

ПРИМЕНЕНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ЛАЗЕРНОГО НАГРЕВА И ФАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНОЙ ТЕРМОГРАФИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТОЛЩИНЫ ПОКРЫТИЙ

© 2025 г. А.Г. Дивин^{1,2,*}, Ю.А. Захаров^{1,2}, Д.Ю. Головин¹, Н.А. Карпова², А.И. Тюрин^{1,**}, А.А. Самодуров¹, С.В. Карпов², В.В. Родаев¹, И.А. Захаров³

¹Тамбовский государственный университет им. Г. Р. Державина,
Россия 392036 Тамбов, ул. Интернациональная, 33

²Тамбовский государственный технический университет, Россия 392000 Тамбов, ул. Советская, 106

³Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Россия 124498 Москва,
Зеленоград, пл. Шокина, 1

E-mail: *divin.ag@tstu.ru; **nano@tsutmb.ru

Поступила в редакцию 15.11.2024; после доработки 29.11.2024

Принята к публикации 29.11.2024

Метод фазочувствительной лазерной термографии обладает высокой чувствительностью и позволяет контролировать равномерность и толщину покрытий из различных материалов. Применение роботов-манипуляторов в качестве сканирующего устройства позволяет в автоматическом режиме тщательно обследовать поверхности объектов сложной формы. В статье приведены сведения о макете роботизированного комплекса для лазерной фазочувствительной термографии на основе пятиосевого робота-манипулятора, лазера мощностью до 8 Вт и длиной волны 450 нм, а также тепловизора СОХ CG640. Предложены методики обработки экспериментальных данных для определения толщины покрытий из материалов с низкой теплопроводностью. Для апробации подхода были изготовлены контрольные образцы из оксида алюминия с покрытием из полипропилена в диапазоне от 40 до 500 мкм. Установлено, что неравномерность покрытия рационально определять по распределению фазы температурных колебаний частотой 0,1—1 Гц.

Ключевые слова: толщинометрия, фазочувствительная термография, робот-манипулятор, лазер.

THE USE OF PERIODIC LASER HEATING AND PHASE SENSITIVE THERMOGRAPHY TO EVALUATION THE THICKNESS OF COATINGS

© 2025 A.G. Divin^{1,2,*}, Yu.A. Zakharov^{1,2}, D.Yu. Golovin¹, N.A. Karpova², A.I. Tyurin^{1,**}, A.A. Samodurov¹, S.V. Karpov², V.V. Rodaev¹, I.A. Zakharov³

¹Tambov State University named after G. R. Derzhavin, Russia 392036, Tambov,
Internatsionalnaya str., 33

²Tambov State Technical University, Russia 392000, Tambov, Sovetskaya str., 106

³National Research University of Electronic Technology, Russia 124498, Moscow,
Zelenograd, Shokin sq., 1

E-mail: *divin.ag@tstu.ru; **nano@tsutmb.ru

The phase-sensitive laser thermography method is highly sensitive and allows you to control the uniformity and thickness of coatings made of various materials. The use of robotic manipulators as a scanning device allows you to carefully examine the surfaces of objects of complex shape in automatic mode. The article provides information about the layout of a robotic complex for laser phase-sensitive thermography based on a five-axis robotic arm, a laser with a power of up to 8 watts and a wavelength of 450 nm, as well as a COX CG640 thermal imager. Methods of processing experimental data for determining the thickness of coatings made of materials with low thermal conductivity are proposed. To test the approach, control samples were made of aluminum oxide coated with polypropylene in the range from 40 to 500 microns. It is established that the unevenness of the coating is rationally determined by the phase distribution of temperature fluctuations with a frequency of 0,1—1 Hz.

Keywords: thickness measurement, phase-sensitive thermography, robotic arm, laser.

DOI: 10.31857/S0130308225010065

1. ВВЕДЕНИЕ

Покрытия широко используются при изготовлении деталей для различных отраслей промышленности. Их наносят с целью улучшения поверхностных свойств материала подложки, таких как внешний вид, адгезия, смачиваемость, стойкость к коррозии и высоким температурам [1—3]. При этом важное значение имеют толщина и равномерность покрытия, поскольку это оказывает большое влияние на характеристики конечного изделия (масса, коэффициент трения,

внешний вид и др.). Контроль толщины на производстве обычно осуществляется путем оптической микроскопии в сочетании с разрушающим испытанием тестовых образцов. Это трудоемкая операция, которая не всегда может дать точные результаты измерения толщины покрытия [4], и кроме этого исследуемые образцы после проверки уже непригодны для своего прямого назначения. По этой причине для измерения толщины покрытия разрабатываются и применяются неразрушающие методы контроля (НК), среди которых наиболее часто используют ультразвуковой НК, основанный на регистрации отраженного эхосигнала и измерении времени его прохождения. Существуют также методы, обеспечивающие погрешность измерения менее 10 мкм, основанные на линейной зависимости между временем распространения ультразвуковой волны и толщиной покрытия. Однако при малых толщинах ультразвуковой НК имеет низкое разрешение, а некоторые материалы подложки могут рассеивать ультразвуковые волны [4], что негативно сказывается на точности измерений.

