

УДК 621.791.722

DOI: 10.15593/2224-9397/2020.4.08

С.О. Курашкин, В.С. Тынченко, А.В. Мурыгин, Д.В. РоговаСибирский государственный университет науки и технологий им. академика
М.Ф. Решетнева, Красноярск, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО ПОЛЯ В ПРОЦЕССЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИНАМИЧЕСКИ ИЗМЕНЯЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ СПЛАВОВ ИЗДЕЛИЙ

В статье рассмотрена проблема моделирования теплового поля в процессе электронно-лучевой сварки, которая широко применяется на предприятиях машиностроения Российской Федерации. Актуальность данного исследования обусловлена сложностью подбора эффективного набора технологических параметров для изделий из титанового сплава. Применение методов математического моделирования позволяет существенно снизить временные, трудовые, а также экономические затраты на совершенствование и также отработку существующих технологий. При этом использование динамически изменяющихся теплофизических параметров в процессе моделирования способствует повышению точности моделирования. **Цель исследования:** повышение эффективности и качества математического моделирования температурного поля. **Методы:** предложенный в статье подход по использованию динамически изменяемых теплофизических параметров использует методы регрессионного анализа, позволяющие восстановить значения таких параметров для сплавов изделий в процессе моделирования. Применялись следующие широко используемые методы аппроксимации: линейная, квадратичная, кубическая, экспоненциальная, логарифмическая, – позволяющие восстановить зависимость недостающих значений теплофизических параметров, зависящие от температуры материала. Для моделирования распределения температурного поля используется аппарат теории сварочных процессов, на основе которого реализованы вычислительные соотношения. **Результаты:** в процессе экспериментальных исследований применения предложенного в работе подхода, было проведено моделирование распределения энергии при электронно-лучевой сварке элемента изделия из титанового сплава ВТ-14. Применение динамически изменяемых теплофизических параметров изделия позволило получить функцию распределения энергии в зоне нагрева более естественного вида, когда нагревание более холодных зон не даёт высокого распределения тепла в смежные области. **Практическая значимость:** полученные результаты могут быть использованы для повышения качества сварного соединения, а также обеспечения повторяемости технологического процесса электронно-лучевой сварки.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, моделирование, технологические параметры, электронный пучок, оптимизация, распределение энергии, ввод электронного луча, теплофизические параметры, регрессия, физические свойства материала.

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

Siberian State University of Science and Technology named after academician
M.F. Reshetnev, Krasnoyarsk, Russian Federation

THERMAL FIELD MODELING OF THE ELECTRON BEAM WELDING PROCESS WITH DYNAMICALLY VARIABLE PARAMETERS OF PRODUCT'S ALLOYS

The article deals with the problem of modeling the thermal zone in the process of electron-beam welding, which is widely used at machine-building enterprises of the Russian Federation. The relevance of this study is due to the complexity of the selection of an effective set of technological parameters for titanium alloy products. The use of mathematical modeling methods can significantly reduce time, labor, and economic costs for improving and also working out existing technologies. At the same time, the use of dynamically changing thermophysical parameters in the process of modeling helps to increase the accuracy of modeling. **Purpose of the study:** improving the efficiency and quality of mathematical modeling of the temperature field. **Methods:** the approach proposed in the article for the use of dynamically changing thermophysical parameters uses the methods of regression analysis, which make it possible to restore the values of such parameters for alloys of products in the process of modeling. The following widely used approximation methods were used: linear, quadratic, cubic, exponential, logarithmic, which allow restoring the dependence of the missing values of thermophysical parameters depending on the temperature of the material. To simulate the distribution of the temperature field, the apparatus of the theory of welding processes is used, on the basis of which the computational relations are realized. **Results:** In the process of experimental studies of the application of the approach proposed in the work, the simulation of energy distribution during electron-beam welding of a product element made of VT-14 titanium alloy was carried out. The use of dynamically changing thermophysical parameters of the product made it possible to obtain the energy distribution function in the heating zone in a more natural form, when heating of colder zones does not give a high distribution of heat to adjacent areas. **Discussion:** the results obtained can be used to improve the quality of the welded joint, as well as to ensure the repeatability of the technological process of electron beam welding.

