

УДК 621.791.722

DOI: 10.24160/1993-6982-2021-3-88-95

Математическое моделирование распределения энергии при вводе в материал изделия луча в процессе электронно-лучевой сварки

С.О. Курашкин, В.С. Тынченко, А.В. Мурыгин

Моделирование процессов электронно-лучевой сварки — одна из наиболее важных частей прикладных исследований, поскольку проведение полномасштабных экспериментов является либо дорогостоящим, либо трудозатратным.

Рассмотрена проблема моделирования температурных полей на этапе ввода электронного луча при сварке. Цель работы — снижение сложности настройки технологических параметров процесса электронно-лучевой сварки, а также создание и развитие более эффективных алгоритмов управления за счет замены натуральных экспериментов модельными. Математический аппарат предлагаемых решений основан на теориях тепловых и сварочных процессов, на основе которых построены математические модели распределения энергии. Для практической реализации вычислений представлено алгоритмическое обеспечение, позволяющее применять математические модели в современных системах моделирования, таких как Matlab, Comsol Multiphysics, Ansys. Полученные модели для расчёта температуры на участке ввода не только дополняют комплекс существующих моделей процесса электронно-лучевой сварки, но также позволяют расширить их применение для вычисления и оптимизации процесса сварки, учитывая температуру изделия на участке ввода электронного луча. Благодаря предложенным решениям, проведен ряд численных экспериментов для изделия из титанового сплава VT-14 и двух изделий разной толщины из алюминиевого сплава АМг-6. Получение температурных полей, а также эффективных значений технологических параметров практически совпадает с результатами ранее проведенных натуральных исследований.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, тепловые процессы, автоматизация управления, оптимизация параметров процесса, ввод-вывод электронного луча, математическое моделирование.

Для цитирования: Курашкин С.О., Тынченко В.С., Мурыгин А.В. Математическое моделирование распределения энергии при вводе в материал изделия луча в процессе электронно-лучевой сварки // Вестник МЭИ. 2021. № 3. С. 88—95. DOI: 10.24160/1993-6982-2021-3-88-95.

Mathematical Modeling of Energy Distribution in Entering a Beam into the Workpiece Material in the Course of Electron Beam Welding

S.O. Kurashkin, V.S. Tynchenko, A.V. Murygin

Modeling of electron beam welding processes is one of the most important parts of applied research, because full-scale experimental investigations are either expensive or highly labor intensive. The problem of modeling the temperature fields at the electron beam entering stage during welding is considered. The aim of the study is to simplify the adjustment of the electron beam welding process technological parameters and to elaborate and develop more efficient control algorithms through replacing full-scale experiments by model ones. The mathematical body of the proposed solutions is constructed using the theories of thermal and welding processes, based on which the energy distribution mathematical models are developed. For practically implementing the computations, an algorithmic support is presented that allows the mathematical models to be applied in modern modeling systems, such as Matlab, Comsol Multiphysics, and Ansys. Apart from supplementing the set of existing mathematical models of the electron beam welding process, the obtained models for calculating the temperature in the beam entering area widen their application for calculating and optimizing the welding process, taking into account the workpiece temperature in the electron beam entering area. By using the proposed solutions, several numerical experiments were carried out for a workpiece made of VT-14 titanium alloy and two pieces of different thickness made of AMg-6 aluminum alloy. The obtained temperature fields and the rms values of process parameters are almost identical with the results of previously conducted full-scale studies.

Key words: electron beam welding, thermal processes, control automation, optimization of process parameters, electron beam entering/removal, mathematical modeling.

For citation: Kurashkin S.O., Tynchenko V.S., Murygin A.V. Mathematical Modeling of Energy Distribution in Entering a Beam into the Workpiece Material in the Course of Electron Beam Welding. Bulletin of MPEI. 2021;3:88—95. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2021-3-88-95.

Введение

Электронно-лучевая сварка (ЭЛС) широко применяется на предприятиях аэрокосмической отрасли не только в России, но и по всему миру для создания высоконадежных неразъёмных соединений, критически важных узлов продукции [1 — 3]. Данный метод получил распространение за счёт безупречного качества формируемых соединений, возможности сварки изде-

лий разнообразной толщины, а также высокой степени повторяемости отработанного процесса при крупносерийном производстве [4 — 6].

Применение ЭЛС осложняется стоимостью оборудования и квалификацией персонала, а также сложностью и ценой настройки технологического процесса для новых номенклатурных позиций изделий предприятия [7 — 9].

Настоящая работа посвящена решению проблемы стоимости настройки технологического процесса для новых номенклатурных позиций изделий предприятия, поскольку замена полномасштабного эксперимента при отработке новых технологических процессов принесет не только существенную экономическую выгоду за счёт сохранения материальных ресурсов, но и позволит определить наилучшие настройки как значений технологических параметров ЭЛС, так и алгоритмов управления производственным оборудованием в автоматизированных системах [10 — 12].

Особенности автоматизации процесса электронно-лучевой сварки

Процесс ЭЛС условно делят на три этапа:

- ввод электронного луча;
- основной этап сварки в установившемся режиме;
- вывод электронного луча.

