

УДК 681.518.5

МЕХАТРОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛОСКИХ УЧАСТКОВ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ТВЕРДЫХ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

Чуриков Александр Алексеевич
канд. техн. наук

Кирина Мария Валерьевна
магистрант

Сычев Владислав Андреевич
магистрант

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов

author@apriori-journal.ru

Аннотация. Проведены исследования, теоретического и экспериментального характера, работоспособности тепловой инспекционной робототехнической системы, состоящей из модулей, построенных на базе транспортного робота горизонтального или вертикального перемещения, технологической платформы, на которой установлено измерительное и инспекционное оборудование и подсистемы управления движением и измерениями. Настоящий технологический комплекс неразрушающего теплового контроля (НТК) является одним из основных компонентов проекта по созданию комплексной системы диагностики внешних теплоизоляционных свойств.

Ключевые слова: неразрушающий тепловой контроль; технологические роботы вертикального и горизонтального перемещения; импульсные методы; неразрушающий экспресс-контроль (НЭК); теплофизические свойства (ТФС); теплоизоляционные материалы; расчетные зависимости, измерительная мехатронная система.

MECHATRONIC SYSTEMS FOR THE CONTROL OF THERMAL CHARACTERISTICS OF PLANAR PORTIONS OF SOLIDS AND MATERIALS ARTICLES

Churikov Alexander Alekseevich
candidate of technical sciences

Kirina Maria Valerevna
undergraduate

Sychev Vladislav Aandreevich
undergraduate
Tambov State Technical University, Tambov

Abstract. Conducted research, theoretical and experimental, performance, thermal inspection robotic system composed of modules based on transport robot horizontal or vertical movement, a technological platform, which is equipped with measuring and inspection equipment and subsystems traffic management and measurement. This technological complex of non-destructive thermal control (STC) is one of the main components of the project to create integrated diagnostic system external thermal insulation properties.

Key words: non-destructive thermal control; technological robots vertical and horizontal movement; pulse methods; nondestructive express-control (NEC); thermal properties (TPS); thermal insulation materials; depending on the design; measurement mechatronic system.

В настоящее время большое внимание уделяется проблеме энергосбережения, что обусловлено, в первую очередь, высокими ценами на энергоресурсы. Решение проблемы минимизации тепловых потерь для объектов, производящих, передающих или использующих тепловую энергию, напрямую зависит от качества применяемых теплоизоляцион-

ных материалов. Одними из важнейших качественных характеристик этих материалов являются их теплофизические свойства (ТФС), такие как теплоемкость, теплопроводность и температуропроводность.

Повышение качества выпускаемой продукции в немалой степени зависят от качества и метрологического обеспечения процессов испытаний и контроля на производстве. Растут требования к количеству и достоверности (точности) измерений, необходимых для объективной оценки высококачественных изделий. Для получения на всех стадиях жизненного цикла изделий информации об их качестве (в том числе надежности) пользуются испытаниями и техническим контролем. Критерием оценки качества является степень соответствия фактических значений параметров и показателей качества требованиям нормативно-технической документации (НТД).

Современные методы позволяют оперативно определять теплофизические свойства, не подвергая материал разрушению. Для определения качества изделий необходимо измерение теплофизических свойств в нескольких участках, подверженных повреждениям и потере тепловых свойств, например, на участках ближе к краю и по центру. Мобильные роботы в настоящее время используются в промышленности и в местах труднодоступных, неудобных или опасных для человека.

Как правило, снятие показаний ТФС предусматривает ручной труд, при этом человек длительное время совершает монотонную работу, что сказывается на его утомляемости и снижению эффективности работы в целом. Поэтому наша задача разработать робототехническую систему контроля свойств участка горизонтальной и поверхности изделий и автоматизировать данный технологический процесс. Для этого требуется разработать манипулятор, передвигающийся по заданной траектории по поверхности материала для снятия показаний датчика. Таким образом, для исследования тепловых свойств участка поверхности изделий наиболее подходящий для нас, с точки зрения оперативности, пред-

ставляют информационно-измерительные системы (ИИС), реализующие импульсные методы, позволяющие осуществлять неразрушающий экспресс-контроль (НЭК) ТФС твердых материалов.

Для реализации метода НК ТФС изделий из теплоизоляционных материалов, разработана робототехническая установка «Испытательный стол», изображенная на рисунке 1, измерения проводятся по отдельным точкам термограмм. За основу робототехнической установки был выбран стол, выпускаемый на заводе «Twitte».