Keywords: electron-beam welding, modelling, technological parameters, electron beam, optimization, normal distribution law, electron beam input, thermophysical parameters, regression, physical properties of the material.

Введение. Электронно-лучевая сварка (ЭЛС) – сварка, при которой нагрев и плавление изделий осуществляются потоком высокоскоростных электронов, движущихся под действием электрического поля в вакууме. Электронно-лучевая сварка используется в аэрокосмической отрасли для соединения различных конструкций и узлов, изготовленных из металлов-сплавов повышенной чистоты и твердости, поэтому предъявляются особые требования к выбору и соблюдению технологического режима [1–3].

Электронно-лучевая сварка также может соединять разнородные металлы. Этот процесс может также применяться к так называемым черно-белым металлам. Аналогичные утверждения относятся к различным цветным металлам. Однако ситуация может быть более сложной,

когда совершенно разные металлы (например, разные химический состав, теплопроводность, свойства затвердевания, коэффициент теплового расширения и т.д.) должны быть соединены друг с другом [4–6].

Важное место отводится выбору оптимального значения скорости сварки, зависящей от ускоряющего напряжения, а этапам ввода и вывода луча не уделяется должного внимания. Также зачастую при моделировании не рассматривается изменение теплофизических параметров, а табличные данные представлены в неполном объеме [7–9].

Такой подход обладает рядом недостатков, поэтому в данной работе предлагается дополнить недостающие значения теплофизических параметров с применением методов регрессионного анализа [10–12] и разработать алгоритм вычисления температуры на этапах ввода и вывода электронного луча. Достоинствами регрессионных моделей являются простота вычислительных алгоритмов, а также наглядность и интерпретируемость результатов [13–15].

1. Восстановление регрессионных зависимостей для теплофизических параметров изделия. В процессе ввода и вывода луча температура, интересующая нас, изменяется от 20 °С до температуры плавления, поэтому для повышения точности необходимо учитывать изменения теплофизических параметров материала изделия, таких как теплоемкость материала, коэффициент температурного расширения, удельная теплоемкость материала, плотность материала.

В настоящее время такие параметры представлены в справочниках для определенных температур материала и показаны в табл. 1.

Таблица 1

Физические свойства материала ВТ-14

Теплоемкость материала, Вт/(м·град)	Коэффициент температурного расширения, 10^6 , 1/Град	Удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·град)	Плотность материала, кг/м ³	Температура, °С
8,37	–	–	4520	20
9,21	8	–	–	100
10,47	8,2	0,544	–	200
11,72	8,5	0,586	–	300
12,92	8,8	0,628	–	400
13,82	8,9	0,67	–	500
–	8,7	0,712	–	600
–	–	–	–	700
–	–	–	–	800
–	–	–	4320	900

Однако для более точного моделирования недостаточно применения таблиц с такой сеткой дискретизации теплофизических параметров. Для восстановления зависимости таких значений требуется применение методов регрессионного анализа с целью использования в процессе математического моделирования. Поскольку каждый теплофизический параметр может иметь свою форму зависимости от температуры материала, то для восстановления регрессии были применены наиболее популярные методы аппроксимации: линейная, квадратичная, кубическая, экспоненциальная, логарифмическая. Ниже в табл. 2 показаны значения коэффициента корреляции для всех видов регрессии по каждому физическому параметру.

