



ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕДУРЫ ТЕПЛОВОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ СОТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В.А. СТОРОЖЕНКО¹, А.В. МЯГКИЙ¹, С.Б. МАЛИК¹, В.Г. ТИХИЙ²

¹Харьковский нац. ун-т радиоэлектроники. Харьков, 61166, пр-т Ленина, 14. E-mail: Fizika@kture.kharkov.ua

²ГП «Конструкторское бюро «Южное». 49008, Днепропетровск, ул. Криворожская. E-mail: info@yuzhnoye.com

Построена теоретическая модель теплофизических процессов в многослойной сотовой конструкции, заполненных полимерным сотовым пластом. Рассчитаны режимы оптимального контроля сотовых конструкций на наличие дефектов типа непрочлея по критерию оптимизации сигнал/помеха. Предложен ряд способов борьбы с высокими помехами, вызванными неоднородностью излучательной способности и клевого слоя, основанных на дифференциальной фильтрации термограмм, полученных в оптимальном режиме контроля. Проведен ряд экспериментов по выявлению указанных дефектов с применением разработанных подходов. Библиогр. 5, табл. 1, рис. 8.

Ключевые слова: тепловая дефектотметрия, сотовая конструкция, дефект типа непрочлея, оптимальный режим контроля

Сотовые конструкции являются одним из наиболее распространенных конструкционных материалов в авиации, космической технике и других отраслях, где к надежности комплектующих предъявляются повышенные требования. Особое внимание уделяется недопущению таких дефектов как места непрочлея (отслоения) между обшивкой и сотовым наполнителем.

Для выявления дефектов типа непрочлея перспективно применение активного метода теплового контроля [1,2] (при использовании тепловизора в качестве регистрирующего устройства), который имеет высокую чувствительность к обнаружению подобных дефектов и большую производительность контроля.

Однако реализовать потенциальные возможности этого метода на практике не всегда удается вследствие значительных помех, обусловленных неоднородностью излучательной способности поверхности сотовой структуры и разнотолщиной клевого 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.

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 цели использовали теоретико-экспериментальный подход, сочетающий по-

строение и анализ теплофизической 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 сотовый пласт (рис.1), с неоднородностью. Дефект типа непрочлея между обшивкой и сотовым пластом моделируется воздушной прослойкой, приведенной на рис. 1.

Используется цилиндрическая система координат, где r – радиальная координата; z – вертикальная координата. Угловая координата из расчетов исключена ввиду того, что в представленной модели ОК абсолютно симметричен по этой координате.

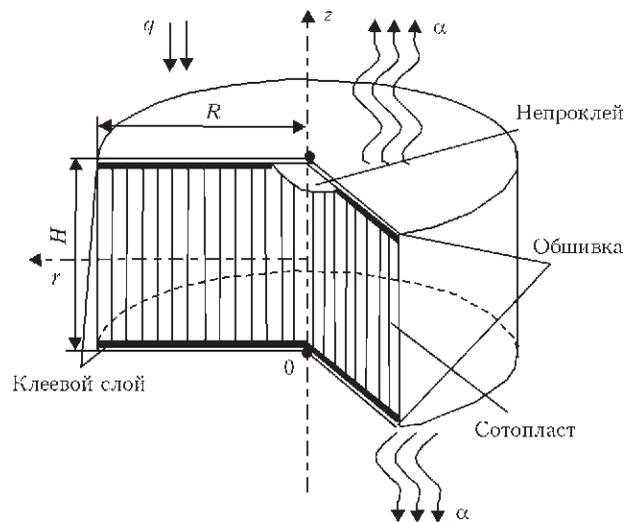


Рис. 1. Объект контроля: R – радиус; H – толщина; q – мощность нагрева; α – коэффициент теплоотдачи поверхности

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 использовали 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.

Теплофизическая модель, основанная на геометрической модели (см. 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 .

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

для $z = H$

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

для $z = 0$

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

для $z = h$

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

где $T(\vec{r}, t)$ – координатно-временная функция температуры; $\lambda(\vec{r}, t)$ – коэффициент теплопроводности материалов ОК; $q(\vec{r}, t)$ – плотность потока тепла от внешнего источника (нагревателя).

