

УДК 620.179.1

МЕТОД И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ИМПУЛЬСНОГО ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ

В.П. Вавилов, А.И. Иванов, Д.А. Нестерук, В.В. Ширяев

НИИ интроскопии ТПУ
E-mail: vavilov@introscopy.tpu.ru

На основе анализа исследований в области инфракрасного термографического контроля плазменных покрытий и собственного опыта авторов предложена методика испытаний и обработки экспериментальных данных, включающая: моделирование дефектов типа отслоений и изменения толщины покрытий методами теории теплопроводности с целью оптимизации экспериментальных процедур и разработки алгоритмов идентификации параметров дефектов; выполнение «оптимизированного» эксперимента и анализ шумов; повышение отношения сигнал/шум с помощью компьютерной обработки последовательностей изображений; построение бинарных карт дефектов и оценка параметров дефектов. Приведены экспериментальные данные по контролю эталонных и реальных образцов, которые подтверждают возможность применения импульсного теплового контроля для оценки параметров двух основных типов дефектов, характерных для теплозащитных покрытий: отслоения и изменения толщины.

Ключевые слова:

Тепловой неразрушающий контроль, инфракрасная термография, теплозащитное покрытие, параметры дефектов.

Key words:

Thermal nondestructive testing, infrared thermography, thermal protection coating, defect characterization.

Процедура теплового контроля

Плазменные покрытия широко используют в промышленности для защиты материалов и изделий от агрессивных воздействий сред. Общей чертой таких теплозащитных покрытий является их «чешуйчатый» или «зернистый» характер, обусловленный быстрым отверждением частиц малого размера, расплюсчивающихся при ударе с высокой скоростью о холодную поверхность основания. Механизм связи покрытия с основанием и отдельных частиц друг с другом до сих пор является предметом дискуссии. Вследствие несовершенств используемых технологий нанесения покрытий, как в интерфейсной зоне, так и в самом покрытии, возможно образование структурных дефектов: расслоений между отдельными слоями, повышенной пористости, трещин и появления не расплавившихся частиц.

Неразрушающий контроль таких дефектов имеет существенное значение, например, в энергетике, где теплозащитные покрытия используются для защиты основного металла компонент газовых турбин и дизельных двигателей. Покрытия состоят из слоев керамики и металлов и обозначаются, например, в виде $M\text{CrAlY}$, где M обозначает металл.

Покрывая лопатки в авиационных газовых турбинах защищают от окисления и/или коррозии с помощью алюминидов платины, гамма-Ti-алюминидов и других материалов.

Импульсный нагрев образца делает процедуру теплового контроля (ТК) более гибкой ввиду того, что объект контроля стимулируется сразу множеством тепловых волн различной частоты. Поэтому анализ температурного отклика на различных частотах позволяет профилировать свойства материала по глубине. В рамках настоящего проекта экспериментальные исследования проводились в два этапа. На первом этапе экспериментальные результаты по контролю покрытий получены в рамках международного сотрудничества НИИ интроскопии ТПУ и Института технологии конструкций Национального совета по исследованиям Италии (г. Падуа). В качестве нагревателей использовались 2–4 ксеноновые импульсные лампы, генерирующие энергию в несколько кДж за 2...10 мс. Для записи термограмм были использованы тепловизоры ThermaCAM P65HS, ThermaCAM SC 3000 и JADE с частотой кадров 25, 60, 1000 Гц, температурной чувствительностью 0,06, 0,03, 0,02 °С соответственно и форматом изображений 320×240.

Методика контроля теплозащитных покрытий включала [1]: 1) моделирование тестовых ситуаций; 2) оценка шумов для отдельных видов материалов покрытий; 3) «улучшение» исходных инфракрасных (ИК) изображений; 4) классификация дефектных отметок на картах дефектов и оценка параметров дефектов.

Моделирование

Предлагаемый подход основан на возможности выбора оператором эталонной точки, принадлежащей бездефектной области покрытия. Для анализа данных использовались общепринятые в тепловом контроле критерии: дифференциальный температурный сигнал $\Delta T = T_d - T_{nd}$ и безразмерный температурный контраст $C = \Delta T / T_{nd}$ (здесь T_{nd} , T_d – температуры в бездефектной и дефектной точках).

Известно, что отслоения покрытий от подложки и изменения их толщины приводят к появлению заметных максимумов во временном развитии контраста C , тогда как изменения излучательно-поглощательных свойств покрытий создают максимальные значения C_m в конце нагрева, т. е. в момент времени окончания нагрева τ_h , причем величина C_m приблизительно соответствует максимальным изменениям коэффициента излучения. Следовательно, шум, обусловленный вариацией коэффициента излучения, может быть отделен от дефектных отметок с помощью соответствующей пороговой процедуры.