На рисунке 1 отмечено цифрами 1 – стол, 2 – координатное передвижение, 3 – мобильный измерительный зонд (МИЗ).

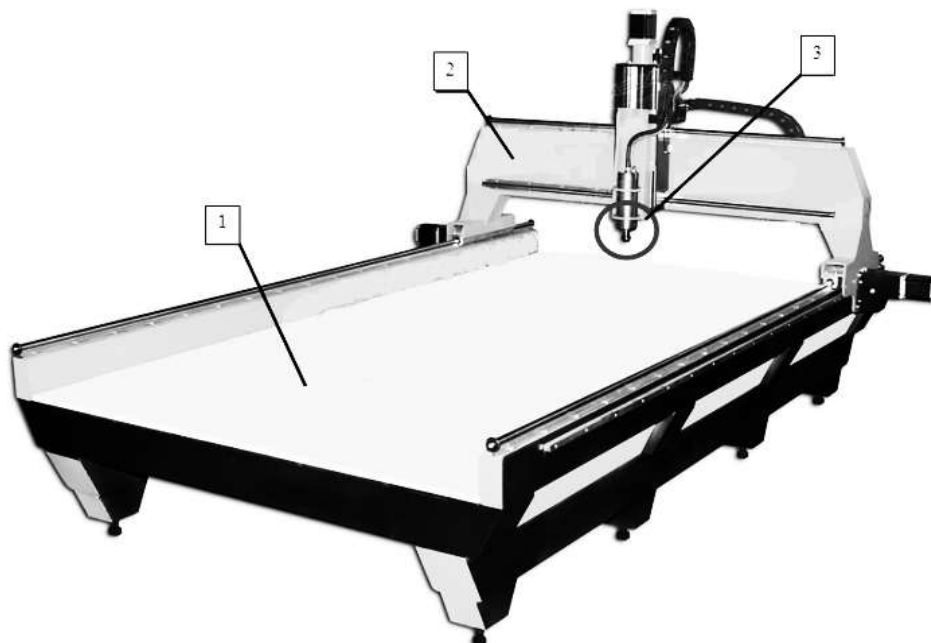


Рис. 1. Испытательный стол

Организацию нагрева полуограниченного тела наиболее просто осуществить через участок простейшей геометрической формы. Основываясь на возможности практической реализации и простого математического описания теплового процесса в твердом теле, выбираем круг как участок поверхности исследуемого образца, через который поступает тепловой поток.

Для решения многомерных задач теплопроводности используем аппарат интегральных характеристик температуры и теплового потока.

Математические модели относительного и абсолютного методов неразрушающего контроля комплекса теплофизических свойств (теплопроводности и температуропроводности) [1; 2], предполагают тепловое воздействие постоянным во времени тепловым потоком плотностью $q(t) \equiv q = \text{const}$, благодаря чему температура в исследуемом образце в процессе нагрева достигает стационарного значения.

В этих методах основным экспериментальным параметром является временная интегральная характеристика температуры поверхности нагреваемого образца вида:

$$S^*(p) = \int_0^{\infty} e^{-pt} \cdot S(t) dt, \quad p >$$

где $S(t)$ – измеряемая средне-интегральная температура нагреваемого круга, p – параметр преобразования Лапласа.

Для абсолютного метода определения теплофизических свойств, предполагаем, что в эксперименте выполняются следующие условия:

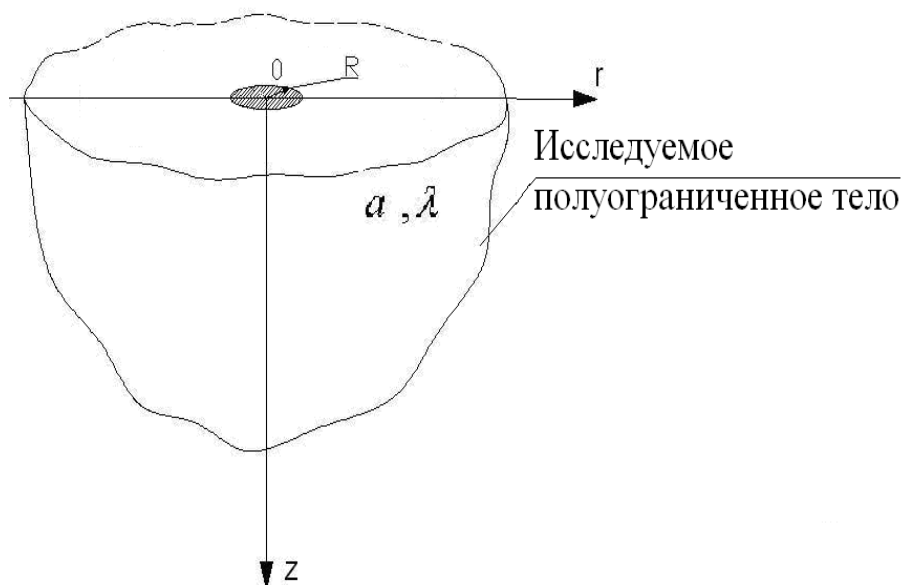


Рис. 2. Модель измерительного блока для абсолютного метода НК теплофизических свойств

- исследуемое тело по отношению к тепловому воздействию является полуограниченным $0 \leq z < \infty$, $0 \leq r < \infty$ (рисунок 2);
- тепловой поток постоянной по координате r плотности $q(t,r) \equiv q(t)$ подводится к телу через круглый участок $0 \leq r < R$ поверхности $z = 0$ (рисунок 2);
- тепловой поток ограничен во времени $q(t) = \begin{cases} q(t) \text{ при } t \leq t_2, \\ 0 \text{ при } t > t_2; \end{cases}$
- тело имеет постоянную начальную температуру (считаем ее равной нулю).

При указанных допущениях температурное поле в исследуемом полуограниченном теле будет описываться решением следующей осесимметричной краевой задачи:

$$\frac{1}{a} \cdot \frac{\partial U(t,r,z)}{\partial t} = \frac{\partial^2 U(t,r,z)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial U(t,r,z)}{\partial r} + \frac{\partial^2 U(t,r,z)}{\partial z^2}$$

($t > 0$, $0 \leq r < \infty$, $0 \leq z < \infty$);

Величину теплопроводности материала находим из по формуле:

$$\lambda = \frac{2 \cdot R \cdot q^*(p)(1 - e^{-t_2 \cdot p})}{S^*(p)} V(g(p))$$

Для расчета величин теплопроводности и температуропроводности требуется экспериментальное определение теплового потока, направленного в исследуемое тело. Это связано с решением трудной технической задачи создания малоинерционного датчика теплового потока и внедрения его в конструкцию прибора. Такая проблема отсутствует в относительных методах определения теплофизических свойств материалов, в которых не требуется измерение теплового потока, направленного в исследуемое тело.

Математическая модель для относительного метода определения теплофизических свойств предполагает наличие двух полуограниченных тел, соприкасающихся в плоскости $z = 0$, причем значения величин теп-

лопроводности λ_3 и температуропроводности a_3 верхнего тела известны и постоянны.