Для контроля толщины покрытий применяется также рентгеновская флуоресцентная спектроскопия [3], позволяющая обеспечить высокую точность контроля защитного слоя материала турбинных лопастей и других деталей. Для контроля толщины высокотемпературных покрытий на металлических основаниях также применяют вихревой метод [5], позволяющий обеспечить высокое значение отношения сигнал/шум [6].

В работе [7] для измерения толщины теплозащитных покрытий горячего отсека в авиационных двигателях применялся терагерцовый контроль в сочетании с обработкой данных нейронной сетью. Есть сведения об использовании данного метода для определения толщины акриловых покрытий на полиэфирных тканях [8].

В случае, если теплопроводности материалов подложки и покрытия отличаются друг от друга, то возможно успешное применение термографического метода контроля [9]. Для контроля дефектов покрытий и относительно тонких изделий применяют так называемую Lock-in термографию, при которой синхронизируют частоту гармонического теплового воздействия на образец и время получения термографического изображения поверхности образца [10]. Также лазерная инфракрасная термография применялась в работе [11] для оценки неоднородности толщины лакокрасочного покрытия на стальной подложке. Было установлено, что данный метод показывает хорошую точность по сравнению с традиционными методами на основе вихревых токов. В статье [12] предложен метод контроля толщины покрытий, нанесенных методом термического напыления, по значению кажущейся теплопроводности. Наиболее часто используемым и теоретически обоснованным является импульсный термографический метод [13, 14], однако и он имеет свои недостатки [15], основные из которых — это значительные погрешности измерения толщины. С другой стороны, в последнее время все чаще используется метод, при котором на образец воздействуют изменяющимся по гармоническому закону потоком энергии электромагнитного излучения. При этом температура на поверхности изменяется с той же частотой, а фаза изменения температуры на поверхности образца зависит от толщины покрытий. Фазочувствительный тепловой контроль (ФТК) сочетает в себе преимущества анализа температурных полей с быстрым методом импульсной инфракрасной термографии, что позволяет выявлять скрытые подповерхностные дефекты и толщину покрытий за короткое время.

Для обработки полученных изображений используют методы обратных задач теплопроводности, машинного обучения [10], системы технического зрения. Но, несмотря на большое количество исследований в данной области, вопросы идентификации результатов ФТК еще до конца не проработаны [4].

Целью данной работы является оценка применимости метода ФТК для оценки толщины и равномерности покрытий, обладающих низкой теплопроводностью, нанесенных на подложку из материала с высокой теплопроводностью. Актуальность использования таких материалов в качестве термобарьерных покрытий [16] способствует более эффективному использованию термонагруженных изделий в машиностроении и двигателях. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: 1) провести теоретические исследования моделей «подложка — покрытие» для определения рациональных режимов ФТК; 2) изготовить контрольные образцы с различной и известной толщиной покрытия; 3) провести исследования контрольных образцов с применением метода ФТК; 4) оценить источники неопределенности измерений толщины покрытий.

2. ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основной характеристикой ФТК является частота колебаний мощности теплового излучения f . Для определения оптимального диапазона частот, обеспечивающих наибольшую чувствительность и точность нахождения толщины покрытий, была рассмотрена трехмерная задача нестационарного распространения тепла в системе двух твердых тел, имеющих форму паралле-

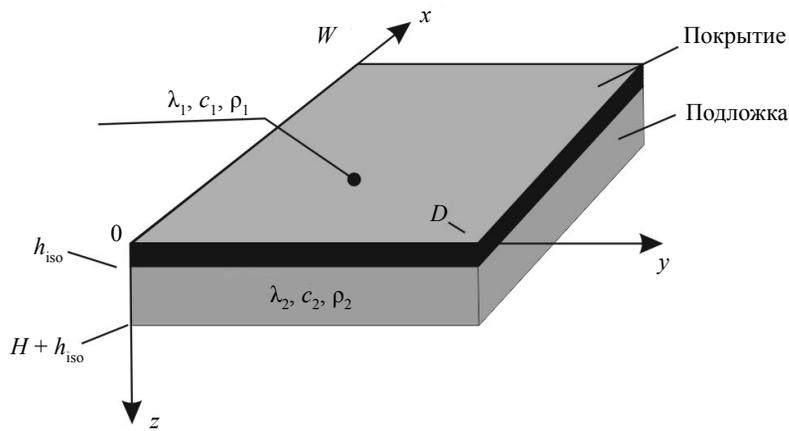


Рис. 1. Схема исследуемого образца.

лепипеда, на основе уравнений теплопроводности Фурье [17, 18]. Схема исследуемого образца приведена на рис. 1.

Математическая модель распределения температурного поля в исследуемом образце (1)—(6) принята в следующем виде.