В свою очередь, сигналы, обусловленные отслоениями, имеют относительно большую амплитуду и появляются позднее сигналов, вызванных изменениями толщины покрытий. Таким образом, селекция сигналов во времени позволяет не только отделить их от помех, но и произвести упрощенную классификацию дефектов.

Вышеописанные рассуждения проиллюстрированы рис. 1, где теоретические кривые ΔT представляют два семейства, соответствующие отслоениям и изменениям толщины покрытий (l_{ci} означает толщину покрытия и l_{dj} – толщину воздушного дефекта) турбинных лопаток авиационных двигателей. Для покрытия температуропроводность $\alpha = 4,35 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$, теплопроводность $\lambda = 1 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$. Для основания из стали AISI 304 $\alpha = 3,75 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; $\lambda = 15 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

Данные на рис. 1 рассчитаны методом «четырехполюсника» в рамках трехслойной одномерной модели [2], покрытие толщиной 250 мкм принято бездефектным.

Заметим, что утонение покрытия ведет к снижению температуры вследствие более быстрого стока тепла через металлическую подложку.

Сигналы, обусловленные отслоениями, характеризуются большими амплитудами и наступают позднее, нежели сигналы, вызванные изменениями толщины покрытий. Следовательно, при соответствующей дискриминации сигналов можно оценить параметры дефектов.

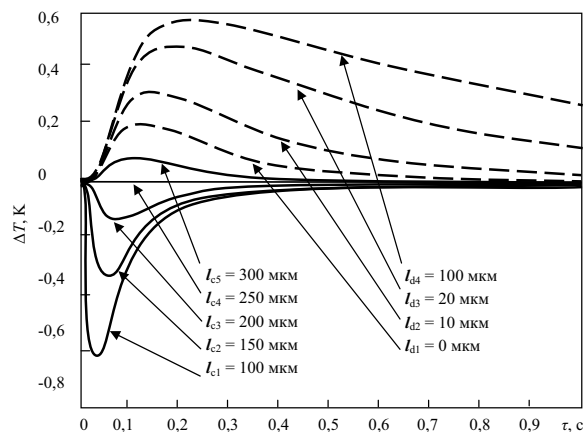


Рис. 1. Теоретические кривые температурного перепада, соответствующие отслоениям l_{dj} и изменениям толщины покрытий турбинных лопаток l_{ci}

Для дальнейших расчетов была использована программа ThermoCalc-6L (разработанная авторами), которая позволяет моделировать нагрев многослойной пластины с внутренними дефектами, путем численного решения соответствующей трехмерной задачи теории теплопроводности. Результаты расчета представляют собой распределение температуры на поверхности объекта контроля как функцию времени. Данные можно сохранить в виде последовательности искусственных изображений или трехмерного вектора.

Объект контроля моделировался стальной пластиной с плазменным покрытием. Теплофизические характеристики слоев следующие: температуропроводность покрытия $\alpha = 4,35 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$, теплопроводность покрытия $\lambda = 1 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; соответственно для основания из стали AISI 304: $\alpha = 3,75 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ и $\lambda = 15 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

Эти параметры типичны для случая ТК плазменных покрытий турбинных лопаток.

Используя полиномиальную аппроксимацию полученных данных с помощью программного пакета Mathematica были получены следующие формулы.

Для определения толщины (раскрытия) дефекта (с погрешностью до 5 %)

$$d = 0,0000238 C_m^{1,103} \tau_m^{0,474} l^{0,072}, \quad (1)$$

где d – толщина дефекта, м, C_m – максимальный текущий контраст, τ – время наступления максимального контраста, с, l – проектная толщина покрытия, м.

Для определения утолщения покрытия (с погрешностью до 7 %):

$$\Delta l = 0,2134 C_m^{0,1554} \tau_m^{0,1355} l^{-0,2565}. \quad (2)$$

Для определения утонения покрытия (с погрешностью до 10 %):

$$\Delta l = 0,3357 C_m^{-0,3157} \tau_m^{0,1444} l^{-0,07822}. \quad (3)$$

Оценка шума

Помехи (шум), сопутствующие активному тепловому контролю, принято выражать в виде шумового контраста:

$$C_n(\tau) = \sigma_n(\tau) / \bar{T}_{nd}(\tau),$$

где $\sigma_n(\tau)$ и $\bar{T}_{nd}(\tau)$ – соответственно стандартное отклонение температуры и средняя температура в выбранной бездефектной зоне. Экспериментально определенное изменение C_n во времени для конкретного покрытия эталонного образца показывает, что шумы имеют смешанную природу.

