

# Применение неразрушающего теплового контроля при исследовании полимерно-металлических изделий

## Application of non-destructive thermal control in the study of polymer-metal products

Н.Ф. МАЙНИКОВА<sup>1</sup>, А.Ю. ГОРБУНОВА<sup>1</sup>, Н.К. КАЛИНИНА<sup>2</sup>, К.А. ЯКОВЛЕВА<sup>2</sup>

N.F. MAINIKOVA<sup>1</sup>, A.YU., GORBUNOVA<sup>1</sup>, N.K. KALININA<sup>2</sup>, K.A. YAKOVLEVA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева»

<sup>1</sup> Tambov State Technical University

<sup>2</sup> D.Mendeleev University of Chemical Technology of Russia

maynikova.nf@yandex.ru, kalininaNK@yandex.ru

Современные комплексы теплового контроля, оснащённые вычислительной техникой, способны решать разнообразные задачи при контроле качества продукции. На примере экспериментальных данных, полученных при исследованиях тонкослойных полимерных покрытий на металлических основаниях, показаны методические возможности неразрушающего метода и измерительной системы теплового контроля.

**Ключевые слова:** неразрушающий тепловой контроль, полимерные покрытия, тепловое воздействие, математическое моделирование, теплопроводность, толщина покрытия.

Modern thermal control systems equipped with computers, are able to solve a variety of tasks in product quality control. On the example of experimental data obtained during the research of thin-layer polymer coatings on metal bases, the methodological capabilities of the non-destructive method and the measuring system of thermal control are shown.

**Keywords:** non-destructive thermal control, polymer coatings, thermal effects, mathematical modeling, thermal conductivity, coating thickness

DOI: 10.35164/0554-2901-2020-9-10-59-61

### Введение

Согласно используемым физическим явлениям, различают акустический, вихретоковый, магнитный, радиоволновый, оптический, тепловой, электрический и другие виды неразрушающего контроля (НК).

Поскольку полимерные материалы часто используются при изготовлении теплоизоляционных или теплопроводных материалов, часто возникает необходимость создания теплозащиты, работающей в пиковых, т.е. кратковременных условиях нагрева. В настоящее время используются контактные тепловые неразрушающие методы определения теплофизических свойств и толщины полимерных покрытий на металлических подложках [1–3]. При реализации таких методов тепловое воздействие и получение измерительной информации осуществляют с помощью выносного измерительного зонда (ИЗ). Нагрев свободной поверхности покрытия осуществляется на ограниченном участке. Разработка адекватной математической модели при создании метода является важной задачей [3].

Для тепловых расчетов двухслойных материалов (полимерное тонкослойное покрытие на металлической подложке) наиболее подходят аналитические и приближенные аналитические решения. Основные физические свойства среды, как правило, в явном виде представлены в них. Приближенные решения достаточно упрощены, но имеют аналитическую форму и наиболее приспособлены для использования их в инженерной практике [4].

Следует указать на известный метод НК толщины тонкослойного полимерного покрытия металлического изделия, в котором искомую величину определяют по зависимости, полученной из анализа соответствующей упрощённой математической модели. Метод реализуется с помощью плоского нагревателя постоянной

мощности, которым поочередно нагревают поверхность без покрытия и поверхность с покрытием. Толщину полимерного покрытия определяют по соответствующей математической модели теплопереноса [2].

К основным недостаткам данного метода следует отнести низкие точность и производительность определения теплопроводности полимерных покрытий, необходимость реализации двух стадий, когда поочередно нагревают поверхность без покрытия и поверхность с покрытием.

Для повышения точности и производительности оценки теплопроводности полимерных покрытий неразрушающим способом был разработан метод контроля, который с помощью математической модели теплового процесса позволяет получить информацию для расчета теплопроводности полимерного покрытия за один эксперимент. В данной работе рассматривается математическая модель теплопереноса, реализующая режим регуляризации теплового процесса для определенной (локальной) области исследуемого двухслойного объекта [1, 3, 5].

