

Данный текст является русскоязычной версией опубликованной на английском языке статьи и представлен в авторской редакции только на данном сайте!

UDC 004.942

Doi: 10.31772/2587-6066-2020-21-3-424-432

For citation: Bocharova O. A., Murygin A. V., Bocharov A. N., Zaitsev R. V. Simulation of the induction soldering process of waveguide paths from aluminum alloys. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2020, Vol. 21, No. 3, P. 424–432. Doi: 10.31772/2587-6066-2020-21-3-424-432

Для цитирования: Моделирование процесса индукционной пайки волноводных трактов из алюминиевых сплавов / О. А. Бочарова, А. В. Мурыгин, А. Н. Бочаров, Р. В. Зайцев // Сибирский журнал науки и технологий. 2020. Т. 21, № 3. С. 424–432. Doi: 10.31772/2587-6066-2020-21-3-424-432

SIMULATION OF THE INDUCTION SOLDERING PROCESS OF WAVEGUIDE PATHS FROM ALUMINUM ALLOYS

O. A. Bocharova*, A. V. Murygin, A. N. Bocharov, R. V. Zaitsev

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
*E-mail: shyx_89@mail.ru

A system of waveguide paths is a complex structure of various elements with various geometries. Induction soldering based on the induction heating method is one of the promising methods for waveguides fabricating. Induction soldering of waveguide paths has a number of technological features: the melting temperature of the base material AD31 (695–663 °C) slightly differs from the melting temperature of St. AK12 solder (577–580 °C) at an average induction heating rate of 20–25 °C / sec; a wide variety of standard sizes of waveguide paths elements complicates the development and subsequent reproduction of technological parameters of the induction soldering process; zones of maximum heating of waveguide paths elements do not coincide with zones of soldering. Therefore, to solve the problems of controlling the waveguides soldering process, it is necessary to simulate this process. The paper deals with the problem of simulating the process of heating a waveguide during induction soldering. Requirements for the process model have been formed. The model is built on the basis of the differential heat conduction equation. The formed model requirements take into account the geometric parameters of waveguides, the physical parameters of materials, the initial and boundary conditions, as well as the uneven distribution of eddy current density in the waveguide. It is proposed to use the finite difference method for the numerical solution of the heat conduction equation. The process of calculating the temperature at the grid nodes is shown. The authors propose a two-stage solution. At the first stage, at an intermediate time step, the temperature at the grid nodes along the X axis is calculated. At the second stage, the temperature at the grid nodes along the Y axis is calculated. The numerical solution of the difference equations along the X and Y axes is carried out by the sweep method. An algorithm for the numerical solution of the heat conduction equation has been developed.

Keywords: waveguide path, induction soldering, model of the waveguide heating process, differential heat conduction equation, finite difference method.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИНДУКЦИОННОЙ ПАЙКИ ВОЛНОВОДНЫХ ТРАКТОВ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

О. А. Бочарова*, А. В. Мурыгин, А. Н. Бочаров, Р. В. Зайцев

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

*E-mail: shyx_89@mail.ru

Система волноводных трактов представляет собой сложную конструкцию из различных элементов с разнообразной геометрией. Одним из перспективных способов изготовления волноводов является индукционная пайка, основанная на методе индукционного нагрева. Индукционная пайка волноводных трактов обладает рядом технологических особенностей: относительно небольшая разница температуры плавления основного материала АД31 (695–663 °С) и припоя Св. АК12 (577–580 °С) при средней скорости индукционного нагрева 20–25 °С/сек; большое разнообразие типоразмеров элементов волноводных трактов представляет сложность при отработке и последующем воспроизведении технологических параметров процесса индукционной пайки; зоны максимального нагрева элементов волноводных трактов не совпадают с зонами пайки. Поэтому для решения задач управления процессом пайки волноводов необходимо провести моделирование данного процесса. В статье рассмотрена задача моделирования процесса нагрева волновода при индукционной пайке. Сформулированы требования к модели. Модель строится на основе дифференциального уравнения теплопроводности. Сформулированные требования к модели учитывают геометрические параметры волноводов, физические параметры материалов, начальные и граничные условия, а также неравномерное распределение плотности вихревого тока в волноводе. Предлагается для численного решения уравнения теплопроводности использовать метод конечных разностей. Показан процесс расчета температуры в узлах сетки. Решение осуществляется в два этапа. На первом этапе на промежуточном временном шаге проводится расчет температуры в узлах сетки по оси X, на втором этапе вычисляется температура в узлах сетки по оси Y. Численное решение разностных уравнений по оси X и Y осуществляется методом прогонки. Разработан алгоритм численного решения уравнения теплопроводности.

Ключевые слова: волноводный тракт, индукционная пайка, модель процесса нагрева волновода, дифференциальное уравнение теплопроводности, метод конечных разностей.

Введение. Для обеспечения функционирования космических аппаратов и передачи электромагнитной энергии в них широко используются системы волноводных трактов [1].

Системы волноводных трактов представляют собой сложную конструкцию из различных элементов с разнообразной геометрией (рис. 1).

