

- Girin, O. B. Phenomenon of Precipitation of Metal Being Electrodeposited, Occurring via Formation of an Undercooled Liquid Metal Phase and its Subsequent Solidification. Part 2. Experimental Verification [Text] / O. B. Girin // Materials Development and Processing. – Weinheim : WILEY-VCH, 2000. – Vol. 8. – P. 189–194.
- Girin, O. B. Phase and Structure Formation of Metallic Materials Electrodeposited via a Liquid State Stage: New Experimental Proof [Text] / O. B. Girin // Defect and Diffusion Forum. – 2010. – V.303-304. – P.99–105.
- Юдин, С. Б. Центробежное литье [Текст] : монография / С. Б. Юдин, С. Е. Розенфельд, М. М. Левин - М. : Машгиз, 1962. – 360 с.

УДК 621.396.6

*Розглянуто теплофізичну модель процесу виявлення дефектів типу непроклей в сотових конструкціях. Проведено експериментальну перевірку даної моделі в оптимальному режимі контролю*

*Ключові слова: сотова конструкція, теплова дефектоскопія, непроклей*

*Рассмотрена теплофизическая модель процесса обнаружения дефектов типа непроклей в сотовых конструкциях. Проведена экспериментальная проверка данной модели в оптимальном режиме контроля*

*Ключевые слова: сотовая конструкция, тепловая дефектоскопия, непроклеи*

*In this work the thermal-physical model of the starved spots in the honeycomb sandwich detection process was considered. The given model experimental verification in optimal test mode was provided*

*Key words: honeycomb sandwich, infrared testing, starved spot*

# ТЕПЛОФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ТЕПЛОВОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ СОТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ, ЕЕ АНАЛИЗ И ПРОВЕРКА

**В. А. Стороженко**

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой\*

Кафедра физики

E-mail: fizika@kture.kharkov.ua

**А. В. Мягкий**

Аспирант\*

Кафедра физики

E-mail: shoor\_80@mail.ru

**С. Б. Малик**

Кандидат технических наук, ассистент\*

Кафедра физики

Контактный тел.: (057) 7021345

E-mail: s\_malyk@ukr.net

**Д. А. Беденко**

студент гр. БИКС-10-2

\*\*Харьковский национальный университет радиоэлектроники

пр. Ленина, 14, г. Харьков, Украина, 61166

Контактный тел.: (057) 7021345

E-mail: manteque@mail.ru

## 1. Введение

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 как места непроклея (отслоения) между обшивкой и сотовым наполнителем.

Известно, что для выявления дефектов такого рода перспективно применение применение активного метода теплового контроля [1,2], который сочетает в себе

высокую чувствительность к обнаружению подобных дефектов с высокой чувствительностью контроля (при использовании тепловизора в качестве регистрирующего устройства).

Однако реализовать потенциальные возможности этого метода на практике не удается в следствии значительных помех, обусловленных неоднородностью излучательной способности поверхности сотовой структуры и разнотолщинностью клевого слоя. Кроме того, для использования тепловизора необходим одновременный нагрев определенной площади ОК (площадный нагреватель), что неминуемо ведет к

неравномерности температурного поля (в частности, «краевой эффект») и возникновению еще одного вида помех.

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

Для достижения цели использовался теоретико-экспериментальный подход, сочетающий в себе построение в себе построение и анализ теплофизической модели сотовой структуры и проведения эксперимента на реальных образцах с дефектами.

## 2. Теоретические исследования

В качестве геометрической модели объекта контроля (ОК) выбрана трехслойной пластины что адекватно отражает реальную конструкцию сотовой структуры, состоящей из углепластиковой обшивки, между двумя слоями которой помещен сотопласт рис.1, с неоднородностью. Дефект типа непрочлей между обшивкой и сотопластом, моделируется воздушной прослойкой. приведенной на рис.1. Используется цилиндрическая система координат:  $r$  - радиальная координата;  $z$  - вертикальная координата;

Угловая координата, из расчетов исключена в виду того что в представленной модели ОК абсолютно симметричен по этой координате.

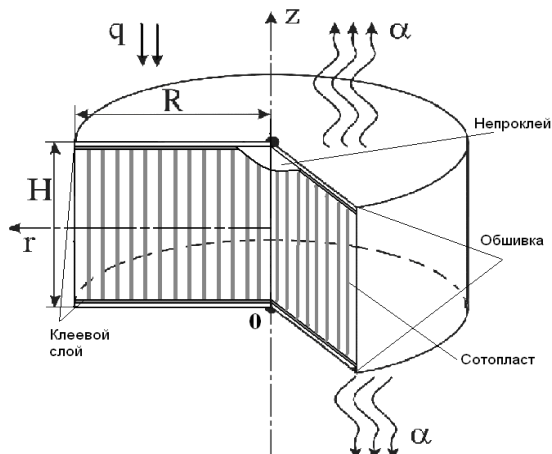


Рис. 1. Объект контроля: R - радиус ОК; H - толщина ОК; q - мощность нагрева;  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи поверхности.