По-видимому, в начальный момент времени, когда вклад собственных шумов детектора излучения невелик, имеет место аддитивный шум, вызванный отраженным излучением горячих компонент импульсных ламп. Минимум шумового контраста наблюдается через 10...20 мс, когда существенно уменьшается отраженное излучение, а вклад структурных неоднородностей невелик вследствие диффузии тепла.

Наконец, при больших временах контроля величина температурного сигнала невелика и возрастает вклад собственных шумов системы контроля. Амплитуда шумового контраста также зависит от размеров выбранной бездефектной зоны. Наивысшие значения отношения сигнал/шум можно ожидать для тех сигналов, которые появляются через 10...20 мс после нагрева, когда $C_n \approx 2\%$, если размер бездефектной зоны соответствует ожидаемому размеру дефектов, и $C_n \approx 9\%$, если бездефектная зона покрывает все изделие.

Обработка ИК изображений

Основной целью этого этапа выполнения проекта являлось повышение отношения сигнал/шум и выбор того изображения, которое следует использовать для построения карты дефектов. В ТК предложено множество алгоритмов обработки температурных данных, использующих, главным образом, динамические различия «дефектных» и «бездефектных» температур. К таким алгоритмам относятся: нормализация, полиномиальная аппроксимация, анализ производных, тепловая томография, импульсная фазовая термография, нелинейная аппроксимация, метод «кажущейся» тепловой инерции, анализ главных компонент и использование элементов искусственного интеллекта (нейронные сети).

Некоторые алгоритмы позволяют выполнять тепловую дефектometriю либо в терминах «кажущихся» теплофизических свойств (метод тепловой инерции), либо непосредственно в параметрах дефектов (нелинейная подгонка). В ряде ранее опубликованных работ проведено сравнение вышеупомянутых алгоритмов с точки зрения максимизации отношения сигнал/шум [1, 3].

На первом этапе исследований были выполнены экспериментальные исследования по ТК эталонного образца покрытий турбинных лопаток. Использован тепловизор JADE фирмы CEDIP, обеспечивающий частоту ввода термограмм в компьютер, равную 1 кГц, в результате чего в течение первых 100 мс после импульса нагрева записывали

до 100 термограмм. Полученные последовательно ИК термограмм обрабатывали с помощью вышеуказанных алгоритмов, для чего использовали программу ThermoFit Pro Томского НИИ интроскопии ТПУ. Полученные в результате обработки значения отношения сигнал/шум приведены в таблице.

Таблица. Отношение сигнал/шум для различных алгоритмов обработки изображений при ТК покрытия толщиной 150 мкм

Алгоритм обработки	Отношение сигнал/шум
«Фазограмма» (1-я значимая частота)	7,14
«Коррелограмма»	6,68
Изображение 2-го полиномиального коэффициента	4,90
«Фазограмма» (2-я значимая частота)	4,16
Изображение 3-го полиномиального коэффициента	3,93
Исходное изображение в оптимальный момент времени после нормализации	2,81
Исходное изображение в оптимальный момент времени	2,47
Изображение 1-го полиномиального коэффициента	2,43
Исходное изображение в оптимальный момент времени после полиномиальной аппроксимации и восстановления последовательности	1,87

Как и ожидалось, наилучшие результаты были получены в результате применения преобразования Фурье к одномерным пиксельным функциям $T_j(\tau)$ (метод импульсной фазовой термографии). Преимуществом этого алгоритма является отсутствие эталонной точки и его независимость от физического процесса, поэтому данный алгоритм часто рекомендуют в качестве «первого» при проверке экспериментальных данных.

Близкое по качеству изображение было получено путем определения коэффициента корреляции между каждым пикселем в анализируемой последовательности и эталонным пикселем, причем эталонный пиксель может быть выбран произвольным образом.

Пример ТК реальной турбинной лопатки приведен на рис. 2 (использован тепловизор ThermoCAM SC 3000).

Следуя выводам, полученным при испытаниях эталонного образца, последовательность ИК термограмм в этом случае была обработана лишь с использованием одномерного преобразования Фурье и анализа корреляции между всеми точками термограммы и выбранной оператором эталонной точкой (корреляционный алгоритм предложен авторами и включен в компьютерную программу ThermoFit Pro). Были идентифицированы три небольших дефекта, отмеченных стрелками на рис. 2, z (квадратная область черного цвета слева сверху изображений соответствует алюминиевой фольге, наклеенной на поверхность лопатки для изучения отраженного излучения нагрева).