Дифференциальные уравнения:

$$c_1 \rho_1 \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_1 \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_1 \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_1 \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial z} \right), \quad 0 < x < W, \quad 0 < y < D, \quad 0 < z < h_{iso}, \quad \tau > 0; \quad (1)$$

$$c_2 \rho_2 \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_2 \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_2 \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_2 \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial z} \right), \quad 0 < x < W, \quad 0 < y < D, \quad h_{iso} < z < H + h_{iso}, \quad \tau > 0. \quad (2)$$

Начальное условие:

$$T(x, y, z, 0) = T_0 \quad \text{при } 0 < x < W, \quad 0 < y < D, \quad 0 < z < H + h_{iso}. \quad (3)$$

Граничные условия:

$$\lambda_1 \frac{dT(x, y, 0, \tau)}{dz} = -q(x, y, 0, \tau) = -\left(\frac{P_{\max}}{2 \cdot W \cdot D} (1 - \cos(\omega \tau)) \right); \quad (4)$$

где $0 < x < W, 0 < y < D, \tau > 0$ и

$$\begin{cases} T(x, y, h_{iso} - 0, \tau) = T(x, y, h_{iso} + 0, \tau) \\ \lambda_1 \frac{dT(x, y, h_{iso} - 0, \tau)}{dz} = \lambda_2 \frac{dT(x, y, h_{iso} + 0, \tau)}{dz} \end{cases}, \quad 0 < x < W, \quad 0 < y < D, \quad z = h_{iso}, \quad \tau > 0. \quad (5)$$

Здесь и далее x, y, z — координаты, м; T — температура, К; c — теплоемкость, Дж/(кг·К); ρ — плотность, кг/м³; λ — теплопроводность, Вт/(м·К); α — коэффициент теплообмена, Вт/(м²·К); τ — время, с; q — плотность теплового потока, Вт/м².

На боковых гранях расчетной системы учитывался конвективный теплообмен в соответствии с уравнениями [19]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_i \frac{dT(0,y,z,\tau)}{dx} = -\alpha(T(0,y,z,\tau) - T_0), \quad x=0, \quad 0 < y < D; \\ \lambda_i \frac{dT(W,y,z,\tau)}{dx} = -\alpha(T(W,y,z,\tau) - T_0), \quad x=W, \quad 0 < y < D; \\ \lambda_i \frac{dT(W,y,z,\tau)}{dy} = -\alpha(T(W,y,z,\tau) - T_0), \quad 0 < x < W, \quad y=0; \\ \lambda_i \frac{dT(x,D,z,\tau)}{dy} = -\alpha(T(x,D,z,\tau) - T_0), \quad 0 < x < W, \quad y=D, \end{array} \right. \quad (6)$$

$z \in Z, \quad \tau > 0, \quad i = 1, 2; \quad z_1 = 0, \quad z_2 = h_{iso}, \quad z_3 = h_{iso} + H, \quad Z = (z_i, z_{i+1}).$

Кроме того, на нижней грани материала обеспечивалось граничное условие первого рода: $T(x, y, H + h_{iso}) = T_0$ за счет хорошего теплового контакта с массивным стальным блоком, имеющим температуру T_0 окружающей среды. Результаты математического моделирования приведены в следующем разделе.

2.1. Изготовление экспериментальных образцов

В качестве объектов исследования были изготовлены модельные образцы, состоящие из подложки, выполненной из материала, имеющего высокую теплопроводность, на которую было нанесено покрытие из материала, обладающего низкой теплопроводностью. В качестве подложки использовали заготовки из оксида алюминия в виде пластин размером $50 \times 50 \times 8,7$ мм со следующими свойствами: $\rho_1 = 4000 \text{ кг/м}^3$, $c_1 = 750 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$, $\lambda_1 = 30 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$. Покрытие с низкой теплопроводностью выполняли из слоя полипропилена ($\rho_2 = 900 \text{ кг/м}^3$, $c_2 = 1900 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$, $\lambda_2 = 0,18 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$) различной толщины. Было изготовлено 6 образцов, имеющих среднюю толщину покрытия, приведенную в табл. 1. В качестве неопределенности измерений выбрано значение стандартного отклонения измеренной толщины в середине образца и на расстоянии 10 мм от вершин прямоугольного сечения образцов. Поверхность образцов была покрыта черной краской для обеспечения лучшей поглощающей и излучательной способностей. Средняя толщина слоя краски составила 22 ± 5 мкм.

Таблица 1

Номер образца	Средняя толщина слоя покрытия h_{iso} , мкм	Стандартное отклонение толщины покрытия по 5 точкам образца, мкм
0	0	0
1	38	15
2	115	30
3	208	50
4	270	25
5	526	45

В процессе изготовления образцов толщину покрытия контролировали электронным микронетром, имеющим разрешение 1 мкм. После термографических исследований толщину покрытия измеряли на срезах образцов при помощи инвертированного металлографического микроскопа Axio Observer, оснащенного системой цифрового захвата и анализа изображения (Carl Zeiss, Германия).

2.2. Экспериментальная установка

Для термографического контроля авторами использовалась измерительная установка, схема которой показана на рис. 2.

