

В. А. СТОРОЖЕНКО, д-р техн. наук, проф., ХНУРЭ, Харьков;
О. В. ЛАЗОРЕНКО, д-р физ.-мат. наук., проф., ХНУРЭ, Харьков;
А. В. МЯГКИЙ, асп., ХНУРЭ, Харьков

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕПЛОВОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ СОТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ЦЕЛЬЮ ПОНИЖЕНИЯ УРОВНЯ ПОМЕХ

Статья посвящена борьбе с помехами вида неоднородности нагрева, неоднородности излучательной способности поверхности изделия, а также помехой, вызванной разнотолщинностью клеевого слоя, при обнаружении методом тепловой дефектоскопии дефектов типа непроклей в сотовых конструкциях. Методы снижения указанных типов помех основаны как на выборе соответствующего режима контроля, так и на обработке результатов термографирования (термограмм и термофильмов) с учетом природы соответствующих помех.

Ключевые слова: тепловая дефектоскопия, сотовая конструкция, помехи, вейвлет анализ.

Введение. В последние годы в различных областях науки и техники все активнее используются новые материалы и конструкции, в частности, конструкции с сотовой структурой.

К сожалению, как известно, усложнение любой системы, с одной стороны, повышает ее возможности, а с другой стороны, ведет к снижению надежности такой системы. Это же наблюдается и при использовании сотовых конструкций. Один из существенных недостатков – это возникновение дефектов во время технологического процесса их изготовления. Как правило, выделяют несколько типов таких дефектов, а именно: отслоение, непроклей, расслоение, деформация сотового наполнителя.

Известно, что для выявления дефектов типа «непроклей» перспективно применение активного метода теплового контроля [1,2] при использовании тепловизора в качестве регистрирующего устройства. Последнее объясняется тем, что тепловизор обладает высокой чувствительностью к обнаружению подобных дефектов и большой производительностью контроля.

Однако реализовать потенциальные возможности этого метода на практике не всегда удается вследствие наличия значительных помех, обусловленных неоднородностью излучательной способности поверхности сотовой структуры и разнотолщинностью клеевого слоя. Кроме того, для создания избыточного температурного поля необходим одновременный нагрев определенной площади объекта контроля (ОК) площадочным нагревателем, для которого характерна неравномерность температурного поля, создаваемого на поверхности ОК. В частности, имеет место так называемый «краевой эффект», что представляет собой дополнительную помеху. Попытаться устранить указанные недостатки можно как на этапе проведения измерений, так и при обработке полученных результатов. Этим объясняется *актуальность* данной работы.

Целью настоящих исследований являлся поиск путей подавления указанных помех как путем оптимизации режима тепловой дефектоскопии (ТДС), так и путем создания алгоритмов обработки ее результатов (термограмм).

Для достижения поставленной цели использовался теоретико-экспериментальный подход, сочетающий в себе построение и анализ теплофизической

© В. А. Стороженко, О. В. Лазоренко, А. В. Мякий, 2013

модели сотовой структуры и проведение эксперимента на реальных образцах с дефектами.

Теоретические исследования

В качестве геометрической модели ОК выбрана трехслойная пластина (что адекватно отражает реальную конструкцию сотовой структуры), состоящая из углепластиковой обшивки, между двумя слоями которой помещен сотопласт с неоднородностью (рис. 1). Дефект типа «непроклей» между обшивкой и сотопластом моделируется воздушной прослойкой.

При описании происходящих процессов нами используется цилиндрическая система координат (r, φ, z) , где r – радиальная координата, z – вертикальная координата. Угловая координата φ из расчетов исключена в виду того, что представленная модель ОК обладает центральной симметрией.

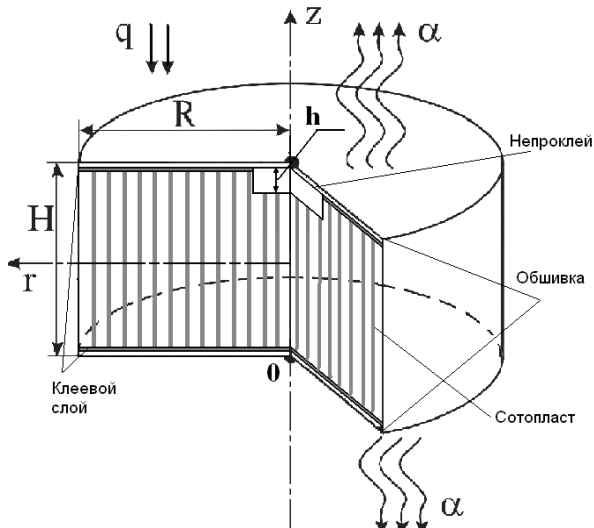


Рис. 1 – Объект контроля: R – радиус ОК; H – толщина ОК; q – мощность нагрева; α – коэффициент теплоотдачи поверхности, h – толщина дефекта