Таблица 2

Коэффициент корреляции

Параметр	Вид регрессии				
	Линейная	Квадратичная	Кубическая	Экспоненциальная	Логарифмическая
Коэффициент температурного расширения	0,8896	0,9695	0,9999	0,8837	0,9369
Теплоемкость материала	0,9989	0,9992	0,9999	0,9938	0,9160
Удельная теплоемкость материала	1	1	1	0,9992	0,9871
Плотность материала	-0,9999	1	-	0,9999	0,9486

Так как коэффициент корреляции для некоторых параметров оказался равен или близок к единице, даже при точности 13 знаков после запятой, авторами решено было для выбора оптимальной регрессии также использовать такой параметр, как средняя ошибка аппроксимации. Ниже в табл. 3 указана средняя ошибка аппроксимации для всех видов регрессии по каждому физическому параметру.

Таблица 3

Средняя ошибка аппроксимации

Параметр	Средняя ошибка аппроксимации				
	Линейная	Квадратичная	Кубическая	Экспоненциальная	Логарифмическая
Удельная теплоемкость материала	0	$3,2 \cdot 10^{-12}$	$1,43 \cdot 10^{-8}$	$3,62 \cdot 10^{-8}$	1,4335
Коэффициент температурного расширения	1,5381	0,9183	0,0493	1,5676	1,1503
Теплоемкость материала	0,6393	0,66020	0,0819	1,6460	6,9289
Плотность материала	0,0091	0	69,6297	0,0021	0,5175

Таким образом, в результате проведенных исследований для восстановления значений теплофизических параметров для различной температуры лучше подходит кубическая аппроксимации, при этом средняя ошибка стремится к нулю, т.е. зависимость практически идеальная.

Для восстановления значений для каждого из параметров была составлена соответствующая формула. Так, исходя из табл. 2, 3, для удельной теплоемкости была выбрана линейная регрессия и записана следующая формула:

$$C = 0,00042T + 0,46, \quad (1)$$

где C – удельная теплоемкость, применяемая для расчётов распределения энергии; T – текущая температура изделия в точке расчета.

Для коэффициента температурного расширения была выбрана кубическая регрессия и записана следующая формула:

$$\alpha = -2,407 \cdot 10^{-8}T^3 + 2,02778 \cdot 10^{-5}T^2 - 0,002446T + 8,0667, \quad (2)$$

где α – коэффициент температурного расширения, применяемый для расчётов распределения энергии.

Для параметра теплоемкости, на основе табл. 3 была выбрана кубическая регрессия и составлена соответствующая формула:

$$\lambda = -2,58964 \cdot 10^{-8}T^3 + 1,789 \cdot 10^{-5}T^2 + 0,00880269T + 8,184994, \quad (3)$$

где λ – теплоемкость, применяемая для расчётов распределения энергии.

Исходя из табл. 2, 3, была выбрана квадратичная регрессия для такого параметра, как плотность, и для восстановления значений, составлена соответствующая формула:

$$\rho = 4,73485 \cdot 10^{-6}T^2 - 0,231629T + 4524,6307, \quad (4)$$

где ρ – плотность, применяемая для расчётов распределения энергии.

Поэтому на основе полученных формул (1)–(4) и табл. 2, 3 для восстановления зависимости теплофизических параметров авторами выбраны несколько регрессий для каждого из параметров (кубическая, квадратичная и линейная). Полученные значения физических свойств для материала ВТ14 представлены в табл. 4.

Таблица 4

Восстановленные теплофизические параметры материала ВТ14

Теплоемкость материала, Вт/(м·град)	Коэффициент температурного расширения, 10^6 , 1/Град	Удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·град)	Плотность материала, кг/м ³	Температура, °С
8,368	8,026	0,468	4520	20
9,218	8,001	0,502	4501,515	100
10,454	8,196	0,544	4478,494	200
11,737	8,508	0,586	4455,568	300
12,911	8,792	0,628	4432,737	400
13,822	8,904	0,670	4410	500
14,314	8,700	0,712	4387,358	600
14,231	8,035	0,754	4364,811	700
13,418	6,764	0,796	4342,358	800
11,720	4,743	0,838	4320	900

Так же основываясь на табл. 1 и полученных формулах (1)–(4), были построены графики для каждого теплофизического параметра, восстановленно при помощи регрессионного анализа. Результаты представлены на рис. 1–4.

