



Активный синхронный термодинамический метод измерения толщины диэлектрических покрытий

Рассмотрены основные физические принципы активного термодинамического контроля диэлектрических покрытий, а также структура бесконтактной системы толщинометрии покрытий, предназначенной для применения в лабораторных и цеховых условиях (в том числе в составе поточных линий). Изложены методики градуировки, поверки и калибровки. Представлены основные технические характеристики и примеры применения.

Submitted 17.02.16

Accepted 2.03.16

A. Bariska^{1,2}, N. Reinke^{1,2}, V. A. Syasko^{3,4}

Active Lock-in Thermodynamic Method for Thickness Measurement of Dielectric Coatings

Introduction. The task of dielectric coating thickness measurement is regular for many industries. The object to be measured represents a two-layer structure with different static and dynamic parameters of the layers; the upper layer is dielectric. The analysis of physical processes taking place at active thermal loading of the object has shown that lock-in temperature measurements of the object's surface make it possible to measure its thickness, porosity and interlayer adhesion.

Method. The structure of a noncontact active lock-in thermodynamic system for dielectric coating thickness measurement is offered. The system includes a flashlamp and a thermodynamic sensor with an optical unit. The technique for coating thickness measurement is developed on the base of the offered algorithm for analysis of primary temperature function $T(t)$, which shows the change of the excess coating surface temperature during heating and cooling.

Results. The main matters of the method metrological provision are justified including principles of reference stepped thickness standard development; questions of graduation, verification and calibration are considered. It is offered to use basic provisions of the active "National Verification System for Coatings Thickness Measurement Instruments" as well as the technology for metal thickness standard fabrication as most similar.

Discussion. The main technical specifications of the system and examples of its applications in aerospace industry, mechanical engineering, and other industries show the correctness of the main theoretical provisions of the method and long-term benefit of using the system created on its base.

Keywords: infrared thermography, thickness, coating, measurement

На многих производствах актуальной является задача бесконтактного измерения толщины лакокрасочных и подобных им покрытий на поточных линиях. Также актуальной является задача измерения толщины нанесённого порошкового покрытия до помещения изделия в тепловую камеру для его полимеризации.

Развитие методов активной термографии, систем теплового нагружения и термодинамических чувствительных элементов явилось базой для разработки промышленных образцов систем толщинометрии диэлектрических по-

крытий, реализующих активный синхронный термодинамический метод измерения. Структурная схема измерений представлена на рис. 1.

Базовыми элементами являются мощная лампа-вспышка, обеспечивающая энергию светового импульса от 500 до 2000 Дж, и термодинамический чувствительный элемент с оптической системой. Оптическая система используется для фокусировки изображения контролируемого участка поверхности изделия заданного диаметра (от 2 до 20 мм) на термодинамическом чувствительном элементе. При этом расстояние

БАРИСКА
Андр

Технический директор «Winterthur Instruments AG», Винтертур, Швейцария. Лектор Университета прикладных наук, Цюрих, Швейцария. Научные интересы: толщинометрия покрытий, статистика.



РАЙНКЕ
Нильс

Генеральный директор «Winterthur Instruments AG», Винтертур, Швейцария, PhD, профессор Университета прикладных наук, Цюрих, Швейцария. Научные интересы: материаловедение, толщинометрия покрытий, НК.



СЯСЬКО
Владимир
Александрович

Профессор кафедры «Приборостроение» Национального минерального университета «Горный», Генеральный директор ООО «Константа» (Санкт-Петербург), д. т. н. Научные интересы: контроль физико-механических характеристик микро- и наноструктурированных материалов.



до поверхности может составлять от 50 до 500 мм. Чувствительный элемент служит для измерения температуры поверхности объекта.

Рассмотрим основные положения метода и принципы работы системы.

¹ Winterthur Instruments AG, Winterthur, Switzerland; info@winterthurinstruments.ch

² Zurich University of Applied Sciences, Zurich, Switzerland

³ National Mineral Resources University (Mining University), St. Petersburg, Russia

⁴ CONSTANTA Ltd, St. Petersburg, Russia; 9334343@gmail.com

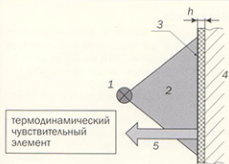


Рис. 1. Структурная схема активной синхронной термодинамической системы измерения толщины диэлектрических покрытий: 1 — лампа-вспышка; 2 — импульсный поток светового излучения; 3 — чувствительный элемент; 4 — основание; 5 — инфракрасное излучение

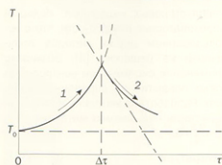


Рис. 2. Базовая температурная функция объекта контроля при измерении: 1 — нагрев; 2 — остывание

сти $a = \lambda / C\rho$ и коэффициент тепловой активности, или тепловую инерцию, $e = \lambda C\rho$. Коэффициент температуропроводности является показателем диффузии внутренней энергии в материале; его величина пропорциональна скорости распространения изотермической поверхности. Тепловая инерция характеризует тепловое согласование двух сред (покрытия и основания) и определяет коэффициент отражения тепловой волны Γ , при этом $\Gamma = 0$ в отсутствие теплового контакта между поверхностями, $\Gamma = 1$ соответствует случаю, в котором материал основания является абсолютным проводником тепла, и $\Gamma = -1$, если материал основания является абсолютным теплоизолятором. При этом кроме процессов диффузии следует учитывать отражающую способность покрытия, процессы конвекции и излучения тепла [2]. Количественная информация о величине h определяется путём анализа базовой температурной функции $T(t)$, описывающей изменение избыточной температуры поверхности покрытия на этапах нагрева и остывания. Функция $T(t)$ определяется как последовательность записанных термограмм.