В состав установки входил робот-манипулятор I производства компании ООО НПО «ПАСКАЛЬ УТ» (Россия), имеющий пять степеней свободы. В качестве рабочих органов использо-

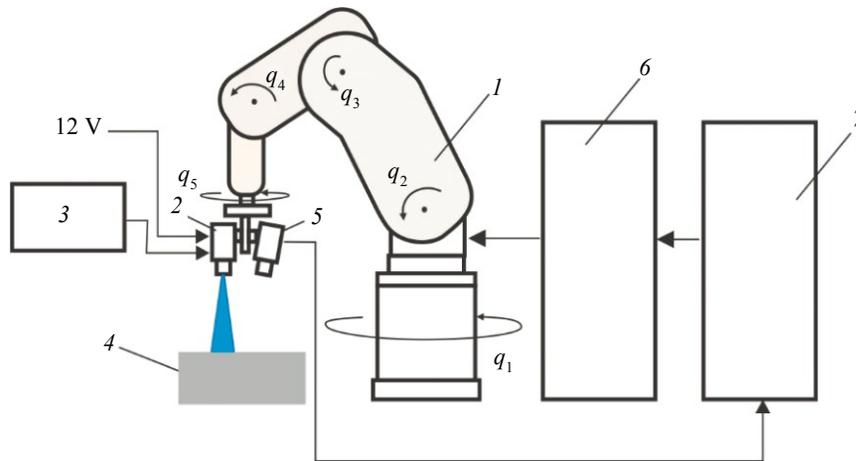


Рис. 2. Схема измерительной установки.

вали лазер непрерывного действия 2-го типа, мощностью 8 Вт, формирующий прямоугольную область нагрева (80×100 мм) оптическим излучением на длине волны 450 нм, и тепловизионную камеру 5 COX CG640, подключенную к персональному компьютеру 7 [20]. В отличие от других нагревателей лазер практически не имеет инерции нагрева и легко управляется внешними сигналами. Робот-манипулятор позволяет перемещаться рабочим органам и сканировать всю поверхность образца 4, что важно для практического применения метода.

Алгоритмы управления роботом основаны на решении обратной задачи кинематики с обобщенными координатами $q_1 — q_5$ и скоростями $dq_1/dt — dq_5/dt$. Управление перемещением лазера осуществляется контроллером 6, а изменение его мощности в соответствии с граничным условием (4) — программным обеспечением контроллера 3.

В поверхностном слое теплоизоляционного материала происходит диссипация энергии электромагнитного излучения с выделением тепла. Это приводит к появлению периодически изменяющегося температурного поля с угловой частотой $\omega = 2\pi f$. При этом фаза колебаний температуры зависит от теплофизических свойств вещества изолятора, а также от толщины покрытия и наличия подповерхностных дефектов.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В данном разделе представлены теоретические и экспериментальные исследования рассматриваемых модельных образцов с применением метода ФТК.

3.1. Тепловой численный анализ

Были проведены серии расчетов для значений толщины покрытия $h_{\text{iso}} = 5, 10, 50, 100, 200$ и 400 мкм, а также различных значений частоты лазерного излучения $f = 0,1; 1,0; 5$ Гц. Использовался лазер с $P_{\text{max}} = 8$ Вт, пятно которого соответствует прямоугольной форме $w_{\text{laser}} \times d_{\text{laser}} = 100 \times 80$ мм. При этом мощность лазера в течение нагрева менялась в соответствии с правой частью условия (4). Начальная температура расчетной системы $T_0 = 20$ °С, конвективный теплообмен на боковых гранях описывался граничными условиями (6) при коэффициенте $\alpha = 7$ Вт/(м²·К).

Для решения системы уравнений теплопроводности применяли метод конечных элементов. При этом в основном материале использовалась тетраэдральная сетка (количество элементов 26584), а в материале теплоизолятора — равномерная прямоугольная сетка (разбиение по длине и ширине по 34 элемента, по высоте 3 элемента, всего 3468 элементов). Численные расчеты были реализованы в среде Comsol Multiphysics 6.2.

Время нагрева подбиралось таким образом, чтобы получить установившиеся колебания температуры в центральной точке верхнего теплоизоляционного слоя T^* . На рис. 3 представлены расчетные значения T^* для различных $h = h_{\text{iso}}$.

Как видно из рис. 3, с увеличением толщины покрытия h_{iso} значительно растет амплитуда температурных колебаний. Кроме того, наличие нанесенного теплоизоляционного покрытия приводит к некоторому изменению фазы температурных колебаний.

Для более детального анализа применялся алгоритм дискретного преобразования Фурье (FFT) из открытой библиотеки SciPy языка программирования Python для данных, представ-

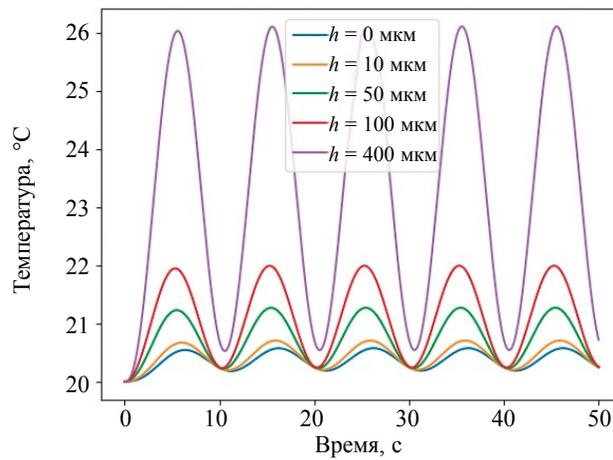


Рис. 3. Температурные колебания на поверхности модельного образца при частоте лазерного излучения 0,1 Гц.

ленных на рис. 3. Результаты представлены в виде зависимостей амплитуды и фазы от частоты излучения и толщины покрытия (рис. 4 и 5).