### Метод неразрушающего теплового контроля

Используемый в работе метод основан на изучении двухслойной системы, в которой полимерное покрытие толщиной  $h_1$  приведено в соприкосновение с поверхностью тела, имеющего другие термические коэффициенты (металлическая подложка). На свободную поверхность покрытия воздействует источник тепла постоянной мощности  $q = q_1 = \text{const}$ . Первый слой (полимерный) имеет свойства: теплопроводность  $\lambda_1$ , теплоёмкость  $c_1$ , плотность  $\rho_1$ ; второй слой (металлическая подложка из стали) – высокотеплопроводный – характеризуется теплофизическими свойствами  $\lambda_2$ ,  $c_2$ ,  $\rho_2$ .

Использованная тепловая схема представлена на рис. 1.

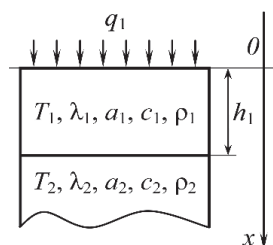


Рис. 1. Тепловая схема метода.

Для определения теплопроводности материала покрытия был осуществлен нагрев двухслойного тела через бесконечный плоский нагреватель постоянной мощности и найдено условие адекватности реального теплопереноса тепловому процессу в двухслойном объекте. Для этой цели в работе выбрана математическая модель процесса, реализуемая при режиме регуляризации теплового процесса для определенной (локальной) области исследуемого объекта [1, 3, 5].

Избыточная температура  $T_1$  распределена по толщине полимерного слоя  $h_1$  в любой момент времени ( $\tau$ ) по зависимости, полученной в результате решения обратной краевой задачи теплопроводности [1]:

$$T_1(0, \tau) = \frac{2q}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{\sqrt{\tau}}{\varepsilon_2} + \left(1 - \frac{\varepsilon_1^2}{\varepsilon_2^2}\right) \frac{qh_1}{\lambda_1}. \quad (1)$$

Выражение (1) можно представить в виде линейной зависимости:

$$T(0, \tau) = b_1 \sqrt{\tau} + b_0, \text{ где } b_1 = \frac{2q}{\sqrt{\pi} \varepsilon_2}.$$

Так как первый слой объекта (полимерное покрытие) низко-теплопроводный, а второй (металлическая подложка) – высоко-теплопроводный, то  $\lambda_1 \ll \lambda_2$  и тепловая активность  $\varepsilon_1 \ll \varepsilon_2$ . Выражение (1) преобразуется к виду:

$$b_0 = \left(1 - \frac{\varepsilon_1^2}{\varepsilon_2^2}\right) \cdot \frac{q \cdot h_1}{\lambda_1} \approx \frac{q \cdot h_1}{\lambda_1}.$$

Расчётные зависимости метода выражаются через уравнения:

$$h_1 = \frac{\lambda_1 \cdot b_0}{q} \text{ и } \lambda_1 = \frac{q \cdot h_1}{b_0}.$$

Из данных выражений при реализации одномерного распространения тепла и режима регуляризации в эксперименте при известной величине теплопроводности полимера можно определить  $h_1$  и, зная толщину слоя полимера  $h_1$ , можно определить теплопроводность.

#### Измерительная система

Теплопроводность изучаемых полимерных покрытий на стальной пластине определяли, используя измерительную систему (ИС), разработанную в Тамбовском государственном техническом университете [6]. Детальные описания схемы ИС, конструкции и работы отдельных модулей представлены в работах [1, 3, 6].

Измерительный зонд (ИЗ) устанавливали на поверхность полимерного покрытия полимерно-металлического тела. Полимерное покрытие подвергалось воздействию постоянной мощности на небольшом локальном участке поверхности радиусом  $R_n$ . Нагреватель, выполненный в виде тонкого диска, был встроен в подложку ИЗ (рис. 2).