В выбранной теплофизической модели слой сотопласта (рис.2) был заменен эквивалентным слоем с теплофизическими характеристиками  $c, \rho, \lambda$ , описываемыми следующими уравнениями.

$$c' = \langle c \rangle = \frac{V_1 C_1 + V_2 C_2}{V_1 + V_2} \tag{1}$$

$$\rho' = \langle \rho \rangle = \frac{V_1 \rho_1 + V_2 \rho_2}{V_1 + V_2} \tag{2}$$

$$\lambda' = \langle \lambda \rangle = \frac{V_1 \lambda_1 + V_2 \lambda_2}{V_1 + V_2} \tag{3}$$

где  $V_1$  – объем полимера;  
 $V_2$  – объем воздуха;  
 $c', \rho', \lambda'$  - теплофизические характеристики (ТФХ) эквивалентного слоя;  
 $c_1, \rho_1, \lambda_1$  - теплофизические характеристики полимера;  
 $c_2, \rho_2, \lambda_2$  - теплофизические характеристики воздуха;

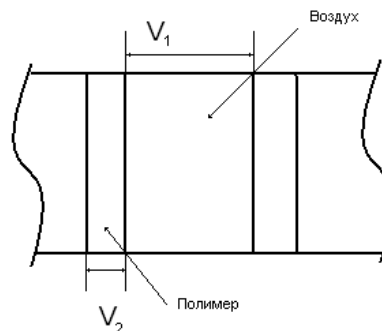


Рис.2. Схема слоев сотопласта.

Теплофизическая модель (рис.1) построенная по данной геометрической модели и задается граничными условиями (4),(5),(6), отражающими реальные условия проведения ТДС [1], т.е. нагрев ОК внешним источником тепла  $q$ , теплообмен с окружающей средой с коэффициентом  $\alpha$ .

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

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

$$z=0 \quad -\lambda(\vec{r},t) \frac{\partial T(\vec{r},t)}{\partial n} \Big|_S = -\alpha \left( T(\vec{r},t) \Big|_S - T_{\text{среды}} \right) \tag{5}$$

$$z=h \quad -\lambda(\vec{r},T,t) \left( \frac{\partial T(\vec{r},t)}{\partial n} \right) \Big|_S = -\lambda(\vec{r},T,t) \left( \frac{\partial T_2(\vec{r},t)}{\partial n} \right) \Big|_S \tag{6}$$

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);  
 $\rho$  - плотность материалов ОК.

Особенностью данной модели, в отличие от ряда известных [1,2] является одновременное использования, как теплоотдачи с нагреваемой поверхности так и учет теплопроводности через дефект  $a$  (воздух).

Анализ построенной теплофизической модели производится путем решения дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности, запи-

санного для выбранной цилиндрической системы координат:

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

где  $c$  - удельная теплоемкость материалов ОК;  $\rho$  - плотность.

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

Для его реализации применялся ранее разработанный авторами программный пакет «ТермоPro\_2009S»[3]. 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/мК)	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 такими:  $h=0,8$  (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 проведена по методике, заложенной в указанном выше программном пакете, а именно; решалось уравнение (7) с граничными условиями (4)-(6), а искомой величиной является температурный контраст  $\Delta T$  на поверхности ОК. над местом залегания дефекта [1]. При этом варьировались параметры режима проведения ТДС: плотность потока тепла  $q$ , продолжительность нагрева поверхности ОК  $t_n$ , время запаздывания  $t_z$  (промежуток времени между окончанием нагрева и регистрацией температурного поля). При этом максимальная температура нагрева поверхности ОК ограничивалась значением 100 С (для избежания деструкции материала).

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

Таблица 2

Результаты расчета оптимального режима ТДС.