На основе анализа данных, представленных на рис. 4 и 5, можно сделать вывод, что изменение фазы температурных колебаний наиболее значительно и однозначно при малых толщинах покрытий. При этом, чем больше частота лазерного излучения, тем меньше интервал толщин, при котором зависимость имеет однозначный характер. Кроме этого, следует иметь в виду, что с увеличением частоты колебаний теплового воздействия температурная волна в образце быстро затухает и уменьшается расстояние μ , на которое она распространяется [10]:

$$\mu = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_1}{\omega \cdot \rho_1 \cdot c_1}} \tag{7}$$

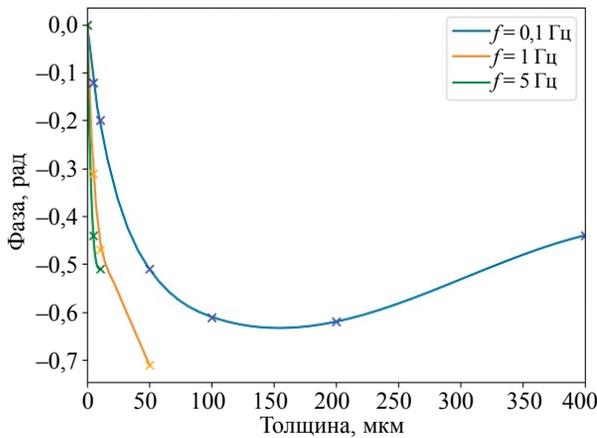


Рис. 4. Изменение фазы температурных колебаний в модельном образце в зависимости от толщины покрытия и частоты излучения.

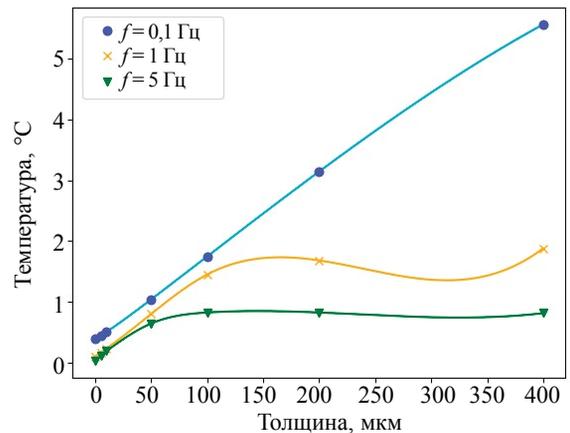


Рис. 5. Изменение амплитуды температурных колебаний в модельном образце в зависимости от толщины покрытия и частоты излучения.

Очевидно, что при выборе частот теплового воздействия для контроля толщины следует учитывать расстояние μ и зависимость, показанную на рис. 6, построенную по формуле (7) для покрытия из полипропилена.

Следовательно, с увеличением частоты колебаний уменьшается предел измерения толщины покрытия, поэтому при контроле толщины с заданной точностью следует уделять большое внимание выбору частоты изменения теплового воздействия. Зависимость амплитуды колебаний температуры от толщины покрытия также существенно зависит от частоты и при значении 0,1 Гц в диапазоне 0—400 мкм имеет почти линейный характер (см. рис. 5).

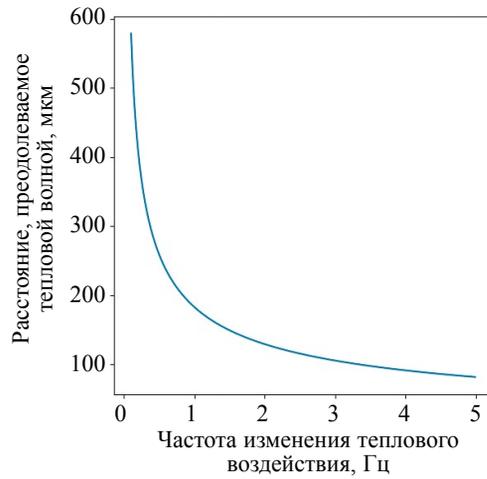


Рис 6. Зависимость длины тепловой волны от частоты изменения теплового воздействия для покрытия из полипропилена.

3.2. Экспериментальная термография

Экспериментальные исследования были основаны на дифференциальном методе, при котором сравнивалось распределение параметров периодически изменяющегося температурного поля исследуемого образца с теплоизоляционным покрытием с соответствующими параметрами образца с нулевой толщиной покрытия. Регистрируя последовательность термограмм и применяя затем дискретное преобразование Фурье для каждого пикселя изображения тепловизионной камеры, получали распределение амплитуды и фазы в зависимости от f и h_{iso} . На рис. 7