Основному этапу сварки в установившемся режиме в мировых исследованиях уделено много внимания, при этом этапы ввода и вывода луча остаются в тени, хотя достаточно большое количество дефектов возникает именно в так называемой нулевой точке сварки — том участке шва, где проходили ввод и вывод луча [13 — 15]. Процессы ввода и вывода осложняются возможным появлением следующих дефектов: газовых пор, непроваров, корневых дефектов при выборе неправильной скорости и формы управления током луча [16 — 18].

Проведение натуральных экспериментов для решения поставленной задачи зачастую не представляется возможным из-за финансовых, либо временных ограничений, что делает актуальным проведение модельных экспериментов.

Выполнены исследования, в которых рассматривался вопрос выбора параметров для формирования сварного соединения, где критерием оптимума стала минимизация неоднородности температурного поля, после воздействия электронного луча [19 — 21]. Одна-

ко в указанных работах не затрагивались вопросы того, как поступать на участках ввода и вывода электронного луча в процессе сварки в случаях, не позволяющих получить сварной шов, соответствующий формируемому по оптимальным параметрам для основного этапа процесса.

Для изучения этапов ввода и вывода можно использовать модели теплопереноса, описываемые дифференциальными уравнениями. Однако применение численных методов, широко встречающихся на практике для решения такого рода задач, не позволяет реализовать встраиваемое в систему автоматизации ядро математического моделирования вследствие большого количества требуемых вычислений. При этом работа с предлагаемым в настоящем исследовании подходом позволит повысить скорость решения поставленной задачи моделирования.

Принципиально систему управления электронно-лучевой сваркой можно сформулировать в виде, изображенном на рис. 1.

Система состоит из:

- программного обеспечения, управляющего электронно-лучевым оборудованием и вспомогательными механизмами;
- аппаратного комплекса, представляющего собой платы сбора данных и иное оборудование для ввода информации;
- исполнительных устройств: электронно-лучевой пушки, управляемого электрического привода и др.

Программное обеспечение можно разделить на:

- алгоритмическое ядро, с помощью которого осуществляется руководство как электронно-лучевой пушкой, так и приводным устройством на основе поступающей информации с датчиков и из ядра математического моделирования;
- ядро математического моделирования, реализующее математическое моделирование распределения энергии в процессе электронно-лучевой сварки с целью формирования наиболее эффективного управления;

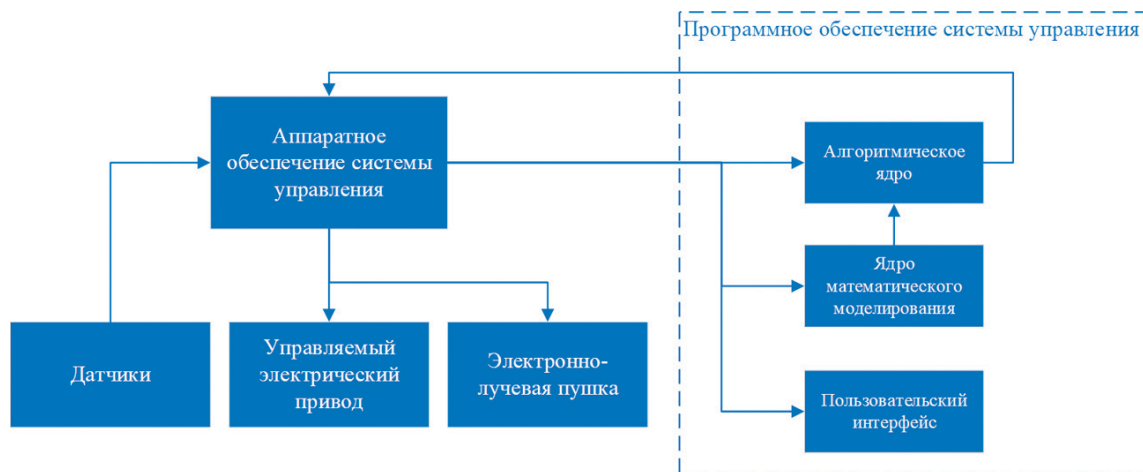


Рис. 1. Структурная схема системы управления электронно-лучевой сваркой

• пользовательский интерфейс, поддерживающий двухстороннее взаимодействие между конечным пользователем системы (оператором установки) и программным компонентом системы управления.

Рассмотрено создание математического обеспечения для процесса моделирования распределения температуры при различных режимах ввода электронного луча в процессе сварки, учитывающего характеристики свариваемых материалов и технологические параметры процесса ЭЛС. В рамках автоматизированной системы управления предлагаемый подход реализован в ядре математического моделирования.

Предложенная система управления учитывает характер распределения тепла в зоне проплавления, установленные технологические параметры процесса, а также требуемые параметры сварного соединения тонкостенных конструкций.

Создание математических моделей распределения температуры при вводе электронного луча в процессе сварки

Разработаны математические модели распределения температуры при различных режимах ввода электронного луча в процессе сварки, позволяющие дополнить комплекс существующих математических моделей, а также проводить более точное моделирование по сравнению с имитацией. Спроектирована схема алгоритма расчёта по полученным моделям. Моделирование проводилось в программном обеспечении Matlab.

На рисунке 2 дана схема ввода электронного пучка в системе координат, связанных со сварным швом, где пересечение осей X и Y — траектория ввода луча, а на оси Z — вывод луча.