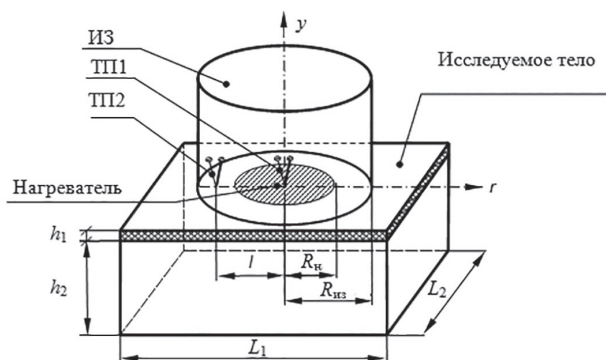


Рис. 2. Измерительная схема.

В состав измерительной системы (рис. 3) входят: персональный компьютер (ПК), плата, измерительный зонд, регулируемый блок питания (БУП). В состав ИЗ входят: плоский нагреватель постоянной мощности (Н), термоприёмники (ТП1 и ТП2), блок холодных спаев (БХС) [6].

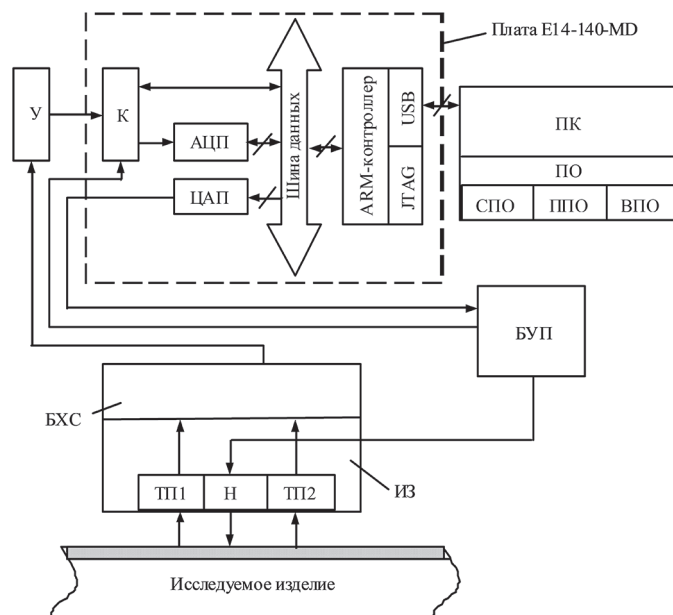


Рис. 3. Структурная схема измерительной системы.

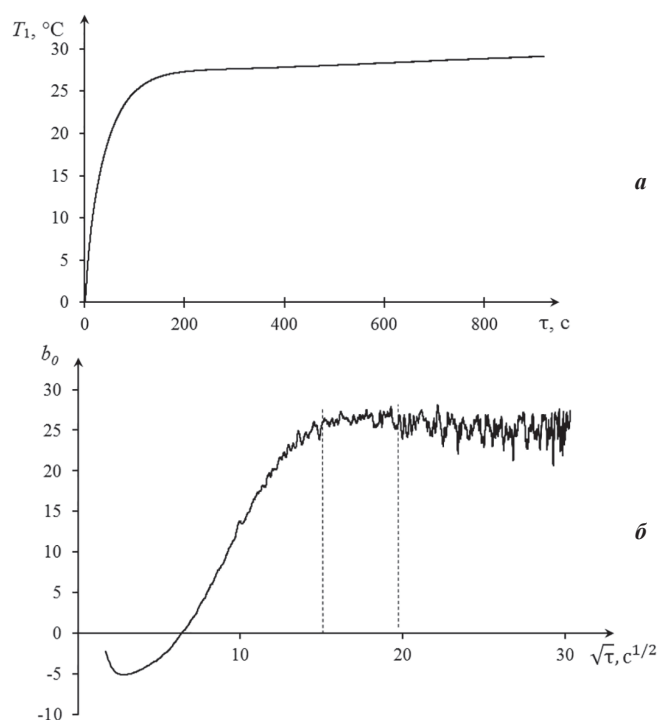
Сигнал с термоприёмников поступает через усилитель (У) на вход управляющей платы. Плата содержит ARM-контроллер, который осуществляет управление платой и поддерживает интерфейсы USB и отладочный JTAG, аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Коммутатор (К) предназначен для коммутации сигналов с аналоговых входов. Цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) работает в асинхронном и синхронном режимах. Программное обеспечение (ПО) реализует алгоритмы управления режимами эксперимента, определения искомых величин (толщины первого слоя –  $h_1$  или теплопроводности материала покрытия –  $\lambda_1$ ). Результаты обрабатываются с помощью пакета программ LabVIEW и Microsoft Excel.

