

**МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ТОЛЩИНЫ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ***

Н. П. Жуков, Н. Ф. Майникова, И. В. Рогов

*Кафедра «Энергообеспечение предприятий и теплотехника»,
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия;
teplotehnika@nnt.tstu.ru*

Ключевые слова: защитное покрытие; краевая задача; математическая модель; неразрушающий контроль; полимерное покрытие; тепловой метод; теплопроводность; толщина.

Аннотация: Представлены постановка и решение краевой задачи нестационарного теплопереноса применительно к двухслойной системе: полимерное покрытие – металлическое основание. Определены расчетные выражения для определения толщины покрытия. Разработан метод теплового неразрушающего контроля. Экспериментально получено подтверждение работоспособности метода.

Обозначения и аббревиатуры

B – константа прибора;
 b_0, b_1 – параметры модели;
 q – плотность теплового потока, Вт/м²;
 R – радиус нагревателя, м;
 T – температура, °С;
 τ – время, с;
 δ – относительная погрешность, %;
 ε – тепловая активность, Вт·с^{1/2}/(м²·К);
 λ – теплопроводность, Вт/(м·К).

ИЗ – измерительный зонд;
Н – нагреватель;
НК – неразрушающий контроль;
ТП – термопреобразователь;
ТФС – теплофизические свойства.

Индексы

1 – первый слой;
2 – второй слой;
о – образцовая мера.

В методе неразрушающего теплового контроля толщины защитных покрытий использован круглый плоский источник тепла, расположенный на поверхности двухслойного полимерно-металлического изделия [1, 2]. Учтено, что регулярные тепловые режимы первого и второго рода имеют общее свойство, характеризующееся независимостью от времени отношения теплового потока в любой точке тела к потоку тепла на его поверхности [3]. Основная часть методов базируется на моделях для тел конечных размеров. Применительно же к методам НК следует говорить не о регулярном тепловом режиме для всего тела (так как оно принимается неограниченным), а о регуляризации теплового процесса только для определенной (локальной) области тела. В нашем случае можно проводить термический анализ, основываясь только на участке термограммы, соответствующем регуляризации теплового режима в области нагревателя и термоприемника.

* По материалам доклада на конференции «Актуальные проблемы энергосбережения и эффективности в технических системах», г. Тамбов, 25 – 27 апреля 2016 г.

Теоретическое обоснование метода

Ограниченный стержень толщиной h_1 приведен в соприкосновение с полуграниченным стержнем, имеющим другие термические коэффициенты. Боковые поверхности стержней имеют тепловую изоляцию. В начальный момент времени и на протяжении всего процесса на свободном конце стержня действует источник тепла постоянной мощности q .

Требуется найти распределение температуры по длине стержней в любой момент времени [2]:

$$\frac{\partial T_1(x, \tau)}{\partial \tau} = a_1 \frac{\partial^2 T_1(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad \tau > 0, \quad 0 < x < h_1; \quad (1)$$

$$\frac{\partial T_2(x, \tau)}{\partial \tau} = a_2 \frac{\partial^2 T_2(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad \tau > 0, \quad h_1 < x < \infty; \quad (2)$$

$$T_1(x, 0) = T_2(x, 0) = 0; \quad (3)$$

$$T_1(h_1, \tau) = T_2(h_1, \tau); \quad (4)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(h_1, \tau)}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial T_2(h_1, \tau)}{\partial x}; \quad (5)$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1(0, \tau)}{\partial x} = q; \quad (6)$$

$$T_2(\infty, \tau) = 0. \quad (7)$$

После ряда преобразований и упрощений при больших τ [2]

$$T_1(0, \tau) = \frac{2q}{\sqrt{\pi}} \frac{\sqrt{\tau}}{\varepsilon_2} + \left(1 - \frac{\varepsilon_1^2}{\varepsilon_2^2}\right) \frac{qh_1}{\lambda_1}. \quad (8)$$

Выражение (8) представляет собой линейную зависимость вида

$$T_1(0, \tau) = b_1 \sqrt{\tau} + b_0, \quad (9)$$

где $b_1 = \frac{2q}{\sqrt{\pi}\varepsilon_2}$. (10)

Решение (8), представляющее собой линейную зависимость (9), может быть применено при регуляризации теплопереноса в локальной области тела. Полученное решение (8) использовано для получения математических выражений расчета толщины низкотеплопроводных покрытий на металлических основаниях.