Вычислена температура при различных технологических (ток и диаметр пучка, время и скорость сварки, фокусное расстояние) и теплофизических (теплоемкость, удельная теплоемкость и плотность материала, коэффициент температурного расширения) параметрах при неустановившемся процессе.

В процессе электронно-лучевой сварки, а именно на этапе ввода луча, возникают перегрев либо недостаточный нагрев металла [22 — 24]. Перегрев протекает с большим количеством поступающей энергии за

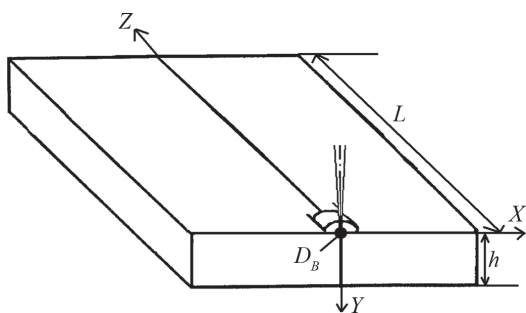


Рис. 2. Схема расчёта ввода электронного луча:
 h — толщина изделия; L — длина изделия; D_B — диаметр пучка

время ввода луча меньше оптимального, что приводит к плавлению сварного шва за пределами требуемой ширины и возникновению дефектов. Недостаточный нагрев, наоборот, образуется при времени ввода луча, превышающем оптимальное, тогда малое количество поступающей энергии ведет к недостаточному нагреву зоны сварного шва и, как следствие, непроварам.

Таким образом, следует использовать модели из теории сварочных процессов. Для предотвращения подобных дефектов на этапе ввода луча предлагается вычисление температуры с целью исключения перерегулирования ее по времени. Перед этим требуется расчет коэффициента теплонасыщения [25, 26].

На первом этапе задаются теплофизические параметры: λ — теплоемкость, Вт/(м·°C); C — удельная теплоемкость, Дж/кг·°C; ρ — плотность, кг/м³ материала; α — коэффициент температурного расширения, 1/°C.

На следующем этапе вводятся параметры сварки, полученные на предыдущих этапах моделирования и протестированные на натуральных экспериментах: V — скорость сварки, см/с; t — время интегрирования, с; h — толщина, мм; l, w — длина и ширина изделия, мм; U — ускоряющее напряжение, В; I_B — ток луча, А; I_F — ток фокусировки, А; D_B — диаметр луча, мм.

Устанавливаются следующие начальные условия: Q — энергия источника тепла, эквивалентная минимальному значению; T_{np} — температура переходного процесса; Q_{sg}, T_{sg} — размерные сетки по мощности и температуре; D_{BX}, D_{BY} — диаметры луча по координатам X и Y ; D_{BXsg}, D_{BYsg} — размерные сетки по диаметру луча по координатам X, Y .

В начальный период действия источника теплоты температуры точек тела монотонно возрастают от начальных значений до температур предельного (стационарного) состояния, устанавливающегося в течение конечного промежутка времени, называемого периодом теплонасыщения [26].

Расчет температур, которые в этот период для различных расчетных схем выражены уравнениями быстро движущихся линейного и точечного источников, выполняется с помощью численных методов — по формулам предельного состояния для принятой расчетной схемы, но с учетом поправочного коэффициента теплонасыщения [26]:

$$\psi(x, y, z, v, t, q) = \frac{T(t) - T_n}{T_{np}(x, y, z, v, t, q) - T_n}.$$

где t — время от момента начала сварки; $T(t)$ — температура на стадии теплонасыщения; T_n — начальная температура; $T_{np}(V, t, v, q)$ — температура предельного состояния.

Под температурой предельного состояния T_{np} понимается сумма двух источников — быстро движущегося линейного в бесконечной пластине и точечного на поверхности полубесконечного тела.

Выражение источника нагрева в виде двух мгновенных движущихся источников: точечного T_1 и линейного T_2 ,

обусловлено тем, что линейный позволяет ввести ограничение в объеме (то есть ширину, длину, толщину изделия).

Уравнение описывает температурные подвижки источников и использует принцип наложения [26]:

$$T_{np}(V, t, q, v) = T_1(V, t, q, v) + T_2(V, t, q, v),$$

где V — объем, т. е. координаты по осям X, Y, Z ; q — мощность источника нагрева; v — скорость сварки; t — время интегрирования.

Формула для состояния температурного поля при воздействии быстро движущегося точечного источника [26] выглядит как:

$$T_1(V, t, q, v) = T_n + \frac{2q}{c\rho\sqrt{(4\pi a)^3}} \exp\left(-\frac{vx}{2a}\right) \int_0^t \exp\left(-\frac{v^2\tau}{4a} - \frac{R^2}{4a\tau}\right) \frac{d\tau}{\tau^{3/2}},$$

где $c\rho$ — теплоемкость стали; a — коэффициент температуропроводности; t — время, отсчитываемое от момента прохождения источника через сечение, в котором находится рассматриваемая точка; R — расстояние от направления движения источника до рассматриваемой точки.

