

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В МНОГОСЛОЙНОЙ БИМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЛАСТИНЕ

Л.Ю. Костылева, kostylevali@susu.ru

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. При использовании метода активного теплового неразрушающего контроля для выявления скрытых дефектов в изделиях из многослойных биметаллических материалов большое значение имеет адекватный выбор технологических режимов контроля. Одним из важных параметров является оптимальное время наблюдения, при котором обеспечивается достаточная амплитуда температурного сигнала над дефектом. Данная величина зависит от геометрии контролируемого объекта, его теплофизических характеристик, а также выбранных режимов и процедур контроля. Для определения этого параметра используют различные экспериментальные исследования. Для биметаллических пластин подготовка образцов для натуральных экспериментов является технологически сложной и дорогостоящей задачей. Поэтому большой объем подготовительных исследований проводят в виде вычислительного эксперимента, в ходе которого с определенными допущениями моделируют процесс изменения теплового состояния объекта контроля. **Цель исследования:** определение оптимальных параметров процесса теплового контроля трехслойной сталеалюминиевой пластины с дефектом в виде воздушной прослойки между металлами. Для различных вариантов взаимного расположения устройства регистрации температуры и источника теплового потока различной мощности необходимо определить время нагрева, при котором наблюдается температурный сигнал достаточной амплитуды. **Материалы и методы.** Используются методы математического и компьютерного моделирования. Приведен пример решения задачи методом конечных элементов в программном пакете Agros2D. **Результаты.** Получены расчетные данные, на основе которых построены распределения температурного сигнала по поверхности многослойной биметаллической пластины со стороны дефекта при различных режимах нагрева, мощности теплового потока, взаимного расположения источника тепловой стимуляции и устройства регистрации температуры, а также определена зависимость температурного сигнала над дефектом от времени нагрева. **Заключение.** На основе проведенного моделирования определены температурные зависимости, необходимые для интерпретации результатов теплового контроля многослойных биметаллических пластин, а также соотношения параметров процесса нагрева, способствующие получению температурного сигнала достаточной амплитуды. 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, метод конечных элементов, дефект соединения между слоями металлов, дефектоскопия

Для цитирования: Костылева Л.Ю. Моделирование нестационарной теплопередачи в многослойной биметаллической пластине // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 3. С. 68–79. DOI: 10.14529/ctcr220307

Original article

DOI: 10.14529/ctcr220307

NUMERICAL MODELING OF TRANSIENT HEAT TRANSFER IN A MULTILAYER BIMETALLIC PLATE

*L.Yu. Kostyleva, kostylevali@susu.ru**South Ural State University, Chelyabinsk, Russia*

Abstract. When using the method of active thermal non-destructive testing to detect latent defects in multilayer bimetallic products, the adequate choice of technological modes of testing is of great importance. One of the important parameters is the optimum observation time, at which a sufficient amplitude of the temperature signal over the defect is provided. This value depends on the controlled object geometry, its thermophysical characteristics, and also selected testing modes and procedures. Various experimental studies are used to determine the optimum observation time. Preparing bimetallic plates samples for full-scale experiments is a technologically complex and expensive task. Therefore, a large amount of preparatory research is carried out in the form of a numerical experiment, during which, with certain assumptions, changing the thermal state of the control object is simulated. **Aim.** Determination of optimal parameters of the thermal NDT process for a three-layer steel-aluminum plate with a planar delamination defect between the metal layers. For different variants of mutual location of the temperature registration device and source of heat flux of different power it is necessary to determine the heating time at which the sufficient amplitude of temperature signal is observed. **Materials and methods.** The methods of mathematical and computer modeling were used. Solving the task by the finite element method with the Agros2D code is given. **Results.** The calculation data have been obtained, which are used as the basis for constructing the temperature signal distribution over the bimetallic plate surface above the defect under different heating modes, heat flux rate, relative position of the heat stimulation source and temperature registration device, as well as determining the temperature signal dependence over the defect on the heating time. **Conclusion.** On the basis of modeling the temperature dependences necessary for interpretation of the results of thermal NDT of multilayered bimetallic plates have been determined, as well as the relations between the parameters of the heating process, which contribute to obtaining a temperature signal of sufficient amplitude. The results can be used for further experimental studies of the active thermal NDT processes of multilayer bimetallic materials.

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

For citation: Kostyleva L.Yu. Numerical modeling of transient heat transfer in a multilayer bimetallic plate. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics.* 2022;22(3):68–79. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr220307

Введение

Для выявления дефектов соединения слоев в изделиях из многослойных биметаллических материалов применяют различные методы неразрушающего контроля, в том числе активный тепловой контроль (ТК) [1, 2]. При проведении активного ТК поверхность изделия с одной из сторон нагревается (или охлаждается) под воздействием источника теплового нагружения. В процессе тепловой стимуляции или после ее окончания выполняется регистрация температуры в различных точках поверхности объекта при помощи контактных или бесконтактных устройств (термодатчиков, пирометров, тепловизоров и др.). Измерение температуры может быть произведено со стороны нагрева (такую процедуру принято называть односторонней или «контролем на отражение») или с обратной стороны изделия (двухсторонняя процедура или «контроль на прохождение»), а также на боковой поверхности объекта [1].

При дальнейшем анализе записи температурного поля (например, в виде термограммы) можно выявить участки объекта с локальными изменениями температуры, которые свидетельствуют о наличии неоднородностей в материале.

ТК позволяет выявить различные виды дефектов: трещины [1], расслоения в местах сварки или склейки [3], отклонения толщины слоев [4], поры, пустоты и раковины [5, 6], нарушения изоляции [7] в изделиях из металлов, пластмасс и полимеров, биметаллов и композитных материалов с различными формами и качеством поверхности.

Диагностировать тип дефекта под аномальным участком и определить его параметры можно лишь при наличии в составе системы ТК адекватных математических моделей и алгоритмов, позволяющих интерпретировать результаты контроля в зависимости от свойств объекта и используемых технологических режимов.

Основным информативным параметром при выявлении дефектов методом теплового неразрушающего контроля служит величина дифференциального температурного сигнала – температурного перепада над аномальным участком. Она определяется как локальная разность температур поверхности объекта, измеренных над дефектной областью и участком без дефекта [1, 2].

Величина температурного сигнала изменяется в процессе нестационарного нагрева (охлаждения), достигая максимального значения в определенный момент времени. Для металлов данный момент составляет от долей секунд до десятков секунд, для неметаллов может достигать десятков минут, в зависимости от теплофизических и геометрических характеристик объекта, глубины залегания и типа дефекта. При этом увеличение мощности тепловой стимуляции и уменьшение интенсивности теплообмена улучшают условия выявления дефектов [2].

В большинстве случаев используют процедуры импульсного активного ТК, поскольку в стационарном режиме сигналы от дефектов нивелируются из-за выравнивания температуры по объему тела, а в условиях теплообмена с окружающей средой разность температур среды и тела не позволяет достичь достаточного значения амплитуды сигнала.

Так, при дефектоскопии турбинных лопаток с металлокерамическим покрытием толщиной 0,18 мм оптимальное время импульсного нагрева измеряется миллисекундами, поскольку при увеличении времени нагрева происходит диффузия тепла в материале и искажается температурный отпечаток, соответствующий дефектной области. Для материалов с высокой теплопроводностью (например, алюминия) более точные оценки размеров дефекта имеют место при высокой мощности тепловой стимуляции (порядка 1 МВт) и малых временах наблюдения (менее 0,01 с) [1].

Поэтому в каждом конкретном случае необходимо выбирать оптимальный момент регистрации температурного сигнала в зависимости от параметров объекта контроля и режима нагрева.

Оптимальное соотношение параметров режима нагрева и времени контроля можно выявить в ходе натурного эксперимента. Однако для биметаллических пластин подготовка экспериментальных образцов с заданными параметрами дефектов является технологически сложной и дорогостоящей задачей. Поэтому немаловажным является этап моделирования, в ходе которого можно с определенными допущениями имитировать процесс изменения теплового состояния объекта контроля с целью определения момента времени, когда величина температурного сигнала достигает оптимального значения при выбранной мощности тепловой стимуляции.

Математические модели процессов теплопередачи в многослойных объектах представляют собой системы линейных и нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих распределение температурного поля в материале с переменными теплофизическими характеристиками под влиянием источников теплового нагружения, условий контакта между слоями пластины и воздействия окружающей среды [8]. Для определения глубины залегания дефекта и его раскрытия («толщины») обычно используют одномерные модели [9, 10]. Двух- и трехмерные модели применяют при необходимости определения поперечных размеров («протяженности») дефекта, так как они позволяют учитывать рассеяние тепла вокруг участка многослойного материала с нарушенной структурой и более корректно определять температурный сигнал над дефектом [1, 4, 5].

Решение многомерных нелинейных задач теплопереноса в аналитической форме часто сопряжено с большими математическими трудностями и не всегда возможно. В таких ситуациях применяют численные методы на основе сеточной аппроксимации исследуемого объекта – метод конечных разностей (МКР), методы конечных элементов (МКЭ) и граничных элементов (МГЭ). Они предполагают замену исходных дифференциальных уравнений алгебраическими за счет дискретизации объекта моделирования [7, 11, 12].

Основной особенностью МКЭ является разбиение исследуемого объекта на небольшие части (конечные элементы, КЭ), включающие некоторое количество узловых точек, в которых выполняется вычисление искомых функций температуры методами вариационного исчисления. В качестве конечных элементов при различных методах расчета могут использоваться треугольники, четырехугольники, криволинейные элементы, в том числе в различных комбинациях. Границы КЭ располагаются по линиям изменения геометрии, внешней нагрузки или свойств материалов.

Для повышения точности расчетов в узлах концентрации температурных градиентов используют элементы меньшей площади.

Моделирование методом конечных элементов обычно производится с использованием специализированных компьютерных систем класса CAE (computer-aided engineering).

В настоящее время известно довольно большое число конечно-элементных пакетов для решения различных задач как коммерческих, так и свободно распространяемых, в том числе с открытым исходным кодом. Коммерческие программные продукты более удобны для пользователя, содержат хорошо проработанные, понятные препроцессоры и постпроцессоры. К наиболее известным проприетарным пакетам, при помощи которых можно решать задачи теплопередачи, относятся ANSYS [13] и COMSOL Multiphysics [14].

Разработка свободно распространяемого программного обеспечения для конечно-элементного моделирования ведется в основном силами академических групп. Такие пакеты не всегда обладают дружелюбным интерфейсом, но при этом используют наиболее современные эффективные алгоритмы и вычислительные процедуры. Среди указанных пакетов можно выделить Agros2D, созданный группой исследователей из Западночешского университета в г. Пльзене [15]. Основными особенностями Agros2D являются возможность численного моделирования мультифизических (связанных) нелинейных задач, использование треугольных, четырехугольных и криволинейных конечных элементов, одновременное использование разных сеток для разных физических полей, автоматическое наложение сеток различной плотности, а также встроенная поддержка языка Python, в том числе вычислительных и графических библиотек. Перечисленные возможности в совокупности с удобным интерфейсом способствовали выбору пакета Agros2D в качестве средства моделирования в проведенном исследовании.

Целью данной работы является определение оптимальных параметров процесса теплового контроля трехслойной сталеалюминиевой пластины с дефектом в виде воздушной прослойки между металлами посредством компьютерного моделирования с использованием пакета Agros2D. Рассматриваются различные варианты взаимного расположения устройства регистрации температуры и источника теплового потока различной мощности, и определяется время нагрева, при котором наблюдается температурный сигнал достаточной амплитуды.

1. Математическая модель нестационарной теплопередачи в многослойной биметаллической пластине при наличии дефекта соединения слоев

Для разработки модели теплового контроля многослойного биметаллического материала с дефектами опишем свойства объекта и условия проведения компьютерного моделирования.

Объект контроля представляет собой трехслойную пластину, наружные слои которой (1, h_1) и (3, h_3) изготовлены из нержавеющей стали, а между ними находится теплораспределительный слой (2, h_2) из алюминия или меди, при этом тепловой поток от источника теплового нагружения $q_{изл}$ направлен по нормали к слоям (рис. 1).

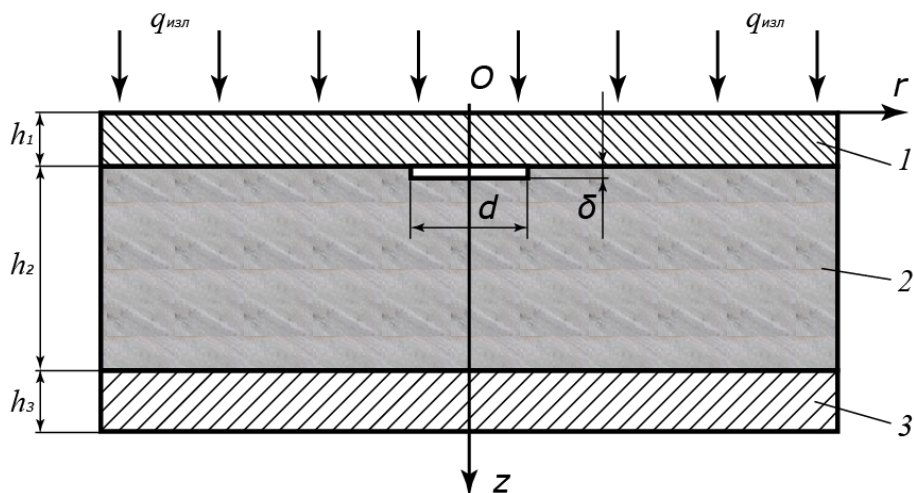


Рис. 1. Трехслойная пластина с цилиндрическим дефектом, ее основные размеры
Fig. 1. Three-layer plate with a cylindrical delamination, its main dimensions

Дефекты расслоения могут присутствовать в местах контакта наружных слоев изделия с внутренним теплораспределительным слоем с одной или другой его сторон. Поперечные размеры дефектов (диаметр d и толщина δ) ограничены и существенно меньше размера пластин.

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

При моделировании теплового состояния объекта был принят ряд допущений и ограничений.

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 двумерное – $T(r, z, \tau)$.

В активных процедурах ТК мощность потока нагрева обычно значительно превышает мощность встречного потока теплоотдачи от тела за счет конвекции и излучения, поэтому теплообмен со стороны источника теплового нагружения можно представить как адиабатический. Влияние конвективной составляющей теплоотдачи со стороны нагрева учитывается только для периода остывания образца.

Отсутствует термическое сопротивление в контакте пластин соседних слоев. Контакт между отдельными слоями пластины полагаем идеальным, то есть на границе раздела выполняется равенство температур и тепловых потоков (граничное условие 4 рода). Передачей тепла в цилиндрическом воздушном зазоре можно пренебречь.

С учетом сформулированных допущений будем полагать, что распределение температуры в исследуемом объекте описывается уравнением теплопроводности ($\tau > 0$, $0 \leq r \leq R$, $0 \leq z \leq (h_1 + h_2 + h_3)$) (см. рис. 1)

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

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 стали при $0 \leq z \leq h_1$; индекс 2 – алюминию при $h_1 \leq z \leq (h_1 + h_2)$; индекс 3 – стали при $(h_1 + h_2) \leq z \leq (h_1 + h_2 + h_3)$.

Для решения дифференциального уравнения (1) его необходимо дополнить краевыми условиями.

В начальный момент времени считаем, что температура во всех точках расчетной области равна температуре окружающей среды (для $0 \leq z \leq (h_1 + h_2 + h_3)$, $0 \leq r \leq R$):

$$T(r, z, 0) = T_0. \quad (2)$$

Граничные условия (ГУ).

На оси цилиндра имеем условие осевой симметрии (для $r = 0$, $0 \leq z \leq (h_1 + h_2 + h_3)$)

$$\frac{\partial T_i}{\partial r} = 0. \quad (3)$$

На верхней стенке пластины 1 для ($0 \leq r \leq R$, $z = 0$) в период нагрева пластины имеем $0 < \tau \leq \tau_1$ граничное условие 2-го рода

$$q_{\text{изл}} = -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z}, \quad (4)$$

а при нагреве с обратной стороны граничное условие 3-го рода

$$\alpha_{\text{окр}} (T_1 - t_{\text{окр}}) = -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z}, \quad (5)$$

где $q_{\text{изл}}$ – тепловой поток нагрева пластины путем теплового излучения; $\alpha_{\text{окр}}$ – приведенный ко-

эффицент теплоотдачи (излучением и конвекцией) от внешней поверхности стенки, имеющей температуру T_1 , в окружающую среду с температурой $t_{\text{окр}}$.

Исследуемый параметр – дифференциальный температурный сигнал ΔT , равный разности температур в исследуемой точке T и в зоне, принятой за бездефектную, $T_{\text{бд}}$:

$$\Delta T(r, z, \tau) = T(r, z, \tau) - T_{\text{бд}}(r, z, \tau). \quad (6)$$

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 [11]. Вследствие нелинейности уравнений и сложных граничных условий получить точное аналитическое решение данной задачи не представляется возможным.

2. Проведение компьютерного моделирования импульсного нагрева трехслойной пластины с дефектом с применением программного пакета Agros2D

Рассмотрим решение задачи методом конечных элементов в программном пакете Agros2D. Размеры и теплофизические характеристики материалов объекта контроля (см. рис. 1) приведены в таблице.

Размеры и теплофизические характеристики образца
Sample dimensions and thermophysical characteristics

Параметр	Наружные слои (1, 3)	Внутренний слой (2)	Дефект
Толщина, мм	1,7	5,6	0,2
Диаметр, мм	100	100	10
Материал	Сталь	Алюминий	Воздух
Плотность, кг/м ³	7850	2712	1,2
Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)	504	897	1005
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	17	203,5	0,02

Начальная температура пластины $T_0 = 20$ °С, температура окружающей среды $t_{\text{окр}} = 20$ °С. Мощность теплового потока нагрева $q_{\text{изл}}$ в различных вариантах решения составляет 6, 10 и 30 кВт/м².

Наблюдение температурного сигнала при нестационарном нагреве ведется на отрезке времени $\tau_1 = 60$ с, шаг расчета 0,1 с.

Этапы выполнения моделирования в Agros2D в целом соответствуют процессу проведения вычислений в других известных конечно-элементных пакетах. На начальном этапе заданы свойства задачи. Выбран тип координат (осесимметричный) и сетки КЭ (треугольная). Добавлено физическое поле (*Heat Transfer*) и определены общие свойства процесса (нестационарный с начальной температурой 293,15 К). Для анализа нестационарного процесса заданы метод определения шага (фиксированный шаг), общее время расчета и количество шагов.

После этого в препроцессоре создана геометрическая модель многослойной пластины с дефектом. Объект имеет простую форму, поэтому были заданы координаты вершин элементов (*Node*) и построены ребра (*Edge*). Вдоль ребер заданы граничные условия – нагрев с заданной мощностью теплового потока с одной из сторон пластины и теплоотдача конвекцией в окружающую среду на противоположной стороне и на боковой поверхности. На оси пластины задано граничное условие, соответствующее осевой симметрии. Для отдельных слоев пластины и воздушной прослойки заданы теплофизические характеристики материала. Полученная модель пластины представлена на рис. 2а.

После формирования модели выполнено наложение сетки конечных элементов. Agros2D автоматически адаптирует размер сетки в области дефекта. Размер элементов сетки у границ дефекта составляет 0,05...0,1 мм, в зонах более равномерного изменения температуры достигает 0,5...2 мм (рис. 2б).

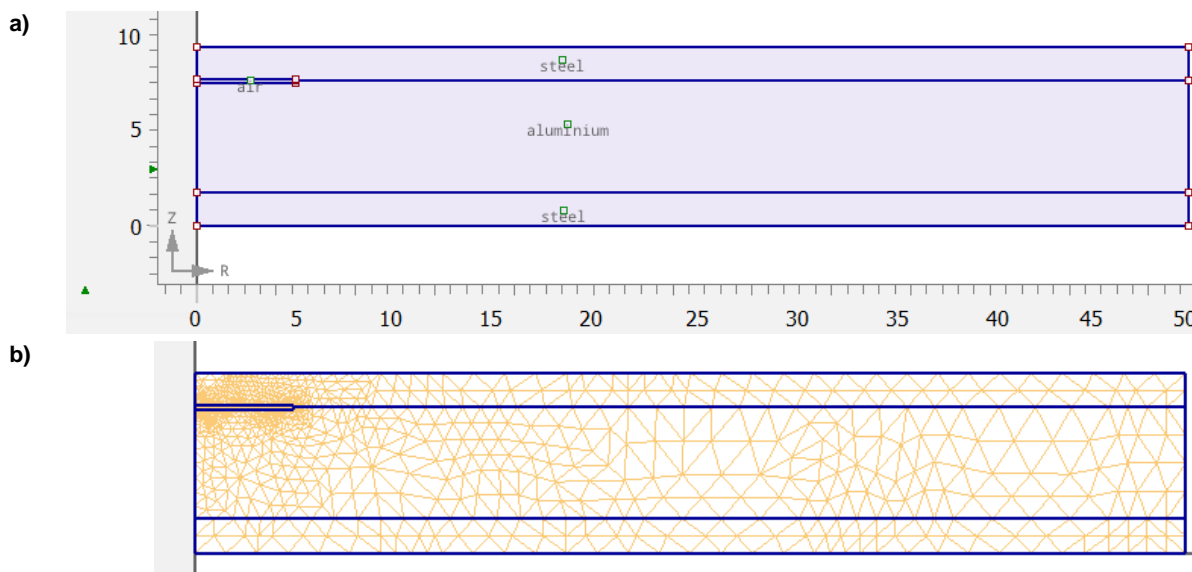


Рис. 2. Конечно-элементная осесимметричная модель трехслойной пластины с дефектом:
а – в препроцессоре; б – с наложенной сеткой конечных элементов
Fig. 2. Finite element axisymmetric model of a three-layer plate with a delamination:
a – in the preprocessor; b – with finite element mesh

В постпроцессоре отображается двумерная и трехмерная модель пластины после окончания нагрева (рис. 3).

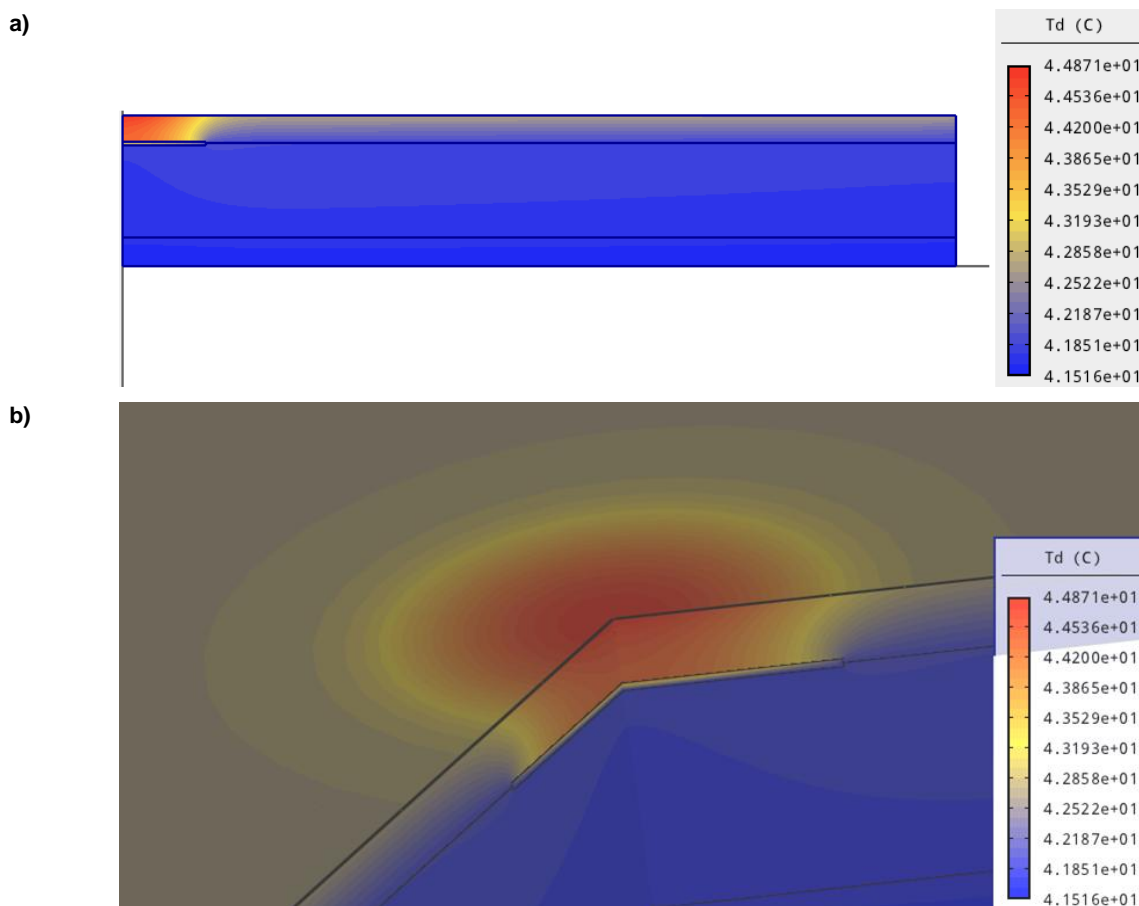


Рис. 3. Распределение температуры при измерении со стороны нагрева по истечении 60 с
при мощности теплового потока 10 кВт: а – в сечении пластины; б – в трехмерной модели пластины
Fig. 3. Temperature distribution on the heating side after 60 s with the heat flux power of 10 kW:
a – in the cross section of the plate; b – in 3D-model of the plate

Также в постпроцессоре построены графики распределения температуры по поверхности пластины вдоль ее радиуса, изменения температуры в точке поверхности на оси пластины и выполнен экспорт значений температуры в точках поверхности пластины для проведения дальнейших расчетов.

Расчеты проведены для различных значений мощности теплового потока и положения источника нагрева. Нагрев задавался поочередно на верхней и нижней стенке пластины, измерения производились на верхней стенке (со стороны дефекта).

3. Результаты моделирования

По результатам моделирования построены графики дифференциального температурного сигнала для всех вариантов численного эксперимента.

На рис. 4 представлена картина распределения температурного сигнала по поверхности пластины со стороны дефекта при нагреве сверху (рис. 4а) и снизу (рис. 4б).

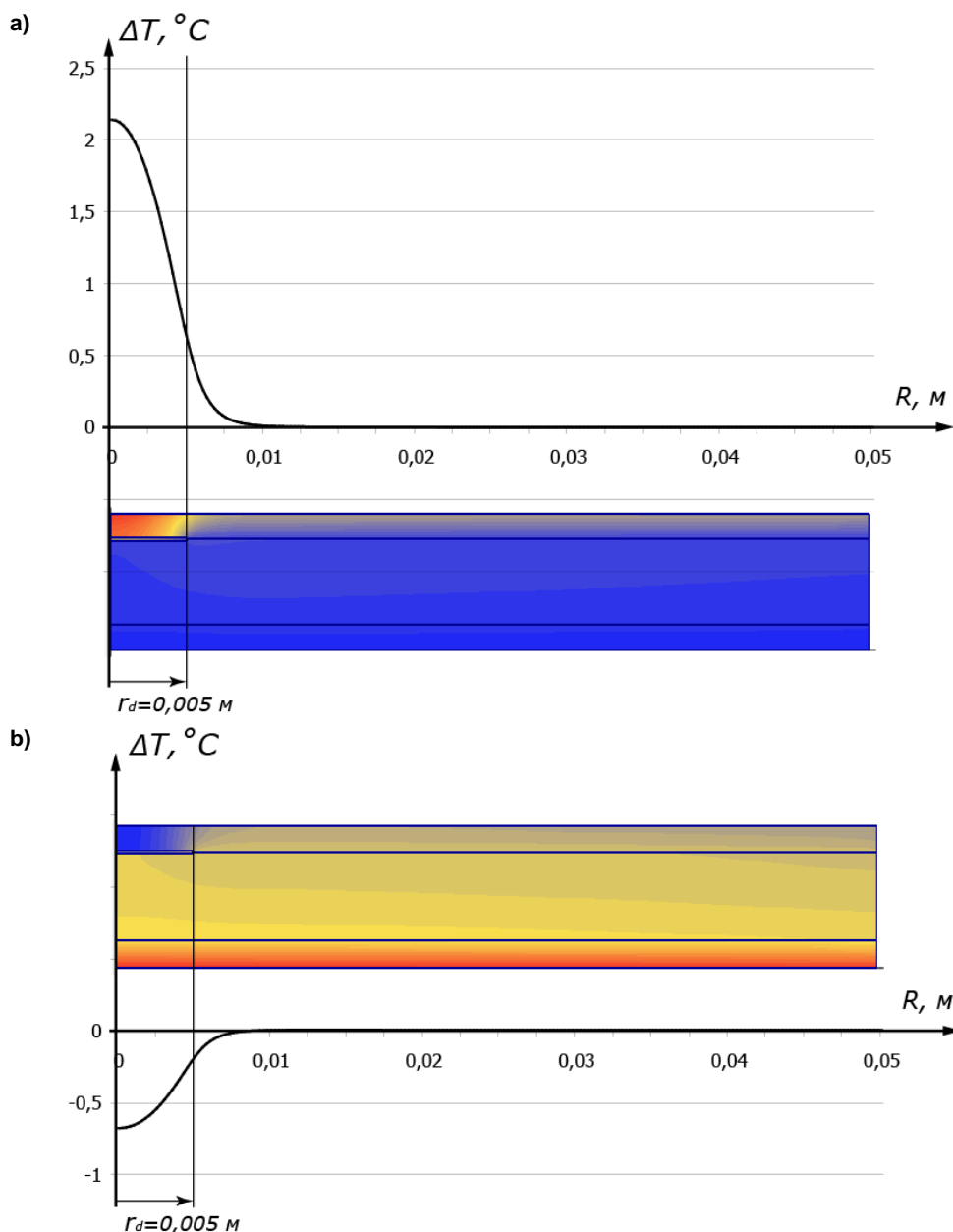


Рис. 4. Температурный сигнал над дефектом при мощности теплового потока 10 кВт:
а – при нагреве со стороны дефекта; б – при нагреве с обратной стороны

Fig. 4. Temperature signal above the defect at a heat flux power of 10 kW:
a – with front-surface heating; b – with rear-surface heating

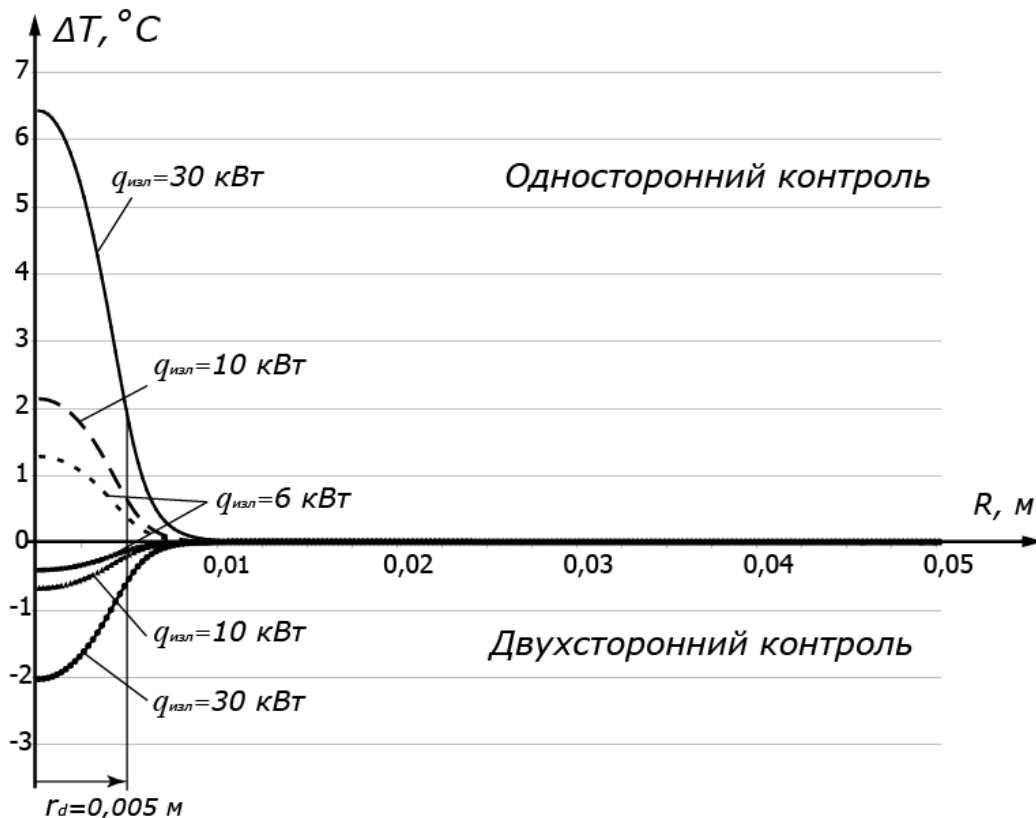


Рис. 5. Температурный сигнал над дефектом при различной мощности теплового воздействия
Fig. 5. Temperature signal above the defect at different power of thermal flux

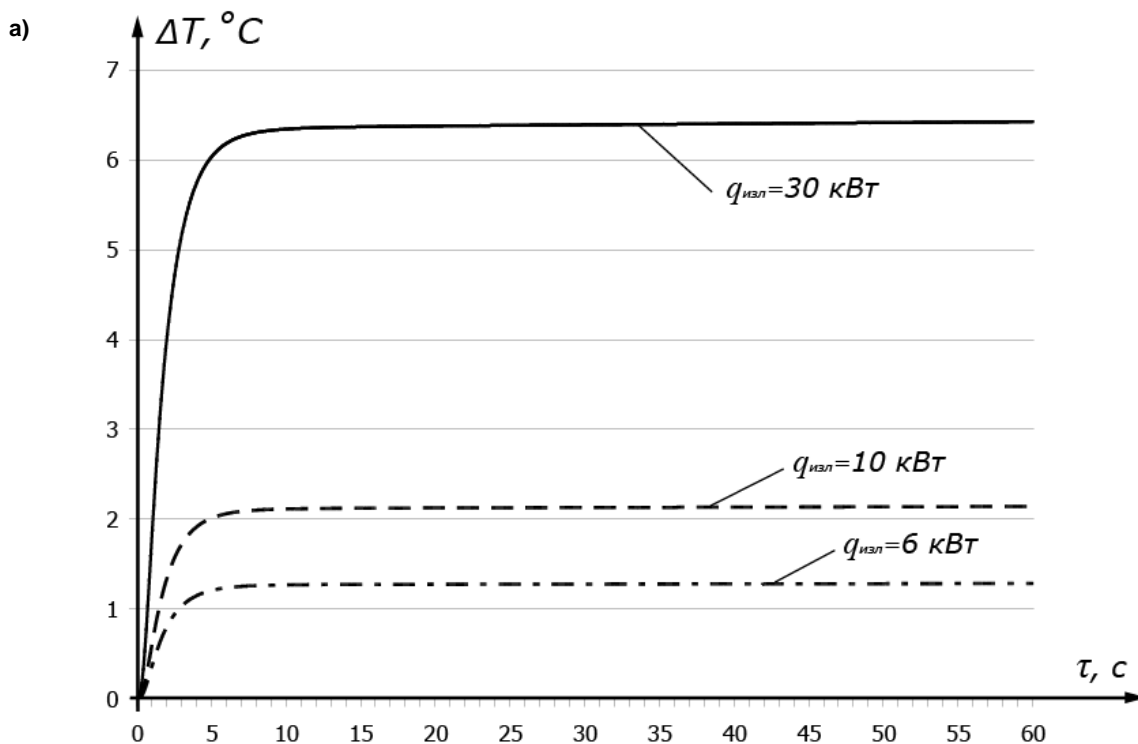


Рис. 6. Зависимость дифференциального сигнала на оси от времени нагрева:
а – при одностороннем контроле; б – при двухстороннем контроле
(см. также с. 77)

Fig. 6. Heating time dependence of the differential temperature signal on the plate center axis:
а – at one-sided test; б – at two-sided test
(see also p. 77)

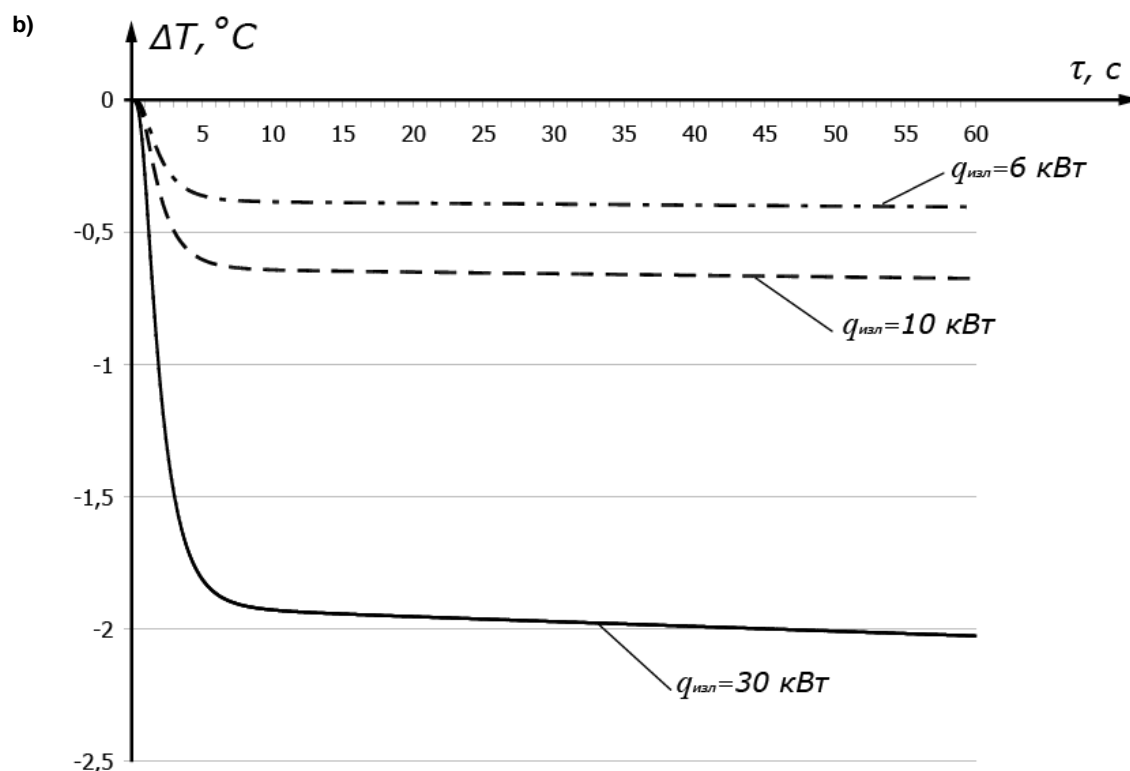


Рис. 6. Окончание
Fig. 6. End

Дефект в виде тонкой воздушной прослойки между металлами оказывает термическое сопротивление тепловому потоку, что приводит к увеличению температуры над дефектом, регистрируемой на нагреваемой поверхности, или к ее понижению, если устройства тепловой стимуляции и регистрации температуры расположены по разным сторонам пластины (при двухсторонней процедуре ТК).

Максимальная величина температурного сигнала наблюдается на оси цилиндрического дефекта.

На рис. 5 показано распределение температурного сигнала по поверхности пластины со стороны дефекта при различной мощности теплового потока нагрева для разных нагреваемых поверхностей.

Увеличение мощности тепловой стимуляции ведет к росту температурного сигнала.

Для определения оптимального времени нагрева пластин построены графики зависимости температурного сигнала над дефектом в центральной точке поверхности пластины от времени (рис. 6).

Во всех рассмотренных случаях можно определить характерный момент времени, до наступления которого температурный сигнал устойчиво растет. При одностороннем контроле время нагрева для исследуемого объекта может быть сокращено до 10 с, при двустороннем – до 15 с. При дальнейшем нагреве сигнал изменяется на сотые доли градуса, что является пределом чувствительности современных тепловизоров.

Заключение

Приведена математическая модель процесса нагрева трехслойной биметаллической пластины с цилиндрическим дефектом в виде воздушной прослойки между металлами. Рассмотрен процесс моделирования импульсного нагрева объекта исследования методом конечных элементов в программном пакете Agros2D. Результаты проведенного моделирования показывают, что дефекты расслоения между металлами оказывают сопротивление тепловому потоку, поэтому при измерении температуры со стороны источника теплового воздействия над дефектом будет наблюдаться локальное повышение температуры, а при расположении устройств тепловой стиму-

ляции и регистрации температуры с разных сторон пластины – ее снижение. Увеличение мощности тепловой стимуляции способствует росту амплитуды температурного сигнала. Максимальная величина сигнала наблюдается на оси дефекта, по результатам последовательных измерений температуры в центральной точке поверхности пластины над дефектом в ходе нагрева определен характерный момент времени, до наступления которого наблюдается устойчивый рост температурного сигнала. Полученные результаты могут быть использованы для дальнейших экспериментальных исследований и при формировании системы активного ТК изделий из многослойных биметаллических материалов.

Список литературы

1. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль: науч. изд. М.: ИД Спектр, 2009. 544 с.
2. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: справ.: в 2 кн. / под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 1986. Кн. 1. 488 с.
3. Netzelmann U., Walle G. High-speed pulsed thermography of thin metallic coatings // Quantitative Infrared Thermography – QIRT'98. DOI: 10.21611/qirt.1998.011. URL: <https://www.researchgate.net/publication/273344370> (дата обращения: 05.05.2022).
4. Bison P., Marinetti S., Grinzato E. et al. Inspecting thermal barrier coatings by IR thermography // Proc. SPIE. 5073. DOI: 10.1117/12.486019. URL: <https://www.researchgate.net/publication/252574078> (дата обращения: 05.05.2022).
5. Krapez J.-C., Maldague X., Cielo P. Thermographic Nondestructive Evaluation: Data Inversion Procedures Part II: 2-D Analysis and Experimental Results // Research in Nondestructive Evaluation. 1991. No. 2. P. 101–124. DOI: 10.1080/09349849109409505. URL: <https://www.researchgate.net/publication/261645355> (дата обращения: 05.12.2021).
6. Vavilov V., Marinetti S., Nesteruk D. Accuracy issues in modeling thermal NDT problems [Электронный ресурс] // Proc SPIE. 6939. DOI: 10.1117/12.775684. URL: <https://www.researchgate.net/publication/252222222> (дата обращения: 05.05.2022).
7. Есьман Р.И., Шевцов В.Ф. Компьютерное моделирование тепловых процессов в многослойных композиционных структурах // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. 2006. № 5. С. 62–67.
8. Ячиков И.М., Логунова О.С., Портнова И.В. Математическое моделирование теплофизических процессов. Магнитогорск: МГТУ, 2004. 175 с.
9. Пехович А.И., Жидких В.М. Расчеты теплового режима твердых тел. Л.: Энергия, 1976. 349 с.
10. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М.: Энергия, 1975. 488 с.
11. 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
12. Numerical solution of coupled problems using code Agros2D / P. Karban, F. Mach, P. Kůs et al. // Computing. 2013. Vol. 95, iss. 1 Supplement. P. 381–408. URL: <https://www.researchgate.net/publication/257448118> (дата обращения: 05.05.2022).
13. Ansys Lumerical HEAT 3D Heat Transport Solver. URL: <https://www.ansys.com/products/photonics/heat> (дата обращения 15.05.2022).
14. SauseM. Modeling of NDT Methods Using COMSOL Multiphysics® [Электронный ресурс]. URL: <https://www.comsol.com/blogs/modeling-of-ndt-methods-using-comsol-multiphysics> (дата обращения: 05.05.2022).
15. Agros Suite. URL: <http://www.agros2d.org> (дата обращения: 15.05.2022).

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. Klyuyev V.V. (Ed.). *Pribory dlya nerazrushayushchego kontrolya materialov i izdeliy: sprav.* [Nondestructive testing instruments for materials and products. Handbook]. In 2 books. Book 1. Moscow: Mashinostroyeniye Publ.; 1986. 488 p. (In Russ.)

3. Netzelmann U., Walle G. High-speed pulsed thermography of thin metallic coatings. In: *Quantitative Infrared Thermography – QIRT'98*. DOI: 10.21611/qirt.1998.011. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/273344370> (accessed 05 May 2022).
4. Bison P., Marinetti S., Grinzato E. et al. Inspecting thermal barrier coatings by IR thermography // In: *Proc. SPIE*. 5073. DOI: 10.1117/12.486019. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/252574078> (accessed 05 May 2022).
5. Krapez J.-C., Maldague X., Cielo P. Thermographic Nondestructive Evaluation: Data Inversion Procedures Part II: 2-D Analysis and Experimental Results. *Research in Nondestructive Evaluation*. 1991;(2):101–124. DOI: 10.1080/09349849109409505. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/261645355> (accessed 05 May 2022).
6. 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 05 May 2022).
7. Yes'man, R.I., Shevtcov V.F. [Numerical modeling of thermal processes in multilayer composite structures]. *Proceedings of Higher Educational Institutions and Energy Associations of the CIS. Energetics*. 2006;(5):62–67. (In Russ.)
8. Yachikov I.M., Logunova O.S., Portnova I.V. *Matematicheskoye modelirovaniye teplofizicheskikh protsessov* [Mathematical modeling of thermophysical processes]. Magnitogorsk: MSTU Publ.; 2004. 175 p. (In Russ.)
9. Pekhovich A.I., Zhidkikh V.M. *Raschety teplovogo rezhima tverdykh tel* [Calculations of the solids' thermal mode]. Leningrad: Energiya Publ.; 1976. 349 p. (In Russ.)
10. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. *Teploperedacha* [Heat transmission]. Moscow: Energiya Publ.; 1975. 488 p. (In Russ.)
11. 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
12. Karban P., Mach F., Kús P., Pánek D., Doležel I. Numerical solution of coupled problems using code Agros2D. *Computing*. 2013;95(1 Supplement):381–408. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/257448118> (accessed 05 May 2022).
13. *Ansys Lumerical HEAT 3D Heat Transport Solver*. Available at: <https://www.ansys.com/products/photonics/heat> (accessed 15 May 2022).
14. Sause M. *Modeling of NDT Methods Using COMSOL Multiphysics®*. Available at: <https://www.comsol.com/blogs/modeling-of-ndt-methods-using-comsol-multiphysics> (accessed 05 May 2022).
15. *Agros Suite*. Available at: <http://www.agros2d.org> (accessed 15 May 2022).

Информация об авторе

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

Information about the author

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

Статья поступила в редакцию 14.06.2022

The article was submitted 14.06.2022