Так как первый слой объекта (рис. 1) низкотеплопроводный, а второй – высокотеплопроводный, то есть $\lambda_1 \ll \lambda_2$, тогда $\varepsilon_1 \ll \varepsilon_2$.

Следовательно,

$$b_0 = \left(1 - \frac{\varepsilon_1^2}{\varepsilon_2^2}\right) \frac{qh_1}{\lambda_1} \approx \frac{qh_1}{\lambda_1}, \quad (11)$$

откуда

$$h_1 = \frac{\lambda_1 b_0}{q}. \quad (12)$$

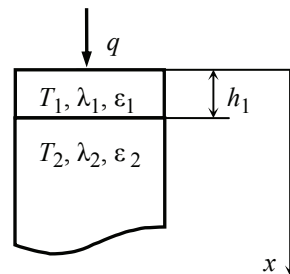


Рис. 1. Система, состоящая из ограниченного и полуграниченного тел

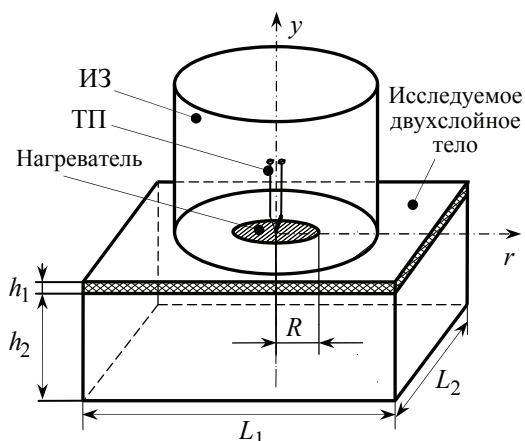


Рис. 2. Измерительная схема метода

конструктивными особенностями применяемого ИЗ. Постоянная B определяется с помощью проведения градуировочных экспериментов на образце с известным значением λ_{10} и размерной характеристикой h_{10} .

Выражения для вычисления B и значения h_1 , при известной величине h_{10} :

$$B = \frac{b_{00}}{h_{10}}; \quad (13)$$

$$h_1 = \frac{b_0}{B}. \quad (14)$$

Для определения h_1 выполняют следующие операции:

1) градуировку: снятие термограммы на образце с известным значением λ_{10} и величиной h_{10} ; определение рабочего участка термограммы; расчет по этому участку коэффициента b_{00} ; расчет постоянной прибора B по формуле (13).

2) определение толщины h_1 покрытия исследуемого объекта: снятие термограммы на изделии; определение рабочего участка термограммы; расчет коэффициента b_0 ; расчет толщины h_1 покрытия по формуле (14).

Экспериментальные исследования

Измерительная система, реализующая метод НК толщины покрытий на металлических изделиях, детально представлена в работе [1]. Она состоит из персонального компьютера, платы, ИЗ и регулируемого блока питания. ИЗ обеспечивает создание теплового воздействия на объект, температура в заданной точке контроля фиксируется ТП. Сбор информации производится при нагреве (см. рис. 2). Для экспериментальной проверки работоспособности метода определяли толщину покрытия из термостойкого акрилового покрытия торговой марки «Престиж» на стальной пластине.