Состояние температурного поля при воздействии быстро движущегося линейного источника описывается следующим образом [26]:

$$T_2(V, q, t, v) = T_n + \frac{q}{4\pi\lambda\delta} \exp\left(-\frac{vx}{2a}\right) \int_0^t \exp\left(-\frac{v^2\tau}{4a} - \frac{2\lambda\tau}{c\rho\delta} - \frac{(x^2 + y^2)}{4a\tau}\right) \frac{d\tau}{\tau^{3/2}},$$

где b — коэффициент теплоотдачи пластины; r — расстояние от направления движения источника до рассматриваемой точки; δ — толщина; λ — коэффициент теплопроводности; t — время распространения теплоты.

Коэффициент теплонасыщения Ψ возрастает от нуля в начальный момент времени до единицы в предельном состоянии. Его значения для расчетной схемы процесса распространения теплоты определяются по номограммам в зависимости от безразмерных критериев расстояния ρ_2 и времени τ_2 . Номограммы представлены на рис. 3.

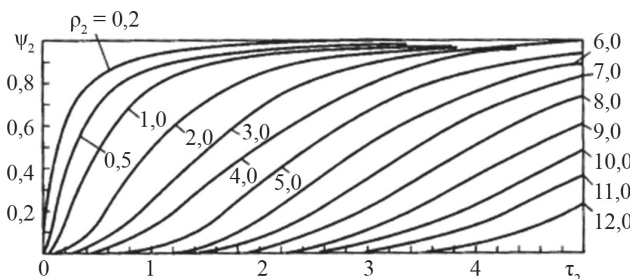


Рис. 3. Номограммы определения коэффициента теплонасыщения для схемы линейного источника в бесконечной пластине Ψ_2

Для плоского процесса распространения теплоты безразмерные критерии ρ_2 и τ_2 вычисляются по формулам [26]:

$$\rho_2 = r\sqrt{\frac{v^2}{4a^2} + \frac{b}{a}}; \quad \tau_2 = t\left(\frac{v^2}{4a} + b\right). \quad (1)$$

Расстояние от источника теплоты до точки тела r , входящее в состав (5), определяется в подвижной системе координат с учетом заданных координат точки и времени t , прошедшего после начала сварки [26]:

$$x = x_0 - vt; \quad y = y_0; \quad z = z_0,$$

где x, y, z — координаты точки в подвижной системе координат, связанной с источником; x_0, y_0, z_0 — координаты точки в неподвижной системе координат.

После прекращения действия источника теплоты наступает период выравнивания температур. Введенная ранее теплота продолжает распространяться в теле и отводится в окружающую среду. Таким образом, температура сварки может быть получена как:

$$T(V, q, t, v) = T_n + (T_{np}(x, y, z, q, t, v) - T_n) [\Psi(t) - \Psi(t - t_k)], \quad (2)$$

где $T(t)$ — температура на стадии выравнивания температур; $\Psi(t), \Psi(t - t_k)$ — коэффициенты теплонасыщения, соответствующие длительностям нагрева и работы стока теплоты $t - t_k$; t_k — время окончания сварки (время действия источника).

Используя формулу (2), можно найти температуру на этапе ввода луча и предотвратить перегрев, тем самым получив более стабильное качество сварного шва.

Для проведения моделирования взято программное обеспечение Matlab. В ходе работы, на основе алгоритма разработана программа, позволяющая проводить математическое моделирование практически для любого типа материала.

Для титанового сплава ВТ-14 толщиной 1,2 мм выполнено моделирование процесса электронно-лучевой сварки при заданных режимах ввода электронного пучка. Найдем распределение температуры при сварке титанового сплава с учетом геометрических размеров изделия и заданных технологических параметров (тока и диаметра пучка, времени и скорости сварки, фокусного расстояния). Используются результаты, полученные и верифицированные в предыдущих исследованиях [17, 18, 22]. В результате моделирования получен график распределения температуры, изображенный на рис. 4.

Также проведено моделирование распределения температуры при заданных режимах ввода электронного луча для алюминиевого сплава АМг-6 толщиной 1,2 мм. На данном этапе получено распределение температуры при сварке алюминиевого сплава с учетом геометрических размеров изделия и заданных технологических параметров.

Используются результаты, описанные и верифицированные в [17, 18, 22]. Получен объемный график распределения температуры при вводе луча, продемонстрированный на рис. 5, из которого виден характер

распределения температуры при нагреве места ввода электронного пучка.

Для полноты эксперимента проведено моделирование распределения температуры при заданных режимах ввода электронного луча для волноводных трактов из алюминиевого сплава АМг-6 толщиной 0,65 мм. На данном этапе взято распределение температуры при сварке волноводных трактов с учётом геометрических размеров изделия и заданных технологических параметров. Задействованы результаты из работ [17, 18, 22]. Получен объёмный график распределения температуры на месте ввода луча (рис. 6).

Заключение

На основе предыдущих работ разработан алгоритм для расчёта температуры при вводе луча с учётом из-

менения температуры в процессе нагрева и, таким образом, дополнен существующий комплекс подходов.

Созданный алгоритм позволит снизить количество дефектов, возникающих в так называемой нулевой точке сварки.

Разработанные математические модели для расчёта температуры на поверхности изделия позволяют создать прототип программной системы, использующей полученные модели и алгоритмы управления режимами ввода электронного пучка. Его можно применять в виде модуля как в рамках новых создаваемых систем автоматизации, так и при модернизации существующих.