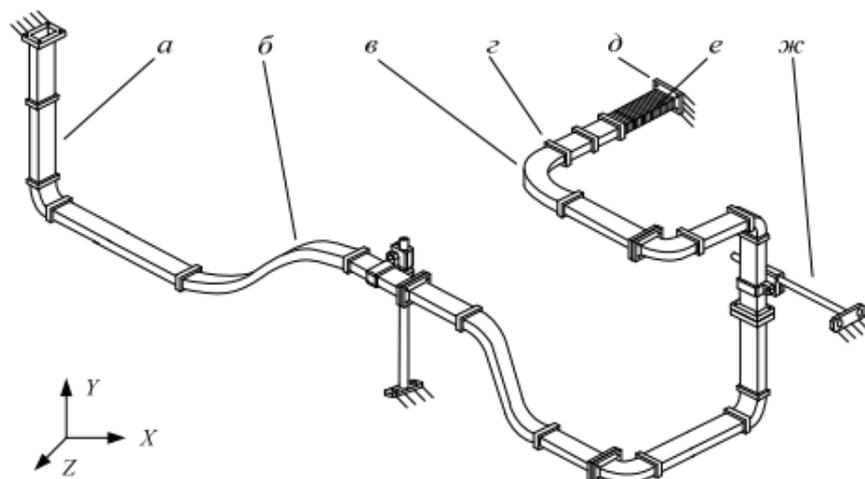


Fig. 1. An example of a section of a waveguide distribution system:
a – a direct element; *b* – a curved element with a variable radius of curvature;
c – a curved element with a constant radius of curvature; *d* – a coupling; *e* – a flange;
f – a flexible section; *g* – an intermediate support

Рис. 1. Пример участка волноводно-распределительной системы:
a – прямой элемент; *b* – криволинейный элемент с переменным радиусом кривизны;
c – криволинейный элемент с постоянным радиусом кривизны; *d* – соединительная муфта;
e – фланец; *f* – гибкая секция; *г* – промежуточная опора

Для соединения конструктивных элементов волноводных трактов используются различные способы: аргодуговая сварка, пайка в соляных ваннах, пайка с использованием источника лазерного излучения [2–5].

Одним из перспективных методов изготовления волноводных трактов является индукционная пайка [1; 3].

Индукционная пайка обеспечивает бесконтактный, быстрый и локальный разогрев места пайки. Что позволяет уменьшить окисление токонесущих поверхностей и коробление волновода. Оборудование, обеспечивающее индукционный нагрев, достаточно компактное и легко управляемое, что позволяет осуществить автоматизированное управление процессом пайки [6].

Однако индукционная пайка волноводных трактов обладает рядом особенностей [7]:

1. Относительно небольшая разница температуры плавления основного материала АД31 ($695\text{--}663^{\circ}\text{C}$) и припоя Св. АК12 ($577\text{--}580^{\circ}\text{C}$) при средней скорости индукционного нагрева $20\text{--}25^{\circ}\text{C}/\text{сек.}$;

2. Большое разнообразие типоразмеров элементов волноводных трактов представляет сложность при отработке и последующем воспроизведении технологических параметров процесса индукционной пайки;

3. Зоны максимального нагрева элементов волноводных трактов не совпадают с зонами пайки.

Поэтому перед постановкой задачи управления процессом индукционной пайки волноводных трактов необходимо провести моделирование процесса нагрева волновода.

Построение модели нагрева волновода. В качестве типового объекта для рассмотрения процесса индукционного нагрева выбрано соединение прямолинейного участка волноводной трубы и фланца (рис. 2).

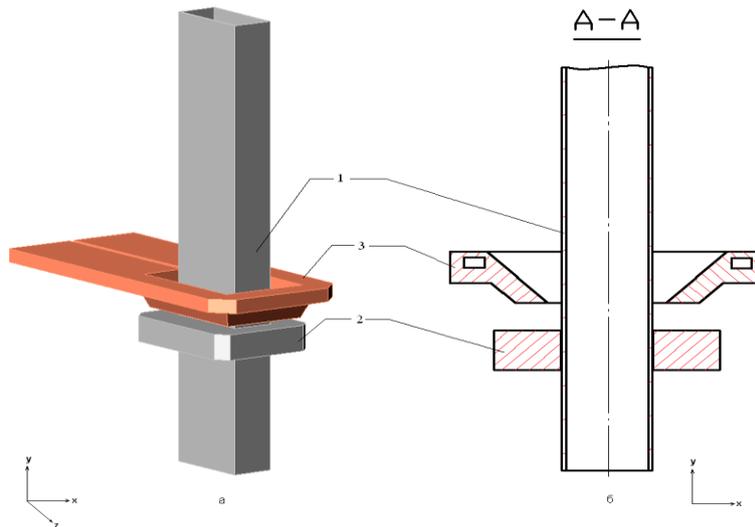


Fig. 2. The researched system “inductor – waveguide”: 1 – a waveguide pipe; 2 – a flange; 3 – an inductor

Рис. 2. Исследуемая система «индуктор – волновод»: 1 – волноводная труба; 2 – фланец; 3 – индуктор

Индуктор (без рассмотрения силовой части индукционного оборудования) представляет собой кольцо, сделанное из меди, рис. 2. Индуктор является источником переменного магнитного поля, формирующего вихревые токи, протекающие в волноводе. Расчет упрощенной двухмерной схемы волновод-индуктор показал, что вихревые токи в волноводе распределены неравномерно [8–10].

Исходя из всего выше сказанного, можно построить математическую модель нагрева волноводного тракта при индукционной пайке с учетом следующих допущений:

- пространственная конфигурация системы позволяет ограничиться упрощенной двухмерной моделью;
- для моделирования системы труба-фланец можно использовать общую модель, так как в упрощенном виде элементы волновода можно представить пластинами.

Для обобщенной модели тепловых процессов, протекающих при индукционной пайке волноводных трактов, возьмем дифференциальное уравнение теплопроводности [11]. Так как нагрев волновода идет за счет вихревых токов, протекающих в нём, то в формулу добавляется постоянно действующий источник тепла:

$$\frac{\partial T(x, y, t)}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T(x, y, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, t)}{\partial y^2} \right) + q(x, y, t), \quad (1)$$

где a – коэффициент температуропроводности материала; T – температура; t – время; x, y – декартовы координаты; $q(x, y, t)$ – постоянно действующий источник теплоты.

