



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,  
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21), (22) Заявка: 2007145771/28, 10.12.2007

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
10.12.2007

(45) Опубликовано: 20.03.2009 Бюл. № 8

(56) Список документов, цитированных в отчете о  
поиске: RU 2224244 C2, 20.02.2004. RU 2222004  
C2, 20.01.2004. SU 934335 A1, 07.06.1982. RU  
2149387 C1, 20.05.2000.

Адрес для переписки:  
302020, г.Орел, Наугорское ш., 29, Орловский  
государственный технический университет  
(ОрелГТУ)

(72) Автор(ы):

Корндорф Сергей Фердинандович (RU),  
Жучков Андрей Николаевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

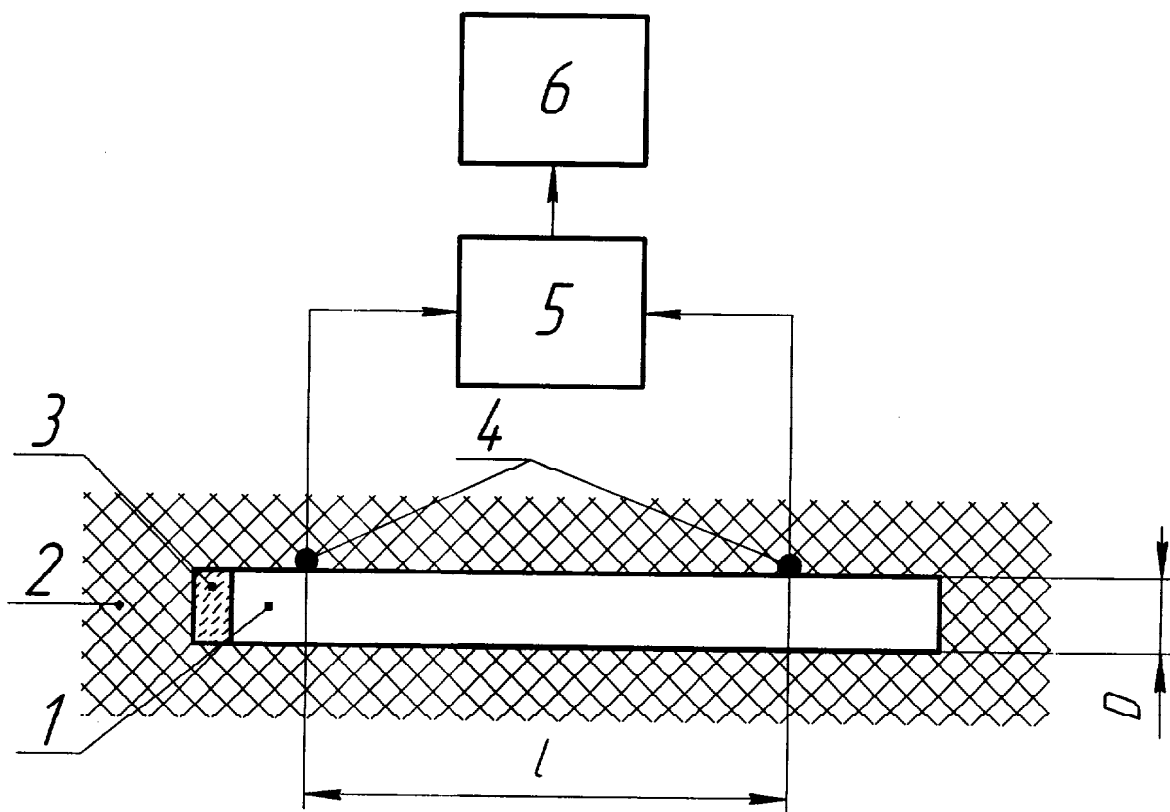
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
"Орловский государственный технический  
университет" (ОрелГТУ) (RU)

## (54) СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

(57) Реферат:

Изобретение относится к нестационарным методам неразрушающего контроля. В способе используют импульсный источник тепла, воздействующий только на испытуемый стержень, в двух фиксированных точках производят синхронную запись температуры в течение времени, равного периоду следования тепловых импульсов, при этом полученные записи

термосигналов разлагают на гармонические составляющие, после чего находят временной сдвиг между максимумами первых гармоник сигналов, полученных от первого и второго датчика, по которому вычисляют искомые теплофизические свойства с учетом диаметра и площади поперечного сечения стержня. Технический результат - повышение точности и упрощение процесса измерений. 1 ил.





FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY,  
PATENTS AND TRADEMARKS

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(21), (22) Application: **2007145771/28, 10.12.2007**

(24) Effective date for property rights: **10.12.2007**

(45) Date of publication: **20.03.2009 Bull. 8**

Mail address:  
**302020, g.Orel, Naugorskoe sh., 29, Orlovskij  
gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet (OrelGTU)**

(72) Inventor(s):  
**Korndorf Sergej Ferdinandovich (RU),  
Zhuchkov Andrej Nikolaevich (RU)**

(73) Proprietor(s):  
**Gosudarstvennoe obrazovatel'noe uchrezhdenie  
vysshego professional'nogo obrazovaniya  
"Orlovskij gosudarstvennyj tekhnicheskij  
universitet" (OrelGTU) (RU)**

(54) **METHOD OF MATERIAL TESTING FOR THERMOPHYSICAL PROPERTIES**

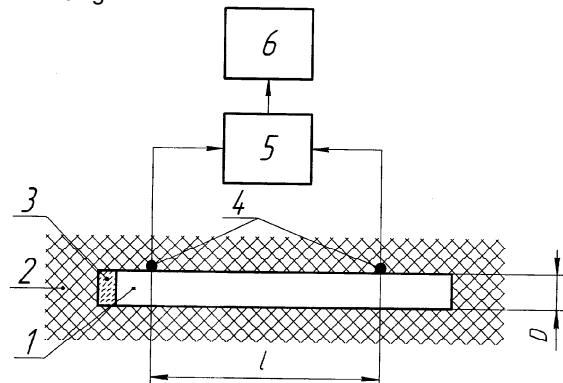
(57) Abstract:

FIELD: physics.

SUBSTANCE: according to method, pulse heat effecting test rod only is used, while temperature is synchronously registered in two fixed points for a time equal to heat pulse-repetition interval. Herewith resulted thermal signal registrations are resolved into harmonic components. Thereafter skewing of maxima of the first signal harmonics from the first and the second sensors is determined to calculate required thermophysical properties considering diameter and cross-section area of the rod.

EFFECT: higher accuracy and simplification of

measurement process.  
1 dwg



RU 2 349 908 C1

RU 2 349 908 C1

Изобретение относится к измерительной технике и может быть использовано для неразрушающего контроля материалов с использованием гармонического анализа температурных волн.

Известны способы определения теплофизических свойств, твердых и дисперсных материалов, сущность которых заключается в использовании источников тепла постоянной мощности, которыми воздействуют на эталонный и испытуемый материалы [1].

Наиболее близким техническим решением является способ определения теплофизических свойств материалов с использованием температурных волн, заключающийся в использовании гармонического нагревателя, воздействующего на эталонный (с известными свойствами) и испытуемый материалы. При этом измеряют температуру в двух точках контроля на теплоизолированной поверхности эталона и теплоизолированной поверхности испытуемого материала в момент равенства нулю теплового потока от нагревателя [2]. Данное устройство принято за прототип.

Недостатком известного способа является сложность реализации метода из-за использования двух образцов, а также большая погрешность измерения, возникающая из-за неточности эталонного образца.

Предлагаемый способ решает задачу упрощения контроля за счет возможности определения теплофизических свойств с использованием только испытуемого образца и задачу повышения точности измерений за счет исключения влияния погрешности эталонного образца.

Это достигается тем, что в способе определения теплофизических свойств материала используют нагреватель, воздействующий на испытуемый образец, и измеряют температуру с помощью датчиков, в двух точках контроля, при этом, в отличие от прототипа, для определения теплофизических свойств используют только испытуемый стержень, к которому прикладывают негармонический источник тепла, а сигналы с двух фиксированных датчиков температуры синхронно записывают в течение времени, равного одному периоду повторения тепловых импульсов, при этом полученные записи термосигналов разлагают на гармонические составляющие, после чего находят временной сдвиг между максимумами первых гармоник сигналов, полученных от первого и второго датчика, а искомые теплофизические свойства вычисляют по формуле:

$$\lambda = \frac{L^2 a \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{\pi c D}{2a} \right)^2} - 1 \right]}{2\pi^2 f^2 t^2 S D},$$

где  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности исследуемого материала;

$a$  - коэффициент теплоотдачи;

$L$  - расстояние между точками измерения;

$D$  - диаметр стержня;

$c$  - удельная теплоемкость материала стержня

$f$  - частота первой гармоники;

$t$  - временной сдвиг между максимумами первых гармоник сигналов полученных от первого и второго датчика;

$S$  - площадь поперечного сечения стержня.

Сущность изобретения поясняется чертежом, на котором исследуемый материал 1 в виде стержня диаметром  $D$  заключен внутри теплоизолятора 2, на торце стержня установлен импульсный нагреватель 3, а датчики температуры 4 расположены по его длине на расстоянии  $L$  друг от друга, сигналы с датчиков поступают в запоминающее устройство 5, соединенное с блоком гармонического анализа 6.