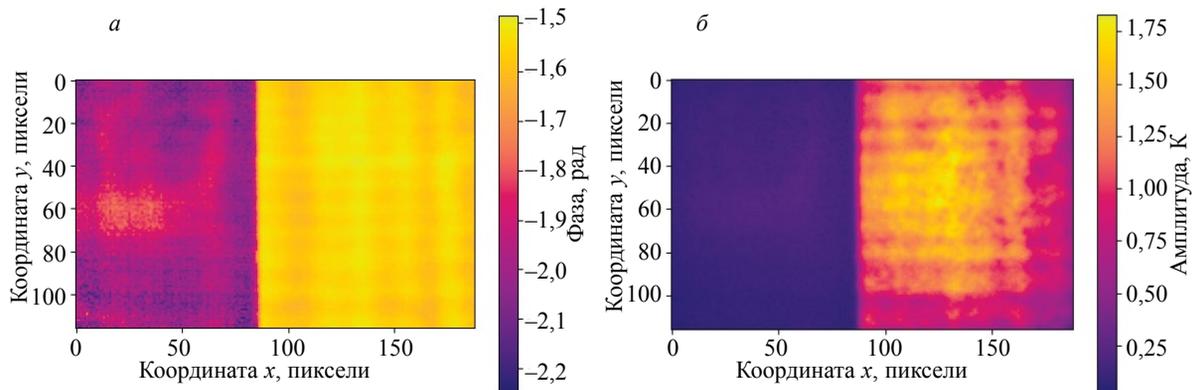


Рис. 7. Распределение фазы (а) и амплитуды (б) при $f = 0,1$ Гц для образцов с толщиной покрытия 0 и 115 мкм.

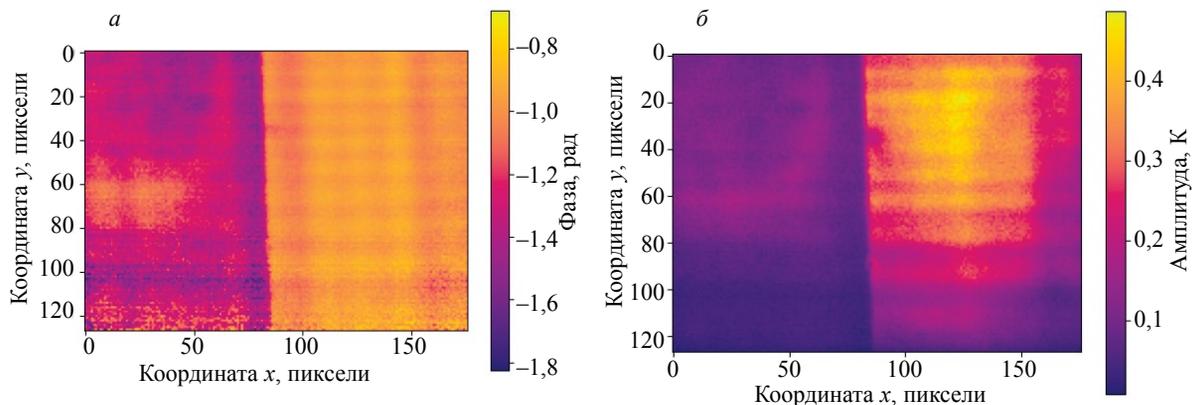


Рис. 8. Распределение фазы (а) и амплитуды (б) при $f = 0,4$ Гц для образцов с толщиной покрытия 0 и 38 мкм.

и 8 представлены полученные распределения фазы (a) и амплитуды (b) при $f = 0,1$ и $0,4$ Гц для модельных образцов при $h_{\text{iso}} = 115$ и 38 мкм соответственно. При этом левая половина снимков соответствует образцу без покрытия полипропиленом, правая — с покрытием.

Совместный анализ данных на рис. 6 и 7 позволяет сделать вывод, что на распределение фаз температурных колебаний меньшее влияние оказывают краевые эффекты и неравномерность освещения лазером. По этой причине распределение фазы более равномерно, и оно зависит в основном от толщины покрытия в отличие от распределения амплитуды.

На рис. 9 представлены полученные зависимости распределения разности фаз (a) при $f = 0,1$ – $0,6$ Гц и амплитуды температурных колебаний (b) при $f = 0,1$ Гц образцов с покрытием и без него для различных значений h_{iso} .

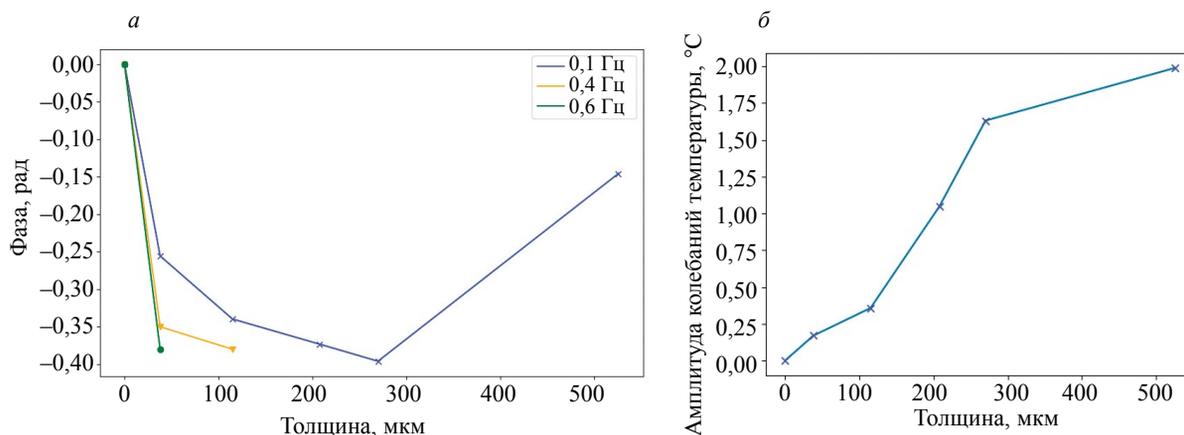


Рис. 9. Зависимость распределения фазы (a) и амплитуды (b) от толщины покрытий.

