

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДЕФЕКТА РАССЛОЕНИЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЛАСТИНЫ ПОСРЕДСТВОМ АКТИВНОГО ТЕПЛООВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

О.В. Логиновский¹, Л.Ю. Костылева¹, А.А. Максимов², И.М. Ячиков¹

¹ Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия,

² Государственная Дума Федерального Собрания Российской Федерации VIII созыва, г. Москва, Россия

Биметаллы во многом являются заменителями дефицитных металлов, при этом они представляют самостоятельную группу материалов, необходимых при создании новых машин, приборов и других различных изделий. Возрастающий объем производства биметаллов и изделий из них требует повышения их эксплуатационных характеристик и, соответственно, повышения качества готовых изделий. Одной из сложных технологических задач является соединение алюминия и его сплавов со сталями различных классов, так как возникает много проблем, связанных с качеством соединения металлов с разными свойствами. Для повышения надежности и долговечности работы машин и других изделий, изготавливаемых из биметаллов, необходимо проводить непрерывный контроль их качества, и наиболее эффективными являются методы неразрушающего контроля. Довольно перспективным в плане простоты и доступности является метод активного теплового контроля, при котором исследуемое изделие подвергается импульсному тепловому воздействию посредством источника теплового нагружения. Амплитуда, форма и изменение во времени температурных сигналов служат информативными параметрами, которые позволяют оператору или автоматической системе обнаруживать те или иные дефекты и оценивать их параметры. При всей доступности импульсного теплового контроля наиболее сложным остается компонент, связанный со специализированными компьютерными программами обработки экспериментальных данных и определения параметров дефекта расслоения. **Целью исследования** является создание компьютерной модели теплового состояния биметаллической пластины при наличии воздушного пузыря между слоями и посредством компьютерного моделирования определение размеров дефектов при активном импульсном тепловом неразрушающем контроле сталеалюминиевых пластин. **Материалы и методы.** При выполнении работы применялись методы математического и компьютерного моделирования. Созданное программное обеспечение с использованием средств разработки пакета MATLAB основывалось на известных методах получения приближенного решения краевой задачи на ЭВМ с применением метода конечных разностей. **Результаты.** Разработана математическая модель алгоритма решения краевой задачи и создана компьютерная программа, позволяющая моделировать проведение импульсного теплового контроля для определения параметров дефекта расслоения биметаллической пластины. **Заключение.** Установлено, что более эффективным является измерение разности температур со стороны, где располагается дефект и произведен нагрев многослойной пластины. Нагрев пластин со стороны, противоположной дефекту, и их дальнейшее охлаждение показали существенно меньшую эффективность с точки зрения получения полезного температурного сигнала. Показано, что при наличии дефекта чем больше тепловой поток нагружения и размер дефекта, тем больше величина полезного сигнала, определяемая разностью температур на измеряемой поверхности.

Ключевые слова: биметалл, методы теплового неразрушающего контроля, инфракрасный неразрушающий контроль, дефектоскопия, дефектометрия, дефект соединения между слоями металлов.

Введение

Интенсивное развитие современной техники постоянно требует создания и широкого использования конструкционных материалов со специальными свойствами. В связи с этим большие перспективы по применению в промышленности получили биметаллические материалы. Биме-

таллы во многом являются заменителями дефицитных металлов, при этом они представляют самостоятельную группу материалов, необходимых при создании новых машин, приборов и других различных изделий. Таким образом, возрастающий объем производства биметаллов и изделий из них требует повышения их эксплуатационных характеристик и, соответственно, повышения качества готовых изделий.

Применение сталеалюминиевых соединений позволило создать сварные облегченные конструкции и соединения в судостроении и химическом машиностроении [1], а также в ряде других областей, например, при производстве современной кухонной посуды [2].

Одной из сложных технологических задач является соединение алюминия и его сплавов со сталями различных классов, так как возникает много проблем, связанных с качеством соединения металлов с разными свойствами. Для повышения надежности и долговечности работы машин и других изделий, изготавливаемых из биметаллов, необходимо проводить непрерывный контроль их качества, и наиболее эффективными являются методы неразрушающего контроля.

Выявление несплошностей (расслоения) в процессе производства биметалла является актуальной задачей. В дефектоскопии для контроля изделий из металлов применяют визуально-оптические, капиллярные, магнитные, токовихревые, ультразвуковые и радиационные методы. Достоверность разных методов локации исследуемого материала обычно определяется с помощью разрушающих методов контроля. В настоящее время наиболее распространенным приемом для определения характера дефектов в биметаллических структурах являются методы ультразвуковой диагностики [3].

При многих преимуществах ультразвукового контроля довольно перспективным в плане простоты и доступности является метод активного теплового контроля, при котором исследуемое изделие подвергается тепловому воздействию посредством источника теплового нагружения [4, 5]. За счет процесса теплопроводности внутри металлического тела тепловая энергия распространяется во всех направлениях. Из-за наличия скрытых дефектов тепловые потоки внутри образца перераспределяются, что приводит к появлению на передней и задней поверхности образца специфических температурных аномалий. Температурные аномальные поля (или сигналы) наблюдаются и регистрируются с помощью устройств измерения или визуализации температуры – чаще всего с помощью тепловизора [6]. Амплитуда, форма и изменение во времени температурных сигналов служат информативными параметрами, которые позволяют оператору или автоматической системе обнаруживать те или иные дефекты (дефектоскопия), а также оценивать их параметры (дефектометрия).

Современные технологии систем активного теплового контроля включают в себя следующие основные компоненты: 1) источник нагрева; 2) компьютерная система с тепловизором; 3) специализированные компьютерные программы для моделирования задач теплового контроля и обработки экспериментальных данных [7]. Большинство существующих процедур диагностики могут быть классифицированы как разновидности импульсного теплового контроля (*pulsed thermal NDT*). Он предусматривает нагрев изделия импульсом тепловой энергии определенной интенсивности и длительности и регистрацию температуры на передней, задней или боковой поверхности изделия как во время действия импульса, то есть на стадии нагрева, так и после его окончания – на стадии охлаждения [8].

При наиболее простом способе поверхность объекта контроля нагревают с помощью электрических ламп накаливания. Достижимая плотность нагрева может составлять до нескольких кВт/м² в зоне диаметром до 1 м при произвольной длительности нагрева. Для более интенсивного теплового нагружения металлов используются галогенные лампы постоянного или импульсного действия, которые создают плотность энергии до 100 кВт/м² в течение времени от нескольких миллисекунд до нескольких секунд.

Особенностью диагностируемых дефектов расслоения, возникающих при изготовлении биметаллических пластин, является то, что глубина нахождения дефекта известна и важным для задачи дефектометрии является определение его размеров. При всей доступности импульсного теплового контроля наиболее сложным остается компонент, связанный со специализированными компьютерными программами обработки экспериментальных данных и определения параметров дефекта расслоения.

Целью работы является создание компьютерной модели теплового состояния биметаллической пластины при наличии воздушного пузыря между слоями (расслоения) и посредством компьютерного моделирования определение размеров дефектов при активном импульсном тепловом неразрушающем контроле сталеалюминиевых пластин.

1. Математическая модель теплового состояния биметаллической пластины при наличии дефекта соединения между слоями

Имеется горизонтальная пластина, состоящая из трех слоев I–III, внешние слои стальные толщиной h и внутренний алюминиевый толщиной H . Толщина многослойной пластины существенно меньше ее других размеров. Между верхней стальной и алюминиевой пластинами находится небольшой дефект их контакта, а именно цилиндрический воздушный зазор. Высота цилиндра δ и диаметр d (рис. 1).