Способ осуществляют следующим образом.

В качестве испытуемого образца используют стержень. Импульсный нагреватель 3 генерирует тепловые импульсы с периодом повторения  $T_n$ , которые распространяются вдоль стержня. После наступления квазистационарного теплового режима производят включение датчиков температуры 4, находящихся в двух фиксированных точках на

поверхности стержня, на расстоянии  $L$  друг от друга. Сигналы с датчиков поступают в запоминающее устройство 5, где они синхронно записываются в течение времени, равного одному периоду повторения тепловых импульсов. Полученные записи термосигналов поступают в блок гармонического анализа 6, который раскладывает каждый из полученных

5 сигналов на гармонические составляющие, причем каждая  $n$ -я гармоника имеет собственную частоту  $f_n$ , амплитуду  $A_n$ , и фазу  $\varphi_n$ . После этого находят временной сдвиг между максимумами первых гармоник сигналов, полученных от первого и второго датчика, а искомые теплофизические свойства вычисляют по формуле:

$$10 \quad \lambda = \frac{L^2 a \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{\pi c D}{2a} \right)^2} - 1 \right]}{2\pi^2 f^2 t^2 S D},$$

где  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности исследуемого материала;

$a$  - коэффициент теплоотдачи;

$L$  - расстояние между точками измерения;

$D$  - диаметр стержня;

$c$  - удельная теплоемкость материала стержня

$f$  - частота первой гармоники;

20  $t$  - временной сдвиг между максимумами первых гармоник сигналов полученных от первого и второго датчика;

$S$  - площадь поперечного сечения стержня.

Формулу получают на основе следующих рассуждений. Согласно закону Фурье тепловой поток, поступающий в сечение стержня с абсциссой  $x$ , равен:

$$25 \quad Q_x = -\lambda S \frac{\partial \theta}{\partial x}.$$

Тепловой поток, поступающий в сечение с абсциссой  $x+dx$ , равен:

$$Q_{x+dx} = -\lambda S \frac{\partial}{\partial x} \left( \theta + \frac{d\theta}{dx} dx \right).$$

30 Весь тепловой поток  $Q$  можно разделить на две составляющие: постоянную  $Q_0$  и переменную  $Q_n$ . Линейный характер этой модели позволяет использовать принцип суперпозиции и рассматривать составляющие  $Q_0$  и  $Q_n$  отдельно.

Для постоянной составляющей:

$$35 \quad Q_{0x+dx} = -\lambda S \frac{\partial}{\partial x} \left( \theta_{0x} + \frac{d\theta_0}{dx} dx \right).$$

При этом потерянная часть постоянной составляющей теплового потока, которая расходуется на излучение с боковой поверхности стержня, равна:

$$40 \quad dQ = Q_{0x+dx} - Q_{0x} = \lambda S \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} dx,$$

но согласно закону Ньютона - Рихмана:

$$dQ = a\theta\pi D dx.$$

Таким образом:

$$45 \quad \lambda S \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} dx = a\theta\pi D dx$$

или

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = m^2 \theta, \quad (1)$$

50 где с учетом того, что  $S = \frac{\pi D^2}{4}$ ,  $m = \sqrt{\frac{a \cdot 4}{\lambda \cdot D}}$ .

Так как для ребра, форма и размеры которого заданы, при условии постоянства коэффициента теплоотдачи  $a$  по всей поверхности и постоянства  $\lambda$  в рассматриваемом

интервале температур  $m = \text{const}$ , то решение уравнения (1) имеет вид:

$$\theta = C_1 e^{mx} + C_2 e^{-mx},$$

где постоянные  $C_1$  и  $C_2$  определяются исходя из граничных условий:

в начале стержня, при  $x=0$   $\theta_0 = C_1 + C_2$ ;

5 в конце стержня при  $x=l$   $\theta_k = C_1 e^{ml} + C_2 e^{-ml}$ .

