

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ТЕПЛОВОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

В. А. СТОРОЖЕНКО, С. И. МЕЛЬНИК, А. Г. ЧУМАКОВ

Рассмотрена теплофизическая модель двухслойного теплозащитного покрытия с дефектами различных типов. Проведен сравнительный анализ схем проведения контроля. Решена задача оптимизации решения тепловой дефектоскопии покрытий. Предложены практические рекомендации по организации тепловизионного контроля теплозащитных покрытий.

The paper presents a thermophysical model of a two-layer thermal barrier coating with defects of various types. Comparative analysis of various schematics of control is given. The problem of optimization of the solution of thermal defectoscopy of coatings is solved. Practical recommendations are given on organizing thermovision control of thermal barrier coatings.

Постановка задачи. Известно, что для дефектоскопии теплозащитных покрытий наиболее приемлемым является тепловой метод контроля, сущность которого в полной мере согласуется с назначением, структурой и используемыми материалами объектов этого класса [1].

Теплозащитное покрытие (на примере конкретного изделия с покрытием АБН) как объект тепловой дефектоскопии (ТДС) представляет собой двухслойную пластину (рис. 1), параметры которой приведены в табл. 1.

Для покрытия АБН характерны следующие типы дефектов (рис. 1): 1 — воздушные пузырьки и инородные включения в слое металла А; 2 — то же в слое нетеплопроводящего покрытия В; 3 — воздушные расслоения и инородные включения на границе слоев.

Наличие разнородных дефектов с возможной дислокацией почти по всей толщине пластины существенно осложняет задачу оптимизации режима ТДС, поскольку для разных дефектов оптимальные значения параметров режима (максимальный температурный перепад ΔT_{\max} , время нагрева τ_n , время регистрации $\tau_{\text{рег}}$) могут оказаться разными [2]. Кроме того, теплофизическая модель объекта с дефектами, на основе анализа которой и производится оптимизация, должна быть максимально приближенной к реальному изделию, что в случае многовариантности дефектов обеспечить сложно. Например, известная подобная модель [1] ориен-

тирована не на обнаружение локальных дефектов, а на определение аномалий термического сопротивления теплозащитного слоя. Таким образом, задачей настоящих исследований являлось:

построение теплофизической модели АБН для трех типов дефектов;

анализ модели с целью получения зависимостей величины ожидаемого сигнала (температурного перепада ΔT) от параметров дефекта для каждого типа и определения оптимального режима и схемы проведения ТДС;

определение параметров порогового дефекта каждого типа;

выработка практических рекомендаций по проведению ТДС.

Теплофизическая модель теплозащитного покрытия. Схематически теплофизическая модель изделия АБН представлена на рис. 1. В ней учтены:

теплообмен с окружающей средой на обеих внешних поверхностях и боковой поверхности (коэффициент теплоотдачи α определен, по данным [3], как $\alpha \approx 4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; температура окружающей среды принята $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$);

возможность проведения ТДС по различным схемам (одно- и двусторонний контроль);

ограниченность времени теплового воздействия τ_n .

Математическое описание теплофизической модели базируется на решении двумерного уравнения теплопроводности Фурье в цилиндрической системе координат

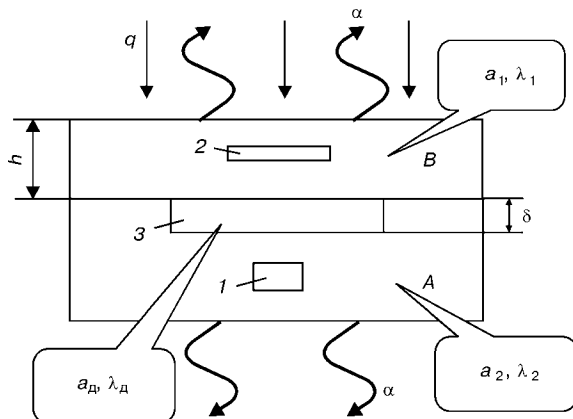


Рис. 1. Теплофизическая модель покрытия АБН (обозначения см. в тексте)

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial \lambda}{\partial r} \frac{\partial T}{\partial r} + \lambda \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (1)$$

и следующих граничных условиях:

$$T(\vec{r}, H) = 0, \quad \left(\alpha T - \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right)_{y=0} = q(\vec{r}_{\text{пов}}, \tau). \quad (2)$$

Таблица 1. Параметры теплозащитного покрытия

| Обозначение слоя | $a \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$ | $\lambda, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ | $h_c, \text{ мм}$ |
|------------------|--------------------------------------|---|-------------------|
| А (сталь) | 80 | 42,0 | 2,0 |
| В (покрытие АБН) | 2 | 3,2 | 8,0 |

Примечание: a — температуропроводность; λ — теплопроводность; h_c — толщина слоя.



Таблица 2. Параметры порогового дефекта типа инородного включения

| Тип дефекта | $a \cdot 10^6$, м ² /с | λ , Вт/(м·К) | h , мм | δ , мм | R_d , мм |
|--------------------------------|------------------------------------|----------------------|----------|---------------|------------|
| Воздушное включение в покрытие | 25 | 0,03 | 0,5 | 0,02 | 0,03 |
| | | | 1,0 | | |
| | | | 1,5 | | |
| Воздушное расслоение | | | 2,0 | 0,02 | 0,03 |
| | | | | 0,03 | |
| | | | | 0,04 | |
| Воздушное включение в подложке | | | 5,3 | 0,02 | 0,03 |
| | | | | 7,3 | |
| | | | | 9,3 | |

Решение уравнения осуществляется методом конечных разностей (сеточным методом), основанном на замене дифференциального уравнения теплопроводности конечно-разностным уравнением для значений температуры в узловых точках сетки.

Используется неявная схема счета, обладающая абсолютной устойчивостью и реализованная в виде оригинальной компьютерной программы «ОРТИМ». Рассчитанное с ее помощью температурное поле изделия с различными дефектами представлено на рис. 2. Кроме собственно решения прямой задачи нестационарной теплопроводности программа решает и задачу оптимизации режима ТДС, т. е. определения оптимальных значений (τ_n , τ_{per})_{opt} и соответствующей этому режиму величины сигнала от порогового дефекта ΔT_{max} .

Оптимизация проводится при условии ограничения максимальной температуры нагрева поверхности объекта $T_{доп}$. Для изделия с покрытием АБН, имеющего высокий уровень допустимых температур, принято $T_{доп} = 100$ °С. Выбранные для проведения расчетов численные значения характерных для покрытия АБН дефектов приведены в табл. 2.

При оптимизации режима контроля сопоставлялись следующие схемы проведения ТДС [4]:

A-A — нагрев и регистрация температуры со стороны металла (рис. 3, а);

B-B — нагрев и регистрация температуры со стороны покрытия (рис. 3, б);

A-B — нагрев металла, регистрация температуры на поверхности покрытия (рис. 3, в);

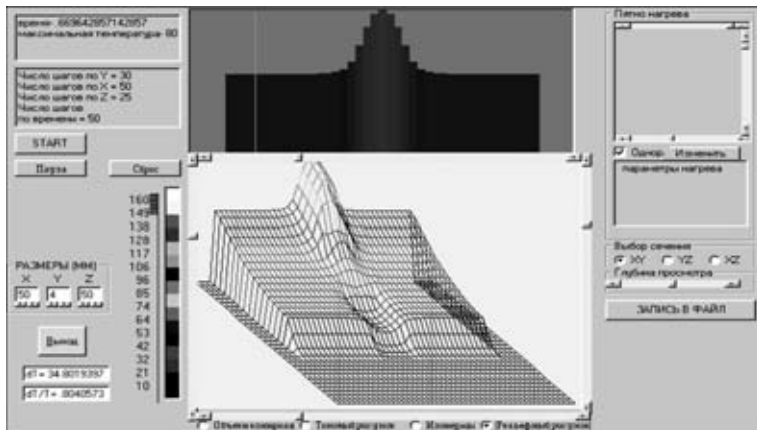


Рис. 2. Термограмма теплозащитных покрытий с дефектами

Таблица 3. Параметры режима контроля при ограничении температуры нагрева для теплозащитного покрытия с дефектами различного типа

| Размер дефекта | Оптимальная схема | Нагрев | | Регистрация | | |
|----------------------|-------------------|--------------|-----------------------------|--------------|----------------|--------------|
| | | τ_n , с | q , кВт/(м ²) | τ_n , с | ΔT , К | $\Delta T/T$ |
| <i>Дефект типа 1</i> | | | | | | |
| h_1 | A-A | 2,50 | 2534 | 2,60 | 138,3 | 1,64 |
| h_2 | | 2,85 | 2338 | 3,30 | 39,3 | 0,54 |
| h_3 | | 3,30 | 2129 | 4,10 | 12,87 | 0,18 |
| <i>Дефект типа 2</i> | | | | | | |
| h_1 | B-B | 46,5 | 36 | 49,0 | 1,74 | 0,024 |
| h_2 | | 40,0 | 37 | 41,0 | 3,36 | 0,041 |
| h_3 | | 10,5 | 59 | 11,0 | 8,27 | 0,100 |
| <i>Дефект типа 3</i> | | | | | | |
| δ_1 | A-A | 4,6 | 1696 | 5,8 | 3,68 | 0,049 |
| δ_2 | | 4,2 | 1809 | 5,2 | 5,51 | 0,074 |
| δ_3 | | 4,0 | 1871 | 5,0 | 7,64 | 0,104 |

B-A — нагрев покрытия, регистрация температуры на поверхности металла (рис. 3, г).

Анализ теплофизической модели. В результате решения прямой задачи нестационарной теплопроводности по упомянутой программе «ОРТИМ» сравнение четырех схем проведения ТДС для каждого из трех типов дефектов позволило найти оптимальные значения параметров режима контроля при ограничении температуры нагрева (уровнем 100 °С) и оптимальные схемы проведения ТДС. При этом определены ожидаемые уровни сигнала от дефектов (ΔT и $\Delta T/T$) с различными параметрами. Результаты анализа приведены в табл. 3.

Из полученных данных можно сделать следующие выводы.

1. Оптимальной схемой проведения ТДС для дефектов типа 1, 2 является схема односторонней ТДС, при которой контроль осуществляется с нагреваемой поверхности. При этом контроль должен выполняться со стороны того слоя, в котором находится дефект (соответственно схемы A-A и B-B для дефектов типов 1 и 2).

2. Оптимальной схемой проведения ТДС для дефектов типа 3 является схема односторонней ТДС, при которой контроль осуществляется с нагреваемой поверхности со стороны металла (A-A).

3. Полученные в оптимальных режимах перепады температур достаточны для выявления всех рассмотренных дефектов.

4. Использование чувствительных тепловизионных камер с разрешением по температуре не хуже 0,2 К позволит уменьшить геометрические параметры пороговых дефектов (до тех значений, при которых максимальный температурный перепад от дефекта превысит разрешение тепловизора $\Delta T_{тепл}$).

Однако реализовать на практике рассчитанный оптимальный режим ТДС крайне сложно. Это связано с тем, что большинство источников нагрева имеют плотность мощности теплового нагрева не выше 10^5 Вт/м², что на 1... 2 порядка ниже рассчитанных оптимальных уров-

Таблица 4. Параметры режима контроля при ограничении плотности тепловой мощности нагрева для теплозащитного покрытия с дефектами различного типа

| Размер дефекта | Оптимальная схема | Нагрев | | Регистрация | | |
|----------------------|-------------------|--------------|---------------|------------------|----------------|--------------|
| | | τ_n , с | T_{max} , К | $\tau_{рег}$, с | ΔT , К | $\Delta T/T$ |
| <i>Дефект типа 1</i> | | | | | | |
| h_1 | A-A | 9,9 | 10,7 | 10,0 | 8,40 | 0,787 |
| h_2 | | 99,0 | 87,0 | 100,0 | 3,90 | 0,036 |
| h_3 | | 60,0 | 45,5 | 62,5 | 1,66 | 0,042 |
| <i>Дефект типа 2</i> | | | | | | |
| h_1 | B-B | 90,0 | 249,5 | 92,0 | 6,37 | 0,025 |
| h_2 | | 90,0 | 249,5 | 92,0 | 11,4 | 0,045 |
| h_3 | | 86,0 | 247,5 | 88,0 | 20,28 | 0,082 |
| <i>Дефект типа 3</i> | | | | | | |
| δ_1 | A-A | 112,0 | 261,6 | 115,5 | 5,14 | 0,020 |
| δ_2 | | 206,5 | 330,5 | 210,0 | 5,58 | 0,017 |
| δ_3 | | 346,5 | 440,4 | 350,0 | 5,95 | 0,013 |

ней мощности теплового нагрева для указанных дефектов (табл. 3). Поэтому алгоритм оптимизации был изменен: вместо ограничения температуры нагрева было введено ограничение плотности мощности теплового нагрева q на уровне 10^5 Вт/м². Результаты этой оптимизации приведены в табл. 4.

Сравнительный анализ данных табл. 3 и 4 приводит к следующим выводам.

1. Оптимальная схема ТДС остается та же для дефектов типа 1 (A-A) и 2 (B-B), но изменяется для дефектов типа 3 (B-B).

2. При этом для дефектов типа 1 перепад температур ΔT существенно уменьшается (за счет уменьшения величины q), однако остается все еще достаточным для надежного выявления дефектов.

3. Для дефектов типа 2 и 3 перепад температур ΔT увеличивается в 2...3 раза в первую очередь за счет увеличения плотности мощности теплового нагрева q и снятия ограничения на величину T_{max} , что вполне допустимо для рассматриваемых покрытий.

4. Так как температура деструкции материала покрытия достигается лишь при трудно реализуемых мощностях, а режим оптимизации с ограничением плотности тепловой мощности обеспечивает выявляемость дефектов, то для практической реализации можно рекомендовать результаты оптимизации при наличии ограничения не на температуру, а на максимальную плотность мощности теплового нагрева.

5. При этом, как показывает анализ, в большом интервале плотности мощности теплового нагрева q временные параметры оптимального режима практически не изменяются, а температурный перепад ΔT и максимальная температура нагрева меняются пропорционально величине q .

Выводы и практические рекомендации. В результате теоретического анализа объекта контроля установлено, что максимальная выявляемость каждого из трех типов дефектов, характерных для покрытия АБН, обеспечивается соответствующим режимом контроля. При этом в качестве не зависящего от типа дефекта параметра режима контроля принята плотность мощности теплового нагрева $q = 10^5$ Вт/м².

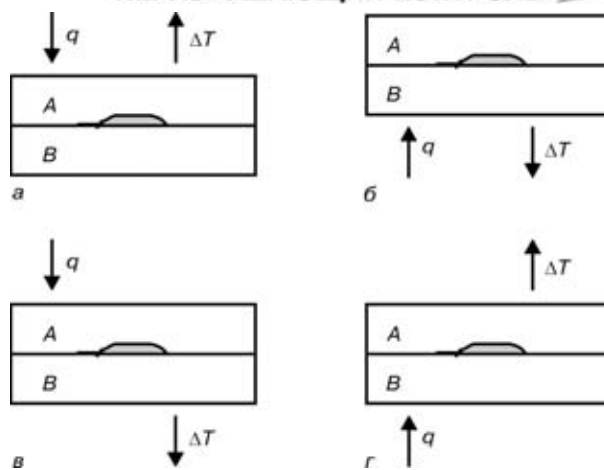


Рис. 3. Схема проведения ТДС (обозначения см. в тексте)

От типа дефекта зависит схема проведения ТДС:

для дефектов типа 2 и 3, представляющих собой соответственно воздушные или инородные включения в слое АБН или отслоения покрытия от подложки, — B-B, т. е. нагрев и регистрация со стороны покрытия АБН;

для дефектов типа 1 — B-A, т. е. нагрев со стороны покрытия АБН, а регистрация со стороны металла.

От параметров предполагаемого дефекта (глубины залегания h и раскрытия δ) зависят временные характеристики ТДС — время нагрева τ_n и регистрации $\tau_{рег}$. Таким образом, для обеспечения максимальной выявляемости каждого дефекта изделие необходимо контролировать многократно при различных τ_n и $\tau_{рег}$, что с практической точки зрения нецелесообразно.

Обычно для получения высокой производительности ТДС изделие контролируют один раз [3] в некотором «усредненно-оптимальном» режиме. Однако для покрытия АБН однократный контроль не приемлем, поскольку схема проведения ТДС для разных типов дефекта разная (B-A для типа 1 и B-B для типа 2, 3). Поэтому для практики можно рекомендовать двукратный контроль покрытия АБН: по схемам B-A (выявление дефектов типа 1) и B-B (выявление дефектов типов 2, 3).

В качестве «усредненно-оптимального» временного режима контроля по схеме B-A можно рекомендовать временные параметры, являющиеся оптимальными для дефекта с наихудшей выявляемостью (с максимальной глубиной залегания h): время нагрева $\tau_n = 60$ с и регистрации $\tau_{рег} = 62,5$ с, т. е. через 2,5 с после окончания нагрева. В качестве такого же режима по схеме B-B предлагается время нагрева $\tau_n = 112$ с и регистрации $\tau_{рег} = 115,5$ с (через 3,5 с после окончания нагрева).

Для оценки производительности ТДС по предлагаемой методике могут быть использованы следующие критерии:

суммарное время контроля одного «кадра» $\tau_k = \tau_{рег}$ и производительность контроля $P = S/\tau_{рег}$, где S — площадь кадра (ориентировочно 20×15 см²).

Более строгий подход к выбору площади кадра основывается на следующих соображениях.



1. Для исключения пропуска порогового дефекта (поперечный размер l_{\min}) необходимо условие [5]

$$n = \frac{l_{\min}}{\Delta l} \gg 1,$$

где Δl — линейный размер пикселя тепловизора; обычно $n = 5 \dots 10$.

2. Из этого неравенства определяется размер кадра тепловизора (регулируется расстоянием до объекта)

$$L_{x,y} = N_{x,y} \Delta l = N_{x,y} l_{\min} / n,$$

где $N_{x,y}$ — число пикселей в кадре тепловизора (соответственно по осям x и y).

3. Отсюда находится площадь кадра тепловизора

$$S = L_x L_y,$$

по которой и рассчитывается производительность ТДС.

Существенное ограничение на размеры кадра накладывается размерами поля нагрева, определя-

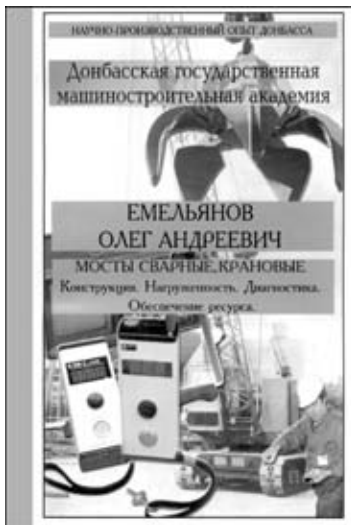
емые параметрами площадочного нагревателя. Главным условием является неравномерность нагрева, которая для выявления дефектов с пределом температур $\Delta T \geq 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ не должна превышать 1 % в пределах кадра при обеспечении ограничения $q \geq 10^5 \text{ Вт/м}^2$. Для этого применяют специальные конструктивные решения [3]. Обычно для исключения «краевого эффекта» площадь поля нагрева S выбирают значительно больше размеров кадра.

1. *Стороженко В. А., Мельник С. И.* Контроль качества теплозащитных пленочных покрытий активным тепловым методом // Тез. Всесоюз. науч.-техн. конф. «Оптические, радиоволновые и тепловые методы неразрушающего контроля», Могилев, 1989. — Ч. 2. — С. 81–83.
2. *Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий.* Справочник / Под ред. В. В. Клюева. — М.: Машиностроение, 1976. — Кн. 1. — 391 с.
3. *Стороженко В. А., Вавилов В. П., Волчек А. Д.* Неразрушающий контроль качества промышленной продукции активным тепловым методом. — Киев: Техника, 1988. — 127 с.
4. *ГОСТ 23483–79.* Неразрушающий контроль. Методы теплового вида. Общие требования. — М., 1979.
5. *Вавилов В. П.* Тепловые методы неразрушающего контроля. Справочник. — М.: Машиностроение, 1991. — 240 с.

Харьков. нац. ун-т радиозлектроники,
ФГУП «ММП», Москва

Поступила в редакцию
04.06.2002

НОВАЯ КНИГА



О. А. Емельянов. Мосты сварные, крановые. Конструкция. Нагруженность. Диагностика. — Краматорск: Донбас. гос. машиностр. академия, 2002. — 332 с.

Рассмотрены повреждения, возникающие при эксплуатации сварных крановых мостов. Показано, что причина их — не низкая прочность сварных соединений, а снижение требований к точности изготовления, недостаточные сведения об условиях эксплуатации и нагруженности, рациональности конструкции сварных узлов моста и его схемно-компоновочного решения. Показано влияние различных конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов, а также двухчастотных нагрузок и вторичных напряжений на техническое состояние сварных мостов.

В книге изложены следующие основные вопросы: итоги применения и недостатки сварных крановых мостов, а также пути совершенствования их конструкций; результаты теоретических и экспериментальных исследований силового взаимодействия колеса крана с рельсом и влияние его на процесс формирования горизонтальных и вертикальных реакций; физическая модель продольного и поперечного скольжения при качении

колеса по рельсу; причины и механизм образования «перекосной» силы при движении крана; энергетические аспекты силового взаимодействия кранов с путями и эстакадами и процессы накопления усталостных повреждений; пути снижения реактивных нагрузок на краны и эстакады и анализ «ходовых качеств» кранов в зависимости от конструктивного исполнения (шарнирных соединений в мосту, крутильной жесткости главных и концевых балок, мест установки приводных и не приводных ходовых колес) и многое другое.

Монография предназначена для специалистов, занимающихся исследованием, проектированием, диагностикой, эксплуатацией и ремонтом грузоподъемных кранов, а также студентов старших курсов вузов по специальности ПТМ.

По вопросу приобретения книги обращайтесь по адресу:
84313, Донецкая обл., г. Краматорск, ул. Шкадинова, 72, Емельянов О. А.
тел. (0026) 41 75 73; 41 71 40