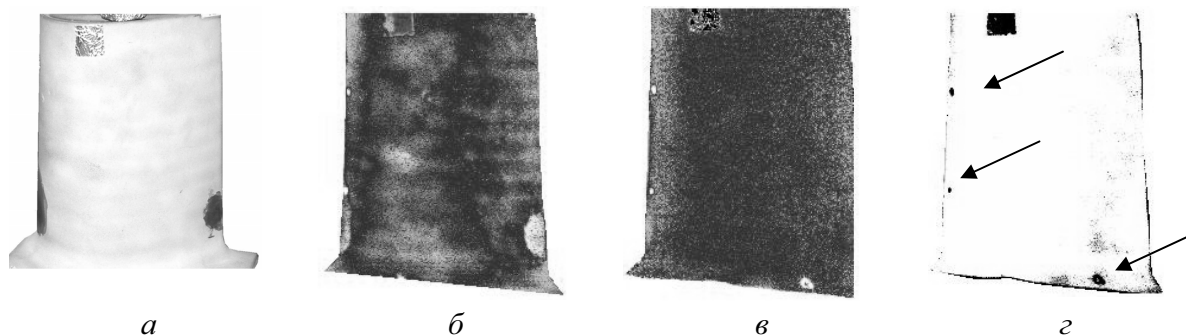


Рис. 2. Тепловой контроль турбинной лопатки: а) фотография турбинной лопатки; б) исходное изображение в оптимальный момент времени; в) «фазограмма»; г) «коррелограмма»

Экспериментальные исследования газопламенных покрытий

На втором этапе экспериментальных исследований на базе компьютерной установки теплового контроля НИИ интроскопии ТПУ были испытаны девять образцов покрытий из порошков никеля, хрома, молибдена, а также системы Ni-Cr-B-Si, предоставленных Юргинским технологическим институтом ТПУ.

Покрытия наносились газопламенным способом, при котором частицы порошка плавят или оплавливают в пламени пропана и наносят на подложку детонационным способом (напылением с использованием взрывной волны, образующейся в стволе установки, которая плавит или оплавляет и разгоняет частицы порошка до высоких скоростей).

Опыт производства и эксплуатации показывает, что дефекты в покрытиях такого типа присутствуют практически всегда. Основными типами дефектов являются поры и несплошности, а также несплавление частиц между собой, несплавление отдельных, особенно крупных, частиц и т. п.

Для контроля образцов использована экспериментальная установка НИИ интроскопии ТПУ, основные элементы которой – тепловизор ThermoCam P65 HS и оптический нагреватель мощностью до 30 кВт. Образцы нагревались импульсом оптического излучения ксеноновой лампы Bowens QU-ADX 3000 с энергией вспышки 3,2 кДж и энергетической освещенностью в плоскости образца до 100 Вт/см²; длительность импульса около 5 мс. Записывали до 600 ИК изображений форматом 320×240 с частотой записи 25 Гц.

Первый шаг анализа экспериментальных данных состоял в повышении выявляемости тепловых аномалий за счет применения методов Фурье-анализа и метода главных компонент. Как указывалось выше, эти два метода анализа динамических ИК изображений являются базовыми, поскольку не требуют знания теплофизических характеристик объектов и условий эксперимента, будучи направленными на выявление особенностей поведения температуры во времени. Соответствующие алгоритмы введены в программное обеспечение ThermoFit Pro.

Второй шаг анализа состоял в определении максимальных температурных контрастов и моментов их появления для последующего решения обратной задачи ТК покрытий и оценки параметров возможных дефектов.

В результате исследований были идентифицированы дефекты в 5-и образцах с использованием инверсионных формул (1–3). На рис. 3 приведены примеры изображений образца № 8.

Для характерных точек поверхности образцов были построены зависимости изменения температуры и температурного контраста во времени по аналогии с графиками, рис. 1.

На основании экспериментальных данных с использованием формул (1–3), в частности, для образца № 8, сделан вывод о наличии в образце разнотолщинности, вызванной пористостью и неоднородностью структуры, на уровне 25 % (60 мкм) в левой части образца, а также расслоения толщины до 40 мкм в правой его части с толщиной покрытия 250 мкм.