В начальный момент времени пластина имеет температуру T_0 и начинает нагреваться под действием заданного теплового потока излучения $q_{изл}$. Рассматриваются два варианта его воздействия в течение времени τ_1 : а – на верхнюю поверхность; б – на нижнюю поверхность. Далее многослойная пластина остывает посредством естественной конвекции в воздухе с температурой $t_{окр}$ в течение времени τ_2 . Требуется определить нестационарное распределение температур по поверхности верхней и нижней стальной пластины для обоих вариантов воздействия теплового потока.

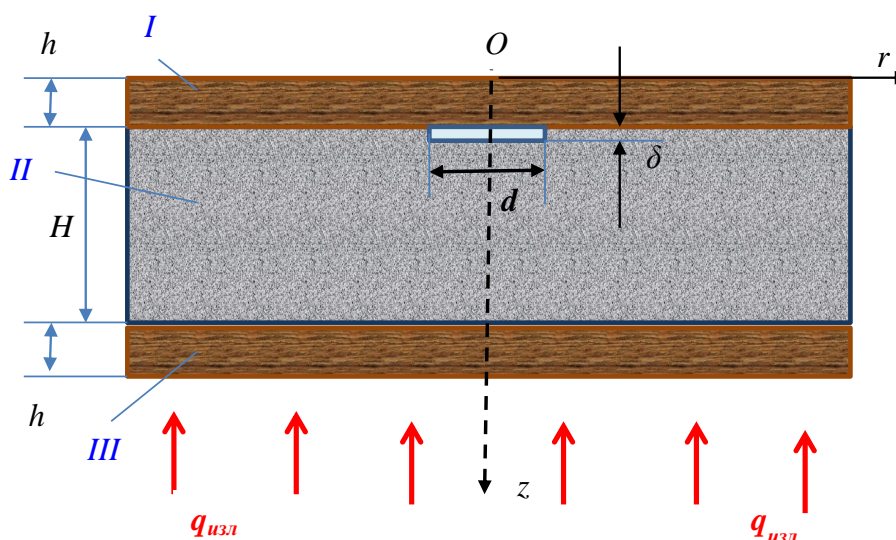


Рис. 1. Многослойная пластина, ее основные размеры и выбор системы координат.

Показан тепловой поток согласно варианту (б)

Fig. 1. Multilayer plate, its main dimensions and the choice of the coordinate system.

The heat flow is indicated according to option (b)

На рис. 1 показана используемая цилиндрическая система координат Orz , причем вертикальная ось Oz совпадает с осью цилиндрического воздушного зазора, а начало координат находится на поверхности верхней стальной пластины.

При моделировании теплового состояния многослойной пластины был принят ряд допущений и ограничений.

1. Для температурного поля имеет место осевая симметрия ($dT/d\varphi = 0$), считаем, что температурное поле нестационарное и двухмерное – $T(r, z, \tau)$.

2. Все пластины имеют форму цилиндра радиуса R , причем $R \gg H$, $R \gg h$.

3. Передачей тепла в цилиндрическом воздушном зазоре можно пренебречь.

4. Отсутствует термическое сопротивление в контакте стальной и алюминиевой пластин.

Считаем, что контакт между отдельными слоями является идеальным, то есть на границе раздела выполняется равенство температур и тепловых потоков [9].

Будем полагать, что распределение температуры в двух стальных пластинах и алюминиевой пластине описывается уравнением теплопроводности ($\tau > 0$, $0 \leq r \leq R$, $0 \leq z \leq H + 2h$)

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

где $i = 1, 2, 3$; τ – время; $T(r, z, \tau)$ – температура; $a_i = \frac{\lambda_i}{c_i \rho_i}$ – коэффициент температуропроводности; λ_i , ρ_i , c_i – соответственно теплопроводность, плотность и удельная теплоемкость металлов. Индекс 1 соответствует стали при $0 \leq z \leq h$; индекс 2 – алюминию при $h \leq z \leq H + h$; индекс 3 – стали при $H + h \leq z \leq H + 2h$.

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

Начальные условия

В начальный момент времени считаем, что температура во всех точках расчетной области равна температуре окружающей среды (для $0 \leq z \leq H + 2h$, $0 \leq r \leq R$):

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

Граничные условия (ГУ)

На оси цилиндра имеем условие осевой симметрии (для $r = 0$, $0 \leq z \leq H + 2h$)

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

На боковой стенке многослойной цилиндрической пластины из допущения (2) имеем (для $r = R$, $0 \leq z \leq H + 2h$)

$$\frac{\partial T_i}{\partial r} = 0. \quad (4)$$

На верхней стенке I пластины.

Для варианта (а) ($0 < r = R$, $z = 0$) в период нагрева пластины имеем $0 < \tau \leq \tau_1$ граничное условие 2-го рода

$$q_{\text{изл}} = -\lambda_{\text{ст}} \frac{\partial T_1}{\partial z}, \quad (5)$$

при ее остывании $\tau_1 < \tau \leq \tau_1 + \tau_2$ граничное условие 3-го рода

$$\alpha_{\text{окр}} (T_1 - t_{\text{окр}}) = -\lambda_{\text{ст}} \frac{\partial T_1}{\partial z}, \quad (6)$$

где $q_{\text{изл}}$ – тепловой поток нагрева пластины путем теплового излучения; $\alpha_{\text{окр}}$ – приведенный коэффициент теплоотдачи (излучением и конвекцией) от внешней поверхности стенки, имеющей температуру T_1 , в окружающую среду с температурой $t_{\text{окр}}$.

При расчете тепловых потерь через наружные поверхности тел, которые находятся в спокойном воздухе закрытых помещений, можно применить следующую формулу [10]

$$\alpha_{\text{окр}} = 9,74 + 0,07(T_1 - t_{\text{окр}}), \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}) \text{ при } T_1 < 150^\circ\text{C}. \quad (7)$$

Результаты вычислений, полученные с ее помощью, достаточно близки к результатам более точных расчетов.

Для варианта (б) на верхней стенке пластины имеем ее остывание при граничном условии 3-го рода $0 < \tau \leq \tau_1 + \tau_2$

$$\alpha_{\text{окр}} (T_1 - t_{\text{окр}}) = -\lambda_{\text{ст}} \frac{\partial T_1}{\partial z}. \quad (8)$$

На нижней стенке пластины III.

Для варианта (а) ($0 < r = R$, $z = H + 2h$) при $0 < \tau \leq \tau_1 + \tau_2$ имеем граничное условие 3-го рода

$$\alpha_{\text{окр}} (T_3 - t_{\text{окр}}) = -\lambda_{\text{ст}} \frac{\partial T_3}{\partial z}. \quad (9)$$

Для варианта (б) в период нагрева пластины $0 < \tau \leq \tau_1$ имеем граничное условие 2-го рода ($0 < r = R, z = H + 2h$)

$$q_{\text{изл}} = -\lambda_{\text{ст}} \frac{\partial T_3}{\partial z}, \quad (10)$$

при ее остывании $\tau_1 < \tau \leq \tau_1 + \tau_2$ граничное условие 3-го рода

$$\alpha_{\text{окр}}(T_3 - t_{\text{окр}}) = -\lambda_{\text{ст}} \frac{\partial T_3}{\partial z}. \quad (11)$$

На границе верхней стальной I и алюминиевой II пластин задаем граничное условие четвертого рода (при $z = h, d/2 \leq r \leq R, \tau > 0$)

$$\frac{\partial T_1}{\partial z} \lambda_{\text{ст}} = \frac{\partial T_2}{\partial z} \lambda_{\text{Al}}; \quad T_1 = T_2. \quad (12)$$

На границе нижней стальной III и алюминиевой II пластин также задаем граничное условие четвертого рода (при $z = H + h, 0 \leq r \leq R, \tau > 0$)

$$\frac{\partial T_3}{\partial z} \lambda_{\text{ст}} = \frac{\partial T_2}{\partial z} \lambda_{\text{Al}}; \quad T_3 = T_2. \quad (13)$$

На границе воздушного зазора.