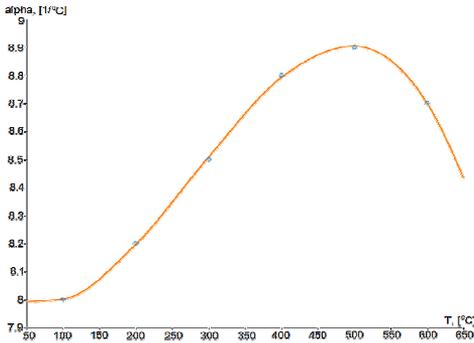


Рис. 1. Восстановленные значения коэффициента температурного расширения (α) в зависимости от температуры при помощи кубической регрессии

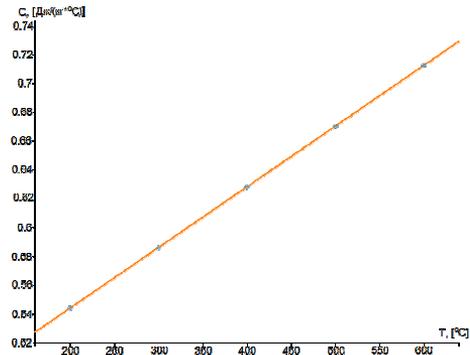


Рис. 2. Восстановленные значения удельной теплоемкости материала (C) в зависимости от температуры при помощи линейной регрессии

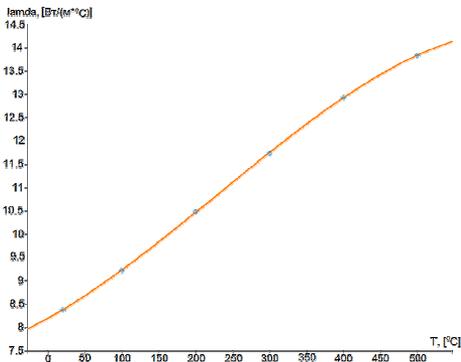


Рис. 3. Восстановленные значения теплоемкости материала (λ) в зависимости от температуры при помощи кубической регрессии

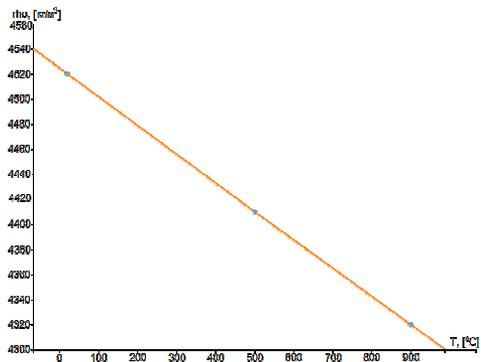


Рис. 4. Восстановленные значения плотности материала (ρ) в зависимости от температуры при помощи квадратичной регрессии

2. Разработка алгоритма вычисления теплового поля. В данной работе производится вычисление температуры при разных коэффициентах и неустановившемся процессе. Поскольку табличный подход неудобен, авторами предложен алгоритм для моделирования процесса нагрева на этапе ввода луча, основанный на полученных данных, и разработана блок-схема алгоритма расчёта распределения температуры при изменении теплофизических параметров от температуры, учитывающая результаты в предыдущих работах, представленная на рис. 5.