Из первого краевого условия находим:

$$C_2 = \theta_0 - C_1.$$

Из второго краевого условия:

$$10 \quad \theta_k = C_1 (e^{ml} - e^{-ml}) + \theta_0 e^{-ml}.$$

Следовательно:

$$C_1 = \frac{\theta_k - \theta_0 e^{-ml}}{e^{ml} - e^{-ml}},$$

$$15 \quad C_2 = \frac{\theta_0 e^{ml} - \theta_k}{e^{ml} - e^{-ml}}.$$

Таким образом:

$$\theta_x = \frac{1}{e^{ml} - e^{-ml}} \left[ (\theta_k - \theta_0 e^{-ml}) e^{mx} + (\theta_0 e^{ml} - \theta_k) e^{-mx} \right].$$

20 При рассмотрении распространения переменной составляющей теплового потока следует учитывать тепловой поток, идущий на нагрев материала стержня:

$$Q_n = cdV \frac{\partial \theta}{\partial t} = c \frac{\pi D^2}{4} \frac{\partial \theta}{\partial t} dx.$$

Перепад температур на участке стержня  $dx$ :

$$25 \quad \frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{1}{\lambda S} Q, \quad (2)$$

а изменение теплового потока:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} S = \alpha \pi D Q + c S \frac{\partial \theta}{\partial t}. \quad (3)$$

30 Поскольку рассматривается линейная модель распространения теплового потока, то при гармоническом возбуждении в начале стержня во всех его сечениях колебания теплового потока и температуры будут гармоническими. Поэтому можно перейти к гармоническим колебаниям с частотой  $\omega$  и полагать, что:

$$35 \quad \frac{\partial \dot{\theta}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} (\dot{\theta} e^{j\omega t + \varphi}) = j\omega \dot{\theta} e^{j\omega t + \varphi} = j\omega \dot{\theta},$$

$$\frac{\partial \dot{Q}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} (\dot{Q} e^{j\omega t + \psi}) = j\omega \dot{Q} e^{j\omega t + \psi} = j\omega \dot{Q}.$$

Поэтому выражение (3) примет вид:

$$40 \quad \frac{\partial \dot{Q}}{\partial x} S = (\alpha \pi D + j\omega c S) \dot{\theta}. \quad (4)$$

Дифференцируя уравнение (2) и с учетом (4), получим:

$$\frac{\partial^2 \dot{\theta}}{\partial x^2} = \frac{1}{\lambda S^2} (\alpha \pi D + j\omega c S) \dot{\theta} = \gamma^2 \dot{\theta},$$

$$45 \quad \text{где } \gamma = \sqrt{\frac{1}{\lambda S^2} (\alpha \pi D + j\omega c S)} = \sqrt{\frac{1}{\lambda S} \left( \frac{4a}{D} + j\omega c \right)}.$$

Решение этого уравнения имеет вид:

$$\dot{\theta}_x = \dot{A}_1 e^{-\gamma x} + \dot{A}_2 e^{\gamma x}.$$

50 С учетом выражений для температуры в начале стержня  $\theta_0$  (при  $x=0$ ) и в конце стержня  $\theta_k$  (при  $x=l$ ) можно записать:

$$\dot{\theta}_0 = \dot{A}_1 + \dot{A}_2$$

$$\dot{\theta}_x = \dot{A}_1 e^{-\gamma_1 x} + \dot{A}_2 e^{\gamma_1 x}$$

Откуда:

$$A_1 = \frac{\dot{\theta}_x - \dot{\theta}_0 e^{\gamma_1 l}}{e^{-\gamma_1 l} - e^{\gamma_1 l}}$$

$$A_2 = \frac{\dot{\theta}_0 e^{-\gamma_1 l} - \dot{\theta}_x}{e^{-\gamma_1 l} - e^{\gamma_1 l}}.$$

Тогда:

$$\dot{\theta}_x = \frac{1}{e^{-\gamma_1 l} - e^{\gamma_1 l}} \left[ (\dot{\theta}_x - \dot{\theta}_0 e^{\gamma_1 l}) e^{-\gamma_1 x} + (\dot{\theta}_0 e^{-\gamma_1 l} - \dot{\theta}_x) e^{\gamma_1 x} \right] = \frac{\dot{\theta}_x - \dot{\theta}_0 e^{\gamma_1 l}}{e^{-\gamma_1 l} - e^{\gamma_1 l}} e^{-\gamma_1 x} + \frac{\dot{\theta}_0 e^{-\gamma_1 l} - \dot{\theta}_x}{e^{-\gamma_1 l} - e^{\gamma_1 l}} e^{\gamma_1 x}. \quad (5)$$

Так как  $\gamma = \alpha + j\beta$  - комплексное число, то входящие в выражение (5) дроби  $A_1$  и  $A_2$  являются комплексными числами и могут быть представлены в виде:

$$\dot{A}_1 = A_1 e^{j(\varphi_1 + \omega t)},$$

$$\dot{A}_2 = A_2 e^{j(\varphi_2 + \omega t)}.$$

Таким образом:

$$\theta_x = A_1 e^{j\varphi_1} e^{-(\alpha + j\beta)x} + A_2 e^{j\varphi_2} e^{(\alpha + j\beta)x}$$

или переходя к тригонометрической форме:

$$\theta_x = A_1 e^{-\alpha x} \sin(\varphi_1 + \omega t - \beta x) + A_2 e^{\alpha x} \sin(\varphi_2 + \omega t + \beta x).$$

Получаем изображение суммы двух бегущих волн: одной затухающей волны, бегущей от начала стержня к концу, другой, также затухающей, но бегущей от конца стержня к началу.