#### Экспериментальные исследования

Исследования осуществляли на двухслойных изделиях в виде стальных пластин с полимерными покрытиями:

- акриловым термостойким покрытием марки «Престиж» [7],
- полиуретановым покрытием марки «Симфония Виннер» [8].

Акриловая термостойкая эмаль выдерживает нагревание до 100°C и предназначена для окрашивания радиаторов отопления, труб, металлических конструкций. Выпускается согласно ТУ 2316-009-88753220-2005.

Рис. 4. Термограмма  $T_1 = f(\tau)$  (а);  $b_0 = f(\sqrt{\tau})$  (б).

**Таблица 1. Результаты экспериментов, полученные на акриловом покрытии.**

№ опыта		$\lambda_{1и}, \text{Вт/(м·K)}$	$b_0$	$\lambda_1, \text{Вт/(м·K)}$	$\delta = \frac{ \lambda_{1и} - \lambda_1 }{\lambda_{1и}} \cdot 100, \%$
Серия №2	1	0,088	33,08	0,090	2,6
	2	0,088	31,65	0,094	7,2
	3	0,088	30,42	0,081	7,0
Серия №3	1	0,088	45,85	0,087	1,3
	2	0,088	47,14	0,084	4,0
	3	0,088	46,69	0,085	3,1

**Таблица 2. Результаты экспериментов, полученные на полиуретановом покрытии.**

№ опыта	$h_{1и}, \text{мм}$	$\lambda_{1и}, \text{Вт/(м·К)}$	$b_0$	$\lambda_1, \text{Вт/(м·К)}$	$\delta = \frac{ \lambda_{1и} - \lambda_1 }{\lambda_{1и}} \cdot 100\%$
1	0,49	0,1	49,968	0,096	4
2	0,50	0,1	51,020	0,096	4
3	0,52	0,1	53,125	0,095	5
4	0,54	0,1	55,230	0,095	5

Теплопроводность акрилового покрытия (табличное значение) – 0,088 Вт/(м·К). Радиус нагревателя – 0,004 м. Временной шаг измерения температуры – 0,25 с. Испытания проводили при мощности теплового воздействия – 19904,46 Вт/м<sup>2</sup>. Изделия с акриловым покрытием толщиной  $h_{1и} = 0,11$  мм (заранее измеренное значение с помощью электронного штангенциркуля как разница толщины двухслойного изделия и толщины пластины без покрытия) использовали для калибровки ИС. Теплопроводность определяли на изделиях с акриловым покрытием толщиной 0,15 и 0,20 мм

На рис. 4а представлена термограмма  $T_1 = f(\tau)$ , зарегистрированная термоприёмником ТП1 при проведении градуировочного эксперимента на изделии с толщиной акрилового покрытия  $h_{1и} = 0,11$  мм.  $T_1$  – избыточная температура.

На рис. 4б представлен график зависимости  $b_0 = f(\sqrt{\tau})$ , выделен рабочий участок, соответствующий регуляризации теплового процесса при распространении тепла, как «плоская вершина».

Градуировочный эксперимент (серия опытов 1) позволил определить значение постоянной прибора [6].