На верхней и нижней стороне $0 \leq r \leq d/2$, при $z = h$

$$\lambda_{\text{ст}} \frac{\partial T_1}{\partial z} = 0, \quad (14)$$

при $z = h + \delta$

$$\lambda_{\text{Al}} \frac{\partial T_2}{\partial z} = 0. \quad (15)$$

На боковой стороне цилиндрического воздушного зазора при $r = d/2, h \leq z = h + \delta$

$$\lambda_{\text{Al}} \frac{\partial T_2}{\partial r} = 0. \quad (16)$$

Таким образом, получена математическая модель (1)–(16), представляющая собой краевую задачу для определения нестационарного распределения температур в трехслойной стенке с динамическими граничными условиями.

2. Алгоритм решения краевой задачи теплового состояния многослойной пластины

Вследствие нелинейности уравнения (1) и сложных граничных условий получить точное аналитическое решение краевой задачи (1)–(16) не представляется возможным. Для получения приближенного решения с помощью ЭВМ использовался метод конечных разностей.

Введем разностную сетку, регулярную по пространственным переменным и времени с координатами узлов: $r_i = (i-1) \cdot \Delta r$, $z_j = (j-1) \cdot \Delta z$, $\tau_k = k \cdot \Delta \tau$ (рис. 2). Сетка имеет постоянные шаги по координате $r - \Delta r = R/(N_R - 1)$ и по координате $z - \Delta z = \delta/4$ и времени $\Delta \tau$, где $i = 1, 2, \dots, N_R$, $j = 1, 2, \dots, N_z$; $k = 0, 1, 2, \dots, K$; $N_R, N_z = (H + 2h)/\Delta z + 1$ и $K = (\tau_1 + \tau_2)/\Delta \tau$ – число интервалов на рассматриваемой области по осям r, z и τ соответственно. Сеточные функции будем обозначать при помощи индексов $T(r_i, z_j, \tau_k) = T_{i,j}^k$.

Введем следующие обозначения:

$$I_1 = \text{round}\left(\frac{d}{2 \cdot \Delta r} + 1\right), \quad J_1 = \text{round}\left(\frac{h}{\Delta z} + 1\right), \quad J_{1\delta} = \text{round}\left(\frac{h + \delta}{\Delta z} + 1\right), \quad J_2 = \text{round}\left(\frac{h + H}{\Delta z} + 1\right).$$

Для расчета поля температур используем схему расщепления по координатам. На каждом шаге по времени введем промежуточный этап, на котором будем записывать одномерную аппроксимацию по одному из пространственных направлений. Рассматриваемая двумерная задача «расщепляется» на последовательность одномерных задач по каждой из координат, при этом погрешности аппроксимаций промежуточных слоев при суммировании уничтожаются [11, 12].

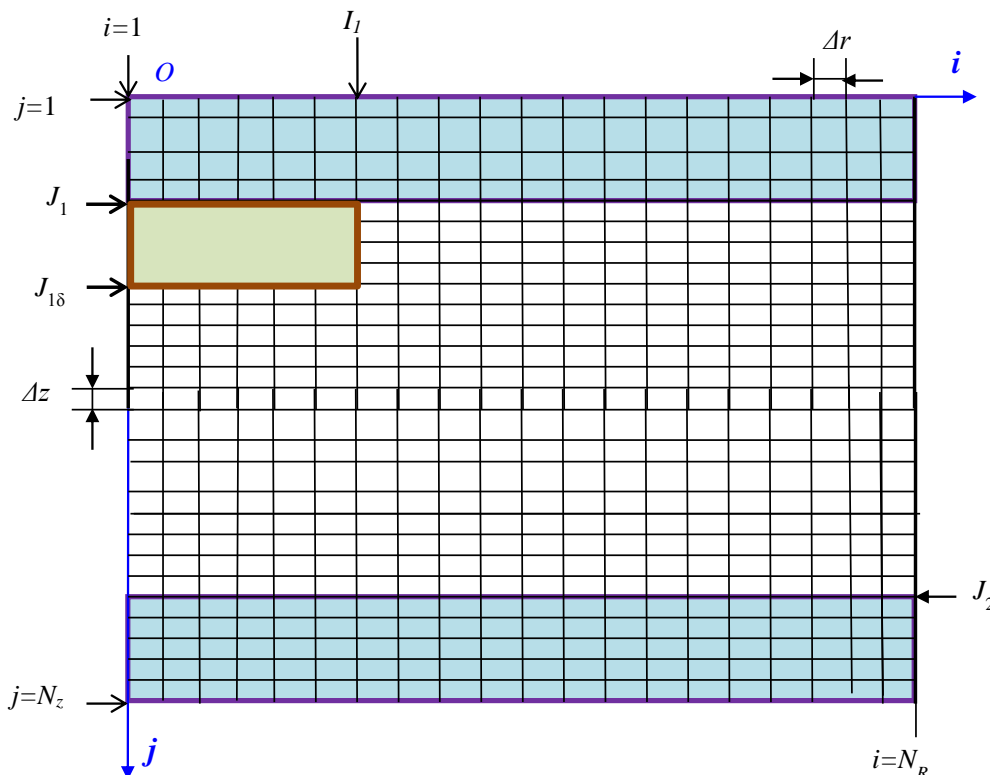


Рис. 2. Схема наложения разностной сетки на рабочую область
 Fig. 2. The scheme of imposing a difference mesh on the working area

Для решения уравнения (1) используем схему расщепления, которая приводит к безусловно устойчивой локально-одномерной схеме, по оси r

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (17)$$

и по оси z

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}. \quad (18)$$

Используя симметричную аппроксимацию пространственных производных, получим:

$$\frac{T_{i,j}^{k+1/2} - T_{i,j}^k}{\Delta\tau/2} = a \left(\frac{T_{i+1,j}^{k+1/2} + T_{i-1,j}^{k+1/2} - 2 \cdot T_{i,j}^{k+1/2}}{\Delta r^2} + \frac{1}{(i-1) \cdot \Delta r} \cdot \frac{T_{i+1,j}^{k+1/2} - T_{i-1,j}^{k+1/2}}{2 \cdot \Delta r} \right),$$

$$\frac{T_{i,j}^{k+1} - T_{i,j}^{k+1/2}}{\Delta\tau/2} = a \left(\frac{T_{i,j+1}^{k+1} + T_{i,j-1}^{k+1} - 2 \cdot T_{i,j}^{k+1}}{\Delta z^2} \right).$$

Сделаем некоторые упрощения и преобразования, имеем:

$$F_{0r} \left(1 + \frac{1}{2(i-1)} \right) \cdot T_{i+1,j}^{k+1/2} - (2F_{0r} + 1) \cdot T_{i,j}^{k+1/2} + F_{0r} \left(1 - \frac{1}{2(i-1)} \right) \cdot T_{i-1,j}^{k+1/2} = -T_{i,j}^k, \quad (19)$$

$$F_{0z} \cdot T_{i,j+1}^{k+1} - (2F_{0z} + 1) \cdot T_{i,j}^{k+1} + F_{0z} \cdot T_{i,j-1}^{k+1} = -T_{i,j}^{k+1/2}, \quad (20)$$

где $F_{0r} = (a \cdot \Delta\tau) / (2 \cdot \Delta r^2)$, $F_{0z} = (a \cdot \Delta\tau) / (2 \cdot \Delta z^2)$.

