

Кинетика поверхностных температур при лазерно-тепловой диагностике контактов

Н.К.Толочко, С.С.Пряхин, Ю.В.Хлопков

Витебский государственный технологический университет,
210035, г.Витебск, Московский просп., 72
Институт технической акустики НАНБ,
210717, г.Витебск, просп. Людникова, 13

Введение

Теплофизические особенности внутри объекта, поверхность которого подвергается воздействию теплового потока, оказывают влияние на теплоотвод и могут проявляться по температурному отклику. Лазерно-тепловая дефектоскопия использует данные тепловых сигналов, отвечающих переходным процессам нагрева и охлаждения поверхностей объектов под действием потока непрерывного лазерного излучения. Кинетики температур поверхности могут быть получены путем регистрации вторичного теплового излучения с помощью малоинерционных датчиков ИК-области спектра и обработки регистрируемого сигнала. Метод контроля является неразрушающим, и при необходимости может использоваться для оперативной проверки 100% выпускаемой продукции.

Использование лазерно-тепловой дефектоскопии представляет интерес для обнаружения брака в композициях, образующих тепловой контакт в месте соединений материалов: поверхностных покрытиях, паяных соединениях и др. [1, 2]. Недостаточная адгезия, отслоения, отклонения количества или структуры соединяющего материала оказывают влияние на отвод тепла от нагреваемой поверхности.

Настоящая работа посвящена проблеме выбора параметров, по которым возможно сопоставление кинетик поверхностных температур, в процессах контроля. Задача решалась математически с привлечением одномерной модели нестационарного процесса нагрева двухслойного тела поверхностным потоком тепла [3, 4].

Тепловая модель и постановка задачи

Рассматривается процесс нагрева тела под действием поверхностного теплового источника с равномерно распределенной по поверхности плотностью потока тепловой мощности q .

Тело состоит из слоев: верхнего, имеющего толщину h , и полубесконечного подслоя. Материалы характеризуются постоянными теплофизическими характеристиками, различающимися для верхнего слоя и подслоя: λ_1, λ_2 - коэффициенты теплопроводности; a_1, a_2 - коэффициенты температуропроводности.

Для описания процесса нагрева со временем t используем функции T_1, T_2 распределения температур по глубине тела z для верхнего слоя и подслоя соответственно.

Неидеальность теплопередачи от верхнего слоя нижнему моделируется введением в зону контакта теплового сопротивления R , объекта характеризующегося малой тепловой емкостью.

Стандартные процедуры замены переменных: $\theta = T \frac{\lambda_1}{q h}$; $Fo = t \frac{a_1}{h^2}$; $\zeta = \frac{z}{h}$ и введение параметров: $\beta = \frac{a_2}{a_1}$; $\gamma = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$; $Bi = \frac{1}{R} \cdot \frac{h}{\lambda_1}$ позволяют записать задачу теплопроводности в безразмерном виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta_1}{\partial Fo} &= \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial \zeta^2}; \quad 0 < Fo < +\infty; \quad 0 < \zeta \leq 1 \\ \frac{\partial \theta_2}{\partial Fo} &= \frac{\partial^2 \theta_2}{\partial \zeta^2}; \quad 0 < Fo < +\infty; \quad 1 < \zeta \leq +\infty \end{aligned} \quad (1)$$

с начальными условиями:

$$\theta_1 = 0; \quad \theta_2 = 0; \quad Fo = 0 \quad (2)$$

граничным условиями на краях:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta_1}{\partial \zeta} &= -1; \quad 0 < Fo < +\infty; \quad 0 < \zeta \leq 1 \\ \theta_2 &\rightarrow 0; \quad 0 < Fo < +\infty; \quad \zeta \rightarrow +\infty \end{aligned} \quad (3)$$

дополнительными условиями на границе контакта:

$$\frac{\partial \theta_1}{\partial \zeta} = \gamma \frac{\partial \theta_2}{\partial \zeta}; \quad 0 < Fo < +\infty; \quad \zeta = 1 \quad (4)$$

для объекта с идеальным контактом между слоями:

$$\theta_1 = \theta_2; \quad \zeta = 1 \quad (5.a)$$

для объекта с неидеальным контактом:

$$-\frac{\partial \theta_1}{\partial \zeta} = Bi(\theta_1 - \theta_2) \quad (5.b)$$