По зависимостям  $b_0 = f(\sqrt{\tau})$ , построенным по термограммам, зарегистрированным термоприёмником ТП1, определяют значения величины  $b_0$  и значения теплопроводности материала покрытия для каждого опыта серий 2 и 3.

Результаты экспериментов по определению теплопроводности акрилового покрытия (серии 2 и 3) и полиуретанового покрытия представлены в таблицах 1 и 2.

Полиуретановая эмаль марки «Симфония Виннер» предназначена для окраски наружных и внутренних поверхностей, например, металлических крыш, радиаторов отопления и т.д. Эмаль содержит антикоррозионные добавки и наносится на металлические поверхности без грунтовок в два слоя.

На образцах с полиуретановым покрытием получены результаты экспериментов при мощности теплового воздействия на нагревателе – 9753 Вт/м<sup>2</sup>. Время проведения экспериментов – 600 с; табличное значение теплопроводности материала покрытия ( $\lambda_{1и}$ ) – 0,1 Вт/(м·К).

Представленные в таблицах 1 и 2 данные подтверждают работоспособность метода и ИС. Погрешность определения теплопроводности покрытий составляет  $\delta = 1,1–7,2\%$ , что допустимо для определения данной величины.

Снижение погрешности способа для определения теплопроводности полимерных покрытий, по аналогии с работами [9, 10], возможно по результатам анализа точности.

Нормированные метрологические характеристики, которые устанавливаются нормативными документами [11], целесообразно вводить для ИС после рассмотрения вопросов оптимизации процесса измерения.

#### Выводы

Как показали исследования тонкослойных полимерных покрытий на металлических основаниях, проведенные неразрушающим тепловым методом с помощью разработанной авторами измерительной системы, при известной толщине слоя полимера можно определить теплопроводность полимерных покрытий в одном краткосрочном эксперименте с допустимой погрешностью.

#### Литература

1. Теоретическое обоснование теплового метода неразрушающего контроля двухслойных изделий / И.В. Рогов, Н.П. Жуков, Н.Ф. Майникова, Н.В. Лунева // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2009. – №9 (23) – С. 93–99.
2. Чернышов В.Н., Пудовкин А.П., Муромцев Ю.Л. и др. Способ неразрушающего контроля толщины плёночного покрытия изделия. Патент № 1663628 РФ, G 01B 11/06, Опубл. 15.07.1991, Бюл. № 26.
3. Modeling of the process of heat transfer from a plane heat source of constant strength in thermophysical measurements / Zhukov N.P., Mainikova N.F., Rogov I.V., Pudovkina E.V // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2012. – Volume 85. – №1. – С. 203–209.
4. Кудинов В.А. Аналитические решения задач тепломассопереноса и термоупругости для многослойных конструкций / Кудинов В.А., Карташов Э.М., Калашников В.В. – М.: Высшая школа. – 2005. – 430 с.
5. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высш. школа, 1967. – 599 с.
6. Жуков Н.П. Измерительно-вычислительная система неразрушающего контроля теплофизических свойств / Н.П. Жуков, Н.Ф. Майникова // Приборы и техника эксперимента. – 2005. – №4 – С.164–166.
7. <http://www.prestige-holding.ru/prestige/emali/emal-ferrum.html>
8. <https://rostovkraska.ru/p161608622-symphony-winner-shelkovisto.htm>
9. Estimation of systematic Errors of the Multimodel Method for Non-destructive Determination of the Thermophysical Properties of Solid Materials / N.F. Mainikova, N.P. Zhukov, I.V. Rogov, A.O. Antonov // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2014. – Т. 87. – № 4. – С.880–887.
10. Evaluation of Random Errors of the Multimodel Method of Nondestructive Determination of the Thermophysical Properties of Solid Materials / N.F. Mainikova, N.P. Zhukov, I.V. Rogov, A.O. Antonov // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2014. – Т. 87. – № 6. – С.1398–1406.
11. ГОСТ 8.009–84 ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений.