

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ТЕПЛООВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ЛИСТОВЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Захаров Ю. А.¹, Дивин А. Г.²

(ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов)

Представлена информация о методе и подходах, используемых при разработке измерительного устройства для бесконтактного и неразрушающего теплового контроля материалов и изделий. Особенностью предлагаемого метода является использование в качестве источника теплового воздействия на образец лазерного излучения на длине волны 403 нм. Используемые методы основаны как на численной аппроксимации экспериментальных зависимостей, так и на использовании расчетных зависимостей, полученных аналитическим путем. Представлена конструкция измерительной установки для исследования листовых материалов, которая позволит реализовать предложенные методы измерения.

Ключевые слова: тепловой контроль, теплопроводность, коэффициент температуропроводности, лазер, неразрушающий контроль.

1. Введение

В настоящий момент в различных отраслях промышленности, в том числе связанных с аэрокосмической тематикой, существует запрос на управление технологическими процессами, основанное на зависимости от результатов контроля качества продукции. К таким технологическим процессам можно отнести процессы нанесения гальванических покрытий, покрытий осаждением различных фаз, травления, некоторых видов термообработки и т. д.

Существенным свойством подобных технологических процессов является то, что их режимы и результат обычно представимы в виде наборов параметров, связанных между собой сложной функцией. При этом результат технологического процесса

¹ Юрий Андреевич Захаров, аспирант (sci.zah@ya.ru).

² Александр Георгиевич Дивин, д.т.н., доцент (aldivin@gmail.com).

может быть слабо предсказуем и зависеть от ряда трудно прогнозируемых факторов.

Эти обстоятельства определяют необходимость использования средств, позволяющих получить информацию о качестве покрытий. При этом наиболее часто используют выборочный разрушающий контроль, а также неразрушающие методы рентгеновского и вихретокового контроля. Однако указанные методы не позволяют получить информацию о качестве покрытия всего изделия.

Альтернативной для указанных методов является термографическая диагностика на основе флеш-метода Паркера [2], сопряжённая с определением теплофизических характеристик (ТФХ) материалов образца [1]. В основе этих подходов лежат методы анализа нестационарных температурных полей, создаваемых импульсами лазерного излучения с разным временным профилем и потоком энергии, распределенным по поверхности инспектируемого объекта или сфокусированным на малой площадке (0,1–1 мм²).

2. Метод контроля

В основу предлагаемого метода контроля положен принцип анализа ТФХ материала образца методом обработки данных об изменении во времени температуры на выбранном для исследования участке поверхности. При этом реализуется несколько методов диагностики, а также определения коэффициента температуропроводности (КТП) и теплопроводности. В последнем случае могут быть использованы как «точечный» динамический нагрев поверхности изделия сфокусированным пучком лазера, так и расфокусированный нагрев участка поверхности в виде круга радиусом до 10 мм [3]. Для увеличения эффективности нагрева сфокусированным пучком лазера оптически прозрачных материалов применяются светопоглощающие мишени размером порядка гауссова радиуса греющего пучка. Точечный нагрев поверхности генерирует в однородном образце тепловую волну со сферическим фронтом, динамика которого содержит исчерпывающую информацию о КТП материала. В анизотропных

материалах на поверхности создаются изотермы эллиптической формы, что дает возможность построить годограф КТП и определить главные компоненты тензора КТП. Косвенно эти данные также свидетельствуют о степени связанности армирующих анизометрических наполнителей (например, волокон) с матрицей и механических свойствах композита. Термографический способ регистрации динамики нестационарного температурного поля с помощью тепловизора с высоким разрешением по температуре и позволяет накопить в течение нескольких секунд высокоскоростного кинофильмирования поверхности в инфракрасном (ИК) свете (8–13 мкм) большой объем информации (~ 0,1–10 Гб) и после соответствующей обработки извлечь данные о величине КТП путем усреднения большого числа индивидуальных определений значений величины коэффициента температуропроводности (в количестве ~ 10^6 – 10^7), что должно существенно понизить величину случайных погрешностей.

Теплопроводность материала образца может определяться как численно, так и аналитически с применением расчетных зависимостей, полученных с применением метода временных интегральных характеристик температуры и теплового потока, рассчитанных по значениям указанных величин в заданной области поверхности образца, нагреваемой расфокусированным пучком лазера [3].

Измерительная установка состоит из нескольких основных частей (см. рис. 1): основания, тепловизора, лазера и кронштейна для образца. При проведении испытания образец закрепляется на специальном кронштейне.

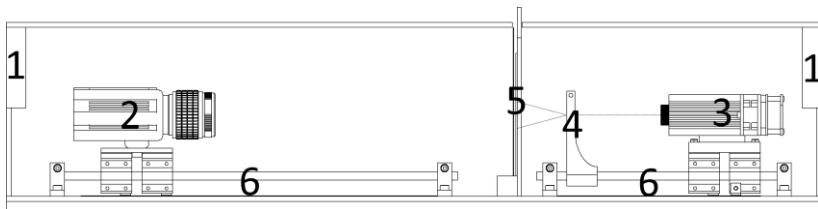


Рис. 1. Схема установки

Лазер (поз. 3) закреплен на специальной подвижной платформе. Платформа позволяет перемещать лазер по трём степеням свободы: изменять расстояние от лазера до образца по направляющим (поз. 6), смещать лазер в плоскости образца и поворачивать вокруг оси, перпендикулярной двум упомянутым.

Перемещение лазера по расстоянию до образца по направляющим реализовано при помощи безлюфтовой передачи винт-гайка. Перемещение в перпендикулярном направлении – по направляющим с фиксирующим прижимным винтом. Вращение – путём применения в конструкции небольшой поворотной платформы, фиксируемой прижимным винтом.

Перед лазером на подвижном кронштейне размещается линза (поз. 4), позволяющая изменять диаметр пятна нагрева лазером. Свет, прошедший через линзу, попадает на поверхность образца, закреплённого в специальном кронштейне (поз. 5).

Система крепления и перемещения тепловизора (поз. 2) реализована аналогично. Существенными отличиями при этом являются: размещение тепловизора с обратной стороны относительно образца и отсутствие возможности перемещения тепловизора параллельно с плоскостью образца и вращения.

В рабочем состоянии установка накрывается кожухом с установленными в нём вентиляторами (поз. 1). Вентиляторы и кожух предназначены для выравнивания и стабилизации температуры в объёме измерительной камеры.

Проведенные на прототипе измерительной установки эксперименты показали [4], что погрешность измерения теплопроводности и КТП не превышает 10%. Для повышения точности измерения теплопроводности необходимо уточнить значение теплового потока, идущего в образец. В настоящее время это значение определяется по калибровочным экспериментам со стандартными образцами [4]. При измерении КТП знаний теплового потока не требуется

Работа выполнена при поддержке РФФ, грант №20-19-00602.

Литература

1. ГОЛОВИН Д. Ю., ТЮРИН А. И., САМОДУРОВ А. А., ДИВИН А. Г., ГОЛОВИН Ю. И. *Динамические термографические методы неразрушающего экспресс-контроля* / Под общ. ред. Ю.И. Головина. – Москва, 2019. – Сер. «Мир материалов и технологий».
2. PARKER W. J., JENKINS R. J., BUTLER C. P., ABBOTT G. L. *Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity, and thermal conductivity* // Journal of Applied Physics. – 1961. – Vol. 32, No. 9. – P. 1679–1684. – DOI: 10.1063/1.1728417.
3. SYCHEV V. A., LYUBIMOVA D. A., DIVIN A. G., PONOMAREV S. V., EGOROV A. S., *Non-destructive thermal control of vegetables and fruits using a machine vision system* // Chem. Eng. Trans. – 2018. – Vol. 70. – DOI: 10.3303/CET1870092.
4. DIVIN A. G., EGOROV A. S., PONOMAREV S. V., AL-BUSAIDI S. S., SHISHKINA G. V., TIURIN A. I. *Contactless non-destructive thermal control of materials* // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1679, No. 2. – DOI: 10.1088/1742-6596/1679/2/022073.

MEASURING UNIT FOR THERMAL NON-DESTRUCTIVE TESTING OF SHEET MULTILAYER MATERIALS

Yurij Zaharov, Tambov State Technical University, Tambov, graduate student (sci.zah@ya.ru).

Alexander Divin, Tambov State Technical University, Tambov, professor (algdivin@gmail.com).

Abstract: The report provides information on the method and approaches used in the development of a measuring device for non-contact and non-destructive thermal control of materials and products. A special feature of the proposed method is the use of laser radiation at a wavelength of 403 nm as a source of thermal effect on the sample. The methods used are based both on the numerical approximation of experimental dependencies and on the use of calculated dependencies obtained analytically. The design of a measuring unit for the study of sheet materials is presented, which will allow implementing the proposed measurement methods.

Keywords: Thermal control, thermal conductivity, thermal conductivity coefficient, laser, non-destructive testing.

УДК 536.2 1

ББК 34.92