Полученные результаты и обсуждение

В случае идеального контакта задача (1)-(4), (5.a) имеет аналитическое решение:

$$\theta_1(\zeta, t) = 2Fo^{1/2} \left\{ \operatorname{ierfc} \frac{\zeta}{2Fo^{1/2}} + \sum_{n=1}^{\infty} g^n \left[\operatorname{ierfc} \frac{2n - \zeta}{2Fo^{1/2}} + \operatorname{ierfc} \frac{2n + \zeta}{2Fo^{1/2}} \right] \right\} \quad (6)$$

$$\theta_2(\zeta, t) = 2Fo^{1/2} \frac{\beta^{1/2}}{\gamma} (1 - g) \sum_{n=0}^{\infty} g^n \operatorname{ierfc} \frac{(2n + 1) + (\zeta - 1)\beta^{-1/2}}{2Fo^{1/2}} \quad (7)$$

$$\text{где: } g = \frac{1 - \gamma\beta^{-1/2}}{1 + \gamma\beta^{-1/2}} \quad (8)$$

Полученное нами решение (6)-(8) отличается от представленного в работе [3]. Однако, проведя процедуры дифференцирования и проверяя условия (1)-(4), (5.a), можно алгебраически убедиться в его справедливости.

Для неидеального контакта задача (1)-(4), (5.b) решалась численными методами. Поскольку в данном случае нас прежде всего интересовало влияние параметра Bi - числа Био, характеризующего состояние теплового контакта между слоями, данный параметр задачи в расчетах варьировался от 2^{-7} до 2^7 . Параметры задачи β , γ принимались равными единице. Временной предел в расчетах был выбран $Fo_{max} = 40$.

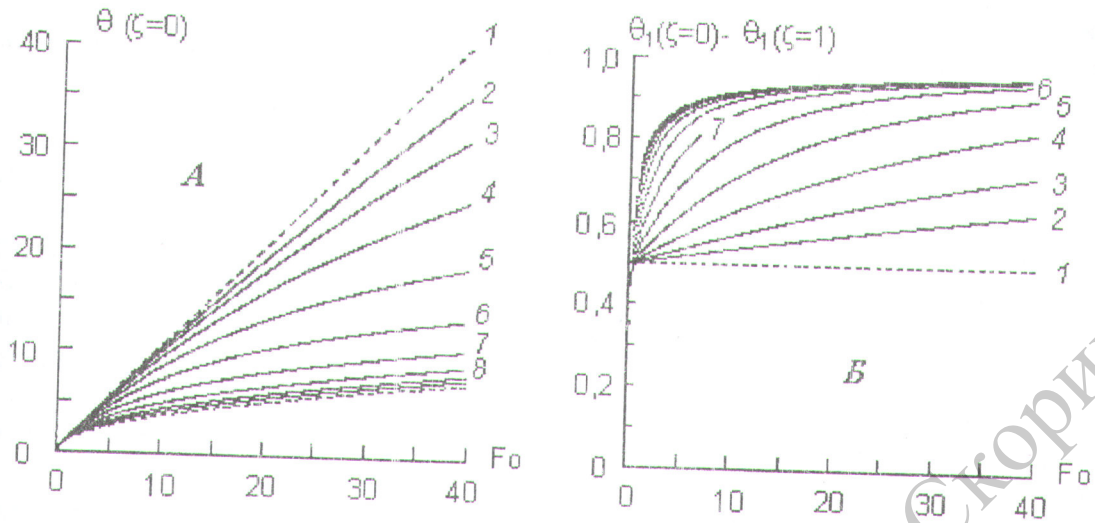


Рис. 1. Насыщение температуры поверхности $\theta(\zeta = 0)$ (А) и перепада температур на верхнем слое $\theta_1(\zeta = 0) - \theta_1(\zeta = 1)$ (Б) от времени Fo в условии нагрева тепловым потоком для разных значений числа Био: 1) $Bi = 0$; 2) $Bi = 2^{-7}$; 3) $Bi = 2^{-6}$; 4) $Bi = 2^{-5}$; 5) $Bi = 2^{-4}$; 6) $Bi = 2^{-3}$; 7) $Bi = 2^{-2}$; 8) $Bi = 2^{-1}$.

На рис.1(А) представлены характеристики насыщения температур поверхностей двухслойных систем в процессе нагрева тепловым потоком. $Bi = \infty$ и $Bi = 0$ получены из аналитического выражения (6) при значении $g = 0$ и $g = 1$. Характеристики объектов с неидеальными контактами располагаются между ними. Следует отметить малые отличия между собой характеристик, соответствующих значениям $2^{-1} < Bi < \infty$. Однако в условии монтажа на фольгированный материал в силу разницы сечений теплопровода в зоне контакта следует ожидать, что тепловое сопротивление существенно превысит сопротивление вывода, фиксируемого пайкой элемента. Этому соответствует возможность сопоставлять между собой кинетики нагрева соединений в процессе лазерного контроля, соответствующие значениям $Bi \ll 1$, т.е. в области сильного влияния данного параметра на ход температур. В случае локальной тепловой изоляции верхнего слоя (при отслоении покрытия) мы также имеем дело со случаем $Bi \ll 1$.

Анализ динамик перепада температур на верхнем слое рис.1(Б) показывает возможность выделить в его нарастания две компоненты: 1) $\Delta\theta_0$ - функция быстрого переходного процесса, отвечающая значению $Bi = 0$; 2) $\Delta\theta_{Bi}$ - дополнительная функция медленного переходного процесса:

$$\theta_1(\zeta = 0, Fo) - \theta_1(\zeta = 1, Fo) = \Delta\theta_0(Fo) + \Delta\theta_{Bi}(Fo) \quad (9)$$

Отметим, что временные масштабы компонентов переходных процессов соответственно: $\sim 0,5$ для $\Delta\theta_0(Fo)$ и $\sim 1/Bi$ для $\Delta\theta_{Bi}(Fo)$.

Отделение от характеристик насыщения температур поверхности $\theta(\zeta = 0, Fo)$ быстрой функции насыщения $\Delta\theta_0(Fo)$ показало, что получаемые функции являются медленно растущими. Причем для малых значений числа Био $0 < Bi < 2^{-3}$ временной ход дополнительной функции описывается приближенной формулой:

$$\theta(\zeta = 0, Fo) - \Delta\theta_0(Fo) = Bi^{-1}[1 - \exp(-BiFo)] \quad (10)$$

Таким образом, при обработке данных для $Bi \ll 1$ временной структуре характери-

стик насыщения поверхностных температур можно поставить в соответствие двухэкспоненциальный процесс с характерными временными параметрами быстрого и медленного τ_B , τ_M :

$$T = T_0 \left\{ \tau_M \left[1 - \exp \left(-\frac{t}{\tau_M} \right) \right] + \frac{\tau_B}{2} \left[1 - \exp \left(\frac{2t}{\tau_B} \right) \right] \right\} \quad (11)$$

Физический смысл параметров τ_B , τ_M - времена релаксации температур внутри верхнего слоя и стекания тепла из верхнего контакта соответственно. Внутренние особенности теплообмена объектов в первую очередь оказывают влияние на эти масштабы. Предэкспоненциальный множитель T_0 , пропорциональный плотности эффективно действующего на поверхность теплового потока, также заслуживает внимания в процессах диагностики как несущий информацию о взаимодействии поверхности с излучением и являющийся показателем состояния поверхности.

Для измерений абсолютных значений характерных времен насыщения и относительных для предэкспоненциального множителя целесообразно использовать участок спада температур по окончании лазерного нагрева; длительность импульса лазерного нагрева τ выбирать из соотношения $\tau_B \ll \tau \sim \tau_M$.

Заключение

Проведен анализ процесса нарастания температур поверхности объекта лазерно-теплового контроля, имеющего внутренний контакт теплофизически разнородных материалов, с использованием одномерной модели нагрева двухслойного тела. Для случая идеального теплового контакта между слоями получено аналитическое решение задачи теплопроводности.

Численные решения, отвечающие неидеальному тепловому контакту, позволили выявить во временном ходе нарастания поверхностных температур два характерные времени, отвечающие параметрам теплообмена между поверхностью и контактом верхнего слоя и между самим слоем и подслоем. Если термическое сопротивление контакта существенно превышает сопротивление верхнего слоя, то кинетика нагрева поверхности описывается двухэкспоненциальной временной функцией. Параметры функций имеют выраженный физический смысл, их использование целесообразно при выявлении и классификации дефектов в объектах контроля.

Abstract. The parameterization problem for laser-heating inspection of joints is considered.

Литература

- [1] Vanzetti R./Electronic Packaging and Production. 1984. V.24. No.2. P.117-121.
- [2] Толочко Н.К., Хлопков Ю.В., Каменков В.С., Пряхин С.С. *Лазерно-тепловой контроль качества приповерхностной структуры изделий и соединений* // Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения: Сб. научн. трудов /Под ред. С.А. Астапчика, П.А. Витязя. Мн.: Технопринт, ПГУ, 2001. С.515-518.
- [3] Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Кокора А.Н. *Лазерная обработка материалов*. М.: Машиностроение, 1975. 296 с.

- [4] *Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник* / Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Зувев И.В., Кокора А.Н. М.: Машиностроение, 1985. 496 с.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ имени Ф.СКОРИНЫ