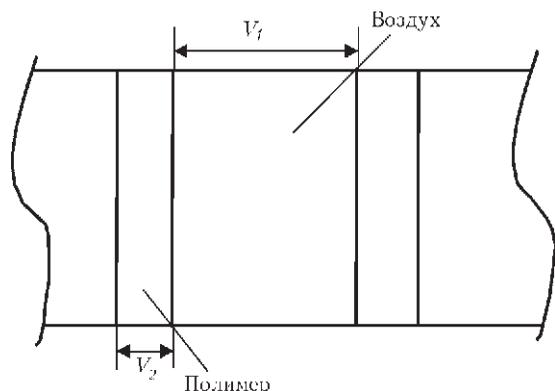


Рис. 2. Схема слоя сотопласта, состоящего из ячеек с полимерными стенками, заполненных воздухом

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 проводится путем решения дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности [4], записанного для выбранной цилиндрической системы координат:

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

Для решения уравнения (7) применяли численный (сеточный) метод конечных разностей, для реализации которого использовали ранее разработанный авторами программный пакет «TermoPro_2009S» [5]. В качестве числового материала использовали справочные данные по одной из разновидностей сотовых структур (таблица).

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, а именно: 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). Максимальная температура нагрева поверхности ОК ограничивалась значением 100°C (во избежание деструкции материала).

Из полученного массива значений q, τ_n, τ_3 определялся оптимальный режим ТДС по критерию $\Delta T \rightarrow \Delta T_{\text{max}}$: $q = 28 \text{ кВт/м}^2$; $\tau_n = 15 \text{ с}$; $\tau_3 = 4.4 \text{ с}$; $\Delta T_{\text{max}} = 1,61^\circ\text{C}$.

Экспериментальные исследования. Для проверки результатов, полученных теоретическим путем, провели экспериментальные исследования на

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



Рис. 3. Исследуемая пластина с обозначенными местами расположения дефектов

образце сотовой структуры, параметры которой приведены в таблице (рис. 3). Образец содержал два искусственных дефекта типа «непроклей» с размерами, мм: 40×70; 20×80.

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

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_n регулировалось таймером.

На рис. 4 приведены две из множества полученных термограмм, иллюстрирующие влияние режима контроля на сигнал от дефекта, т.е. ΔT .

Из термограмм видно, что в оптимальном режиме тепловой контраст, вызванный дефектом ($\Delta T=1,53$ °C), существенно выше, чем в неоптимальном ($\Delta T=0,54$ °C).

Однако наряду с полезным сигналом на термограммах присутствуют и температурные контрасты, вызванные помехами (шумовой сигнал), сопоставимые по величине с полезным сигналом: $\Delta T_{ш}=2,6$ °C. что не позволяет

однозначно идентифицировать дефекты по амплитудному принципу, т.е. по ΔT .

Подавление помех путем обработки результатов ТДС. *Подавление помехи, вызванной неоднородностью нагрева.* Для компенсации неоднородности нагрева предложено использовать нормировку обратной функции распределения мощности нагрева $q(x, y)$ по площади кадра. Прямая функция была получена экспериментальным путем с помощью измерителя мощности ИМО-2. Дальнейшую компьютерную обработку термограмм проводили по следующему алгоритму: значение температуры в каждом пикселе термограммы (в виде матрицы) компенсировалось по уравнению:

$$F' = \frac{q_{\max}}{q} F, \quad (8)$$

где F – матрица значений температур термограммы; F' – матрица скорректированных значений T ; q – матрица значений мощности нагрева; q_{\max} – максимальный элемент q .

В результате такой обработки неоднородность температурного поля, вызванная неравномерностью нагрева, была снижена в два раза (рис. 5).

Снижение влияния неоднородности излучательной способности поверхности образца. Известно, что для оценки влияния неоднородности излучательной способности $\Delta \epsilon$ принято использовать эквивалентный ей температурный перепад ΔT_{ϵ} [3]. С помощью описанной выше теплофизической модели было проведено исследование временной зависимости $\Delta T_{\epsilon}(t)$, 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 ΔT_{ϵ} и полезного сигнала $\Delta T_{\text{деф}}$ не совпадают: сигнал от помехи