Найдем скорость распространения волны  $\vartheta$ , для чего примем фазы колебаний

постоянными:

$$\omega t - \beta x = 0.$$

Откуда:

$$x = \frac{\omega}{\beta} t, \quad \frac{dx}{dt} = \frac{\omega}{\beta} = \vartheta.$$

Найдем значение  $\beta$ :

$$(\alpha + j\beta)^2 = \frac{1}{\lambda S} \left( \frac{4a}{D} + j\omega c \right),$$

Следовательно:

$$\alpha^2 - \beta^2 = \frac{4a}{\lambda S D}$$

$$j2\alpha\beta = j \frac{\omega c}{\lambda S}, \quad \alpha = \frac{\omega l}{2\beta \lambda S},$$

$$\left( \frac{\omega c}{2\lambda S} \cdot \frac{1}{\beta} \right)^2 - \beta^2 = \frac{4a}{\lambda S D},$$

$$\beta^4 + \frac{4a}{\lambda S D} \beta^2 - \left( \frac{\omega c}{2\lambda S} \right)^2 = 0,$$

$$\beta = \sqrt{\frac{-2a}{\lambda S D} \pm \sqrt{\left( \frac{2a}{\lambda S D} \right)^2 + \left( \frac{\omega c}{2\lambda S} \right)^2}},$$

$$\vartheta = \frac{2\pi f \sqrt{S\lambda}}{\sqrt{\frac{2a}{D} + \sqrt{\left( \frac{2a}{D} \right)^2 + \left( \frac{\omega c}{\lambda} \right)^2}}} = \frac{\sqrt{2}\pi f \sqrt{\frac{S\lambda D}{a}}}{\sqrt{1 \pm \sqrt{1 + \left( \frac{\omega c D}{4a} \right)^2}}},$$

$$\vartheta = \frac{\sqrt{2\pi f} \sqrt{\frac{S\lambda D_f}{a}}}{\sqrt{\sqrt{1 + \left(\frac{\pi c D_f}{2a}\right)^2} - 1}}.$$

Учитывая, что  $\vartheta = \frac{L}{t}$ , можно найти:

$$\alpha = \frac{L^2 a \left( \sqrt{1 + \left(\frac{\pi c D_f}{2a}\right)^2} - 1 \right)}{2\pi^2 f^2 t^2 S D}$$

Таким образом, предлагаемый способ позволяет упростить процедуру контроля и повысить точность измерений за счет исключения эталонного образца.

Источники информации

1. Патент №2222004 РФ, МПК G01N 25/18. Способ определения теплофизических свойств твердых и дисперсных материалов в виде стержней [Текст] / И.Н.Ищук - Опубл. 20.01.04, Бюл. №2.

2. Патент №2224244 РФ, МПК G01N 25/18. Способ температурных волн для определения теплофизических свойств материалов [Текст] / И.Н.Ищук - Опубл. 20.02.04, Бюл. №5 - прототип.

#### Формула изобретения

Способ определения теплофизических свойств материалов, заключающийся в использовании нагревателя, воздействующего на испытуемый образец и измерении температур с помощью датчиков в двух точках контроля, отличающийся тем, что в качестве испытуемого образца используют только один стержень, к которому прикладывают негармонический источник тепла, а сигналы с двух фиксированных датчиков температуры синхронно записывают в течение времени, равного одному периоду повторения тепловых импульсов, при этом полученные записи термосигналов разлагают на гармонические составляющие, после чего находят временной сдвиг между максимумами первых гармоник сигналов, полученных от первого и второго датчика, а искомые теплофизические свойства вычисляют по формуле

$$\lambda = \frac{L^2 a \left( \sqrt{1 + \left(\frac{\pi c D_f}{2a}\right)^2} - 1 \right)}{2\pi^2 f^2 t^2 S D},$$

где  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности исследуемого материала;

$a$  - коэффициент теплоотдачи;

$L$  - расстояние между точками измерения;

$D$  - диаметр стержня;

$c$  - удельная теплоемкость материала стержня;

$f$  - частота первой гармоники;

$t$  - временной сдвиг между максимумами первых гармоник сигналов, полученных от первого и второго датчика;

$S$  - площадь поперечного сечения стержня.