Как видно из рис. 9б, амплитуда температурных колебаний нелинейно растет с увеличением толщины покрытия. При этом (рис. 9а) зависимость фазы также имеет нелинейный характер и может иметь неоднозначный характер в зависимости от толщины покрытия. Поэтому для практического применения были использованы участки, где чувствительность фазы от толщины покрытия отрицательна.

После проведенных исследований можно сделать вывод, что результаты численных расчетов (см. рис. 4 и 5) и физических экспериментов (см. рис. 9а и 9б) качественно согласуются между собой по характеру зависимостей. Количественные отличия между ними могут быть объяснены принятыми допущениями и упрощениями теоретической модели.

Полученная экспериментальная зависимость $\varphi(h_{\text{iso}})$ для контрольного образца позволяет решить обратную задачу для нахождения толщины покрытия, используя метод интерполяции и значения массивов разности фаз и толщины слоя покрытия.

При реализации измерений фазу колебаний температуры на поверхности исследуемого изделия можно сравнивать с фазой колебаний мощности электромагнитного излучения, как это реализовано в работе P. Song и др. [4].

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как было показано ранее, в диапазоне $h_{\text{iso}} = [0; 250]$ мкм метод ФТК обладает высокой чувствительностью и его можно использовать для оценки неравномерности покрытий малой толщины. Вместе с тем от значения частоты изменения теплового воздействия зависят чувствительность метода и диапазон измерения толщины. В связи с этим предлагается следующая методика определения толщины покрытия в диапазоне 0–500 мкм:

1. Получить на контрольных образцах градуировочные характеристики в виде зависимостей разностей фазы и амплитуды колебаний температуры от толщины покрытия.

2. Установить частоту 0,1 Гц мощности электромагнитного излучения лазера на поверхность объекта контроля, изменяющегося в соответствии с выражением:

$$P = \left(\frac{P_{\text{max}}}{2} (1 - \cos(\omega t)) \right).$$

3. В установившемся режиме определить амплитуду колебаний температуры на поверхности образца в контролируемой области.

4. Если амплитуда колебаний в диапазоне $[0,5; 1,5]$ К, то следует установить частоту теплового воздействия 0,1 Гц. При амплитуде $[0,25; 0,5]$ К — частоту 0,4 Гц, а при $(0; 0,25)$ — частоту 0,6 Гц. При амплитуде более 1,5 К толщину покрытия можно определить непосредственно по градуировочному графику $h_{iso} = f(A)$.

5. После установления колебаний температуры поверхности образца и последующей их регистрации за 10—15 периодов применить метод дискретного преобразования Фурье к последовательности зарегистрированных термограмм с последующим определением распределения фазы по поверхности объекта контроля.

6. Определить разность фаз между фазой колебаний мощности электромагнитного излучения и фазой колебаний температуры в соответствующих пикселях изображения поверхности.

7. Используя градуировочные характеристики (рис. 8а), рассчитать и построить карты распределения толщины покрытия на поверхности изделия.

Следует иметь в виду, что амплитуда изменения температуры в значительной степени зависит от равномерности теплового воздействия по поверхности образца и наличия (отсутствия) краевых эффектов. Это можно обеспечить за счет использования теплоизоляции боковых поверхностей образцов.

Неопределенность измерения толщины покрытия по разности фаз или амплитуд колебаний температуры включает в себя неопределенности, вызванные неравномерностью покрытия на исследуемых образцах (см. табл. 1), ошибками интерполяции по экспериментальным данным (обеспечивает вклад до 10 мкм в суммарную стандартную неопределенность измерения толщины), неравномерностью нагрева образца (вклад до 5 мкм). Таким образом, для снижения неопределенности измерений необходимо увеличивать точность изготовления контрольных образцов, увеличивать число реперных точек экспериментальных зависимостей.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценка неравномерности толщины покрытия имеет большое значение при изготовлении изделий различного назначения. При этом очень важно производить измерения на как можно большей площади поверхности изделия в короткий интервал времени, что обеспечит высокую производительность процедуры контроля. В настоящей статье рассмотрен метод лазерного роботизированного термографического контроля для проверки толщины и неоднородности покрытия. Результаты подтверждают, что для контроля теплозащитных покрытий на теплопроводных подложках целесообразно обеспечить частоту тепловых воздействий от 0,1 до 1 Гц. По распределению фазы колебаний температуры имеется возможность контролировать равномерность покрытий в диапазоне толщин 0—250 мкм. Для роботизированного термографического контроля крупногабаритных изделий использование фазочувствительного метода более предпочтительно, так как при этом наблюдается меньшая чувствительность к неравномерности нагрева поверхности изделия и выявляется возможность последовательного контроля участков поверхности по всему изделию.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 20-19-00602 (<https://rscf.ru/project/20-19-00602/>) с использованием оборудования ЦКП ФГБОУ ВО «ТГУ имени Г.Р. Державина» и ЦКП «Робототехника» ФГБОУ ВО «ТГТУ».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhang J., Cho Y., Kim J., Malikov A.K., Kim Y.H., Yi J.H., Li W. Non-Destructive Evaluation of Coating Thickness Using Water Immersion Ultrasonic Testing // *Coatings*. 2021. V. 11. No. 11. DOI: 10.3390/COATINGS11111421
2. Duan Y., Zhang H., Sfarra S., Avdelidis N.P., Loutas T.H., Sotiriadis G., Kostopoulos V., Fernandes H., Ion Petrescu F., Ibarra-Castanedo C., Maldague X.P. On the use of infrared thermography and acousto-ultrasonics NDT techniques for ceramic-coated sandwich structures // *Energies*. 2019. V. 12. No. 13. DOI: 10.3390/en12132537
3. Li Z., Wang C., Ju H., Li X., Qu Y., Yu J. Prediction Model of Aluminized Coating Thicknesses Based on Monte Carlo Simulation by X-ray Fluorescence // *Coatings*. 2022. V. 12. No. 6. DOI: 10.3390/coatings12060764
4. Song P., Xiao P., Liu J., Wang Y.H. The inspection of coating thickness uniformity of SiC-coated carbon-carbon (C/C) composites by laser-induced thermal-wave imaging // *Carbon* N. Y. 2019. V. 147. DOI: 10.1016/j.carbon.2019.03.015