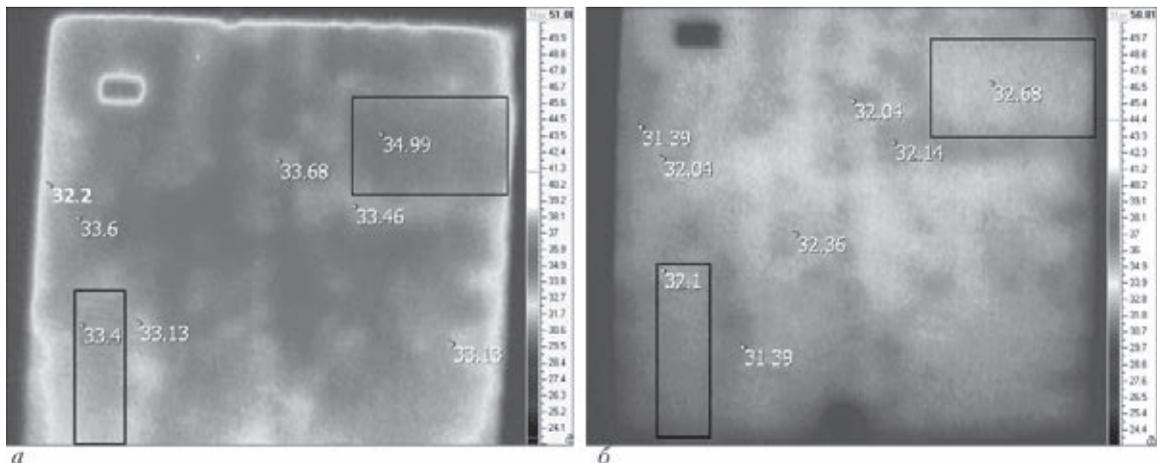


Рис. 4. Термограммы ОК: а – в оптимальном режиме (средняя температура по поверхности $T_{cp}=33,36$ °C); б – в неоптимальном режиме ($T_{cp}=32,01$ °C)



достигает максимума сразу по окончании нагрева, т.е. в момент времени τ_n , а полезный сигнал – с определенным временем запаздывания τ_3 .

Это открывает возможность максимизировать отношение сигнал/шум (т.е. $\Delta T_{\text{деф}}/\Delta T_\epsilon$) путем выбора соответствующего момента регистрации температурного поля на поверхности объекта контроля.

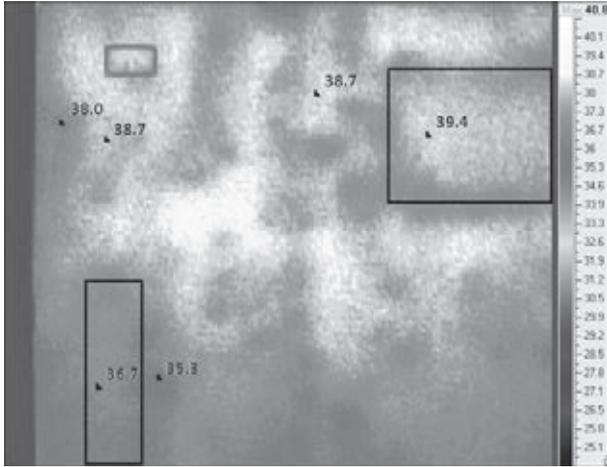


Рис. 5. Термограмма после корректировки помехи, вызванной неоднородностью нагрева

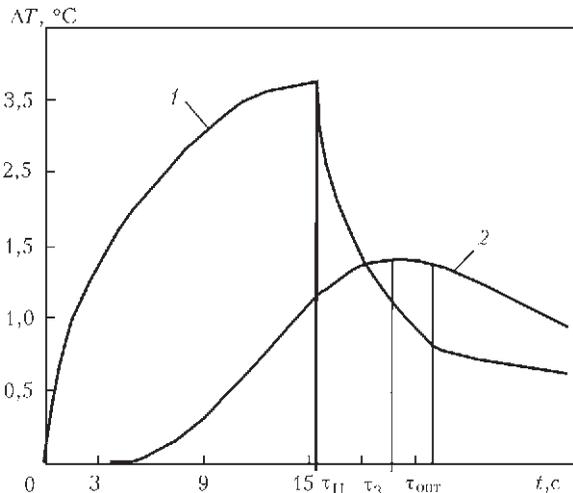


Рис. 6. Развитие во времени помехи ΔT_ϵ (1) и сигнала от дефекта $\Delta T_{\text{деф}}$ (2)

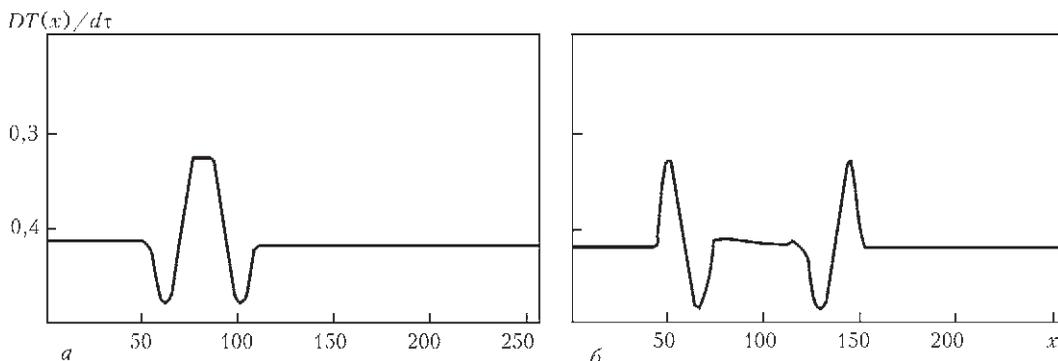


Рис. 7. Частная производная от температуры поверхности по времени в зависимости от координаты для участка с помехой (а) и для области над дефектом (б)