Сравнение результатов моделирования с ранее полученными данными позволяет сделать вывод о применимости метода в дальнейших исследованиях.

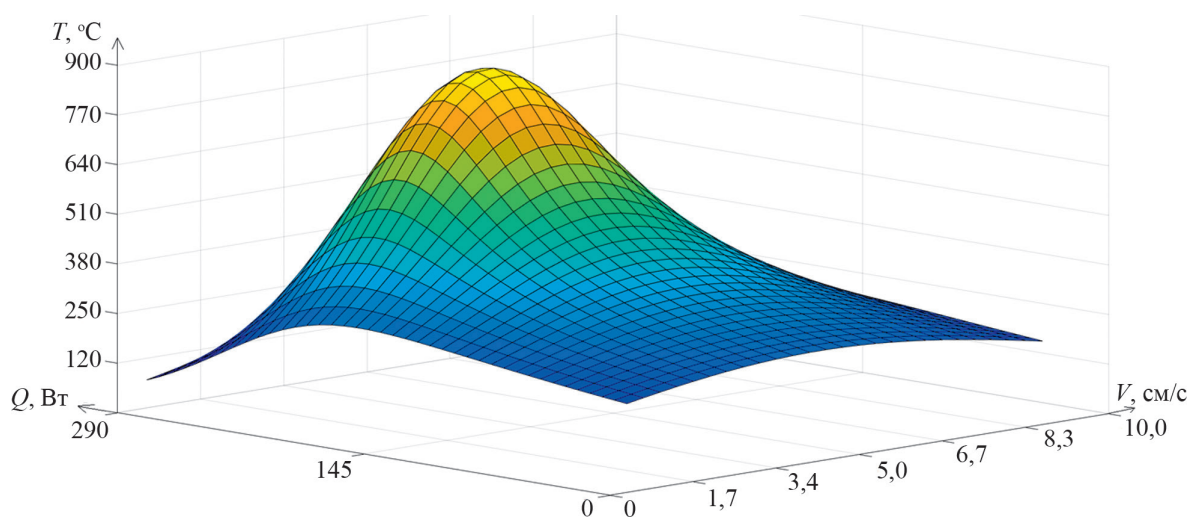


Рис. 4. Распределение температуры титанового сплава ВТ-14

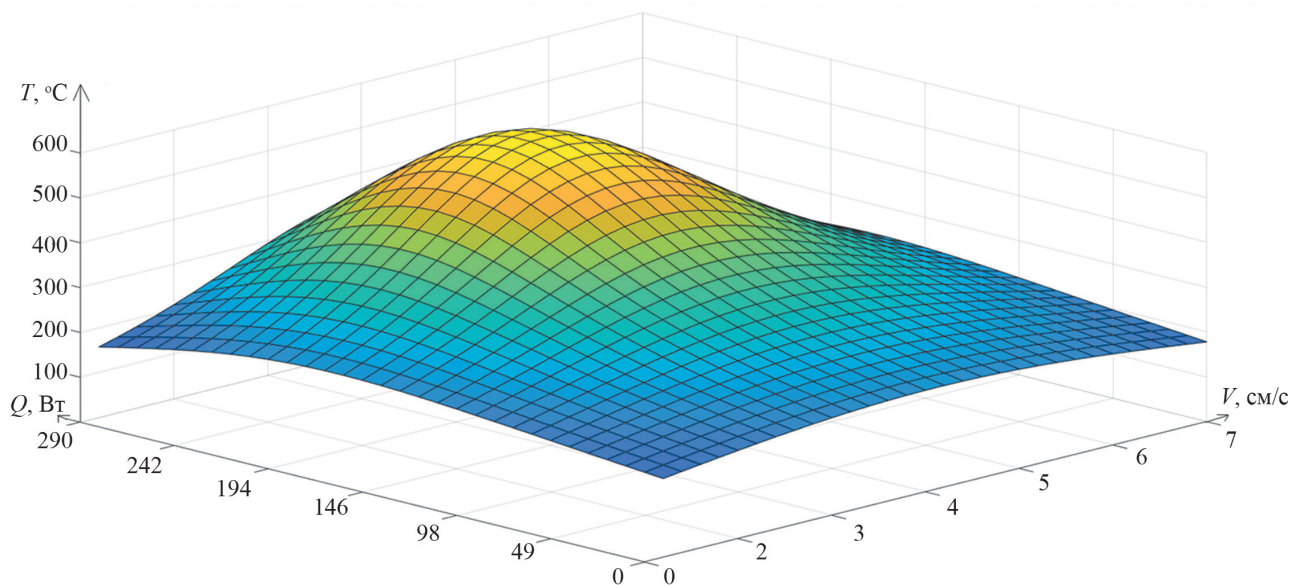


Рис. 5. График поверхности распределения температуры для алюминиевого сплава АМг-6