$q$ , кВт/м <sup>2</sup>	$t_n$ , с.	$t_z$ , с.	$\Delta T$ , оС
28	15	3,3	1,73

### 3. Экспериментальные исследования

Для проверки результатов, полученных теоретическим путем, были проведены эксперименты на образце сотовой структуры, параметры которой приведены в

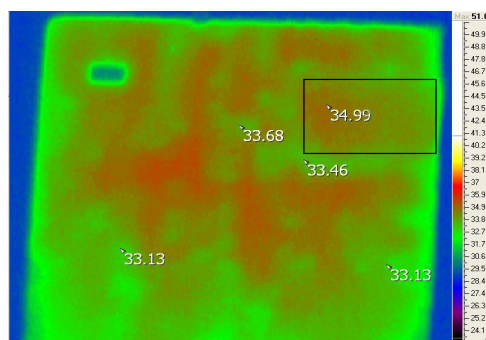
табл.1. Образец содержал два идентифицированных дефекта с размерами:

- 1) 40 X 70 (мм)
- 2) 20 X 80 (мм)

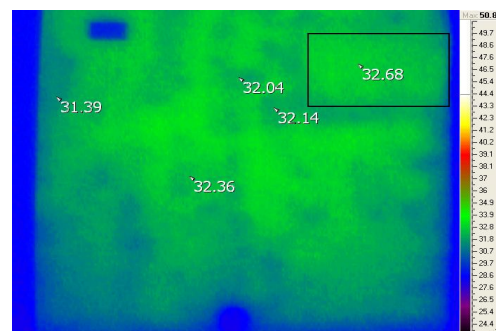
Остальные параметры соответствовали расчетным глубина  $h=0,8$  мм, раскрытие  $\delta=0,2$  мм.



Рис.3. Схема расположения дефектов в образце.



а)



б)

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

Для проведения экспериментов использовался тепловизор IRTIS – 200, созданный авторами площадочный нагреватель излучательного типа управляемый таймером (площадь нагрева нагревателя, т.е. кадра

составляла 1515 см, неравномерность нагрева по полю кадра 12%).

Для проверки оптимальности рассчитаного режима контроля был получен ряд термограмм: в оптимальном режиме контроля, до его наступления и после. На рис. 4, для иллюстрации приведены две из них.

Из термограмм видно, что в оптимальном режиме тепловой контраст вызванный дефектом существенно выше ( $\Delta T=1,53^{\circ}\text{C}$ ), чем в неоптимальном ( $\Delta T=0,54^{\circ}\text{C}$ ). Отличие экспериментально полученного значения ( $\Delta T = 1,53^{\circ}\text{C}$ ) от расчетного ( $\Delta T = 1,73^{\circ}\text{C}$ ) – в пределах погрешности. При этом экспериментально полученное значение  $\Delta T(1,53)$  весьма близко к расчетному (1,73).

Однако при этом наряду с полезным сигналом на термограммах присутствуют и температурные контрасты вызванные помехами (шумовой сигнал) сопоставимый по величине с полезным сигналом ( $\Delta T_{ш}=1,36^{\circ}\text{C}$ ). Если использовать для идентификации амплитудный признак, то достоверность их обнаружения будет невелика.

---

#### Выводы

---

1. Найденный расчетным путем оптимальный режим контроля (нагрев до  $100^{\circ}\text{C}$  мощностью  $q = 28 \text{ кВт/м}^2$  в течении времени  $t_n = 15 \text{ с.}$ , регистрация температурного поля через время запаздывания  $t_z = 3 \text{ с.}$  после окончания нагрева) позволяет выявить дефекты с параметрами:  $\delta = 0,2 \text{ мм}$ , при поперечные размеры  $l = 4 \text{ мм}$ , при уровне сигнала (температурный перепад)  $\Delta T = 1,73^{\circ}\text{C}$ .

2. Экспериментальная проверка, проведенная на одном образце, подтвердила результаты теории, т.к.

наибольший сигнал от дефекта ( $\Delta T=1,64^{\circ}\text{C}$ ) был получен именно в оптимальном режиме:  $q=28 \text{ кВт/м}^2$ ,  $t_n = 15 \text{ с}$ ,  $t_z=3 \text{ с}$ .

Однако при этом наряду с полезным сигналом на термограммах присутствует и шумовой сигнал ( $\Delta T_{ш} = 1,36^{\circ}\text{C}$ ), сопоставимый по величине с полезным сигналом. Это, очевидно, вызвано неравномерностью излучательной способности поверхности образца который оказался покрытый пленкой.

3. Таким образом, кроме оптимизации режима контроля для более достоверного выявления дефектов, необходима компьютерная обработка полученных данных.

---

#### Литература

1. Стороженко, В.А. Неразрушающий контроль качества промышленной продукции активным тепловым методом[Текст]/В.П Вавилов, А.Д. Волчек. - К.: Техника, 1988. - 126 с.
2. Стороженко, В.А. Оптимизация режимов тепловой дефектоскопии на основе теплофизического моделирования[Текст]/ С.Б Малик, А.В. Мякий. // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Прилади і методи неруйнівного контролю. – Харків: НТУ «ХПИ» – №48. – 2008. – С. 84-91.
3. Xavier P. V. Maldague. Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing. - John Wiley & Sons, Inc., 2001, p. 684.