Уравнение (1) описывает множество вариантов течения процесса нагрева волновода. Поэтому чтобы провести моделирование тепловых процессов, протекающих при индукционной пайке, необходимо к уравнению (1) добавить условия однозначности, которые могут содержать геометрические, физические, начальные и граничные условия. Данные условия выглядят следующим образом:

- принимается упрощенная геометрическая двухмерная модель волновода, показанная на рис. 3;
- считается, что вихревые токи протекают по поверхности волновода [12];
- учитывается, что плотность вихревого тока распределена неравномерно из-за формы волновода и расположения индуктора относительно волновода [12].
- теплофизические характеристики материала волновода постоянны;
- начальная температура волновода одинакова по всей его длине:

$$T(x, y) = T_H = \text{const} ;$$

– теплообмен с окружающей средой (граничное условие III рода) осуществляется внутренней и внешней поверхностью трубы:

$$a \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial x} = b(T(x, y, t) - T_{cp}) ,$$

где b – коэффициент теплообмена; T_{cp} – температура среды; $0 \leq x \leq l_T$ (внутренняя сторона); $0 \leq x \leq l_T - h_\phi$ (внешняя сторона);

– теплообмен с окружающей средой осуществляется верхней и боковой гранью фланца;

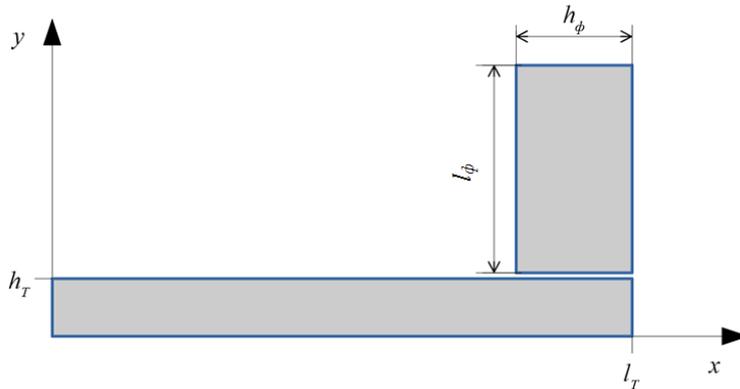


Fig. 3. Simplified geometric model of the waveguide: l_T – length of a pipe; h_T – width of a pipe; h_f – width of a flange; l_f – length of a flange

Рис. 3. Упрощенная геометрическая модель волновода: l_T – длина трубы; h_T – ширина трубы; h_f – ширина фланца; l_f – длина фланца

Для верхней грани:

$$a \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial y} = b(T(x, y, t) - T_{cp}) ,$$

где $h_T \leq y \leq h_T + l_f$

Для боковой грани:

$$a \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial x} = b(T(x, y, t) - T_{cp}) ,$$

где $l_T - h_\phi \leq x \leq l_T$

– мощность нагрева остается постоянной $q(x, y, t) = \text{const}$;

– теплообмен между трубой и фланцем считаем равным нулю.

Для численного решения уравнения (1) применим метод конечных разностей [13–15].

Рассмотрим метод применительно к трубе волновода.

Для аппроксимации уравнения (1) методом конечных разностей представим трубу в виде совокупности узлов с координатами (рис. 4): $x_i = i \cdot h_x$, $y_j = j \cdot h_y$, $t_k = k \cdot \tau$, где h_x , h_y – шаг по координатной сетке x , y ; τ – шаг по времени.

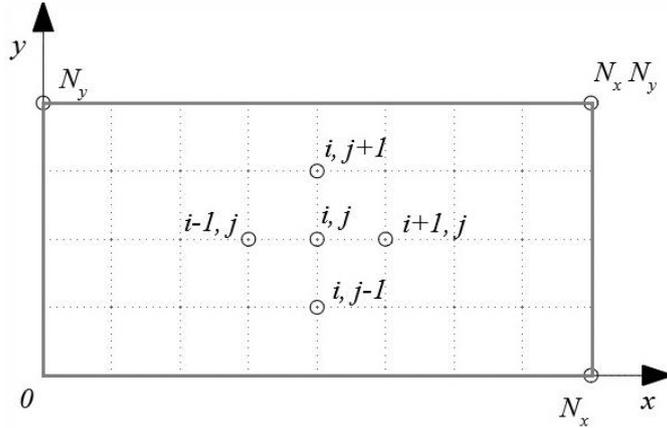


Fig. 4. Difference mesh of the solution domain

Рис. 4. Разностная сетка области решения

Проведем дискретизацию уравнения (1) в два этапа. На первом этапе, на промежуточном временном шаге $\tau/2$ проводим дискретизацию по оси X, на втором этапе проводим дискретизацию по оси Y. Получаем уравнение (1) в разностном виде [15]:

$$\frac{T_{ij}^{k+\frac{1}{2}} - T_{ij}^k}{\frac{\tau}{2}} = a \left(\frac{T_{i+1,j}^{k+\frac{1}{2}} - 2T_{ij}^{k+\frac{1}{2}} + T_{i-1,j}^{k+\frac{1}{2}}}{h_x^2} \right) + q_{ij}^{k+\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

$$\frac{T_{i,j}^{k+1} - T_{i,j}^{k+\frac{1}{2}}}{\frac{\tau}{2}} = a \left(\frac{T_{i,j+1}^{k+1} - 2T_{i,j}^{k+1} + T_{i,j-1}^{k+1}}{h_y^2} \right) + q_{i,j}^{k+1}, \quad (3)$$

где $T_{ij}^k = T(x_i, y_j, t_k)$; $q_{i,j}^k = q(x_i, y_j, t_k)$.

Решая сначала уравнение (2), а затем уравнение (3) определяем поле температуры на целом шаге по времени.

Аппроксимация граничных условий для трубы выглядит следующим образом:

$$a \frac{T_{i,j+1}^k - T_{i,j}^k}{h_y} = b(T_{i,j}^k - T_{cp}), \text{ при } 0 \leq i \leq N_x, j=0,$$

$$a \frac{T_{i,j-1}^k - T_{i,j}^k}{h_y} = b(T_{i,j}^k - T_{cp}), \text{ при } 0 \leq i \leq N_x, j=N_y.$$

Для решения разностных уравнений (2) и (3) подходит метод прогонки [14]. Рассмотрим данный метод на примере решения уравнения (2). Преобразуем уравнение (2) [14]:

$$\frac{T_{i,j}^{k+\frac{1}{2}}}{\frac{\tau}{2}} + a^2 \left(\frac{T_{i,j}^{k+\frac{1}{2}}}{h_x^2} \right) = a \frac{T_{i+1,j}^{k+\frac{1}{2}}}{h_x^2} + a \frac{T_{i-1,j}^{k+\frac{1}{2}}}{h_x^2} + \frac{T_{i,j}^k}{\frac{\tau}{2}} + q_{i,j}^{k+\frac{1}{2}}.$$

$$\text{Затем } \left(\frac{1}{\frac{\tau}{2}} + \frac{2a}{h_x^2} \right) T_{i,j}^{k+\frac{1}{2}} = \frac{a}{h_x^2} T_{i+1,j}^{k+\frac{1}{2}} + \frac{a}{h_x^2} T_{i-1,j}^{k+\frac{1}{2}} + \frac{1}{\frac{\tau}{2}} T_{i,j}^k + q_{i,j}^{k+\frac{1}{2}}.$$

Отсюда получаем

$$a_i T_{i,j}^{k+\frac{1}{2}} = b_i T_{i+1,j}^{k+\frac{1}{2}} + c_i T_{i-1,j}^{k+\frac{1}{2}} + d_i + q_{i,j}^{k+\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

где $a_i = \frac{1}{\frac{\tau}{2}} + \frac{2q}{h_x^2}$; $b_i = c_i = \frac{q}{h_x^2}$; $d_i = \frac{1}{\frac{\tau}{2}} T_{i,j}^k$.

Для граничных точек 0 и N_x уравнение (4) запишем в следующем виде:

$$a_0 T_{0,j}^{k+\frac{1}{2}} = b_0 T_{i,j}^{k+\frac{1}{2}} + d_0, \quad (5)$$

$$a_N T_{N,j}^{k+\frac{1}{2}} = c_N T_{N-1,j}^{k+\frac{1}{2}} + d_N. \quad (6)$$

Алгоритм прогонки начинается с записи уравнения (5) в виде:

$$T_{0,j}^{k+\frac{1}{2}} = P_0 T_{i,j}^{k+\frac{1}{2}} + Q_0, \quad (7)$$

где $P_0 = \frac{b_0}{a_0}$, $Q_0 = \frac{d_0}{a_0}$ определяются начальными и граничными условиями моделирования.

Соотношение (7) подставляем в (4) для $i=0$. Продолжая процесс последовательной подстановки можно выразить $T_{i,j}^{k+\frac{1}{2}}$ через $T_{i+1,j}^{k+\frac{1}{2}}$:

$$T_{i,j}^{k+\frac{1}{2}} = P_i T_{i+1,j}^{k+\frac{1}{2}} + Q_i, \quad (8)$$

где P_i и Q_i новые коэффициенты, полученные в процессе подстановки.

Используя выражения (8) и (4) можно получить формулы для расчета P_i и Q_i :

$$P_i = \frac{b_i}{a_i - c_i P_i}, \quad (9)$$

$$Q_i = \frac{d_i + c_i Q_{i-1}}{a_i - c_i P_{i-1}}. \quad (10)$$

При вычислении P_{N_x} и Q_{N_x} получаем, что $P_{N_x} = 0$, $b_{N_x} = 0$. Следовательно, T_{N_x} будет равна Q_{N_x} . Рассчитав, таким образом, T_N можно начать процесс обратной прогонки для получения $T_{N-1}, T_{N-2}, \dots, T_2, T_1, T_0$ [9].

$$T_{i-1}^{k+\frac{1}{2}} = P_{i-1} T_{i-1,j}^{k+\frac{1}{2}} + Q_{i-1}. \quad (11)$$

Исходя из выше изложенного, можно сформулировать алгоритм решения:

1. Вычисляем P_0 и Q_0 , коэффициенты a_0, b_0, d_0 определяем с помощью начальных и граничных условий.
2. Вычисляем P_i и Q_i для $i=1, 2, \dots, N_x$, используя выражения (9) и (10).
3. Полагаем $T_N = Q_N$.
4. Подставляем T_N в формулу (11) и определяем $T_{N-1}, T_{N-2}, \dots, T_2, T_1, T_0$.

Алгоритм решения уравнения (3) аналогичен. Коэффициенты, входящие в уравнение (3) примут следующий вид:

$$a_i = \frac{1}{\frac{\tau}{2}} + \frac{a}{h_y^2}, b_i = c_i = \frac{a}{h_y^2}, d_i = \frac{1}{\frac{\tau}{2}} T_{i,j}^{k+\frac{1}{2}}.$$

Прогонка будет осуществляться по индексу j .

С помощью программного комплекса Elcut был проведен расчет распределения плотности вихревого тока в волноводной трубе и фланце. Результаты подтверждают принятые ранее допущения при постановке задачи моделирования. На рис. 5 и 6 видно, что плотность вихревых токов резко увеличивается на угловых поверхностях трубы и фланца волновода. Кроме того на рис. 5 плотность вихревого тока резко снижается в толщине стенок трубы и фланца. Области протекания вихревых токов хорошо локализованы (рис. 6).

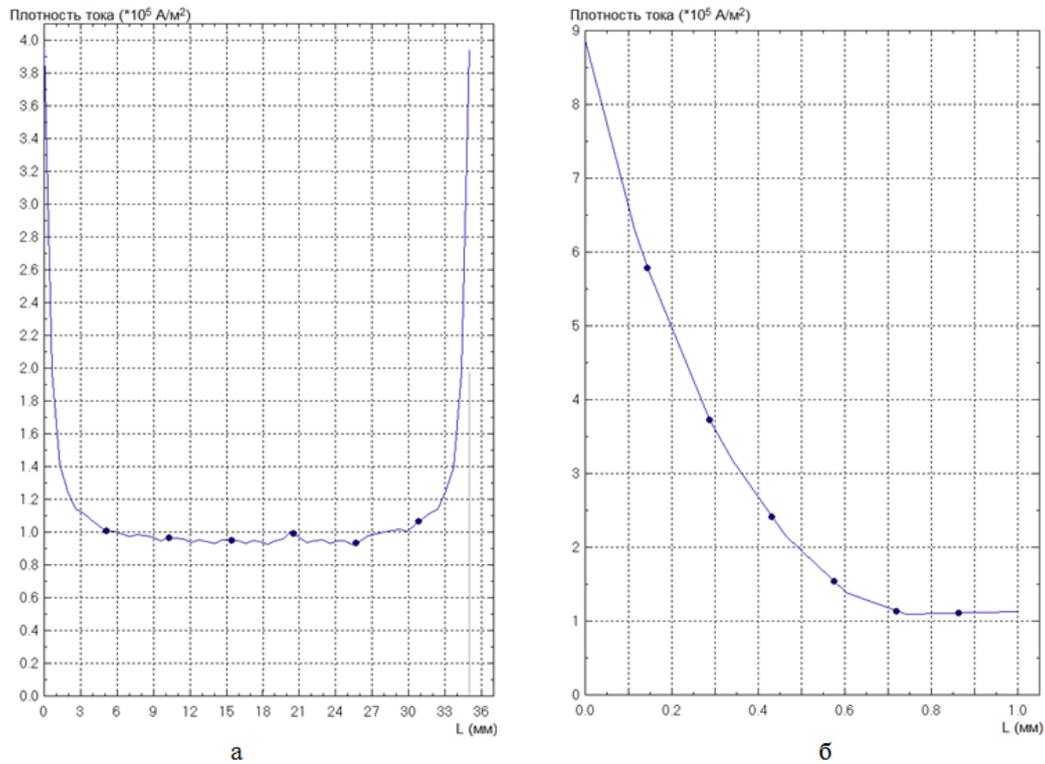


Fig. 5. The distribution of pipe eddy current density for the size 35×15 mm:
a – in the large side of the pipe; *b* – in the thickness of the pipe

Рис. 5. Распределение плотности вихревого тока трубы для типоразмера 35×15 мм:
a – по большой стороне трубы; *б* – по толщине трубы

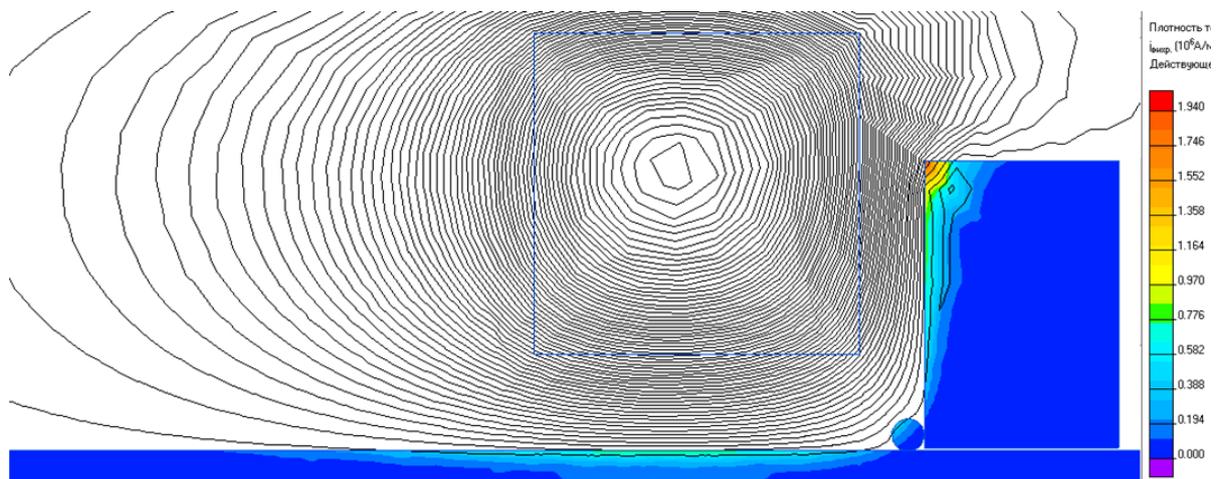


Fig. 6. The distribution of eddy current density in the “inductor – waveguide” system for the size 35×15 mm

Рис. 6. Распределение плотности вихревого тока в системе «индуктор – волновод» для типоразмера 35×15 мм

На рис. 7 показаны результаты нагрева волновода по предложенной модели.

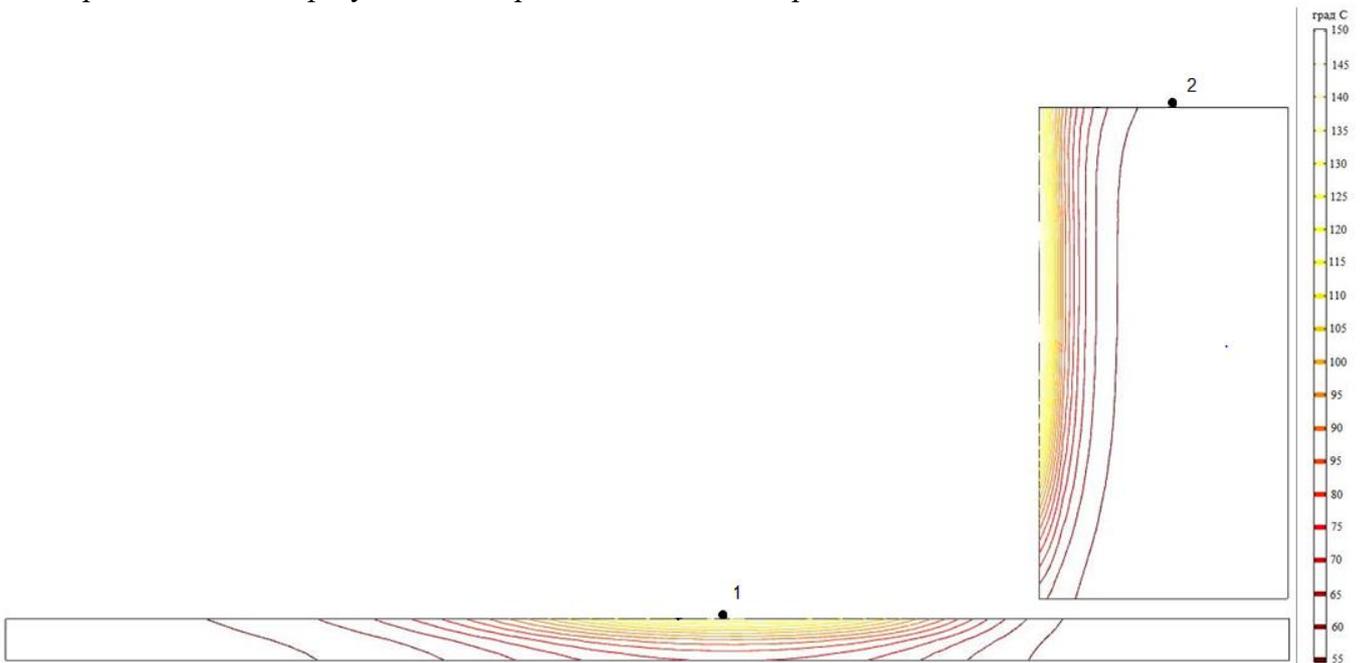


Fig. 7. Temperature fields of the waveguide during induction heating

Рис. 7. Температурные поля волновода при индукционном нагреве

Для проверки результатов моделирования взято изменение температуры в контрольных точках 1 и 2 (рис. 7). Контрольные точки совпадают с точками измерения температуры при проведении процесса нагрева волновода с помощью индукционного оборудования [16; 17].

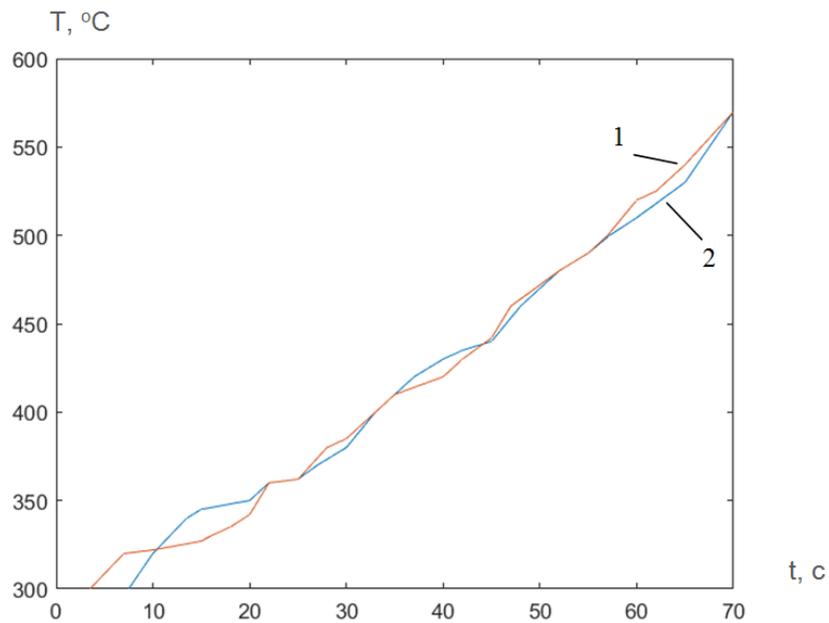


Fig. 8. Heating of the 35×15 waveguide pipe: 1 – calculated values; 2 – measured data

Рис. 8. Нагрев трубы волновода типоразмера 35×15 : 1 – расчетные значения; 2 – измеренные данные

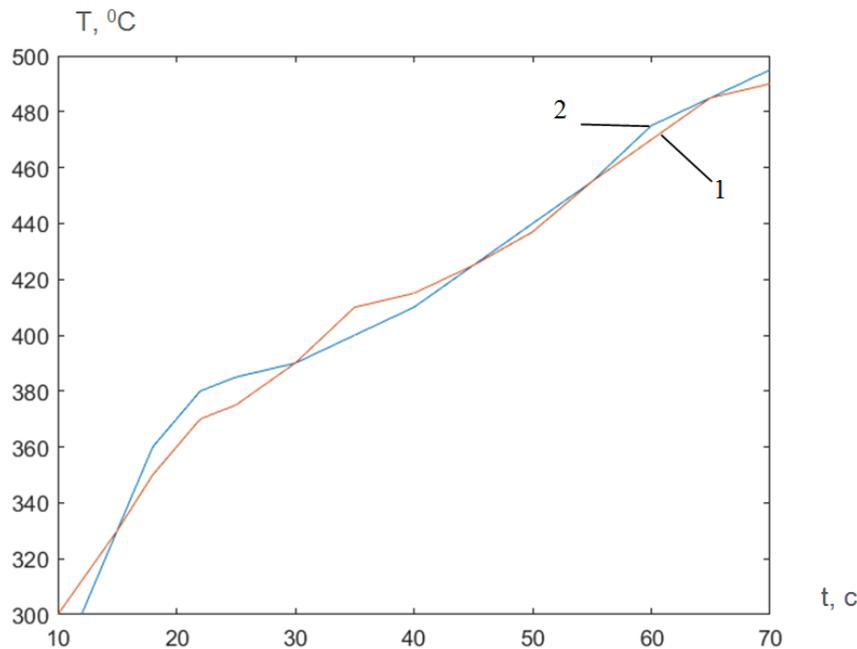


Fig. 9. Heating of the 35×15 waveguide flange: 1 – calculated values; 2 – measured data

Рис. 9. Нагрев фланца волновода типоразмера 35×15 : 1 – расчетные значения; 2 – измеренные данные

Как видно из рис. 8 и 9 результаты моделирования достаточно точно описывают процесс нагрева элементов волновода. Следовательно, данную модель можно применить для моделирования автоматизированной системы управления пайкой волноводных трактов и анализа алгоритмов управления.

Заключение. 1. Процесс индукционной пайки волноводных трактов обладает рядом особенностей, что затрудняет подбор технологических параметров процесса для различных типов волноводных трактов и управление процессом и предполагает необходимость проведения моделирования нагрева волноводов на основе дифференциального уравнения теплопроводности.

2. Для моделирования процесса нагрева трубы и фланца волновода наиболее целесообразно использовать метод конечных разностей.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта: «Математическое и физическое моделирование процессов, происходящих при индукционной пайке трубопроводов в защитных средах», проект № 18-48-242006.

Acknowledgment. The reported study was funded by Russian Foundation for Basic Research, Government of Krasnoyarsk Territory, Krasnoyarsk Regional Fund of Science, to the research project: «Mathematical and physical modeling of processes occurring during induction soldering of pipelines in protective environments», project № 18-48-242006.

References

1. Zlobin S. K., Mikhnev M. M., Laptенок V. D., Bocharov A. N., Dolgopолов B. B. [Features of production of waveguide-distribution paths of antenna-feeder devices of space vehicles]. *Vestnik SibGAU*. 2013, No 6, P. 196–201 (In Russ.).
2. Brovko A. V. [Problems of automatic welding of radar waveguides]. *Izvestiya vuzov: Mashinostroenie*. 2013, No. 1, P. 50–54 (In Russ.).

3. Bushminsky I. P. *Izgotovlenie ehlementov konstruksii SVCh. Volnovody i volnovodnye ustroystva* [Manufacturing of elements of microwave structures. Waveguides and waveguide devices]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1974, P. 304.
4. Full in-house production facilities. Available at: <http://www.advancedmicrowave.com/our-facilities> (accessed: 10.05.2020).
5. Pamin S. et al. Joining of aluminum waveguides using pulsed laser radiation. *Microwave Conference (APMC), 2015 Asia-Pacific. – IEEE, 2015, vol. 3, P. 1–3.*
6. Rapoport E., Pleshivtseva Y. *Optimal Control of Induction Heating Processes*. CRC Press, NY, 2007, 349 p.
7. Zlobin S. K. [Features of soldering elements of waveguide-distribution paths from aluminum alloys with the use of an induction heating source]. *Materialy XVI Mezhdunar. nauch. konf. "Reshetnevskie chteniya"* [Materials XVI Intern. Scientific. Conf "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2012, Vol. 1, P. 16–17 (In Russ.).
8. Bocharova O. A., Tynchenko V. S., Bocharov A. N., Oreshenko T. G., Murygin A. V., Panfilov I. A. Induction heating simulation of the waveguide assembly elements. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019, Vol. 1353, P. 012040.
9. Patidar B., Hussain M. M., Sanjoy Das, Mukherjee D, Tiwari A. P. Simulation and Experimental Validation of Induction Heating of MS Tube for Elevated Temperature. *NDT Application Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference in Pune, 2015, 6 p.*
10. Rhein S., Tilman U., Knut G. Optimal control of induction heating processes using FEM software. *Conference: 2015 European Control Conference (ECC), 2015, P. 515–520.*
11. Lykov A. V. *Teoriya teploprovodnosti* [Theory of thermal conductivity]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1967, 599 p.
12. Babat G. I. *Induktsionnyi nagrev metallov i ego promyshlennoe primenenie* [Induction heating of metals and its industrial application]. Moscow – Leningrad, Energy Publ., 1965, 552 p.
13. Paskonov V. M., Polezhaev V. I., Chudov L. A. *Chislennoe modelirovanie protsessov teplo-massoobmena* [Numerical modeling of heat and mass transfer processes]. Moscow, Nauka Publ., 1984, 288 p.
14. Patankar S. V., Kalabin E. V., Yankov G. G. *Chislennoe reshenie zadach teploprovodnosti i konvektivnogo teploobmena pri techenii v kanalakh* [Numerical solution of problems of thermal conductivity and convective heat transfer during flow in channels]. Moscow, Mehi Publ., 2003, 312 p.
15. Samara A. A. *Teoriya raznostnykh skhem* [Theory of difference schemes]. Moscow, Nauka Publ., 1977, 388 p.
16. Zlobin S. K., Mikhnev M. M., Laptенок V. D., Seregin Yu. N., Bocharov A. N., Tynchenko V. S., Dubets Yu. P., Dolgopolov B. B. [Automated equipment and technology for soldering waveguide paths of spacecraft]. *Vestnik SibGAU*. 2014, No. 4 (56), P. 219–229 (In Russ.).
17. Murygin A. V., Tynchenko V. S., Laptенок V. D., Emilova O. A., Seregin Y. N. Modeling of thermal processes in waveguide tracts induction soldering. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017, Vol. 173(1), P. 012026.

Библиографические ссылки

1. Особенности производства волноводно-распределительных трактов антенно-фидерных устройств космических аппаратов / С. К. Злобин, М. М. Михнев, В. Д. Лаптёнок и др. // *Вестник СибГАУ*. 2013. № 6. С. 196–201.
2. Бровка А. В. Проблемы автоматической сварки волноводов радиолокационных станций // *Известия вузов: Машиностроение*. 2013. № 1. С. 50–54.
3. Бушминский И. П. Изготовление элементов конструкций СВЧ. Волноводы и волноводные устройства. М. : Высшая школа, 1974. 304 с.

4. Full in-house production facilities [Электронный ресурс]. URL: <http://www.advancedmicrowave.com/ourfacilities> (дата обращения: 10.05.2020).
5. Pamin S. et al. Joining of aluminum waveguides using pulsed laser radiation // Microwave Conference (APMC), 2015 Asia-Pacific. – IEEE, 2015. Vol. 3. P. 1–3.
6. Rapoport, E., Pleshivtseva Y. Optimal Control of Induction Heating Processes. CRC Press. N. Y., 2007.
7. Особенности пайки элементов волноводнораспределительных трактов из алюминиевых сплавов с применением источника индукционного нагрева / С. К. Злобин, М. М. Михнев, В. Д. Лаптенюк и др. // Решетневские чтения : материалы XVI междунар. научн. конф. : в 2 ч. Красноярск, 2012 . Ч. 1. С. 16–17.
8. Induction heating simulation of the waveguide assembly elements / О. А. Bocharova, V. S. Tynchenko, A. N. Bocharov et al. // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2019. Vol. 1353. P. 012040
9. Patidar, B. Simulation and Experimental Validation of Induction Heating of MS Tube for Elevated Temperature / B. Patidar, M. M. Hussain, Sanjoy Das et al. // NDT Application Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference in Pune. 2015.
10. Rhein S., Tilman U., Knut G. Optimal control of induction heating processes using FEM software // Conference: 2015 European Control Conference (ECC). 2015, P. 515–520.
11. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М. : Высшая школа, 1967. 599 с.
12. Бабат Г. И. Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение. М. – Л. : Энергия, 1965. 552 с.
13. Пасконов В. М., Полежаев В. И., Чудов Л. А. Численное моделирование процессов тепло-массообмена. М. : Наука, 1984. 288 с.
14. Патанкар С. В. Численное решение задач теплопроводности и конвективного теплообмена при течении G в каналах : пер. с англ. Е. В. Калабина ; под ред. Г. Г. Янькова. М. : Изд-во МЭИ, 2003. 312 с.
15. Самарский А. А. Теория разностных схем. М. : Наука, 1977. 388 с.
16. Автоматизированное оборудование и технология для пайки волноводных трактов космических аппаратов / С. К. Злобин, М. М. Михнев, В. Д. Лаптенюк и др. // Вестник СибГАУ. 2014. № 4(56). С. 219–229.
17. Modeling of thermal processes in waveguide tracts induction soldering / A. V. Murygin, V. S. Tynchenko, V. D. Laptenok et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 173(1) 012026. 2017.

© Бочарова О. А., Мурыгин А. В., Бочаров А. Н., Зайцев Р. В., 2020

Bocharova Olesya Andreevna – senior lecturer of the department of Information and control systems; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: shyx_89@mail.ru.

Murygin Aleksandr Vladimirovich – Dr. Sc., professor, head of the department of Information and control systems; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: avm514@mail.ru.

Bocharov Aleksei Nikolaevich – Cand. Sc., docent of the department of Information and control systems; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: sibalexbo@gmail.com.

Zaitsev Roman Viktorovich – a post-graduate student; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: spoon27@yandex.ru.

Бочарова Олеся Андреевна – старший преподаватель кафедры информационно-управляющих систем; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: shyx_89@mail.ru.

Мурыгин Александр Владимирович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационно-управляющих систем; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: avm514@mail.ru.

Бочаров Алексей Николаевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационно-управляющих систем; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: sibalexbo@gmail.com.

Зайцев Роман Викторович – аспирант; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: spoon27@yandex.ru.