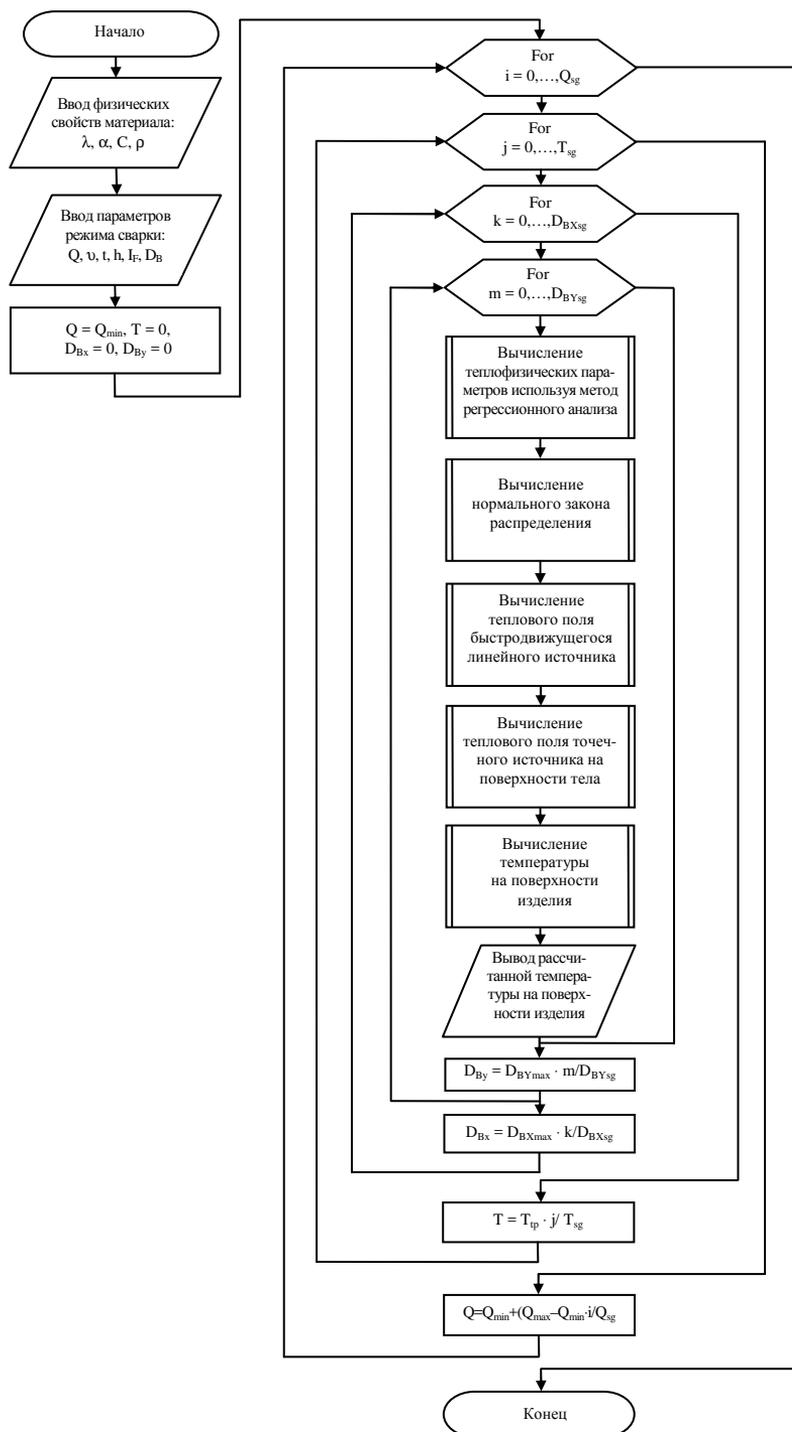


Рис. 5. Блок-схема алгоритм расчета теплового поля при изменении теплофизических параметров

Моделирование производится согласно алгоритму в соответствии с формулами расчёта распределения температуры [7–9].

На первом этапе производится задание теплофизических параметров таких как: теплоемкость материала (λ), коэффициент температурного расширения (α), удельная теплоемкость материала (C), плотность материала (ρ).

На следующем шаге вводятся параметры сварки: мощность (Q), скорость сварки (v), время (t), толщина изделия (h), ток фокусировки (I_F), диаметр луча (D_B), мощность – эффективная мощность, т.е. произведение КПД пушки на ток луча и на ускоряющее напряжение. Задаются начальные условия: Q – энергия источника тепла, эквивалентная минимальному значению; T_p – температура переходного процесса; Q_{sg} – размерная сетка по мощности; T_{sg} – размерная сетка по температуре; D_{BX} , D_{BY} – диаметр луча по координатам x и y ; D_{BXsg} , D_{BYsg} – размерная сетка по диаметру луча по координатам x и y .