5. Wu J., Li Y. Research on Non-destructive Testing Method of Coating Thickness of Turbine Blade // Journal of Physics: Conference Series. 2020. V. 1617. No. 1. DOI: 10.1088/1742-6596/1617/1/012093
6. Park J.W., Ha J.M., Seung H.M., Jang H., Choi W. Thickness evaluation of Cr coating fuel rod using encircling ECT sensor // Nucl. Eng. Technol. 2022. V. 54. No. 9. DOI: 10.1016/j.net.2022.03.035
7. Gong Y., Cao B., Zhang H., Sun F., Fan M. Terahertz based Thickness Measurement of Thermal Barrier Coatings Using Hybrid Machine Learning // Nondestruct. Test. Eval. 2023. DOI: 10.1080/10589759.2023.2167991
8. Vieweg N., Regner N., Dutzi K., Kutz J., Kehrt M., Steiger A., Kaya C., Stegmaier T. Online thickness measurements of acrylate-based coatings on knitted polyester fabric using terahertz time-domain spectroscopy // J. Ind. Text. 2023. V. 53. DOI: 10.1177/15280837231207396
9. Chulkov A.O., Nesteruk D.A., Shagdyrov B.I., Vavilov V.P. Erratum to: Method and Equipment for Infrared and Ultrasonic Thermographic Testing of Large-Sized Complex-Shaped Composite Products // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2021. V. 57. P. 824. <https://doi.org/10.1134/S1061830921090114>.
10. Schmid S., Reinhardt J., Grosse C.U. Spatial and temporal deep learning for defect detection with lock-in thermography // NDT E Int. 2024. V. 143. DOI: 10.1016/j.ndteint.2024.103063
11. Mezghani S., Perrin E., Vrabie V., Bodnar J. L., Marthe J., Cauwe B. Evaluation of paint coating thickness variations based on pulsed Infrared thermography laser technique // Infrared Phys. Technol. 2016. V. 76. DOI: 10.1016/j.infrared.2016.03.018
12. Moskovchenko A., Vavilov V., Švantner M., Muzika L., Houdková Š. Active IR thermography evaluation of coating thickness by determining apparent thermal effusivity // Materials (Basel). 2020. V. 13. No. 18. DOI: 10.3390/ma13184057
13. Marinetti S., Robba D., Cernuschi F., Bison P.G., Grinzato E. Thermographic inspection of TBC coated gas turbine blades: Discrimination between coating over-thicknesses and adhesion defects // Infrared Phys. Technol. 2007. V. 49. No. 3 SPEC. ISS. DOI: 10.1016/j.infrared.2006.06.018
14. Franke B., Sohn Y.H., Chen X., Price J.R., Mutasim Z. Monitoring damage evolution in thermal barrier coatings with thermal wave imaging // Surf. Coatings Technol. 2005. V. 200. No. 5—6. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2005.07.090
15. Liu B., Zhang H., Fernandes H., Maldague X. Quantitative evaluation of pulsed thermography, lock-in thermography and vibrothermography on foreign object defect (FOD) in CFRP // Sensors (Switzerland). 2016. V. 16. No. 5. DOI: 10.3390/s16050743
16. Clarke D.R. Materials selections guidelines for low thermal conductivity thermal barrier coatings // Surf. Coatings Technol. 2003. V. 163—164. DOI: 10.1016/S0257-8972(02)00593-5
17. Narasimhan T.N. Fourier's heat conduction equation: History, influence, and connections // Rev. Geophys. 1999. V. 37. No. 1. DOI: 10.1029/1998RG900006
18. Fourier J.B.J. The analytical theory of heat. 2009.
19. Ahmadi M., Mostafavi G., Bahrami M. Natural convection from interrupted vertical walls // J. Heat Transfer. 2014. V. 136. No. 11. DOI: 10.1115/1.4028369
20. Divin A.G. et al. Application of Laser Scanning Thermography and Regression Analysis to Determine Characteristics of Defects in Polymer Composite Materials // Russ. J. Nondestruct. Test. 2024. V. 60. No. 1.