При решении уравнения (19) для цилиндрической стенки получим уравнение в виде трехдиагональной матрицы:

$$T_{i-1,j}^{k+1/2} \cdot A_i - T_{i,j}^{k+1/2} \cdot B_i + T_{i+1,j}^{k+1/2} \cdot C_i = D_i, \quad (21)$$

где $A_i = F_{0r} \left(1 - \frac{1}{2(i-1)} \right)$, $B_i = 1 + 2F_{0r}$, $C_i = F_{0r} \left(1 + \frac{1}{2(i-1)} \right)$, $D_i = -T_{i,j}^k$.

Аналогично при решении уравнения (20) для плоской стенки имеем систему уравнений:

$$T_{i,j-1}^{k+1} A_j - T_{i,j}^{k+1} B_j + T_{i,j+1}^{k+1} C_j = D_j, \quad (22)$$

где $A_j = F_{0z}$, $B_j = 1 + 2F_{0z}$, $C_j = F_{0z}$, $D_j = -T_{ij}^{k+1/2}$.

Решая последовательно задачи (21) и (22), получим значение функции $T_{i,j}^{k+1}$, которое отличается от истинного значения $T(r, z, \tau)$ решения задачи (1) на величину $O(\Delta\tau^2)$. При этом процесс решения двухмерной задачи заменяется процессом последовательного решения двух одномерных задач. Описанная разностная схема расщепления (21), (22) имеет преимущества в смысле простоты и наглядности решаемой задачи и относительно небольшого объема вычислений.

Каждое из соотношений (21) и (22) образует систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), которые решались известным методом алгоритма прогонки [13, 14].

1. Для всех $i = 2, 3, \dots, N-1$ определяем коэффициенты (прямая прогонка)

$$\alpha_i = \frac{A_i}{B_i - C_i \cdot \alpha_{i-1}}; \quad \beta_i = \frac{C_i \cdot \beta_{i-1} - D_i}{B_i - C_i \cdot \alpha_{i-1}}, \quad (23)$$

при этом считаем известными α_1 и β_1 из левого граничного условия.

2. При всех $i = N-1, \dots, 2, 1$ определяем температуры (обратная прогонка)

$$T_i = \alpha_i \cdot T_{i+1} + \beta_i, \quad (24)$$

при этом считаем известным T_N из правого граничного условия.

Далее рассмотрим алгоритм дискретизации начальных и граничных условий. Имеем начальное распределение температур (для $i = 1 \dots N_R$, $j = 1, 2, \dots, N_z$)

$$T_{i,j} = t_{\text{окр}}. \quad (25)$$

Для реализации алгоритма прогонки (1), (2) проведем дискретизацию граничных условий (3)–(16) с погрешностью $O(h)$, задавая недостающие коэффициенты СЛАУ (23), (24) [15].

При прогонке по r на левой границе имеем граничное условие на оси симметрии (3) или условие теплоизоляции на боковой стенке воздушного зазора (16). Из выражения (24) можно записать $T_1 = \alpha_1 T_2 + \beta_1$, из условия (3) $T_1 = T_2$, решая совместно эти уравнения, получим при $i = 1$, $j = 1 \dots J_1$ и $j = J_{1\delta} \dots N_z$

$$\alpha_1 = 1, \quad \beta_1 = 0. \quad (26)$$

Аналогично из условия (16) при $i = I_1, j = J_1 + 1 \dots J_{1\delta} - 1$

$$\alpha_{I_1} = 1, \quad \beta_{I_1} = 0. \quad (27)$$

При прогонке по r на правой границе $i = N_R, j = 1 \dots N_z$ (граничное условие на боковой стенке цилиндрических пластин) из формулы (4) имеем $T_{N_R} = T_{N_R-1}$. Подставим в нее выражение на основе (24) $T_{N_R-1} = \alpha_{N_R-1} T_{N_R} + \beta_{N_R-1}$, получим

$$T_{N_R} = \frac{\beta_{N_R-1}}{1 - \alpha_{N_R-1}}. \quad (28)$$

При прогонке по z на левой границе для I пластины, ГУ 2-го рода.

Из выражения (24) имеем $T_1 = \alpha_1 T_2 + \beta_1$, из выражения (5) $\lambda_{\text{ст}} \frac{T_1 - T_2}{\Delta z} = q_{\text{изл}}$, решая совместно эти уравнения, получим (при $i = 1 \dots N_R, j = 1$)

$$\alpha_1 = 1, \quad \beta_1 = \frac{\Delta z \cdot q_{\text{изл}}}{\lambda_{\text{ст}}}. \quad (29)$$

При ГУ 3-го рода. Из выражения (24) имеем $T_1 = \alpha_1 T_2 + \beta_1$, из (6) $\lambda_{\text{ст}} \frac{T_2 - T_1}{\Delta z} = \alpha_{\text{окр}} (T_1 - t_{\text{окр}})$, решая совместно эти уравнения, получим (при $i = 1 \dots N_R, j = 1$)

$$\alpha_1 = \frac{1}{1 + \varphi}, \quad \beta_1 = \frac{\varphi}{1 + \varphi} t_{\text{окр}}, \quad (30)$$

где $\varphi = \Delta z \cdot \alpha_{\text{окр}} / \lambda_{\text{ст}}$.

На правой границе для I пластины, ГУ 2-го рода.

Для верхней стороны воздушного зазора из выражения (14) имеем $T_{J_1} = T_{J_1-1}$. Подставим в него выражение на основе (24) $T_{J_1-1} = \alpha_{J_1-1} T_{J_1} + \beta_{J_1-1}$, получим (при $i = 1 \dots J_1 - 1, j = J_1$)

$$T_{J_1} = \frac{\beta_{J_1-1}}{1 - \alpha_{J_1-1}}. \quad (31)$$

При ГУ 4-го рода. На границе верхней стальной и алюминиевой пластин из выражения (12) имеем $\lambda_{\text{ст}}(T_{J_1} - T_{J_1-1}) = \lambda_{\text{ал}}(T_{J_1+1} - T_{J_1})$. Подставим в него выражение на основе (24)

$T_{J_1-1} = \alpha_{J_1-1} T_{J_1} + \beta_{J_1-1}$, получим (при $i = 1 \dots N_R, j = J_1$)

$$T_{J_1} = \frac{\lambda_{\text{ст}} \cdot \beta_{J_1-1} + \lambda_{\text{ал}} \cdot T_{J_1+1}}{\lambda_{\text{ст}} \cdot (1 - \alpha_{J_1-1}) + \lambda_{\text{ал}}}. \quad (32)$$

При прогонке по z на левой границе для II пластины, ГУ 2-го рода. Для нижней стороны воздушного зазора из выражения (15) имеем $T_{J_{18}} = T_{J_{18}+1}$, получим (при $i = 1 \dots J_1 - 1, j = J_{18}$)

$$\alpha_{J_{18}} = 1, \quad \beta_{J_{18}} = 0. \quad (33)$$

При ГУ 4-го рода. На границе верхней стальной и алюминиевой пластин из выражения (12) имеем $\lambda_{\text{ст}}(T_{J_1} - T_{J_1-1}) = \lambda_{\text{ал}}(T_{J_1+1} - T_{J_1})$. Из выражения (24) имеем $T_{J_1} = \alpha_{J_1} T_{J_1+1} + \beta_{J_1}$, получим (при $i = 1 \dots N_R, j = J_1$)

$$\alpha_{J_1} = \frac{1}{1 + \lambda_{\text{ал}} / \lambda_{\text{ст}}}, \quad \beta_{J_1} = \frac{T_{J_1-1}}{1 + \lambda_{\text{ст}} / \lambda_{\text{ал}}}. \quad (34)$$

При прогонке по z на правой границе для II пластины, ГУ 4-го рода.

На границе нижней стальной и алюминиевой пластин из выражения (13) имеем $\lambda_{\text{ал}}(T_{J_2} - T_{J_2-1}) = \lambda_{\text{ст}}(T_{J_2+1} - T_{J_2})$. Подставим в него выражение на основе (24)

$T_{J_2-1} = \alpha_{J_2-1} T_{J_2} + \beta_{J_2-1}$, получим (при $i = 1 \dots N_R, j = J_2$)

$$T_{J_2} = \frac{\lambda_{\text{ал}} \cdot \beta_{J_2-1} + \lambda_{\text{ст}} \cdot T_{J_2+1}}{\lambda_{\text{ал}} \cdot (1 - \alpha_{J_2-1}) + \lambda_{\text{ст}}}. \quad (35)$$

При прогонке по z на левой границе для III пластины, ГУ 4-го рода.

На границе нижней стальной и алюминиевой пластин из выражения (13) имеем $\lambda_{\text{ал}}(T_{J_2} - T_{J_2-1}) = \lambda_{\text{ст}}(T_{J_2+1} - T_{J_2})$. Из выражения (24) имеем $T_{J_2} = \alpha_{J_2} T_{J_2+1} + \beta_{J_2}$, получим (при $i = 1 \dots N_R, j = J_2$)

$$\alpha_{J_2} = \frac{1}{1 + \lambda_{\text{ал}} / \lambda_{\text{ст}}}, \quad \beta_{J_2} = \frac{T_{J_2-1}}{1 + \lambda_{\text{ст}} / \lambda_{\text{ал}}}. \quad (36)$$

При прогонке по z на правой границе для III пластины, ГУ 2-го рода.

Из выражения (24) имеем $T_{N_z-1} = \alpha_{N_z-1} T_{N_z} + \beta_{N_z-1}$, из выражения (5) $\lambda_{\text{ст}} \frac{T_{N_z} - T_{N_z-1}}{\Delta z} = q_{\text{изл}}$, решая совместно эти уравнения, получим (при $i = 1 \dots N_R, j = N_z$)

$$T_{N_z} = \frac{q_{\text{изл}} \cdot \Delta z}{\lambda_{\text{ст}} (1 - \alpha_{N_z-1})} + \frac{\beta_{N_z-1}}{1 - \alpha_{N_z-1}}. \quad (37)$$

ГУ 3-го рода. Из выражения (24) имеем $T_{N_z-1} = \alpha_{N_z-1} T_{N_z} + \beta_{N_z-1}$, из выражения (6)

$$\lambda_{ст} \frac{T_{N_z-1} - T_{N_z}}{\Delta z} = \alpha_{окр} (T_{N_z} - t_{окр}), \text{ решая совместно эти уравнения, получим (при } i = 1 \dots N_R, j = N_z)$$

$$T_{N_z} = \frac{\varphi \cdot t_{окр} + \beta_{N_z-1}}{1 - \alpha_{N_z-1} + \varphi}, \quad (38)$$

где $\varphi = \alpha_{окр} \cdot \Delta z / \lambda_{ст}$.

Таким образом, разработан численный алгоритм (21)–(38), позволяющий приближенно решать дифференциальное уравнение (1) с краевыми условиями (2)–(16).

3. Результаты теплового состояния многослойной пластины при наличии дефекта соединения между слоями

На основе созданной математической модели и предложенного алгоритма решения краевой задачи создана компьютерная программа «Тепловое состояние многослойной пластины» с использованием среды разработки MATLAB version 7.11 (R2010b). Теплофизические свойства металлов, используемые при моделировании теплового состояния многослойной пластины, сведены в таблицу.

Теплофизические свойства стали 08X18H10 и алюминия
Thermophysical properties of 08X18H10 steel and aluminum

№	Наименование величины	Обозначение	Величина	Единица измерения
1	Плотность стали	$\rho_{ст}$	7850	кг/м ³
2	Удельная теплоемкость стали	$c_{ст}$	504	Дж/(кг К)
3	Коэффициент теплопроводности стали	$\lambda_{ст}$	17	Вт/(м К)
4	Плотность алюминия	ρ_{Al}	2712	кг/м ³
5	Удельная теплоемкость алюминия	c_{Al}	897	Дж/(кг К)
6	Коэффициент теплопроводности алюминия	λ_{Al}	203,5	Вт/(м К)

В качестве примера рассмотрена многослойная пластина со следующими размерами: $h = 1,7$ мм, $H = 5,6$ мм, $R = 50$ мм. Начальная температура пластины $T_0 = 30$ °С, температура окружающей среды $t_{окр} = 20$ °С. Тепловой поток излучения $q_{изл} = 10$ кВт/м². Время нагрева – $\tau_1 = 60$ с и время охлаждения на воздухе – $\tau_2 = 5$ с.

На рис. 3 показаны линии уровня температурного поля в сечении, проходящем через ось пластин после нагрева сверху согласно варианту (а) и охлаждения при разных тепловых потоках нагружения при диаметре воздушного зазора и его толщине $d = 10$ мм, $\delta = 0,2$ мм. Видно, что качественная картина температурных полей подобна и выбор теплового нагружения во многом определяется имеющимися источниками нагрева и чувствительностью тепловизора.

На рис. 4. показано распределение температуры по радиусу для верхней и нижней поверхностей многослойной пластины после ее нагрева сверху (а) и дальнейшего охлаждения на воздухе. Показаны результаты расчетов при разных тепловых потоках 1, 3 и 6 кВт/м² и при разных диаметрах воздушного зазора $d = 10$ мм и $d = 16$ мм. На верхней поверхности пластины после ее нагрева наблюдается максимальное значение температуры t_{max} на оси цилиндрического дефекта. При движении по радиусу от оси наблюдается провал температуры t_{min} на расстоянии $r = 0,8 - 1 \cdot (d/2)$. Таким образом, диагностируя размер области, где наблюдается перепад температур, можно проводить дефектometriю, то есть определять размер имеющегося расслоения биметалла. При использовании тепловизора точность измерений размера дефекта будет определяться разностью температур $\Delta t = (t_{max} - t_{min})$. Из рис. 4 видно, что при нагреве сверху измерение разности температур при наличии дефекта со стороны нагрева более эффективно.

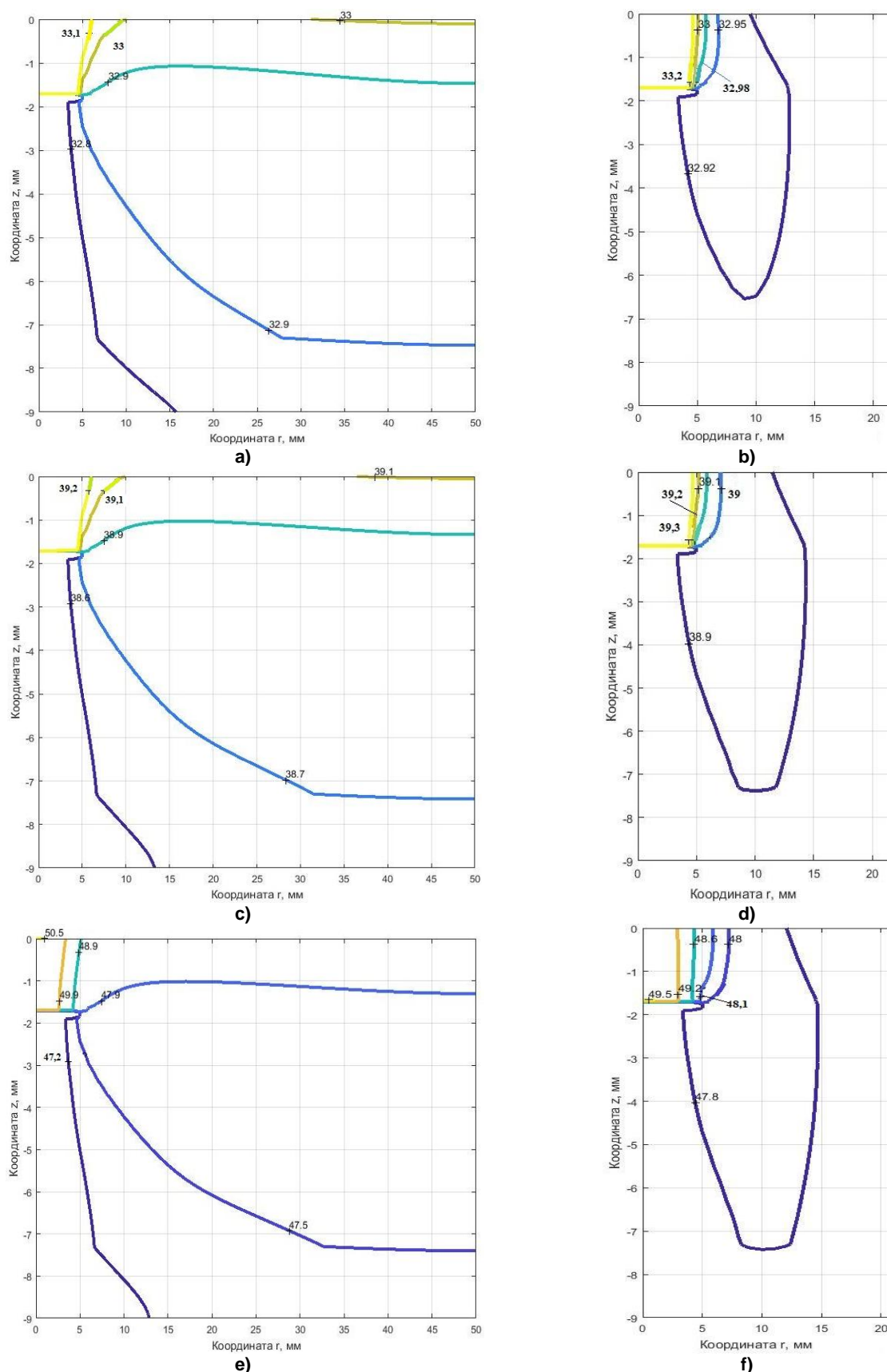


Рис. 3. Линии уровня температурного поля в пластинах после периода нагрева (а, с, е) и после периода охлаждения на воздухе (b, d, f) при разных тепловых потоках: а, b – 1 кВт/м²; с, d – 3 кВт/м²; е, f – 6 кВт/м²
 Fig. 3. Lines of the temperature field level in the plates after a heating period (a, c, e) and after a cooling period in air (b, d, f) at different heat fluxes: a, b – 1 kW/m²; c, d – 3 kW/m²; e, f – 6 kW/m²