В предложенной теплофизической модели неоднородный по структуре слой сотопласта (рис. 2) был заменен однородным эквивалентным слоем с усредненными теплофизическими характеристиками (ТФХ): удельной теплоемкостью c' , плотностью ρ' и коэффициентом теплопроводности λ' . Для определения усредненных значений использованы следующие соотношения:

$$c' = \langle c \rangle = \frac{V_1 C_1 + V_2 C_2}{V_1 + V_2}, \quad (1)$$

$$\rho' = \langle \rho \rangle = \frac{V_1 \rho_1 + V_2 \rho_2}{V_1 + V_2}, \quad (2)$$

$$\lambda' = \langle \lambda \rangle = \frac{V_1 \lambda_1 + V_2 \lambda_2}{V_1 + V_2}, \quad (3)$$

где V_1 – объем полимера;

V_2 – объем воздуха;

c_1, ρ_1, λ_1 – ТФХ полимера;

c_2, ρ_2, λ_2 – ТФХ воздуха.

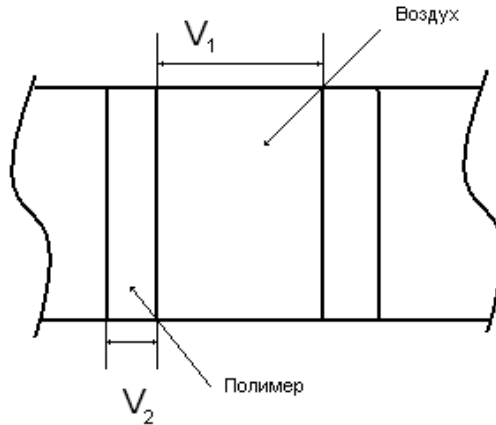


Рис. 2 – Схема слоя сотопласта, состоящего из ячеек с полимерными стенками, заполненных воздухом

На внешних поверхностях ОК выполняются граничные условия 2-го и 3-го рода:

$$z = H: \quad \left(\lambda(\vec{r}, t) \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial z} \right) = \alpha(T(\vec{r}, t) - T_{\text{среды}}) - q(\vec{r}, t), \quad (4)$$

$$z = 0: \quad -\lambda(\vec{r}, t) \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial z} = -\alpha(T(\vec{r}, t) - T_{\text{среды}}), \quad (5)$$

$$z = h: \quad -\lambda_1(\vec{r}, T, t) \left(\frac{\partial T_1(\vec{r}, t)}{\partial z} \right) = -\lambda_2(\vec{r}, T, t) \left(\frac{\partial T_2(\vec{r}, t)}{\partial z} \right) \quad (6)$$

где $T(\vec{r}, t)$ – координатно-временная функция температуры;

$\lambda(\vec{r}, T, t)$ – коэффициент теплопроводности материалов ОК;

$q(\vec{r}, t)$ – плотность потока тепла от внешнего источника (нагревателя).

Теплофизическая модель, основанная на геометрической модели (рис. 1), описывается граничными условиями (4) – (6), отражающими реальные условия

проведения ТДС [1], т.е. нагрев ОК внешним источником тепла q и теплообмен с окружающей средой с коэффициентом α .

Особенностью данной модели в отличие от ряда известных [1, 3] является одновременный учет и теплоотдачи с нагреваемой поверхности, и теплопроводности через дефект (воздух).

Анализ построенной теплофизической модели производится путем решения нестационарного дифференциального уравнения теплопроводности [4], записанного для выбранной цилиндрической системы координат:

$$\operatorname{div}(\vec{\lambda}(\vec{r}, T) \nabla T(\vec{r}, t)) + q(\vec{r}, t) = c\rho \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial t}. \quad (7)$$

Для решения уравнения (7) применялся численный (сеточный) метод конечных разностей.

Этот метод успешно реализован в ранее разработанном авторами программном пакете «TermoPro_2009S» [5]. В качестве числового материала использовались справочные данные по одной из разновидностей сотовых структур (табл. 1).

Таблица 1 – Характеристики материалов ОК

Характеристики материалов	Углепластик обшивки	Полимерный сотовый наполнитель
Теплопроводность (Вт/м К)	0,3 – 0,9	0,065
Степень черноты	0,8 – 0,82	-
Толщина (мм)	0,8	28
Размер ячейки (мм)	-	2,5

Численные параметры моделируемого дефекта (воздушная прослойка) были выбраны следующими: глубина залегания $h = 0,8$ мм (что соответствует толщине обшивки), раскрытие (толщина) $\delta = 0,2$ мм (соответствует толщине клеевого слоя), поперечный размер $l = 5$ мм (соответствует размеру двух ячеек).

Анализ разработанной теплофизической модели осуществлялся по методике, заложенной в указанном выше программном пакете. Ее суть вкратце такова.