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

Данный вывод относительно выбора 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 оценить порог чувствительности метода в зависимости от неравномерности излучательной способности $\Delta\epsilon/\epsilon$: можно определить минимальный поперечный размер r дефекта или его максимальную глубину залегания h [5].

Устранение помехи, вызванной разнотолщинностью клеевого слоя. Разнотолщинность клеевого 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 , вызванное дефектом).

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 $\frac{\partial T(x)}{\partial \tau}$ (рис.7).

Суть 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 $F'_{i,j}$ – элемент матрицы скорректированных температур; i, j – целые числа, номера соответствую-

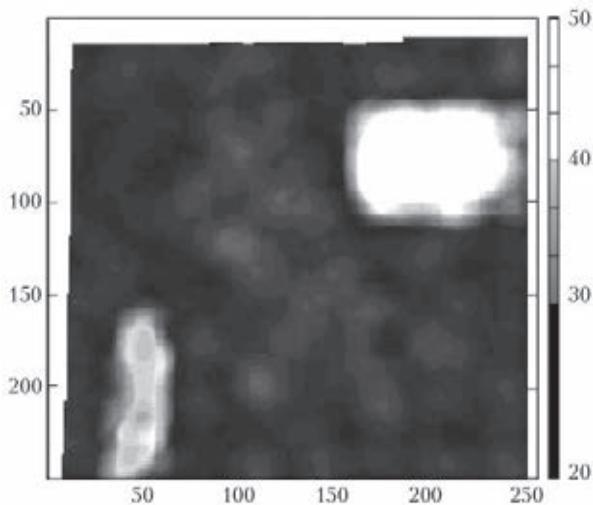


Рис. 8. Термограмма после обработки

ющих пикселей по x и y ; $F_{i,j}$ – характеристическая матрица.

Расшифровав $F_{i,j}$, используя зависимости, приведенные на рис. 7, получаем конечный вид термограммы после обработки (рис. 8). Сравнение этой термограммы с исходной (рис. 4, а) 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.

Это создает предпосылки для перехода (в условиях производства) от визуальной идентификации дефектов к автоматизированной.

Выводы

Разработана теплофизическая модель ОК, более полно (по сравнению с аналогами) отражающая реальные условия проведения тепловой дефектоскопии сотовых конструкций и, благо-

даря этому, позволяющая оценивать ожидаемую величину сигнала от дефекта с достаточной точностью (погрешность порядка 10 %).

Предложена 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 .

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 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 разнотолщинностью клеевого слоя, снизить до $0,2^\circ\text{C}$ (вместо $1,2^\circ\text{C}$).

1. *Стороженко В. А., Маслова В. А.* Термография в диагностике и неразрушающем контроле. – Харьков.: 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.
4. *Львов А.В.* Теория теплопроводности. – М.: Высш. шк., 1967. – 602 с.
5. *Стороженко В. А., Малик С. Б., Мякий А. В.* Оптимизация режимов тепловой дефектоскопии на основе теплофизического моделирования // Вісн. Нац. техн. ун-ту «ХПІ». Зб. наук. праць. Тематичний випуск: Прилади і методи неруйнівного контролю. – Харків: НТУ «ХПІ» – № 48. – 2008. – С. 84–91.

A theoretical model of thermophysical processes in a multilayer honeycomb structure, filled with polymer honeycomb plastic, was constructed. Modes of optimum testing of honeycomb structures for defects of the type of lacks-of-adhesion by the criterion of signal/noise optimization were calculated. Methods for eliminating high noise caused by nonuniformity of the emittance and of adhesive layer are proposed, which are based on differential filtering of thermograms derived in the optimum testing mode. A number of experiments have been conducted to detect the above defects with application of the developed approaches. 5 References, 1 Table, 8 Figures.

Keywords: thermal flaw detection, honeycomb structure, lack-of-adhesion type defect, optimum testing mode

Поступила в редакцию
07.11.2011