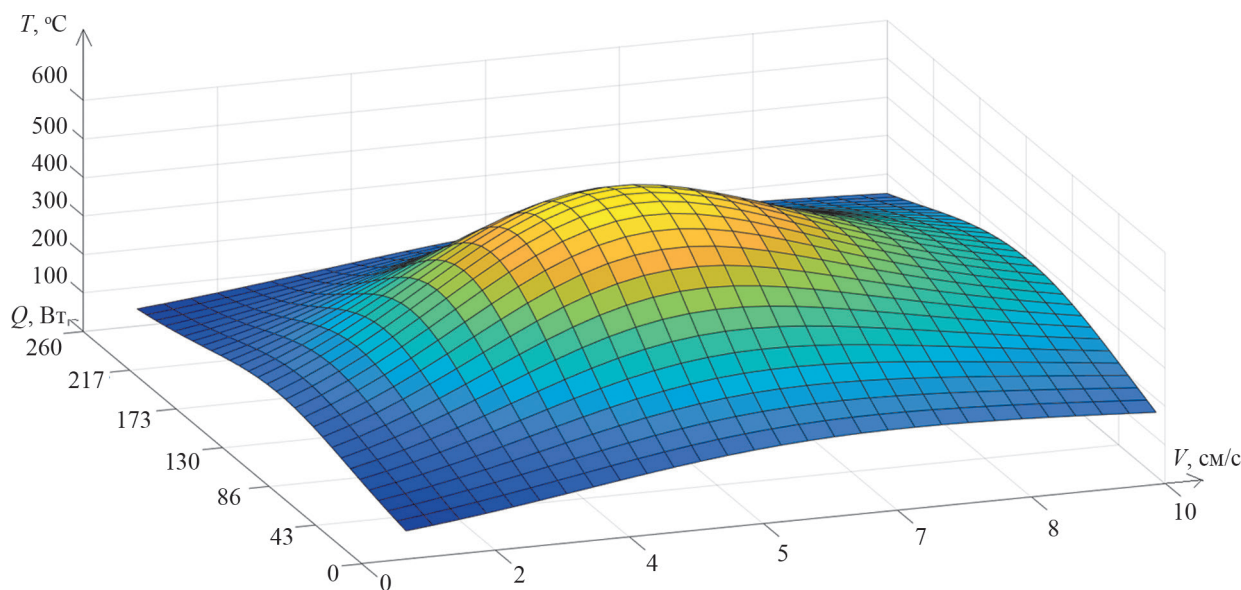


Рис. 6. График поверхности распределения температуры для волноводных трактов

Литература

References

1. **Lozinskiĭ M.G.** Industrial Applications of Induction Heating. Oxford: Pergamon Press, 1969.
2. **Gierth P., Rebenklau L., Michaelis A.** Evaluation of Soldering Processes for High Efficiency Solar Cells // Proc. XXXV Intern. Spring Seminar on Electronics Technol. 2012. Pp. 133—137.
3. **Murygin A.V. e. a.** Complex of Automated Equipment and Technologies for Waveguides Soldering Using Induction Heating // IOP Conf. Series: Materials Sci. and Eng. 2017. V. 173. No. 1. P. 012023.
4. **Nishimura F. e. a.** Development of a New Investment for High-Frequency Induction Soldering // Dental Materials J. 1992. V. 11. No. 1. Pp. 59—69.
5. **Cai H. e. a.** Study on Multiple-frequency IGBT High Frequency Power Supply for Induction Heating // Proc. CSEE. 2006. V. 26. Pp. 154—158.
6. **Lanin V.L., Sergachev I.I.** Induction Devices for Assembly Soldering in Electronics // Surface Eng. and Appl. Electrochem. 2012. V. 48. No. 4. Pp. 384—388.
7. **Moghaddam M., Mojallali H.** Neural Network Based Modeling and Predictive Position Control of Traveling Wave Ultrasonic Motor Using Chaotic Genetic Algorithm // Intern. Rev. Modelling and Simulations. 2013. V. 6. No. 2. Pp. 370—379.
8. **Ghazanfarpour B., Radzi M., Mariun N.** Adaptive Neural Network with Heuristic Learning Rule for series Active Power Filter // International Rev. Modelling and Simulations. 2013. V. 6. No. 6. Pp. 1753—1759.
9. **Lin C.T. e. a.** Neural-network-based Fuzzy Logic Control and Decision System // IEEE Trans. Computers. 1991. V. 40. No. 12. Pp. 1320—1336.
10. **Peter S.E. e. a.** Wavelet Based Spike Propagation Neural Network (WSPNN) for Wind Power Forecasting // Proc. Int Rev Model Simul. 2013. V. 6. No. 5. Pp. 1513—1522.

1. **Lozinskiĭ M.G.** Industrial Applications of Induction Heating. Oxford: Pergamon Press, 1969.
2. **Gierth P., Rebenklau L., Michaelis A.** Evaluation of Soldering Processes for High Efficiency Solar Cells. Proc. XXXV Intern. Spring Seminar on Electronics Technol. 2012:133—137.
3. **Murygin A.V. e. a.** Complex of Automated Equipment and Technologies for Waveguides Soldering Using Induction Heating. IOP Conf. Series: Materials Sci. and Eng. 2017;173; 1:012023.
4. **Nishimura F. e. a.** Development of a New Investment for High-Frequency Induction Soldering. Dental Materials J. 1992;11;1:59—69.
5. **Cai H. e. a.** Study on Multiple-frequency IGBT High Frequency Power Supply for Induction Heating. Proc. CSEE. 2006;26:154—158.
6. **Lanin V.L., Sergachev I.I.** Induction Devices for Assembly Soldering in Electronics. Surface Eng. and Appl. Electrochem. 2012;48;4:384—388.
7. **Moghaddam M., Mojallali H.** Neural Network Based Modeling and Predictive Position Control of Traveling Wave Ultrasonic Motor Using Chaotic Genetic Algorithm. Intern. Rev. Modelling and Simulations. 2013; 6;2:370—379.
8. **Ghazanfarpour B., Radzi M., Mariun N.** Adaptive Neural Network with Heuristic Learning Rule for series Active Power Filter. International Rev. Modelling and Simulations. 2013;6;6:1753—1759.
9. **Lin C.T. e. a.** Neural-network-based Fuzzy Logic Control and Decision System. IEEE Trans. Computers. 1991; 40;12:1320—1336.
10. **Peter S.E. e. a.** Wavelet Based Spike Propagation Neural Network (WSPNN) for Wind Power Forecasting. Proc. Int Rev Model Simul. 2013;6;5:1513—1522.

11. **Farahat M.A. e. a.** Short Term Load Forecasting Using BP Neural Network Optimized by Particle Swarm Optimization // *Int. Rev. Model. Simulations*. 2013. V. 6. No. 2. Pp. 450—454.
12. **Ananthamoorthy N., Baskaran K.** Modelling, Simulation and Analysis of Fuzzy Logic Controllers for Permanent Magnet Synchronous Motor Drive // *Ibid.* No. 1. Pp. 75—82.
13. **Wei H. e. a.** Angular Sensing System Based on Y-type Twin-core Fiber and Reflective Varied-line Spacing Grating Fabricated by Electron Beam Lithography // *Results Physics*. 2020. V. 18. P. 103193.
14. **Sitnikov I.V., Belenkiy V.Y., Olshanskaya T.V.** Study of the Effect of Focusing and Oscillation of Electron Beam on the Structure and Properties of Welded Seams // *IOP Conf. Series: Materials Sci. and Eng.* 2019. V. 611. No. 1. P. 012009.
15. **Kasitsyn A.N. e. a.** Control of Electron Beam Welding Parameters Based on the Gap Scanning System Data During the Welding Process // *IOP Conf. Series: Materials Sci. and Eng.* 2020. V. 759. No. 1. P. 012013.
16. **Рапопорт Э.Я., Пleshivtseva Ю.Э.** Оптимальное управление температурными режимами индукционного нагрева. М.: Наука, 2012.
17. **Серегин Ю.Н. и др.** Экспериментальные исследования по оптимизации технологии электронно-лучевой сварки алюминиевых сплавов // *Технологии и оборудование ЭЛС-2011: Материалы Междунар. науч.-техн. конф. СПб., 2011. С. 71—80.*
18. **Серегин Ю.Н., Курашкин С.О.** Моделирование режима ЭЛС для прогнозирования параметров сварного шва // *Электронно-лучевая сварка и смежные технологии*. 2017. С. 26—36.
19. **Tynchenko V. e. a.** Application of Artificial Neural Networks for Identification of Non-normative Errors in Measuring Instruments for Controlling the Induction Soldering Process // *Intern. Multidisciplinary Sci. Geo Conf.* 2018. V. 18. No. 2. Pp. 117—124.
20. **Milov A.V., Tynchenko V.S., Murygin A.V.** Experimental Verification of Flux Effect on Process of Aluminium Waveguide Paths Induction Soldering // *Proc. Intern. Russian Automation Conf. N.-Y.: Springer*, 2019. Pp. 282—291.
21. **Рапопорт Э.Я., Пleshivtseva Ю.Э.** Алгоритмически точный метод параметрической оптимизации в краевых задачах оптимального управления системами с распределенными параметрами // *Автоматрия*. 2009. Т. 45. №. 5. С. 103—112.
22. **Seregin Y.N., Kurashkin S.O.** Modeling the Thermal Process Using the Temperature Functional by Electron Beam Welding // *IOP Conf. Series: Materials Sci. and Eng.* 2020. V. 734. No. 1. P. 012003.
23. **Пермяков Г.Л. и др.** Численное моделирование процесса электронно-лучевой сварки с продольной осцилляцией луча на основе экспериментально определенной формы канала проплавления // *Сибирский журнал науки и технологий*. 2015. Т. 16. №. 4. С. 828—832.
11. **Farahat M.A. e. a.** Short Term Load Forecasting Using BP Neural Network Optimized by Particle Swarm Optimization. *Int. Rev. Model. Simulations*. 2013;6;2: 450—454.
12. **Ananthamoorthy N., Baskaran K.** Modelling, Simulation and Analysis of Fuzzy Logic Controllers for Permanent Magnet Synchronous Motor Drive. *Ibid*;1:75—82.
13. **Wei H. e. a.** Angular Sensing System Based on Y-type Twin-core Fiber and Reflective Varied-line Spacing Grating Fabricated by Electron Beam Lithography. *Results Physics*. 2020;18:103193.
14. **Sitnikov I.V., Belenkiy V.Y., Olshanskaya T.V.** Study of the Effect of Focusing and Oscillation of Electron Beam on the Structure and Properties of Welded Seams. *IOP Conf. Series: Materials Sci. and Eng.* 2019;611;1:012009.
15. **Kasitsyn A.N. e. a.** Control of Electron Beam Welding Parameters Based on the Gap Scanning System Data During the Welding Process. *IOP Conf. Series: Materials Sci. and Eng.* 2020;759;1:012013.
16. **Rapoport E.Ya., Pleshivtseva Yu.E.** Optimal'noe Upravlenie Temperaturnymi Rezhimami Induktsionnogo Nagreva. М.: Наука, 2012. (in Russian).
17. **Seregin Yu.N. i dr.** Eksperimental'nye Issledovaniya po Optimizatsii Tekhnologii Elektronno-luchevoy Svarki Alyuminiyevykh Splavov. *Tekhnologii i Oborudovanie ELS-2011: Materialy Mezhdunar. Nauch.-tekhn. Konf. SPb., 2011:71—80.* (in Russian).
18. **Seregin Yu.N., Kurashkin S.O.** Modelirovanie Rezhima ELS dlya Prognozirovaniya Parametrov Svarnogo Shva. *Elektronno-luchevaya Svarka i Smezhnye Tekhnologii*. 2017:26—36. (in Russian).
19. **Tynchenko V. e. a.** Application of Artificial Neural Networks for Identification of Non-normative Errors in Measuring Instruments for Controlling the Induction Soldering Process. *Intern. Multidisciplinary Sci. Geo Conf.* 2018;18;2:117—124.
20. **Milov A.V., Tynchenko V.S., Murygin A.V.** Experimental Verification of Flux Effect on Process of Aluminium Waveguide Paths Induction Soldering. *Proc. Intern. Russian Automation Conf. N.-Y.: Springer*, 2019:282—291.
21. **Rapoport E.Ya., Pleshivtseva Yu.E.** Algoritmicheski Tochnyy Metod Parametricheskoy Optimizatsii v Kraevykh Zadachakh Optimal'nogo Upravleniya Sistemami s Raspredeleennyimi Parametrami. *Avtometriya*. 2009;45;5: 103—112. (in Russian).
22. **Seregin Y.N., Kurashkin S.O.** Modeling the Thermal Process Using the Temperature Functional by Electron Beam Welding. *IOP Conf. Series: Materials Sci. and Eng.* 2020;734;1:012003.
23. **Permyakov G.L. i dr.** Chislennoe Modelirovanie Protsesta Elektronno-luchevoy Svarki s Prodol'noy Otsillyatsiyey Lucha na Osnove Eksperimental'no Opredelennoy Formy Kanala Proplavleniya. *Sibirskiy Zhurnal Nauki i Tekhnologiy*. 2015;16;4:828—832. (in Russian).

24. **Cho W.I. e. a.** Numerical Simulation of Molten Pool Dynamics in High Power Disk Laser Welding // *J. Materials Proc. Technol.* 2012. V. 212. No. 1. Pp. 262—275.

25. **Reich M. e. a.** Real-time Beam Tracing for Control of the Deposition Location of Electron Cyclotron Waves // *Fusion Eng. and Design.* 2015. V. 100. Pp. 73—80.

26. **Коновалов А.В. и др.** Теория сварочных процессов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007.

24. **Cho W.I. e. a.** Numerical Simulation of Molten Pool Dynamics in High Power Disk Laser Welding. *J. Materials Proc. Technol.* 2012;212;1:262—275.

25. **Reich M. e. a.** Real-time Beam Tracing for Control of the Deposition Location of Electron Cyclotron Waves. *Fusion Eng. and Design.* 2015;100:73—80.

26. **Konvalov A.V. i dr.** Teoriya Svarochnykh Protsessov. M.: Izd-vo MG TU im. N.E. Baumana, 2007. (in Russian).

Сведения об авторах:

Курашкин Сергей Олегович — аспирант кафедры информационно-управляющих систем Сибирского государственного университета науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнева, e-mail: scorpion_ser@mail.ru

Тынченко Вадим Сергеевич — кандидат технических наук, доцент кафедры информационно-управляющих систем Сибирского государственного университета науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнева, e-mail: vadimond@mail.ru

Мурьгин Александр Владимирович — доктор технических наук, заведующий кафедрой информационно-управляющих систем Сибирского государственного университета науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнева, e-mail: avm514@mail.ru

Information about authors:

Kurashkin Sergey O. — Ph.D.-student of Information and Control Systems Dept., Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, e-mail: scorpion_ser@mail.ru

Tynchenko Vadim S. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Information and Control Systems Dept., Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, e-mail: vadimond@mail.ru

Murygin Aleksandr V. — Dr.Sci. (Techn.), Head of Information and Control Systems Dept., Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, e-mail: avm514@mail.ru

Работа выполнена при поддержке: РФФИ, Правительства Красноярского края и Краевого фонда науки в рамках научного проекта № 19-48-240007 «Математическое и алгоритмическое обеспечение процесса электронно-лучевой сварки тонкостенных конструкций аэрокосмического назначения»

The work is executed at support: RFBR, Government of the Krasnoyarsk Territory and the Regional Science Foundation, project number 19-48-240007 «Mathematical and algorithmic support of the electron-beam welding of thin-walled aerospace structures»

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 03.09.2020

The article received to the editor: 03.09.2020