Проводилось решение уравнения (7) с граничными условиями (4) – (6) относительно искомой величины в виде температурного контраста ΔT на поверхности ОК над местом залегания дефекта [1]. При этом варьировались параметры режима проведения ТДС: плотность потока тепла q , продолжительность нагрева поверхности ОК τ_n , время запаздывания τ_3 (промежуток времени между окончанием нагрева и регистрацией температурного поля). Макси-

мальная температура нагрева поверхности ОК ограничивалась значением 100°C (во избежание деструкции материала).

Из полученного массива значений q , τ_H , τ_3 определялся оптимальный режим ТДС по критерию $\Delta T \rightarrow \Delta T_{\max}$ (табл. 2).

Таблица 2 – Результаты расчета оптимального режима ТДС

q , кВт/м ²	τ_H , с	τ_3 , с	ΔT_{\max} , °C
28	15	4,4	1,61

Экспериментальные исследования

Для проверки результатов, полученных теоретическим путем, были проведены экспериментальные исследования на образце сотовой структуры, параметры которой приведены в табл. 1. Образец содержал два искусственных дефекта типа «непроклей» с размерами:

- 1) 40 x 70 (мм)
- 2) 20 x 80 (мм)

Остальные параметры дефектов соответствовали расчетным: глубина $h = 0,8$ мм, раскрытие $\delta = 0,2$ мм.



Рис. 3 – Внешний вид исследуемой пластины с обозначенными местами расположения дефектов

Для проведения экспериментов использовался тепловизор IRTIS – 200 в сочетании с созданным авторами площадочным нагревателем излучательного

типа с неравномерностью нагрева по полю кадра 12%. Время нагрева τ_H регулировалось таймером.

На рис. 4 в качестве примера приведены две из множества полученных термограмм, иллюстрирующие влияние режима контроля на сигнал от дефекта, т. е. величину температурного контраста ΔT .

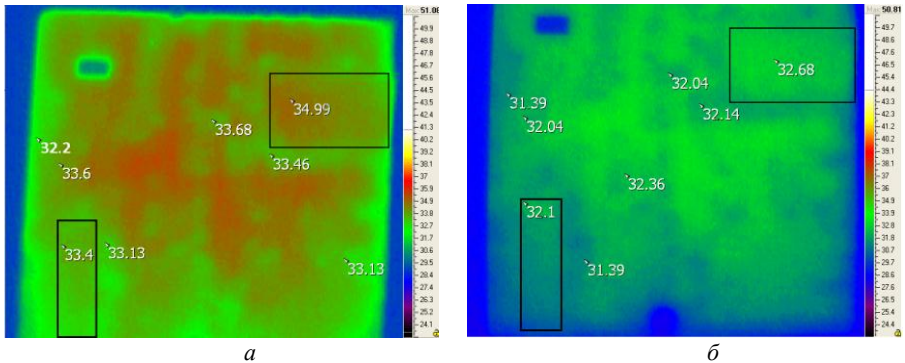


Рис. 4 – Термограммы ОК:

а – в оптимальном режиме (средняя температура по поверхности $T_{cp} = 33,36^\circ\text{C}$); *б* – в неоптимальном режиме (средняя температура по поверхности $T_{cp} = 32,01^\circ\text{C}$)

Из термограмм видно, что в оптимальном режиме тепловой контраст, вызванный дефектом в правом верхнем углу ОК ($\Delta T = 1,53^\circ\text{C}$), существенно выше, чем в неоптимальном ($\Delta T = 0,54^\circ\text{C}$). Где $\Delta T = T_c - T_o$, T_c - средняя температура по кадру, T_o - температура над дефектом.

Таким образом за счет оптимизации проведения контроля удастся повысить величину сигнала от дефекта и улучшить его выявляемость.

Однако наряду с полезным сигналом на термограммах присутствуют и температурные контрасты вызванные помехами (шумовой сигнал), сопоставимые по величине с полезным сигналом: $\Delta T_{ш} = 2,6^\circ\text{C}$. Это не позволяет однозначно идентифицировать дефекты по амплитудному принципу, т. е. по величине температурного контраста ΔT .

Подавление помех путем обработки результатов ТДС

Подавление помехи неоднородности нагрева путем обработки результатов ТДС с использованием вейвлет-анализа.

Одним из важнейших факторов успешного обнаружения тепловых дефектов типа «непроклей» является использование в экспериментальных исследованиях для одновременного нагрева заданной площади ОК площадочного нагревателя, который в идеальном случае мог бы создавать равномерное тем-

пературное поле по всей нагреваемой поверхности. К сожалению, на практике в подавляющем большинстве случаев этого достичь не удастся. В частности, имеет место так называемый «краевой эффект», что представляет собой, разумеется, дополнительную помеху.

Поэтому постараться снизить негативное влияние неравномерности нагрева исследуемой поверхности ОК можно на этапе цифровой обработки полученных экспериментальных данных.

В качестве одного из возможных вариантов такой обработки предлагается использование возможностей аппарата вейвлет-анализа.

Вейвлет-анализ, сформировавшийся как математический аппарат в конце 1980-х – начале 1990-х гг., успешно применяется в самых различных областях науки и техники. На сегодняшний день вейвлеты уже нашли широкое применение в задачах распознавания и идентификации образов, при обработке и синтезе сигналов, при анализе изображений и т. п. [6, 7].