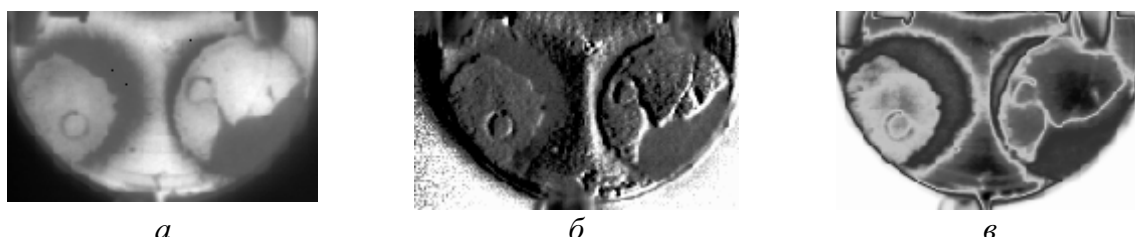


Рис. 3. Результаты ТК для образца № 8: а) исходное ИК изображение; б) фазограмма Фурье-преобразования; в) главная компонента

Выводы

1. Предложена методика испытаний и обработки экспериментальных данных инфракрасного термографического контроля плазменных покрытий, включающая моделирование дефектов методами теории теплопроводности; оптимизацию эксперимента, анализ шумов; компьютерную обработку последовательностей изображений, построение бинарных карт дефектов с оценкой их параметров.

2. Метод обеспечивает распознавание отслоений и неравномерностей толщины покрытий. Алгоритмы обработки последовательностей термограмм обеспечивают количественную оценку параметров дефектов покрытия при существенном повышении соотношения сигнал/шум.
3. Экспериментальные данные по контролю эталонных и реальных образцов показывают правильность используемого подхода.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 09-08-99022 – р_офи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Marinetti S., Vavilov V., Bison P.G., Grinzato E., Cernuschi F. Quantitative infrared thermographic nondestructive testing of thermal barrier coatings // Mater. Evaluation. – 2003. – V. 61. – № 6. – P. 773–780.
2. Maillat D., Andre S., Batsale J.-C., et al. Thermal quadrupoles: Solving the heat equation through integral transforms. – London: John Wiley & Sons Publ., 2000. – 360 p.

3. Zalameda J.N., Rajic N., Winfree W.P. A comparison of image processing algorithms for thermal nondestructive evaluation // Thermosense–XXV: Proc. SPIE. – Orlando, USA, 2003. – V. 5073. – P. 374–385.

Поступила 09.06.2010 г.

УДК 536.2.083

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ИМПУЛЬСНЫМ МЕТОДОМ ПРИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ЛУЧА

Г.В. Кузнецов, М.Д. Кац

Томский политехнический университет

E-mail: Katz@tpu.ru

Численно решена задача о пространственном нестационарном температурном поле образца материала при локальном неоднородном воздействии на его поверхность теплового импульса малой временной протяженности. Проведена оценка масштабов погрешностей определения теплофизических характеристик материала импульсным методом, связанная с предположением об одномерности процесса теплопереноса в образце и пространственной однородности лазерного импульса.

Ключевые слова:

Теплофизические характеристики, импульсный метод, методические погрешности, температуропроводность, удельная теплоемкость, теплопроводность.

Key words:

Thermophysical characteristics, pulse method, truncation error, thermal diffusivity, specific heat capacity, heat conductivity.

Введение

В последние десятилетия повышенное внимание привлекают импульсные методы определения коэффициентов температуропроводности и теплопроводности, а также теплоемкости материалов в условиях достаточно высоких температур. Наибольший интерес для решения этих задач представляет метод лазерного импульса [1–3], сущность которого состоит в поглощении в тонком слое фронтальной («горячей») поверхности образца импульса лучистой энергии и регистрации измерения во времени температуры его обратной («холодной») поверхности.

Полученная по итогам однократного эксперимента информация позволяет рассчитать удельную

теплоемкость, а также коэффициенты температуропроводности и теплопроводности материала с использованием выражений:

$$a = 1,37 L^2 / (\pi^2 \tau_{0,5}); \quad (1)$$

$$c = Q / (T_{\max} \rho L); \quad (2)$$

$$\lambda = ac\rho, \quad (3)$$

где L – толщина образца, м; ρ – плотность материала, кг/м³; a – температуропроводность, м²/с; $\tau_{0,5}$ – время достижения половины максимальной температуры перегрева «холодной» (ненагреваемой) поверхности образца, с; c – теплоемкость, Дж/(кг·К); Q – плотность теплового потока, поглощенная об-