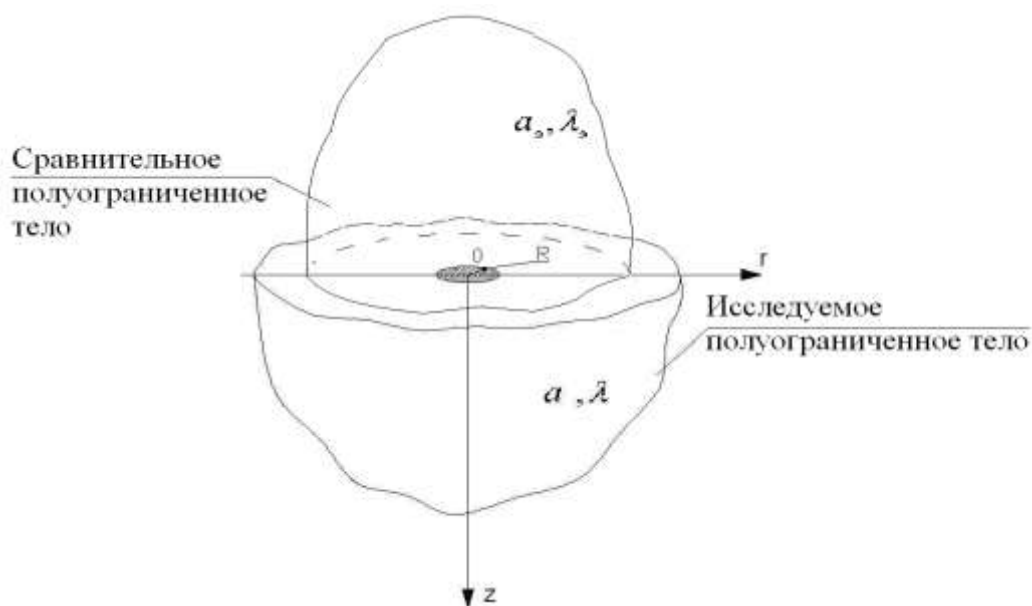


Рис. 3. Модель измерительного блока для относительного метода НК теплофизических свойств

Предполагаем, что в эксперименте выполняются следующие условия:

- исследуемое ($0 \leq z < \infty, 0 \leq r < \infty$) и сравниваемое ($0 \leq r < \infty, -\infty < z \leq 0$) тела по отношению к тепловому воздействию являются полуограниченными (рисунок 3);
- в плоскости контакта действует источник тепла в виде круга $0 \leq r < R$, выделяющий удельный тепловой поток $Q(t)$, причем теплообмен между телами пренебрежимо мал и тепловые потоки, направленные каждый в одно соответствующее тело от источника тепла, имеют постоянные по координате r плотности $q(t,r) \equiv q(t)$ и $q_3(t,r) \equiv q_3(t)$, $q(t) + q_3(t) = Q(t)$;
- удельный тепловой поток $Q(t)$, а, следовательно, и тепловые потоки

$q(t), q_3(t)$ ограничены во времени

$$q(t) = \begin{cases} q(t) \text{ при } t \leq t_2, \\ 0 \text{ при } t > t_2; \end{cases}$$

$$q_3(t) = \begin{cases} q_3(t) \text{ при } t \leq t_2, \\ 0 \text{ при } t > t_2; \end{cases}$$

- в плоскости контакта $z = 0$ температура исследуемого тела равна температуре сравниваемого тела;
- тела имеют постоянную одинаковую начальную температуру (считаем ее равной нулю).

При данных допущениях температурное поле двух соприкасающихся полуограниченных тел будет описываться решением следующей осесимметричной краевой задачи:

$$\frac{1}{a} \cdot \frac{\partial U(t, r, z)}{\partial t} = \frac{\partial^2 U(t, r, z)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial U(t, r, z)}{\partial r} + \frac{\partial^2 U(t, r, z)}{\partial z^2}$$

($t > 0, 0 \leq r < \infty, 0 \leq z < +\infty$);

Величину теплопроводности материала находим по формуле:

$$\lambda = 2 \cdot R \cdot \left(\frac{Q^*(p)(1 - e^{-t_2 \cdot p})}{S^*(p)} - \frac{\lambda_3}{2 \cdot R \cdot V(g_3(p))} \right) V(g(p)).$$

Для определения значений величин теплопроводности λ исследуемого тела необходимо знать значения интегральных характеристик температуры, а также значения интегральной характеристики удельной тепловой мощности, выделяемой плоским круглым нагревателем (эта мощность в процессе эксперимента задается). Таким образом, нет необходимости измерять тепловой поток, направленный в исследуемое тело, что значительно упрощает конструкцию зонда и измерительную схему прибора, и, следовательно, повышает надежность работы всей экспериментальной установки.

Список использованных источников

1. Градецкий В.Г., Рачков М.Ю. Роботы вертикального перемещения. М.: Тип. Мин. Образования РФ, 1997. 223 с.
2. Карташов Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. М.: Высшая школа, 2001.
3. Кирина М.В., Сычев В.А., Чуриков А.А., Расчетные зависимости абсолютного и относительного методов определения теплопроводности твердых и дисперсных материалов // Труды ТГТУ. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2015. Вып. 41.
4. Чуриков А.А. Разработка и исследование методов и устройств для автоматического неразрушающего контроля температурозависимых теплофизических свойств твердых теплозащитных материалов: Дис. ...канд. техн. наук. М.: МИХМ, 1980.
5. Russell R. Andrew, Paoloni Frank J.A. Robot Sensor for Measuring Thermal Properties of Gripped Objects // Instrumentation and Measurement. IEEE Transactions on V. IM-34. Is. 3. Sept. 1985. P. 458-460.