Основная идея вейвлет-преобразования, в частности, одномерного сигнала состоит в его разложении по базису, сконструированному из обладающей определенными свойствами локализованной функции (вейвлета) посредством масштабных изменений и переносов. Каждая из функций этого базиса характеризуется как определенную пространственную (или временную) частотную составляющую сигнала, так и локализацию этой составляющей в физическом пространстве (или времени) [6].

Аппарат вейвлет-анализа включает в себя большое количество всевозможных вейвлет-преобразований (ВП) [6, 7], однако в этой работе нас интересуют одномерное и двумерное диадные ВП. Рассмотрим их подробнее.

Известно, что для ортонормальных вейвлетных базисов на двоичной решетке разработаны алгоритмы кратномасштабного анализа (КМА). КМА основывается на следующих предпосылках:

- ✓ пространство сигналов V может быть разбито на иерархически вложенные подпространства V_j , которые не пересекаются и объединение которых дает в пределе $L^2(\mathbb{R})$;
- ✓ для любой функции $s(t) \in V_j$ ее сжатая версия принадлежит пространству V_{j-1} ;
- ✓ существует такая функция $\varphi(x) \in V_0$, для которой ее сдвиги $\varphi_{0,k} = \varphi(t - k)$, $k \in \mathbb{Z}$ образуют ортонормированный базис пространства V_0 .

Тогда поскольку функции $\varphi_{0,k}(t)$ образуют ортонормированный базис пространства V_0 , функции $\varphi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \varphi(2^{-j}t - k)$ также образуют ортонормированный базис в V_0 . Скейлинг-функцию $\varphi(t)$ (отцовский вейвлет) принято называть масштабирующей функцией, так как она посредством $\varphi_{j,k}(t)$ создает свои

масштабированные версии в пространстве сигнала. Сигнал $s(t)$ может быть представлен множеством последовательных приближений $s_j(t)$ в подпространствах V_j . Переменная j называется масштабным коэффициентом. Сигнал $s(t)$ является пределом аппроксимации $s_j(t) \in V_j$ при $j \rightarrow \infty$, т. е. $s(t) = \lim_{j \rightarrow \infty} s_j(t)$. Поэтому при малых j получаются грубые приближения $s(t)$, а при больших – точные.

Функция $\Psi \in L^2(\mathbb{R})$; называется R-функцией, если базис $\{\psi_{jk}\}$, определяемый выражением

$$\psi_{jk}(t) = 2^{-j/2} \psi(2^{-j}t - k), \quad j, k \in \mathbb{Z}; \quad (8)$$

где \mathbb{Z} ; – множество целых чисел, является базисом Рисса [6, 7], т. е. существуют две константы A_w и B_w , $0 < A_w \leq B_w < \infty$, для которых соотношение, называемое вейвлетным каркасом,

$$A_w \left\| \{c_{jk}\} \right\|^2 \leq \left\| \sum_{j \in \mathbb{Z}} \sum_{k \in \mathbb{Z}} c_{jk} \psi_{jk} \right\|^2 \leq B_w \left\| \{c_{jk}\} \right\|^2$$

выполняется при любой (ограниченной, дважды квадратично суммируемой) последовательности $\{c_{jk}\}$:

$$\left\| \{c_{jk}\} \right\|^2 = \sum_{j \in \mathbb{Z}} \sum_{k \in \mathbb{Z}} |c_{jk}|^2 < \infty.$$

Базис Рисса является безусловным, т. е. в нем порядок размещения векторов может быть произвольным.

Любая локализованная R-функция $\Psi \in L^2(\mathbb{R})$ называется R-вейвлетом (материнским вейвлетом или просто вейвлетом), если для нее существует функция $\dot{\Psi} \in L^2(\mathbb{R})$; (ее пара, двойник), такая, что семейства $\{\psi_{jk}\}$ и $\{\dot{\psi}_{jk}\}$, построенные по принципу соотношения (8) и

$$\dot{\psi}_{jk}(t) = 2^{-j/2} \dot{\psi}(2^{-j}t - k), \quad j, k \in \mathbb{Z};$$

являются парными базисами функционального пространства $L^2(\mathbb{R})$.

Здесь $\{\dot{\psi}_{jk}\}$ – «двойник» базиса $\{\psi_{jk}\}$ в том смысле, что скалярное произведение входящих в них функций удовлетворяет условию:

$$\langle \psi_{jk}, \psi_{lm} \rangle = \delta_{jl} \delta_{km},$$

где δ_{jl}, δ_{km} – символы Кронекера.

В общем случае реконструкция сигнала на n -ом уровне разрешения j_n задается выражением:

$$s(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_{j_n, k} \varphi_{j_n, k}(t) + \sum_{j=j_n}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_{j, k} \psi_k(t), \quad (9)$$

где $a_{j_n, k}$ и $d_{j, k}$ – аппроксимирующие и детализирующие коэффициенты на n -ом уровне разложения соответственно. Они определяются соотношениями:

$$a_{j_n, k} = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \varphi_{j_n, k}(t) dt \quad d_{j, k} = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \psi_{j, k}(t) dt. \quad (10)$$

Вейвлет $\psi(t)$ определяет тонкую структуру анализируемого сигнала, а скейлинг-функция $\varphi(t)$ отвечает за его грубую аппроксимацию (см., например, [6, 7]).

Пара соотношений (9) и (10) определяет одномерное диадное вейвлет-преобразование.

В случае двумерного диадного вейвлет-преобразования одномерный исследуемый сигнал $s(t)$ заменяется на функцию двух переменных $s(x, y)$, частным случаем которой является изображение.

Тогда и вейвлетный базис тоже становится функцией двух переменных:

$$\psi_{j, k}(V) = 2^{-j/2} \psi(2^{-j}V - k), \quad \varphi_{j, k}(V) = 2^{-j/2} \varphi(2^{-j}V - k), \quad (11)$$

где $V = x, y \in \mathbb{Z}^2$, $(j, k) \in \mathbb{Z}^2$. В результате, любое изображение может быть представлено с помощью двумерного диадного вейвлет-преобразования, определяемого соотношениями (9) и (10) с использованием соотношений (11).

В рамках данной работы нас интересовала возможность выравнивания пространственного распределения теплового поля используемого нами нагревателя. Пример такого реального распределения приведен на рис. 5, а.

Предлагаемая идея вейвлет-обработки изображения состоит в следующем. Сначала используя прямое двумерное диадное вейвлет-преобразование, разлагаем исходное изображение нагревателя с применением максимально возможного количества уровней разложения n . Последнее определяется разрешением анализируемого цифрового изображения. Затем приравниваем нулю все аппроксимирующие и детализирующие коэффициенты на этом максимальном уровне разложения и восстанавливаем изображение с помощью обратного двумерного диадного вейвлет-преобразования. В результате получаем суще-

ственно выравненное пространственного распределения теплового поля используемого нами нагревателя (рис. 5, б). Разность между исходным изображением и восстановленным демонстрируется на рис. 5, в. По сути дела, предложенный алгоритм реализует применение к исходному изображению фильтра низких пространственных частот, убирающего вариации теплового поля с наибольшими пространственными масштабами. Это не приводит к потере информации о дефектах, поскольку их характерные пространственные масштабы обычно оказываются меньше.

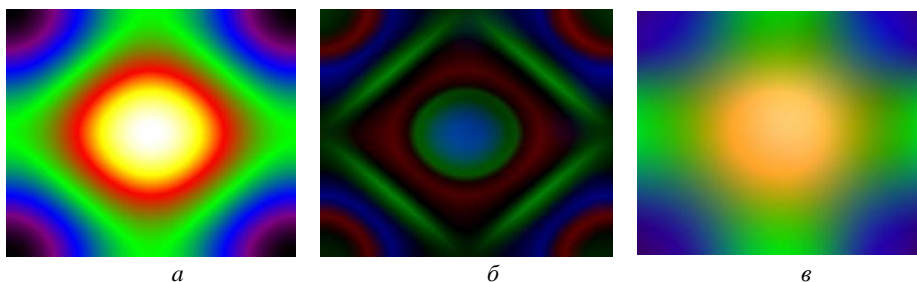


Рис. 5 – Неравномерность пространственного распределения теплового поля используемого источника: *а* – без обработки; *б* – после вейвлет-обработки с использованием дискретного вейвлета Мейера (dmeu) с применением восьми уровней разложения; *в* – разность между первым и вторым пространственными распределениями

Вместе с тем, возникает вопрос выбора анализирующего вейвлета, поскольку на сегодня существуют сотни различных вейвлетов, в том числе и двумерных. Основным критерием отбора является геометрия теплового поля, создаваемого нагревателем. В нашем случае оно центрально симметрично, поэтому и анализирующий вейвлет должен быть симметричным. К тому же рекомендуется, чтобы он был достаточно гладким. Одним из таких вейвлетов является дискретный вейвлет Мейера (dmeu), который и использовался нами в данной работе.

Далее полагаем, что воздействие всех мешающих факторов на реальный исследуемый образец является аддитивным. В этом случае для компенсации неоднородности пространственного распределения теплового поля нагревателя каждое исследуемое изображение реального образца необходимо обработать с помощью того же алгоритма, что и изображение нагревателя. Разумеется, должен использоваться тот же выбранный вейвлет и то же количество уровней разложения.

Снижение влияния неоднородности излучательной способности поверхности образца

Известно, что для оценки влияния неоднородности излучательной способности $\Delta \varepsilon$ принято использовать эквивалентный ей температурный перепад

ΔT_{ε} [3]. С помощью описанной выше теплофизической модели было проведено исследование временной зависимости $\Delta T_{\varepsilon}(t)$, т. е. помехи, в сравнении с аналогичной временной зависимостью температурного перепада от дефекта $\Delta T_{\text{деф}}(t)$, т. е. полезного сигнала.