Из изложенного также следует, что характер изменения базовой функции будет зависеть от пористости покрытия и его адгезии с основанием, которые,

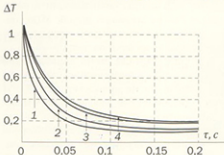


Рис. 3. Изменение температуры поверхности покрытий разной толщины на стальном основании после окончания теплового нагружения с использованием лампы-вспышки: 1 — 10 мм; 2 — 60 мм; 3 — 180 мм; 4 — 380 мм

в зависимости от задачи контроля, могут рассматриваться как контролируемые или мешающие параметры, т. е. рассматриваемый метод позволяет определять одну из трёх характеристик покрытия — толщину, пористость или его адгезию, — при известных двух.

На рис. 3 представлен пример изменения температуры поверхности лакокрасочного покрытия, нанесённого на лист низкоуглеродистой стали после температурного нагружения с использованием лампы-вспышки. Значение h предварительно измерено магнитоиндукционным толщиномером.

При проектировании систем на базе рассматриваемого метода измерения основное внимание должно быть уделено обеспечению стабильности параметров источника температурного нагружения и термодинамического чувствительного элемента.

Градуировка и поверка систем должны производиться с использованием рабочих мер толщины диэлектрических покрытий на металлических основаниях, изготовленных в соответствии с технологическим процессом нанесения покрытий заказчиком. Поверка мер может выполняться по аналогии с поверочной схемой для ступенчатых металлических мер [3]. Эти же меры могут использоваться для калибровки системы перед проведением измерений, либо должны быть изготовлены и аттестованы рабочие эталоны покрытий (контрольные образцы) в соответствии с изложенными требованиями.

Рассматриваемый метод измерения использован при проектировании системы бесконтактного измерения толщины покрытий КОУТ МАСТЕР (рис. 4). Система позволяет измерять толщину диэлектрических покрытий на металлах и пластиках в лабораторных и цеховых условиях, в том числе в составе поточных линий окраски. Также система может использоваться для контроля пори-



Рис. 4. Система КОУТ МАСТЕР в поточной линии окраски

стости и адгезии покрытий. Динамика процессов нагревания–остывания обеспечивает полный цикл измерения от 20 мс (при $h = 10 \div 20$ мкм) до 1 с (при $h = 500$ мкм). Основная абсолютная допустимая погрешность измерения $\Delta h \leq \pm [(0,01 \div 0,03) h + 1 + \Delta h_{\text{ц}}]$, мкм, где $\Delta h_{\text{ц}}$ — погрешность аттестации мер толщины покрытий, применявшихся при градуировке и калибровке системы. Расстояние до объекта контроля — до 500 мм.

Система нашла применение на точных производствах изделий автомобилестроения (например, при контроле качества покрытий на деталях фрикционных передач), бытовой техники, на линиях нанесения порошковых покрытий (например, покрытий на колёсных дисках), в авиастроении, в том числе при контроле качества покрытий на

углепластиковых изделиях с большой шероховатостью поверхности, что с использованием других методов практически не решалось [4]. Возможно применение системы при контроле лаковых покрытий на деревянных изделиях. Разработана методика измерения пористости напыляемых металлических покрытий.

Литература

1. Bariska A., Reinke N. Einfache Beschichtungskontrolle mit thermischer Schichtprüfung. ITG — Sonderausgabe. 2010. No. 10. P. 10–13.
2. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. — М.: ИД Спектр, 2009. — 544 с.
3. Р 50.2.006–2001 ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений толщины покрытий в диапазоне от 1 до 20000 мкм. — М.: ИПК Изд-во стандартов, 2001.
4. Bariska A. Alles unter Kontrolle. — Messen und Prüfen. 2014. V. 64. P. 30–32.

References

1. Bariska A., Reinke N. Einfache Beschichtungskontrolle mit thermischer Schichtprüfung. ITG — Sonderausgabe. 2010, no. 10, pp. 10–13.
2. Vavilov V. P. *Infrakrasnaya termografiya i teplovoy kontrol'* [Infrared Thermography and Thermal Inspection]. Moscow, ID Spektr, 2009, 544 p.
3. Р 50.2.006-2001. Gosudarstvennaya поверочная skhema dlya sredstv izmereniya tolschiny pokrytiy v diapazone ot 1 do 20000 mkm [National System for Standardization of Measurements. National Verification System for Coatings Thickness Measurement Instruments in the Range 1–20,000 Micrometers]. Moscow, ИПК Izdatel'stvo standartov, 2001.
4. Bariska A. Alles unter Kontrolle. — *Messen und Prüfen*. 2014, v. 64, pp. 30–32..

Статья получена 17 февраля 2016 г.,
в окончательной редакции — ?? февраля