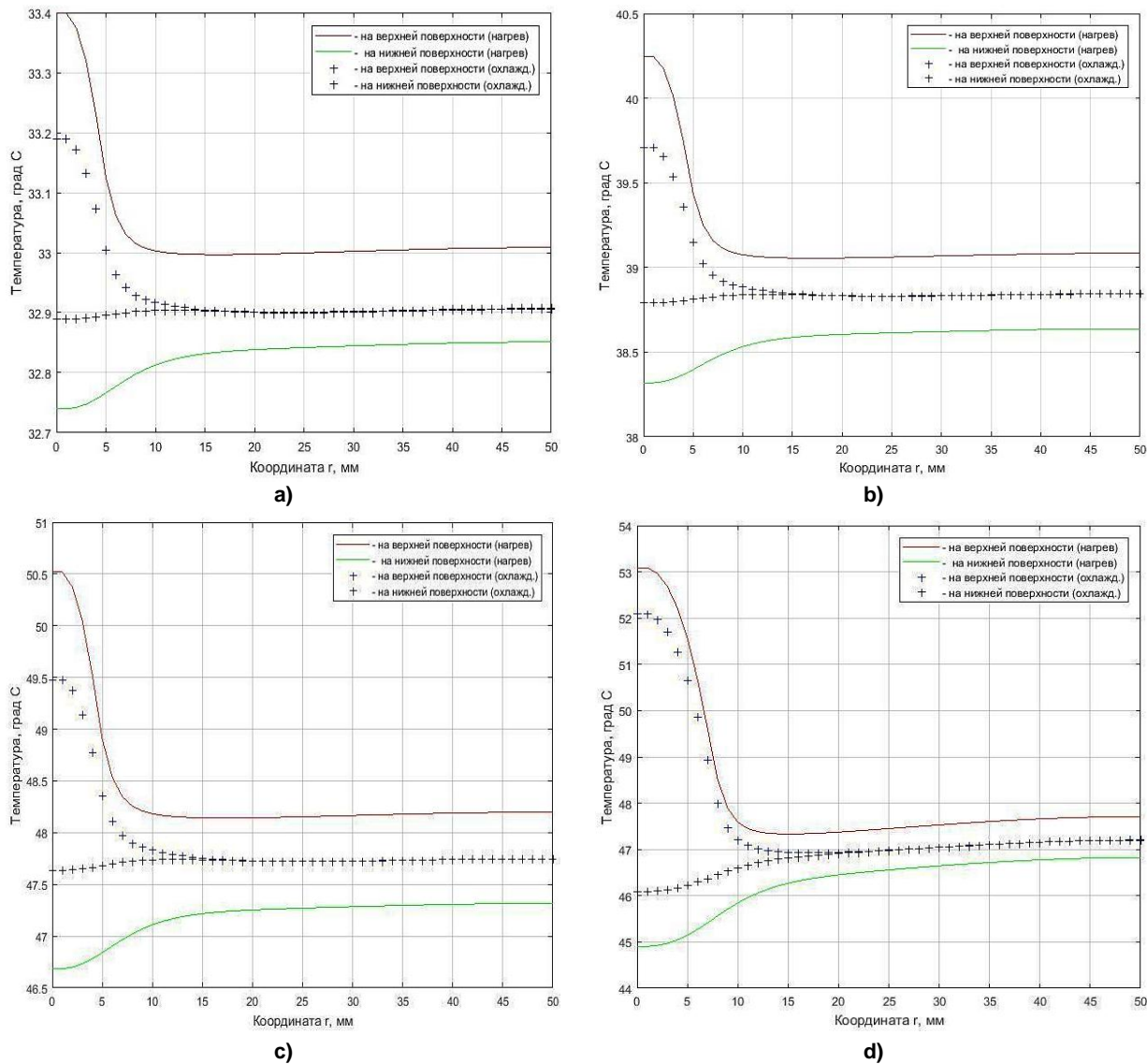


Рис. 4. Распределение температуры по радиусу для верхней и нижней поверхностей многослойной пластины после ее нагрева и охлаждения при разных тепловых потоках: а – 1 кВт/м^2 ; б – 3 кВт/м^2 ; с, d – 6 кВт/м^2 при диаметре воздушного зазора $d = 10 \text{ мм}$ (а, б, с) и $d = 16 \text{ мм}$ (d)
Fig. 4. Radial temperature distribution for the upper and lower surfaces of a multilayer plate after heating and cooling at different heat fluxes: а – 1 кВт/м^2 ; б – 3 кВт/м^2 ; с, d – 6 кВт/м^2 with an air gap diameter $d = 10 \text{ мм}$ (а, б, с) and $d = 16 \text{ мм}$ (d)

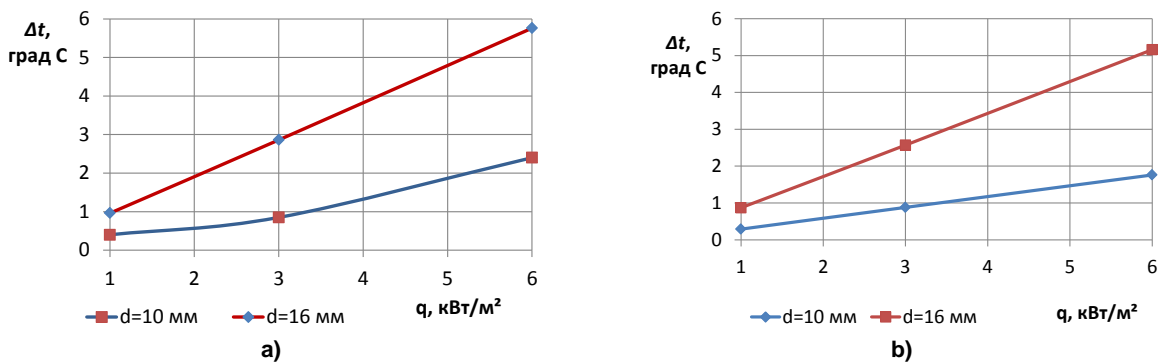


Рис. 5. Зависимость разницы температур в районе дефекта для верхней поверхности многослойной пластины от теплового потока: а – после периода нагрева; б – после периода охлаждения 5 с
Fig. 5. Dependence of the temperature difference in the area of the defect for the upper surface of the multilayer plate on the heat flux: а – after the heating period; б – after a cooling period of 5 s

На основе компьютерного моделирования установлено, что чем больше тепловой поток и размер дефекта (диаметр), тем больше величина полезного сигнала Δt (рис. 5). Видно, что за время охлаждения 5 с перепад температуры на верхней поверхности пластин практически не изменился.

Аналогичные результаты, полученные при задании теплового потока согласно варианту (b) для нагрева пластин снизу, показали существенно меньшую эффективность с точки зрения получения полезного температурного сигнала.

Выводы

1. Предложена математическая модель алгоритма решения краевой задачи и создана компьютерная программа «Тепловое состояние многослойной пластины», позволяющая моделировать проведение импульсного теплового контроля для определения параметров дефекта расслоения биметаллической пластины.

2. Для сталеалюминиевой пластины получены температурные поля по сечению многослойной пластины после нагрева и охлаждения при разных тепловых потоках нагружения и разном диаметре воздушного зазора, моделирующего дефект расслоения. Установлено, что качественная картина температурных полей подобна и выбор теплового нагружения во многом определяется имеющимися источниками нагрева и чувствительностью тепловизора.

3. Получено распределение температуры по радиусу для верхней и нижней поверхностей многослойной пластины после ее нагрева со стороны дефекта и дальнейшего охлаждения на воздухе. Показаны температурные аномалии при разных тепловых потоках и диаметрах воздушного зазора, моделирующего наличие дефекта.

4. Установлено, что более эффективным является измерение разности температур со стороны, где располагается дефект и произведен нагрев многослойной пластины. Нагрев пластин со стороны, противоположной дефекту, и их дальнейшее охлаждение показали существенно меньшую эффективность с точки зрения получения полезного температурного сигнала.

5. Показано, что при наличии дефекта, чем больше тепловой поток нагружения и размер дефекта (диаметр), тем больше величина полезного сигнала, определяемая разностью температур на измеряемой поверхности.

Литература

1. Рябов, В.Р. Применение биметаллических и армированных сталеалюминиевых соединений / В.Р. Рябов. – М.: Металлургия, 1975. – 288 с.
2. Савин, И.А. Производство слоистых листов и лент с использованием холодного плакирования / И.А. Савин, А.В. Хайруллин // Наука и современность. – 2017. – № 1 (11). – С. 185–199.
3. Слюсарев, М.В. Исследование параметров качества биметаллических листов / М.В. Слюсарев // Вестник ВолГУ. Серия 9. – 2007. – Вып. 6. – С. 176–182.
4. Тепловой метод диагностики расслоений в биметаллах / А.П. Пудовкин, В.Н. Чернышов, А.В. Колмаков, Ю.В. Плужников // Вестник ТГТУ. – 2003. – Т. 9, № 2. – С. 177–185.
5. Вавилов, В.П. Тепловые методы неразрушающего контроля: справ. / В.П. Вавилов. – М.: Машиностроение, 1991. – 264 с.
6. Вавилов, В.П. Тепловизоры и их применение / В.П. Вавилов, А.Г. Климов. – М.: Интел универсал, 2002. – 88 с.
7. Нестерук, Д.А. Тепловой контроль и диагностика: учеб. пособие для подготовки специалистов I, II, III уровня / Д.А. Нестерук, В.П. Вавилов. – Томск, 2007. – 104 с.
8. Maldague, X. Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing / X. Maldague. – John Wiley & Sons, Inc., U.S.A., 2001. – 684 p.
9. Метод бесконтактного неразрушающего контроля слоев двухслойных изделий и анализ теплофизических процессов в биметаллах / А.П. Пудовкин, В.Н. Чернышов, Ю.В. Плужников, А.В. Колмаков // Вестник ТГТУ. – 2002. – Т. 8, № 2. – С. 190–200.
10. Кирвель, И.И. Энергосбережение в процессах теплообмена / И.И. Кирвель, М.М. Бражников, Е.Н. Зацепин. – Минск: БГУИР, 2007.
11. Яненко, Н.Н. Метод дробных шагов решения многомерных задач математической физики / Н.Н. Яненко. – Новосибирск: Наука, 1967. – 234 с.