Оказалось, что характер этих временных зависимостей принципиально отличается (рис. 6): моменты времени, соответствующие максимальным значениям помехи $\Delta T_{\varepsilon}(t)$ и полезного сигнала $\Delta T_{\text{деф}}(t)$ не совпадают: сигнал от помехи достигает максимума сразу по окончании нагрева, т. е. в момент времени τ_{H} , а полезный сигнал – с определенным временем запаздывания τ_3 .

Этот факт открывает возможность максимизировать отношение сигнал/шум $\Delta T_{\text{деф}} / \Delta T_{\varepsilon}$ путем выбора соответствующего момента регистрации температурного поля на поверхности объекта контроля.

В частности, согласно данным рис. 6 при выборе времени контроля $\tau_3 = 4,4$ с соотношение сигнал/шум равно $\Delta T_{\text{деф}} / \Delta T_{\varepsilon} = 1,2$, а при $\tau_3 = \tau_{\text{опт}} = 6,2$ с это отношение составляет $\Delta T_{\text{деф}} / \Delta T_{\varepsilon} = 1,6$, что на 26% больше предыдущего.

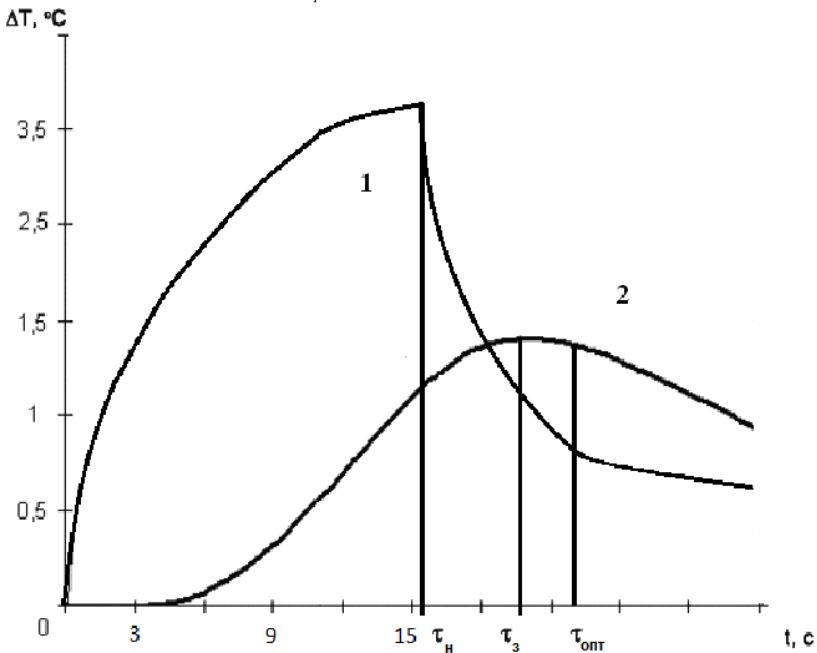


Рис. 6 – Развитие во времени помехи $\Delta T_{\varepsilon}(t)$ (1) и сигнала от дефекта $\Delta T_{\text{деф}}(t)$ (2)

Данный вывод относительно выбора оптимального момента регистрации $\tau_{\text{опт}}$ справедлив и для рассмотренной выше помехи, вызванной неравномерностью нагрева поверхности ОК.

Оптимизация режима контроля по критерию максимума отношения сигнал/помеха (вместо максимума полезного сигнала) позволяет оценивать порог чувствительности метода в зависимости от неравномерности излучательной способности $\Delta\varepsilon / \varepsilon$: можно определить минимальный поперечный размер дефекта r или его максимальную глубину залегания h [5].

Устранение помехи, вызванной разнотолщиной клевого слоя.

Разнотолщинность клевого слоя можно представить как эквивалентное изменение термического сопротивления ОК, которое приводит к появлению температурных контрастов на его поверхности, достигающих значений (как показывает эксперимент) $4,2^{\circ}\text{C}$, что сопоставимо с полезным сигналом ΔT , вызванным наличием дефекта. Однако анализ полученных экспериментальных данных показал, что эти контрасты отличаются от полезного сигнала пространственно-временной зависимостью $\Delta T(\tau, x)$. Этот факт лег в основу предложенного метода подавления этой помехи путем компьютерной обработки термограмм с использованием зависимости $\partial T(x) / \partial x$ (рис. 7).

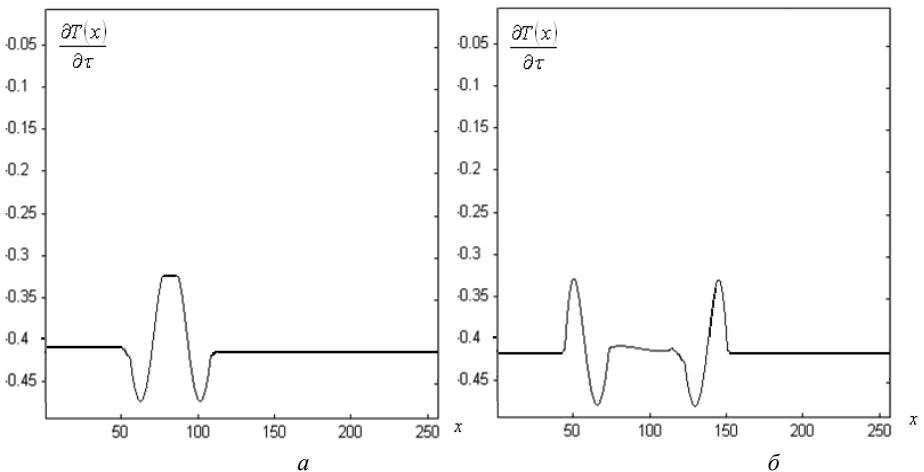


Рис. 7 – Частная производная от температуры поверхности по времени в зависимости от координаты для области:
 a – для участка с помехой; b – над дефектом

Суть данного метода заключается в вычислении двумерной матрицы, элементами которой являются соответствующие частные производные по времени:

$$F_{i,j} = \frac{\partial F'_{i,j}(x, y)}{\partial t}, \quad (5)$$

где $F'_{i,j}(x, y)$ – элемент матрицы скорректированных температур;

i, j – целые числа, номера соответствующих пикселей по x и y ;

$F_{i,j}$ – элемент характеристической матрицы.

Расшифровав $F_{i,j}$, используя зависимости, приведенные на рис. 7, получаем конечный вид термограммы после обработки (рис. 9). Сравнение этой термограммы с исходной (рис 8) подтверждает тот факт, что достоверность обнаружения дефектов (даже визуальным путем) существенно возросла после обработки. Количественная же оценка показывает уменьшение сигнала помехи данного вида более чем в 1,5 раза.

Последнее является крайне важным, поскольку создает предпосылки для перехода в условиях производства от визуальной идентификации дефектов к автоматизированной.

