

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОПЕРЕЧНЫХ РАЗМЕРОВ ДЕФЕКТОВ РАССЛОЕНИЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЛАСТИНЫ ПРИ АКТИВНОМ ТЕПЛОМ НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ

Л.Ю. Костылева¹, kostylevali@susu.ru

Г.И. Волович², g_volovich@mail.ru

С.Г. Некрасов¹, nekrasovsg@susu.ru

Е.А. Рец¹, retcea@susu.ru

¹ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

² ООО «Челэнергоприбор», Челябинск, Россия

Аннотация. При выявлении скрытых дефектов соединения слоев в изделиях из многослойных материалов используют различные методы неразрушающего контроля, в том числе активный тепловой контроль. Одна из основных трудностей при использовании этого метода заключается в обработке и интерпретации полученных данных теплового изображения. Особенностью исследуемых дефектов нарушения сплошности соединения слоев биметаллических пластин является то, что глубина нахождения дефекта известна, и основной задачей становится определение его размеров. Для этого применяют различные методы, в том числе анализ пространственных профилей температуры. **Цель исследования:** анализ использования различных подходов к определению поперечного размера дефекта расслоения между металлами при моделировании процесса активного теплового неразрушающего контроля сталеалюминиевых пластин. **Материалы и методы.** Используются методы математического и компьютерного моделирования, численного дифференцирования. Размер дефекта определяется по проекциям половины высоты амплитуды сигнала и экстремума производной функции температурного сигнала. Вычисления и графические построения производятся с использованием математического пакета GNU Octave. **Результаты.** Выполнено моделирование для различных значений мощности теплового потока, времени нагрева и охлаждения. На основе полученных расчетных данных построены графики распределения температурного сигнала по поверхности многослойной биметаллической пластины. Определены значения радиуса дефекта по проекциям характерных точек. **Заключение.** Результаты моделирования позволяют сделать вывод, что использование проекции экстремума производной функции температурного сигнала позволяет точно оценить размер дефекта, а в случае с проекцией точки, соответствующей половине высоты амплитуды сигнала, оценка получается заниженной. Полученные результаты могут быть использованы для дальнейших экспериментальных исследований процессов активного теплового контроля изделий из многослойных биметаллических материалов.

Ключевые слова: биметаллы, активный тепловой неразрушающий контроль, численное моделирование, дефект соединения между слоями металлов, дефектоскопия, дефектометрия

Для цитирования: Определение поперечных размеров дефектов расслоения биметаллической пластины при активном тепловом неразрушающем контроле / Л.Ю. Костылева, Г.И. Волович, С.Г. Некрасов, Е.А. Рец // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2023. Т. 23, № 2. С. 102–110. DOI: 10.14529/ctcr230209

Brief report

DOI: 10.14529/ctcr230209

DETERMINING THE DIMENSIONS OF DELAMINATING DEFECTS IN A BIMETALLIC PLATE USING ACTIVE THERMAL NON-DESTRUCTIVE TESTING

L.Yu. Kostyleva¹, kostylevali@susu.ru

G.I. Volovich², g_volovich@mail.ru

S.G. Nekrasov¹, nekrasovsg@susu.ru

E.A. Retc¹, retcea@susu.ru

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

² LLC Chelenergopribor, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Various methods of nondestructive testing, including active infrared thermography, are used to detect latent subsurface defects in the contact of layers in multilayer products. One of the main difficulties using this method consists in processing and interpreting the thermal image data. The peculiarity of investigated defects of bimetal plate layers continuity violation is that the depth of defect location is known and the main task is to determine its size. Some methods are used for this purpose including analysis of spatial temperature profiles. **Aim.** To analyse the use of various approaches to determining the transverse dimensions of a delamination between metals in simulating active thermal non-destructive testing of steel-aluminium plates. **Materials and methods.** Mathematical and computer simulating methods, numerical differentiation are used. The delamination size is determined by projections of half the height of the amplitude signal and the extremum of the derivative of the temperature signal function. Calculations and graphical constructions are performed using the mathematical package GNU Octave. **Results.** Numerical simulation is carried out for different values of heat flow power, heating and cooling time. The temperature signal distribution over the surface of a multilayer bimetallic plate has been plotted. The values of the defect radius according to the projections of the characteristic points are determined. **Conclusion.** The results of simulation allow us to conclude that using the projection of the extremum of the temperature signal derivative function allows us to accurately estimate the defect size, while in the case of the point projection corresponding to half of the signal amplitude height, the result is underestimated. The obtained results can be used for further experimental studies of processes of active thermal non-destructive testing of products made of multilayer bimetallic materials.

Keywords: bimetal, active thermal non-destructive testing, numerical modeling, delamination in metal layers, flaw detection, defectometry

For citation: Kostyleva L.Yu., Volovich G.I., Nekrasov S.G., Retc E.A. Determining the dimensions of delaminating defects in a bimetallic plate using active thermal non-destructive testing. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics.* 2023;23(2):102–110. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr230209

Введение

Активный тепловой неразрушающий контроль является одним из перспективных методов выявления скрытых дефектов соединения слоев в изделиях из многослойных материалов [1]. При его проведении поверхность объекта нагревают или охлаждают с одной из сторон, а затем измеряют температуру на поверхности при помощи различных контактных или бесконтактных устройств (термодатчиков, пирометров, тепловизоров и др.). Если регистрация значений температуры производится со стороны нагрева, такую процедуру называют односторонней или «контролем на отражение», если с обратной – двухсторонней, или «контролем на прохождение» [1]. При наличии неоднородностей в материале (трещин, расслоений, пустот и др.) на соответствующих участках поверхности будет наблюдаться локальный перегрев или понижение температуры.

Одной из наиболее сложных задач является интерпретация полученных данных – определение типа дефекта и его параметров (поперечных размеров, глубины залегания и др.). Для ее решения используют математические модели и алгоритмы, учитывающие свойства объекта и технологические режимы контроля.

Особенностью исследуемых дефектов нарушения сплошности соединения слоев биметаллических пластин является то, что глубина нахождения дефекта известна, и основной задачей становится определение его размеров.

На термограммах экспериментальных образцов дефект создает видимый «отпечаток», образуемый точками с повышенной или пониженной температурой. Его размеры могут быть определены в пикселях с последующим переводом в традиционные метрические единицы. Однако при визуальной оценке погрешность может достигать 20 %, что является следствием увеличения температурного «отпечатка» при диффузии тепла в образце [1, 2].

Для более точной оценки применяют различные методы повышению информативности термографического изображения (усреднение, вычитание, деление изображений [3], наложение термограмм, полученных одновременно при односторонней и двусторонней процедуре контроля [4] и др.).

Помимо визуальной оценки определение размеров дефекта выполняют путем анализа профиля температуры на поверхности образца. Для этого набор значений температуры в отдельных точках поверхности преобразуют в графическое изображение температурного поля. Над дефектным участком полученный график функции температуры имеет характерный профиль с максимальной амплитудой в центральной точке дефекта.

В англоязычных источниках описан способ определения размера дефекта, обозначаемый аббревиатурой FWHM – Full Width Half Maximum [5, 6]. Ширина дефекта измеряется по положению проекции точки, соответствующей половине высоты максимального температурного перепада. Этот способ оценки дает приемлемые результаты, однако для некоторых материалов оценка размера дефекта получается заниженной [7, 8]. Описаны адекватные результаты определения размеров расслоений в углепластиковых композитных материалах [9, 10] и коррозии стальных пластин [5].

В.П. Вавилов и В.В. Ширяев показали, что координата экстремума производной функции температурного сигнала соответствует проекции границы внутреннего дефекта [11]. При этом точность определения размеров составляет до одного радиального шага пространственной сетки. Данный способ дает удовлетворительные результаты при определении размеров пор в алюминии и расслоений в пластиковых композитных материалах [1, 12, 13].

При определении поперечных размеров дефектов для более корректного расчета значений температурного сигнала над дефектом используют двух- и трехмерные модели теплового состояния объекта контроля, поскольку они учитывают тепловое рассеяние вокруг участка многослойного материала с внутренним дефектом.

Данная статья является продолжением исследования, описанного в работе [14], где была рассмотрена математическая модель теплового состояния многослойной пластины с дефектом соединения слоев и алгоритм решения краевой задачи теплового состояния с применением методов компьютерного моделирования. Целью исследования является анализ использования различных подходов к определению поперечного размера дефекта расслоения между металлами при активном тепловом неразрушающем контроле сталепластины.

Материалы и методы

Рассмотрим трехслойную пластину (рис. 1) с наружными слоями из нержавеющей стали (1, толщиной h_1) и (3, толщиной h_3), между которыми расположен теплораспределительный слой из алюминия (2, толщиной h_2). Тепловой поток от источника нагрева $q_{\text{изл}}$ направлен по нормали к слоям.

Исследуются дефекты в виде воздушной прослойки в местах контакта наружных слоев изделия с внутренним теплораспределительным слоем с одной или другой его сторон. Размеры таких дефектов (диаметр d и толщина δ) существенно меньше размеров слоев пластины.

Процесс нагрева соответствует условиям проведения импульсного активного ТК. Для выявления дефектов с обеих сторон теплораспределительного слоя модель учитывает условия проведения односторонней и двусторонней процедур ТК.

Для обеспечения возможности определения поперечных размеров дефектов пластина рассматривается как симметричная относительно оси z в цилиндрической системе координат (r, z) . Все слои пластины имеют форму цилиндра радиуса R , причем $R \gg h_i$. Для температурного поля имеет место осевая симметрия ($dT/d\varphi = 0$), считаем, что температурное поле нестационарное и двухмерное – $T(r, z, \tau)$.

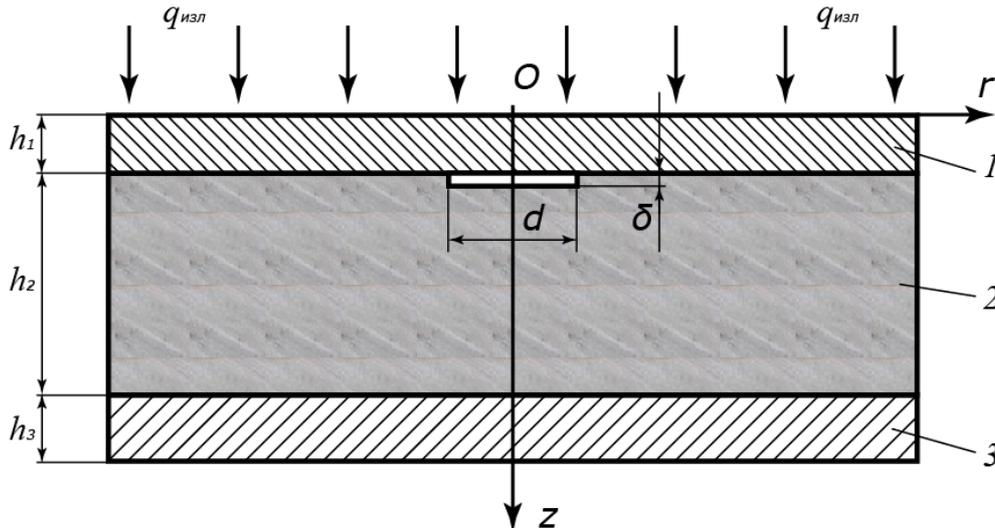


Рис. 1. Трехслойная пластина с цилиндрическим дефектом, ее основные размеры
Fig. 1. Three-layer plate with a cylindrical delamination, its main dimensions

С учетом сформулированных допущений полагаем, что распределение температуры в исследуемой пластине описывается уравнением теплопроводности ($\tau > 0$, $0 \leq r \leq R$, $0 \leq z \leq (h_1 + h_2 + h_3)$):

$$\frac{\partial T_i}{\partial \tau} = a_i \cdot \left(\frac{\partial^2 T_i}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_i}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

где $i = 1, 2, 3$ – номер слоя; τ – время; $T(r, z, \tau)$ – температура; $a_i = \lambda_i / (c_i \cdot \rho_i)$ – коэффициент температуропроводности; λ_i , ρ_i , c_i – соответственно теплопроводность, плотность и удельная теплоемкость металлов.

Индекс 1 соответствует стальному слою при $0 \leq z \leq h_1$; индекс 2 – алюминиевому слою при $h_1 \leq z \leq (h_1 + h_2)$; индекс 3 – стальному слою при $(h_1 + h_2) \leq z \leq (h_1 + h_2 + h_3)$.

Подробное описание модели импульсного нагрева и последующего остывания многослойной пластины при наличии дефекта расслоения с учетом граничных условий и различных вариантов нагрева и охлаждения (односторонний и двухсторонний тепловой контроль) приведено в [14].

Определяются значения температуры T на поверхности пластины и дифференциального температурного сигнала ΔT , равного разности температур в исследуемой точке T и в зоне, принятой за бездефектную, $T_{\text{бд}}$:

$$\Delta T(r, z, \tau) = T(r, z, \tau) - T_{\text{бд}}(r, z, \tau). \quad (2)$$

Для полученных функций распределения температуры и температурного сигнала вычисляются значения производных по формуле

$$\frac{\partial T_i}{\partial r} = \frac{T_{i+1} - T_i}{\Delta r}. \quad (3)$$

Оценка размера дефекта выполняется по положению точек, соответствующих проекциям экстремума производной и половины высоты амплитуды сигнала на ось r .

Численное моделирование и построение графиков выполняются с применением программного продукта GNU Octave (аналог MATLAB) [15].

Результаты

Рассмотрим решение задачи для различных режимов нагрева и времени наблюдения. Размеры пластины (см. рис. 1) $h_1 = h_3 = 1,7$ мм, $h_2 = 5,6$ мм, радиус пластин $R = 50$ мм, толщина воздушного зазора $\delta = 0,2$ мм. Начальная температура пластины $T_0 = 20$ °С, температура окружающей среды $t_{\text{окр}} = 20$ °С.

Теплофизические свойства стали: плотность $\rho_{\text{ст}} = 7850$ кг/м³, удельная теплоемкость $c_{\text{ст}} = 504$ Дж/(кг·К), коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{ст}} = 17$ Вт/(м·К). Теплофизические свойства

алюминия: плотность $\rho_{al} = 2712 \text{ кг/м}^3$, удельная теплоемкость $c_{al} = 897 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$, коэффициент теплопроводности $\lambda_{al} = 203,5 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

В различных вариантах решения диаметр воздушного зазора d принимается равным 5 и 10 мм, мощность теплового потока нагрева $q_{изл}$ составляет 10, 30 и 100 кВт/м².

Нагрев и измерение температуры выполняются со стороны дефекта. Время нагрева и шаг расчета выбираются в зависимости от величины мощности теплового потока.

На рис. 2 представлены графики распределения температуры по поверхности пластины со стороны дефекта при $d = 5 \text{ мм}$, $q_{изл} = 100 \text{ кВт/м}^2$. Время нагрева $\tau_1 = 1 \text{ с}$, шаг расчета 0,01 с. Выполнены расчеты для времени наблюдения $\tau_1 = 1 \text{ с}$ (после нагрева, график T_1) и $\tau_2 = 1,5 \text{ с}$ (после охлаждения на воздухе, график T_2).

Определены точки, соответствующие половине высоты амплитуды изменения температуры $\Delta T_1/2$ (после нагрева) и $\Delta T_2/2$ (после охлаждения).

Также показаны графики производных функций распределения температуры $\partial T_1/\partial r$ (после нагрева) и $\partial T_2/\partial r$ (после охлаждения).

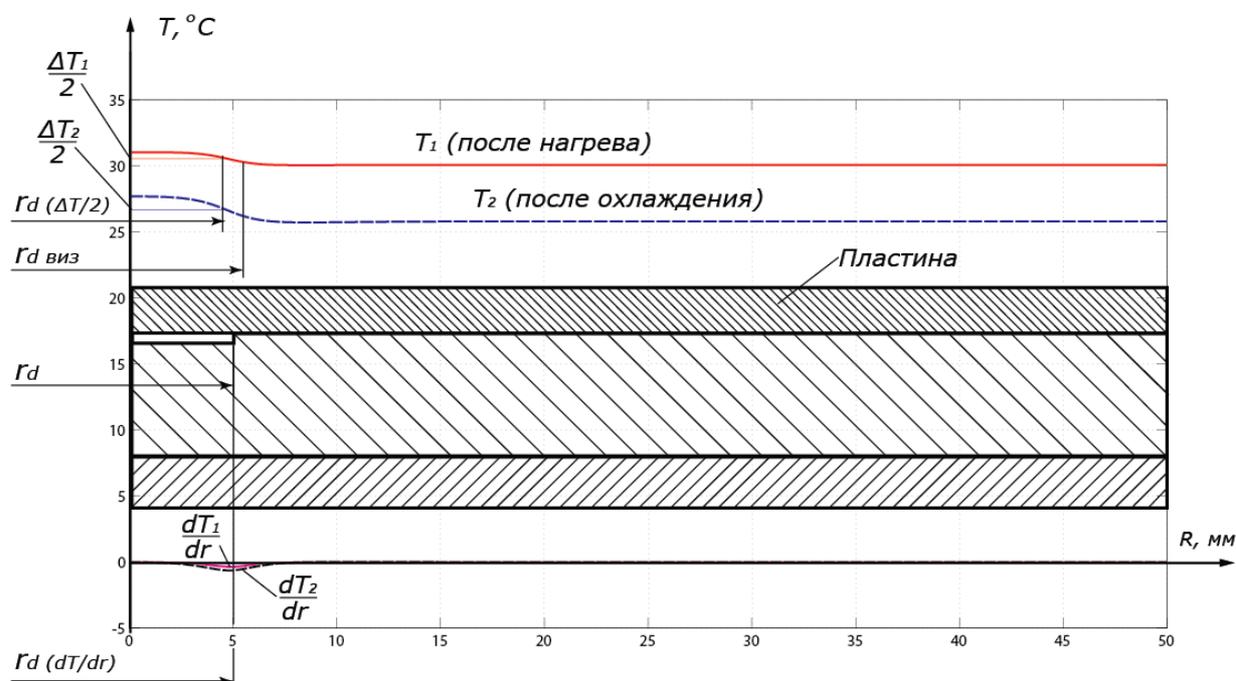


Рис. 2. Определение радиуса дефекта на основе анализа профиля температуры
Fig. 2. Defect radius determined by analysing the temperature profile

Видно, что проекции экстремума производной $r_d(\partial T/\partial r)$ точно соответствуют радиусу дефекта r_d как при наблюдении после нагрева, так и после охлаждения. В то же время радиус дефекта, определенный по проекции половины высоты амплитуды температуры $r_d(\Delta T/2)$, меньше фактического размера дефекта в обоих случаях. При визуальной оценке радиус дефекта $r_{d \text{ виз}}$ превышает фактический.

На рис. 3 представлены графики распределения дифференциального температурного сигнала ΔT_1 (после нагрева) и ΔT_2 (после охлаждения). При расчете значений температурного сигнала в качестве температуры бездефектной зоны используется значение T_i в точке $r_i = R$. Построены графики производных функций температурного сигнала $\partial(\Delta T_1)/\partial r$ (после нагрева) и $\partial(\Delta T_2)/\partial r$ (после охлаждения), определены проекции характерных точек для оценки радиуса дефекта.

Оценки радиуса дефекта различными способами соответствуют оценкам, полученным при анализе профиля распределения температуры (см. рис. 2), но переход к дифференциальному температурному сигналу позволяет более наглядно представить результаты проведенных вычислений.

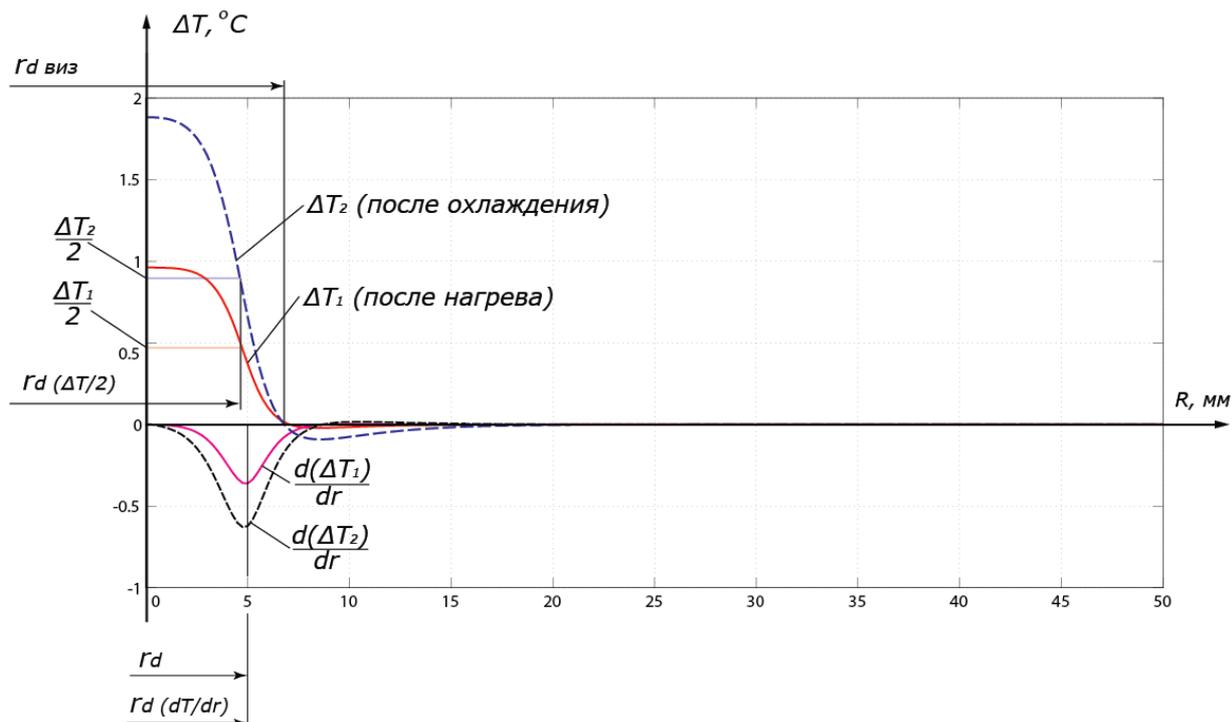


Рис. 3. Определение радиуса дефекта на основе анализа профиля дифференциального температурного сигнала

Fig. 3. Defect radius determined by analysing the differential temperature signal profile

В таблице представлены результаты моделирования теплового состояния для различных значений мощности теплового потока, времени нагрева и охлаждения.

Результаты моделирования

Таблица

Table

Simulation result

Тепловой поток, Вт/м ²	Время нагрева, с	Время наблюдения, с	Шаг, с	r_d , мм	$r_d \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)$, мм	$r_d \left(\frac{\Delta T}{2} \right)$, мм
10 000	30	30	0,1	5,0	5,0	4,75
	30	35	0,1	5,0	5,0	4,75
	30	45	0,1	5,0	5,0	4,75
	30	30	0,1	10,0	10,0	9,0
	30	35	0,1	10,0	10,0	8,75
	30	45	0,1	10,0	10,0	8,75
30 000	5	5	0,1	5,0	5,0	4,75
	5	10	0,1	5,0	5,0	4,75
	5	15	0,1	5,0	5,0	4,75
	5	5	0,1	10,0	10,0	9,25
	5	10	0,1	10,0	10,0	8,50
	5	15	0,1	10,0	10,0	8,25
	30	30	0,1	5,0	5,0	4,75
	30	35	0,1	5,0	5,0	4,75
	30	45	0,1	5,0	5,0	4,75
	30	30	0,1	10,0	10,0	9,0
	30	35	0,1	10,0	10,0	8,75
	30	45	0,1	10,0	10,0	8,75

Тепловой поток, Вт/м ²	Время нагрева, с	Время наблюдения, с	Шаг, с	r_d , мм	$r_d \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)$, мм	$r_d \left(\frac{\Delta T}{2} \right)$, мм
100 000	1	1	0,01	5,0	5,0	4,75
	1	0,5	0,01	5,0	5,0	4,75
	1	6	0,01	5,0	5,0	4,5
	1	1	0,01	10,0	10,0	10,0
	1	0,5	0,01	10,0	10,0	10,0
	1	6	0,01	10,0	10,0	9,0
	2	2	0,01	5,0	5,0	5,0
	2	3	0,01	5,0	5,0	4,75
	2	10	0,01	5,0	5,0	4,75
	2	2	0,01	10,0	10,0	9,75
	2	3	0,01	10,0	10,0	9,5
	2	10	0,01	10,0	10,0	8,5

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод, что оценка радиуса дефекта по проекции экстремума производной температуры и дифференциального температурного сигнала обеспечивает точное определение размера дефекта на используемой модели при различных параметрах режима нагрева.

Определение радиуса дефекта по проекции точки, соответствующей половине максимального температурного перепада, приводит к занижению размера дефекта. При малых временах наблюдения оценка более точная (отклонение в большинстве случаев не превышает одного радиального шага расчетной сетки), а при увеличении времени охлаждения величина отклонения растет.

Заключение

Результаты моделирования показывают, что использование проекции экстремума производной функции температурного сигнала позволяет точно оценить размер дефекта, а в случае с проекцией точки, соответствующей половине высоты амплитуды сигнала, оценка получается заниженной. Полученные данные в целом соответствуют результатам исследований для других видов материалов [5, 13] и могут быть использованы для дальнейших численных и экспериментальных исследований теплового состояния биметаллических пластин в процессе дефектоскопии методами активного теплового неразрушающего контроля.

Список литературы

1. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль: науч. изд. М.: ИД Спектр, 2009. 544 с.
2. Martin R., Gyekenyesi A.L., Shepard S. Interpreting the results of pulsed thermography data // *Materials Evaluation*. 2003. Vol. 61. P. 611–616. URL: <https://www.researchgate.net/publication/292229377> (дата обращения: 16.01.2023).
3. Shepard S.M. Advances in pulsed thermography // *Proc. SPIE 4360, Thermosense XXIII*. DOI: 10.1117/12.421032. URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/4360/1/Advances-in-pulsed-thermography/10.1117/12.421032> (дата обращения: 16.01.2023).
4. Галдин Д.А., Каледин В.О. Применение термографии и моделирования температурных полей в композитных пластинах для неразрушающего контроля // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2020. № 11. С. 83–86.
5. Almond D.P., Saintey S., Lau S.K. Edge effects and defect sizing by transient thermography // *Proceedings of Quantitative InfraRed Thermography QIRT'94, Eurotherm Seminar*. 1994. P. 247–252. DOI: 10.21611/qirt.1994.037. URL: <http://qirt.org/archives/qirt1994/papers/037.pdf> (дата обращения: 16.01.2023).
6. Ibarra-Castanedo C., Benitez H., Maldague X., Bendada A. Review of thermal-contrast-based signal processing techniques for the nondestructive testing and evaluation of materials by infrared ther-

mography [Электронный ресурс]. URL: <https://www.researchgate.net/publication/228417761> (дата обращения: 16.01.2023).

7. Almond D.P., Lau S.K. Defect sizing by transient thermography. I. An analytical treatment // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1994. Vol. 27, no. 5. P. 1063–1069. DOI: 10.1088/0022-3727/27/5/027. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0022-3727/27/5/027> (дата обращения: 16.01.2023).

8. Aircraft composites assessment by means of transient thermal NDT / N.P. Avdelidis, D.P. Almond, A. Dobbins et al. // *Progress in Aerospace Sciences*. 2004. Vol. 40. P. 143–162. DOI: 10.1016/j.paerosci.2004.03.001. URL: <https://www.researchgate.net/publication/222923920> (дата обращения: 16.01.2023).

9. Comparative study of Thermographic Signal Reconstruction and Partial Least Squares Thermography for detection and evaluation of subsurface defects / F. López, V.P. Nicolau, C. Ibarra-Castanedo et al. // *Proceedings of the 2014 International Conference on Quantitative InfraRed Thermography*. DOI: 10.21611/QIRT.2014.095. URL: <http://www.qirt.org/archives/qirt2014doi/papers/QIRT-2014-095.pdf> (дата обращения: 16.01.2023).

10. Ibarra-Castanedo C., Bendada A., Maldague X. Thermographic Image Processing for NDT // IV Conferencia Panamericana de END, Buenos Aires – Octubre 2007. URL: <https://www.researchgate.net/publication/254738827> (дата обращения: 16.01.2023).

11. Вавилов В.П., Ширяев В.В. Способ определения размеров дефектов при тепловом контроле // *Дефектоскопия*. 1979. № 11. С. 63–65.

12. Vavilov V., Marinetti S., Nesteruk D. Accuracy issues in modeling thermal NDT problems // *Proc. SPIE*. 6939. DOI: 10.1117/12.775684. URL: <https://www.researchgate.net/publication/252222222> (дата обращения: 16.01.2023).

13. Vavilov, V., Burleigh D. *Infrared Thermography and Thermal Nondestructive Testing*. Springer Nature Switzerland AG, 2020. 610 p. DOI: 10.1007/978-3-030-48002-8

14. Определение параметров дефекта расслоения биметаллической пластины посредством активного теплового неразрушающего контроля / О.В. Логиновский, Л.Ю. Костылева, А.А. Максимов, И.М. Ячиков // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. 2021. Т. 21, № 4. С. 37–51. DOI: 10.14529/ctcr210404

15. GNU Octave [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gnu.org/software/octave> (дата обращения: 16.01.2023).

References

1. Vavilov V.P. *Infrakrasnaya termografiya i teplovoy kontrol'* [Infrared Thermography and Thermal Nondestructive Testing]. Moscow: ID Spektr; 2009. 544 p. (In Russ.)

2. Martin R., Gyekenyesi A.L., Shepard S. Interpreting the results of pulsed thermography data. *Materials Evaluation*. 2003;61:611–616. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/292229377> (accessed 16 January 2023).

3. Shepard S.M. Advances in pulsed thermography. In: *Proc. SPIE 4360, Thermosense XXIII*. DOI: 10.1117/12.421032. Available at: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/4360/1/Advances-in-pulsed-thermography/10.1117/12.421032> (accessed 16 January 2023).

4. Galdin D.A., Kaledin V.O. Nondestructive testing of composite plates using thermography and thermal fields modelling. *Scientific and Technical Volga region Bulletin*. 2020;11:83–86. (In Russ.)

5. Almond D.P., Saintey S., Lau S.K. Edge effects and defect sizing by transient thermography. In: *Proceedings of Quantitative InfraRed Thermography QIRT'94, Eurotherm Seminar*; 1994. P. 247–252. DOI: 10.21611/qirt.1994.037. Available at: <http://qirt.org/archives/qirt1994/papers/037.pdf> (accessed 16 January 2023).

6. Ibarra-Castanedo C., Benitez H., Maldague X., Bendada A. Review of thermal-contrast-based signal processing techniques for the nondestructive testing and evaluation of materials by infrared thermography. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/228417761> (accessed 16 January 2023).

7. Almond D.P., Lau S.K. Defect sizing by transient thermography. I. An analytical treatment. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1994;27(5):1063–1069. DOI: 10.1088/0022-3727/27/5/027. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0022-3727/27/5/027> (accessed 16 January 2023).

8. Avdelidis N.P., Almond D.P., Dobbins A. et al. Aircraft composites assessment by means of transient thermal NDT. *Progress in Aerospace Sciences*. 2004;40:143–162. DOI: 10.1016/j.paerosci.2004.03.001. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/222923920> (accessed 16 January 2023).

9. López F., Nicolau V.P., Ibarra-Castanedo C. et al. Comparative study of Thermographic Signal Reconstruction and Partial Least Squares Thermography for detection and evaluation of subsurface defects. In: *Proceedings of the 2014 International Conference on Quantitative InfraRed Thermography*. DOI: 10.21611/QIRT.2014.095. Available at: <http://www.qirt.org/archives/qirt2014doi/papers/QIRT-2014-095.pdf> (accessed 16 January 2023).

10. Ibarra-Castanedo C., Bendada A., Maldague X. Thermographic Image Processing for NDT. In: *IV Conferencia Panamericana de END, Buenos Aires – Octubre 2007*. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/254738827> (accessed 16 January 2023).

11. Vavilov V.P., Shiryayev V.V. [The method for determining defect size in thermal NDT]. *Defectoskopiya (Rus. J. NDT)*. 1979;11:63–65. (In Russ.)

12. Vavilov V., Marinetti S., Nesteruk D. Accuracy issues in modeling thermal NDT problems. In: *Proc SPIE*. 6939. DOI: 10.1117/12.775684. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/252222222> (accessed 16 January 2023).

13. Vavilov V., Burleigh D. *Infrared Thermography and Thermal Nondestructive Testing*. Springer Nature Switzerland AG; 2020. 610 p. DOI: 10.1007/978-3-030-48002-8

14. Loginovskiy O.V., Kostyleva L.Yu., Maksimov A.A., Yachikov I.M. Determination of the Parameters of the Lamination of a Bimetallic Plate by Means of Active Thermal Non-Destructive Control. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2021;21(4):37–51. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr210404

15. *GNU Octave*. Available at: <http://www.gnu.org/software/octave> (accessed 16 January 2023).

Информация об авторах

Костылева Лилия Юрьевна, старший преподаватель кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; kostylevali@susu.ru.

Волович Георгий Иосифович, д-р техн. наук, проф., директор, ООО «Челэнергоприбор», Челябинск, Россия; g_volovich@mail.ru.

Некрасов Сергей Геннадьевич, д-р техн. наук, проф. кафедры информационно-измерительной техники, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; nekrasovsg@susu.ru.

Рец Евгения Анатольевна, заведующий лабораторией кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; retcea@susu.ru.

Information about the authors

Liliya Yu. Kostyleva, Senior Lecturer of the Department of Informational and Analytical Support of Management in Social and Economic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; kostylevali@susu.ru.

Georgiy I. Volovich, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Director, LLC Chelenergopribor, Chelyabinsk, Russia; g_volovich@mail.ru.

Sergey G. Nekrasov, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Department of Information and Measuring Technology, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; nekrasovsg@susu.ru.

Evgeniya A. Retc, Head of the Laboratory of the Department of Information and Analytical Support of Management in Social and Economic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; retcea@susu.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 20.01.2023

The article was submitted 20.01.2023