12. Ячиков, И.М. Математическое моделирование теплофизических процессов / И.М. Ячиков, О.С. Логунова, И.В. Портнова. - Магнитогорск: МГТУ, 2004. - 175 с.

13. Цаплин, А.И. Теплофизика в металлургии / А.И. Цаплин. - Пермь: Из-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. - 230 с.

14. Берковский, Б.М. Разностные методы исследования задач теплообмена / Б.М. Берковский, Е.Ф. Ноготов. - Минск: Наука и техника, 1976. - 144 с.

15. Кузнецов, Г.В. Разностные методы решения задач теплопроводности / Г.В. Кузнецов, М.А. Шеремет. - Томск: ТПУ, 2007. - 172 с.

Логиновский Олег Витальевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; loginovskiyo@mail.ru.

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

Максимов Александр Александрович, д-р техн. наук, депутат, Государственная Дума Федерального Собрания Российской Федерации VIII созыва, г. Москва.

Ячиков Игорь Михайлович, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры информационно-измерительной техники, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; iachikovim@susu.ru, ORCID.ORG 0000-0002-1562-7506.

Поступила в редакцию 14 августа 2021 г.

DOI: 10.14529/ctcr210404

DETERMINATION OF THE PARAMETERS OF THE LAMINATION OF A BIMETALLIC PLATE BY MEANS OF ACTIVE THERMAL NON-DESTRUCTIVE CONTROL

O.V. Loginovskiy¹, loginovskiiiov@susu.ru,

L.Yu. Kostyleva¹, kostylevali@susu.ru,

A.A. Maksimov²,

I.M. Yachikov¹, iachikovim@susu.ru, ORCID.ORG 0000-0002-1562-7506

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,

² State Duma of the Federal Assembly of the Russian Federation of the VIII convocation, Moscow, Russian Federation

Bimetals are in many ways substitutes for scarce metals, while they represent an independent group of materials necessary for the creation of new machines, devices and other various products. The increasing volume of production of bimetals and products made from them requires an increase in their operational characteristics and, accordingly, an increase in the quality of finished products. One of the difficult technological tasks is the connection of aluminum and its alloys with steels of various classes, since there are many problems associated with the quality of the connection of metals with different properties. To improve the reliability and durability of machines and other products made of bimetals, it is necessary to carry out continuous quality control, and the most effective methods are non-destructive testing. Quite promising in terms of simplicity and accessibility is the method of active thermal control, in which the investigated product is subjected to pulsed thermal action by means of a source of thermal loading. The amplitude, shape and time variation of temperature signals serve as informative parameters that allow an operator or an automated system to detect certain defects and evaluate their parameters. With all the availability of pulsed thermal con-

trol, the most difficult component is associated with specialized computer programs for processing experimental data and determining the parameters of a delamination defect. **The aim of the study** is to create a computer model of the thermal state of a bimetallic plate in the presence of an air bubble between the layers and, through computer simulation, to determine the size of defects during active pulse thermal non-destructive testing of steel-aluminum plates. **Materials and methods.** When performing the work, the methods of mathematical and computer modeling were used. The created software using the development tools of the MATLAB package was based on known methods for obtaining an approximate solution to a boundary value problem on a computer using the finite difference method. Results. A mathematical model has been developed, an algorithm for solving a boundary value problem, and a computer program has been created that allows simulating a pulse thermal control to determine the parameters of a delamination defect in a bimetallic plate. **Conclusion.** It was found that it is more efficient to measure the temperature difference from the side where the defect is located and the multilayer plate is heated. Heating the plates from the side opposite to the defect and their further cooling showed significantly lower efficiency in terms of obtaining a useful temperature signal. It is shown that in the presence of a defect, the greater the loading heat flux and the defect size, the greater the value of the useful signal determined by the temperature difference on the measured surface.

Keywords: bimetal, methods of thermal non-destructive testing, infrared non-destructive testing, flaw detection, defectometry, defect in the connection between metal layers.

References

1. Ryabov V.R. *Primeneniye bimetallicheskih i armirovannykh stalealuminiumevykh soyedineniy* [Application of bimetallic and reinforced steel-aluminum joints]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1975. 288 p.
2. Savin I.A., Khayrullin A.V. [Production of laminated sheets and strips using cold cladding]. *Nauka i sovremennost'* [Science and modernity], 2017, no. 1 (11), pp. 185–199. (in Russ.)
3. Slyusarev M.V. [Investigation of quality parameters of bimetallic sheets]. *Vestnik VolGU. Seriya 9* [VolSU Bulletin. Series 9], 2007, iss. 6, pp. 176–182. (in Russ.)
4. Pudovkin A.P., Chernyshov V.N., Kolmakov A.V., Pluzhnikov Yu.V. [Thermal method for diagnostics of delamination in bimetallics]. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Tambov State Technical University], 2003, vol. 9, no. 2, pp. 177–185. (in Russ.)
5. Vavilov V.P. *Teplovyye metody nerazrushayushchego kontrolya: sprav.* [Thermal methods of non-destructive testing. Handbook]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1991. 264 p.
6. Vavilov V.P., Klimov A.G. *Teplovizory i ikh primeneniye* [Thermal imagers and their application]. Moscow, Intel universal Publ., 2002. 88 p.
7. Nesteruk D.A., Vavilov V.P. *Teplovoy kontrol' i diagnostika: ucheb. posobiye dlya podgotovki spetsialistov I, II, III urovnya* [Thermal control and diagnostics. Textbook for training specialists of I, II, III level]. Tomsk, 2007. 104 p.
8. Maldague X. Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing. John Wiley & Sons, Inc., U.S.A., 2001. 684 p.
9. Pudovkin A.P., Chernyshov V.N., Pluzhnikov Yu.V., Kolmakov A.V. [Method of non-contact non-destructive testing of layers of two-layer products and analysis of thermophysical processes in bimetallics]. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Tambov State Technical University], 2002, vol. 8, no. 2, pp. 190–200. (in Russ.)
10. Kirvel' I.I., Brazhnikov M.M., Zatsepin E.N. *Energoberezheniye v protsessakh teploobmena* [Energy saving in heat transfer processes]. Minsk, BSUIR Publ., 2007.
11. Yanenko N.N. *Metod drobnykh shagov resheniya mnogomernykh zadach matematicheskoy fiziki* [Fractional steps method for solving multidimensional problems of mathematical physics]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1967. 234 p.
12. Yachikov I.M., Logunova O.S., Portnova I.V. *Matematicheskoye modelirovaniye teplofizicheskikh protsessov* [Mathematical modeling of thermophysical processes]. Magnitogorsk, MSTU Publ., 2004. 175 p.
13. Tsaplin A.I. *Teplofizika v metallurgii* [Thermal physics in metallurgy]. Perm, Perm State Technical University Publ., 2008. 230 p.

14. Berkovskiy V.M., Nogotov E.F. *Raznostnyye metody issledovaniya zadach teploobmena* [Difference methods for studying heat transfer problems]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1976. 144 p.

15. Kuznetsov G.V., Sheremet M.A. *Raznostnyye metody resheniya zadach teploprovodnosti* [Difference Methods for Solving Heat Conduction Problems]. Tomsk, TPU Publ., 2007. 172 p.

Received 14 August 2021

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

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/ctr210404

FOR CITATION

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, vol. 21, no. 4, pp. 37–51. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctr210404