На третьем этапе выполняются подпроцессы. В первом, согласно формулам (1)–(4) и заданным изначальным значениям параметров, производится вычисление теплофизических параметров.

Поскольку используется дискретная модель, т.е. конечное число шагов известно, мы можем рассчитывать теплофизические параметры, для следующего шага, зная предыдущие значения температуры, это возможно, основываясь на разработанных математических моделях в предыдущей работе.

Во-втором подпроцессе производится расчет нормального закона распределения электронного пучка. В-третьем и четвёртом подпроцессах выполняется вычисление теплового поля быстро движущегося линейного источника и теплового поля точечного источника на поверхности тела.

На последнем этапе, в пятом подпроцессе, производится вычисление температуры. При вычислении распределения температуры для получения более точных результатов производится проверка текущей рассчитанной температуры. Таким образом, когда температура изменяется, в процессе расчёта производятся расчёт и подстановка значений теплофизических параметров с применением методов регрессионного анализа для текущей температуры.

3. Экспериментальные исследования. Проведем моделирование процесса ввода луча с применением найденных теплофизических параметров материала изделия для различной температуры.

Для сравнения предложенного подхода к моделированию процесса, а также предложенных подходов в предыдущих работах [16–18], где применялись значения теплофизических параметров при температуре плавления материала изделия, были построены графики нагрева в нескольких точках сварного шва. Полученные графики представлены на рис. 6 и 7.

Как видно из графиков, применение предложенного подхода позволяет учитывать теплофизические характеристики на каждом этапе нагрева изделия и, следовательно, получить функцию распределения энергии в зоне нагрева более естественного вида, когда нагревание более холодных зон не даёт высокого распределения тепла в смежные области. Энергия концентрируется в зоне пайки в отличие от моделей, не учитывающих динамику изменения теплофизических характеристик (см. рис. 7).

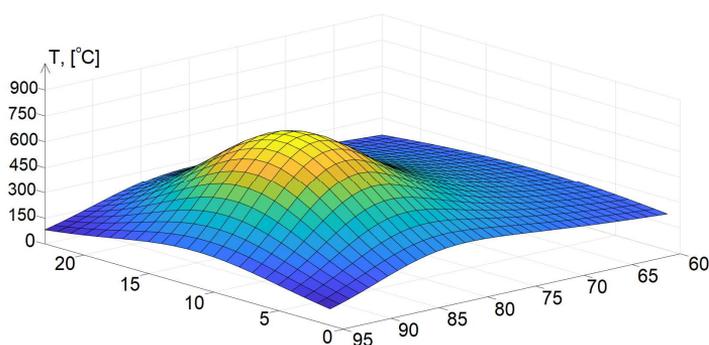


Рис. 6. Распределение теплового поля при вводе луча без изменения теплофизических коэффициентов

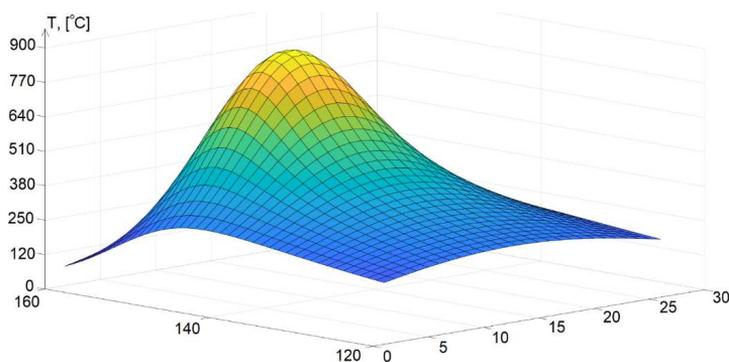


Рис. 7. Распределение температуры титанового сплава ВТ-14 при изменении теплофизических коэффициентов в зависимости от температуры