Испытаниям подвергали изделия с толщинами покрытий $h_{1н}$ 0,15 и 0,20 мм (серии экспериментов №№ 1 и 2, табл. 1), величина которых измерялась с помощью электронного штангенциркуля как разница толщины двухслойного изделия и толщины пластины без покрытия h_2 (см. рис. 2). Для градуировки в качестве образцовой меры использовано изделие с толщиной акрилового покрытия $h_{10} = 0,11$ мм. Теплопроводность материала покрытия – 0,09 Вт/(м·К); временной шаг измерения температуры – 0,25 с; радиус нагревателя – 0,0004 м; радиус ИЗ – 0,04 м; подложка ИЗ – рипор.

Результаты экспериментов

№ опыта		$h_{1н}$, мм	b_0	h_1 , мм	$\delta = \left \frac{h_{1н} - h_1}{h_{1н}} \right 100\%$
Серия № 1	1	0,15	33,08	0,139	7,3
	2		33,23		7,1
	3		33,53		6,3
	4		34,05		4,8
	5		33,42		6,6
Серия № 2	6	0,20	45,85	0,192	3,9
	7		45,88		3,8
	8		46,14		3,3
	9		44,58		6,6
	10		46,69		2,1

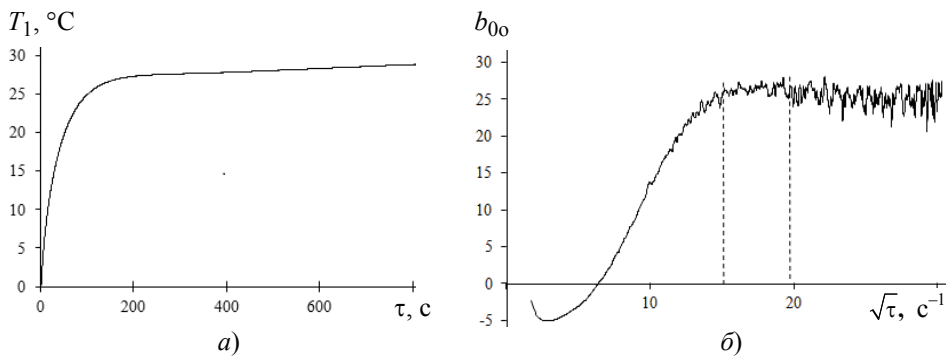


Рис. 3. Термограмма (а) $T_1 = f(\tau)$, зависимость $b_{00} = f(\sqrt{\tau})$ (б)
(опыт № 1, табл. 1)

На рис. 3, а представлена термограмма, зарегистрированная ТП при проведении градуировочного эксперимента (опыт № 1, табл. 2). Здесь T_1 – избыточная температура в точке контроля. На рис. 3, б показана зависимость $b_{00} = f(\sqrt{\tau})$, на которой выделен рабочий участок термограммы. График данной зависимости с достаточной степенью точности позволяет выделить рабочий участок (плоскую вершину). Для определения постоянной прибора B проведены пять параллельных градуировочных экспериментов и найдено среднее значение B (см. табл. 2).

В таблице 1 приведены результаты десяти параллельных опытов серий экспериментов №№ 1 и 2.

Таблица 2

Результаты градуировочного эксперимента

№ опыта	b_{00}
1	26,70
2	26,92
3	26,49
4	25,43
5	25,67
Среднее	26,24

Расчет вели по (14): $h_1 = \frac{b_0}{B} = \frac{33,08}{238,55} = 0,139$ мм. Аналогично определены

значения h_1 термостойкого акрилового покрытия металлической пластины из стали в опытах 2 – 10 серий №№ 1 и 2 (см. табл. 1). Относительные погрешности определения толщины покрытия составили 2,1 – 7,3 %.

Результаты эксперимента подтверждают работоспособность метода. В дальнейшем будет проведен анализ погрешностей и определение условий адекватности метода реальному теплопереносу [4, 5].

Список литературы

1. 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.

2. Теоретическое обоснование теплового метода неразрушающего контроля двухслойных изделий / И. В. Рогов [и др.] // Вопр. соврем. науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2009. – № 9 (23) – С. 93 – 99.

3. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М. : Высшая школа, 1967. – 599 с.

4. Анализ погрешностей многомодельного метода измерения теплофизических характеристик композитов. Часть 1. Особенности метода. Оценка случайных погрешностей / Н. П. Жуков [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2000. – Т. 6, № 3. – С. 416 – 424.

5. Определение условий адекватности модели распределения тепла в плоском полупространстве реальному процессу при теплофизическом контроле / Н. Ф. Майникова [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2006. – Т. 12, № 3А. – С. 610 – 616.

Nondestructive Testing to Measure the Thickness of Coatings

N. P. Zhukov, N. F. Mainikova, I. V. Rogov

*Department “Enterprise Power Supply and Thermal Engineering”,
TSTU, Tambov, Russia; teplotehnika@nnn.tstu.ru*

Keywords: boundary value problem; mathematical model; nondestructive testing; polymer coating; protective coating; thermal method; thermal conductivity; thickness.

Abstract: The paper presents the formulation and solution of the boundary value problem of unsteady heat transfer in relation to the two-layer system: a polymer coating – metal base. The calculation expressions to determine the thickness of the coating are found. A method for thermal nondestructive testing is developed. Experimental confirmation of the method efficiency is obtained.

References

1. Zhukov N.P., Mainikova N.F. [A measuring-computational system of nondestructive control of thermophysical properties], *Pribory i tekhnika eksperimenta* [Instruments and Experimental Techniques], 2005, no. 4, pp. 164-166. (In Russ.)

2. Rogov I.V., Zhukov N.P., Mainikova N.F., Luneva N.V. [The theoretical justification of thermal method of non-destructive testing of two-layer products], *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo* [Problems

of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2009, no. 9 (23), pp. 93-99. (In Russ.)

3. Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* [The theory of heat conduction], Moscow: Vysshaya shkola, 1967, 599 p. (In Russ.)

4. Zhukov N.P., Mainikova N.F., Rogov I.V., Balashov A.A. [Error Analysis of Multimodel Method of Measurement of Composite Thermophysical Properties. Part 1. The Peculiarities of the Method. The Estimation of Accidental Errors], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2000, vol. 6, no. 3, pp. 416. (In Russ., Abstract in Eng.)

5. Mainikova N.F., Zhukov N.P., Balashov A.A., Nikulin S.S. [Identification of Conditions of Heat Distribution Model Adequacy in Flat Semi-Space to the Real Process by Thermophysical Control], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2006, vol. 12, no. 3A, pp. 610-616. (In Russ., Abstract in Eng.)

Methode der nichtzerstörenden Bestimmung der Dicke der Schutzdeckungen

Zusammenfassung: Es sind die Stellung und die Lösung der Ortsaufgabe der nichtstationären Wärmeübertragung in bezug auf das Duplexsystem dargelegt: die polymere Deckung – die metallische Gründung. Es sind die Rechenformeln für die Bestimmung der Dicke der Deckung bestimmt. Es ist die Methode der thermischen nichtzerstörenden Kontrolle entwickelt. Es ist die Bestätigung der Arbeitsfähigkeit der Methode experimental erhalten.

Méthode de la détermination non-destructive de l'épaisseur des revêtements de protection

Résumé: Sont présentées la position et la résolution du problème limite du transfert thermique non stationnaire par rapport au système à deux couches: revêtement polymère – base métallique. Sont définies les expressions de calcul pour la détermination de l'épaisseur du revêtement. Est élaborée une méthode du contrôle non destructif thermique. Est reçue expérimentalement la confirmation de l'intégrité de la méthode.

Авторы: *Жуков Николай Павлович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Энергообеспечение предприятий и теплотехника»; *Майникова Нина Филипповна* – доктор технических наук, профессор кафедры «Энергообеспечение предприятий и теплотехника»; *Рогов Иван Владимирович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергообеспечение предприятий и теплотехника», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Дмитриев Олег Сергеевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Физика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.