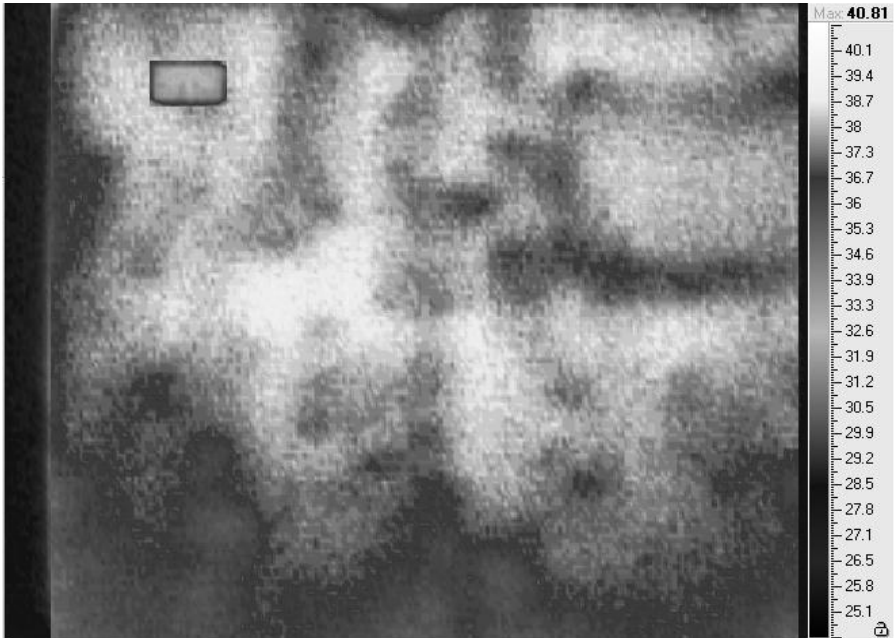


Рис. 8 – Исходная термограмма

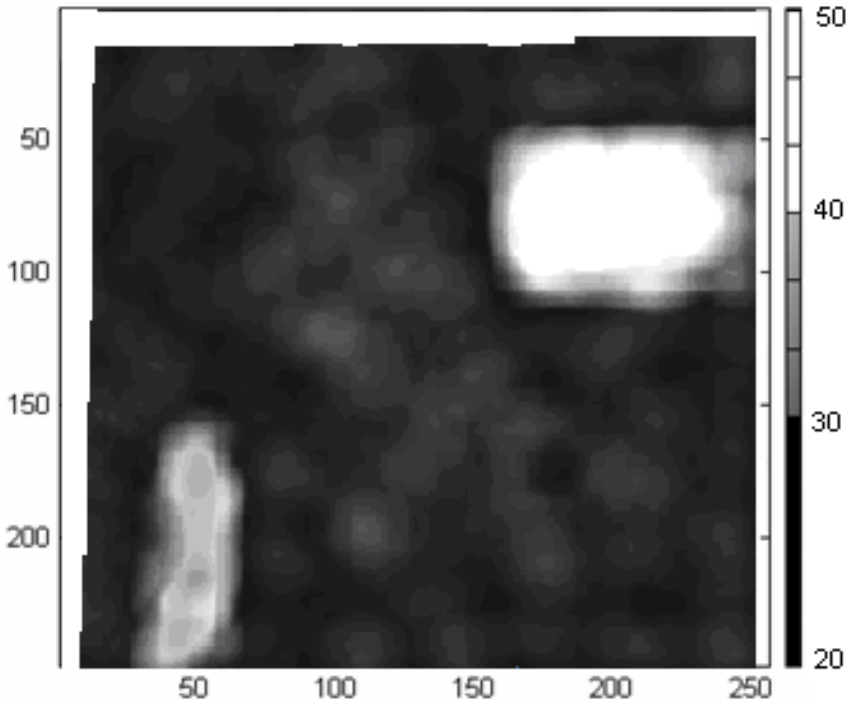


Рис. 9 – Термограмма после обработки

Выводы.

1. Разработана теплофизическая модель ОК, более полно (по сравнению с аналогами) отражающая реальные условия проведения тепловой дефектоскопии сотовых конструкций и, благодаря этому, позволяющая оценивать ожидаемую величину сигнала от дефекта с достаточной точностью (погрешность порядка 10%).

2. Создана методика оптимизации режима проведения тепловой дефектоскопии, основанная на критерии максимизации не самого полезного сигнала, а соотношения сигнал/шум, что позволяет расширить границы применимости метода на ОК, поверхность которых имеет неравномерность излучательной способности ε .

3. Предложены методы для борьбы с помехами, вызванными неоднородностью нагрева, неоднородностью излучательной способности поверхности образца и разнотолщинностью клеевого слоя, как за счет оптимизации метода контроля, так и за счет обработки полученных результатов, в частности, использования методов вейвлет-анализа.

4. В результате применения предложенных методов было достигнуто снижение уровня помех связанных с неоднородностью нагрева до $0,7^{\circ}\text{C}$ (вместо $1,4^{\circ}\text{C}$), снизить помеху, вызванную неоднородностью излучательной способности ε , удалось до $0,6^{\circ}\text{C}$ (вместо 2°C), а температурный контраст, вызванный разнотолщиной клеевого слоя, снизить до $0,2^{\circ}\text{C}$ (вместо $1,2^{\circ}\text{C}$).

Список литературы: 1. *Стороженко В.А., Маслова В.А.* Термография в диагностике и неразрушающем контроле. – Х.: «Смит», 2004. – 160 с. 2. *Xavier P. V. Maldague.* Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing. – John Wiley & Sons, Inc., 2001, p. 684. 3. *Вавилов В.П.* Инфракрасная термография и тепловой контроль. – М.: ИД Спектр, 2009. – 544 с.: ил. и цветная вкладка 16 с. 4. *Лыков А.В.* Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 602 с. 5. *Стороженко В.А., Малик С.Б., Мягкий А.В.* Оптимизация режимов тепловой дефектоскопии на основе теплофизического моделирования // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Прилади і методи неруйнівного контролю. – Харків: НТУ «ХПІ» – №48. – 2008. – С. 84 – 91. 6. *Mallat S.* A Wavelet Tour of Signal Processing. The Sparse Way. – N. Y.: Academic Press, 2008. – 805 p. 7. *Лазоренко О. В., Черногор Л. Ф.* Сверхширокополосные сигналы и процессы. Монография. – Х.: Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, 2009. – 576 с.

Надійшла до редколегії 15.04.2013

УДК 621.396.6

Обработка результатов тепловой дефектоскопии сотовых конструкций с целью понижения уровня помех/ В.А.Стороженко, О.В. Лазоренко, А. В. Мягкий// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Х. : НТУ «ХПІ», 2013. – № 34 (1007). – С. 108–112. – Бібліогр.: 7 назв.

Стаття присвячена боротьбі із завадами виду неоднорідності нагрівання, неоднорідності випромінювальної здатності поверхні виробу, а також завадою, що викликана різнотовщиною клейового шару, при виявленні методом теплової дефектоскопії дефектів типу непоклей в стільникових конструкціях. Методи зниження вказаних типів завод базуються як на виборі відповідного режиму контролю, так і на обробці результатів термографіювання (термограм та термофільмів) з урахуванням природи відповідних завод.

Ключові слова: тепла дефектоскопія, стільникова конструкція, завада.

The paper is devoted to heating nonuniformity, emissivity nonuniformity, and thickness variation of the adhesive layer interferences reduction techniques at starved spot detection in a honeycomb sandwich by the thermal test. Those techniques are based on corresponding testing mode selection, thermal test results (infrared images and sequences) processing taking into account those interferences nature.

Keywords: thermal test, honeycomb sandwich, interference.