Выводы. В данной работе было проведено восстановление зависимости теплофизических параметров титанового сплава ВТ14 с целью дальнейшего вычисления распределения температурных полей на этапе ввода луча при электронно-лучевой сварке. Важно отметить, что в данной работе вычисление температуры при вводе луча проводилось не на полноразмерном изделии, а на участке стыка изделия. Применение регрессионного анализа позволило дополнить недостающие значения теплофизических параметров, и тем самым авторами на основе предыдущих работ был разработан алгоритм для расчёта температуры при вводе луча с учётом изменения температуры в процессе нагрева. Таким образом, был дополнен существующий комплекс подходов, что позволило получать более точные значения температурных полей, а в дальнейшем позволит уменьшить дефекты в корне сварного шва и получить более стабильное качество шва в процессе электронно-лучевой сварки.

Таким образом, разработанный алгоритм на основе ранее сделанной математической модели с применением регрессионного анализа предполагает перспективное применение на этапе ввода электронного луча, а в дальнейшем при выводе луча. Сравнение результатов, полученных выше в графическом виде, даёт представление о целесообразности применения алгоритма и показывает более точные результаты распределения температуры в зоне нагрева на этапе ввода электронного луча. Разработанный алгоритм вычисления распределения теплового поля на основе математических моделей оптимизации при вводе электронного пучка учитывает характер распределения при нагреве изделия, установленные технологические параметры процесса электронно-лучевой сварки, геометрию изделия, а также теплофизические параметры, восстановленные при помощи регрессионного анализа. Такой алгоритм вычисления распределения температуры на участке изделия при вводе луча на основе разработанных математических моделей с учётом физических свойств материала позволит создать математическое обоснование для выбора технологических параметров при разных режимах ввода-вывода луча.

В дальнейшем полученные результаты можно применить при создании моделей оптимизации режимов ввода и вывода ЭЛС, позволяющих формировать более качественное соединение в так называемой нулевой точке.

Исследование выполнено при финансовой 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».

Библиографический список

1. 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 Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – № 611(1). DOI: 10.1088/1757-899X/611/1/012009
2. Control of electron beam welding parameters based on the gap scanning system data during the welding process / A.N. Kasitsyn, R.Y. Agafonov, A.V. Leonov, G.V. Grigoriev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – № 759(1). DOI: 10.1088/1757-899X/759/1/012013
3. Electron beam welding features of cermet membranes / I.A. Kharitonov, V.K. Dragunov, A.L. Goncharov, V.N. Martynov // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – № 1109(1). DOI: 10.1088/1742-6596/1109/1/012022
4. Modelling the shape of electron beam welding joints by neural networks / T.S. Tsonevska, E.G. Koleva, L.S. Koleva, G.M. Mladenov // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – № 1089(1). DOI: 10.1088/1742-6596/1089/1/012008
5. Belenkiy V.Y. Scanning of an electron beam along an x-shaped trajectory as a means of reducing defects in the root of a weld in EBW // Automatic welding. – 1986. – Vol. 9. – P. 35–37.
6. Prevention of the formation of root defects in EBW with non-penetration of up to 60 mm depth / K.S. Akopianc, A.V. Emchenko-Ribko, V.Y. Neporohin, G.A. Shilov // Automatic welding. – 1989. – Vol. 4. – P. 30–34.
7. Modeling of electron beam distribution in electron beam welding / Y.N. Seregin, A.V. Murygin, V.D. Laptенок, V.S. Tynchenko // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – № 450(3). DOI: 10.1088/1757-899X/450/3/032036
8. Modelling of the welded seam parameters at electron-beam welding / V.S. Tynchenko, A.V. Murygin, Y.N. Seregin, A.V. Milov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – № 450(2). DOI: 10.1088/1757-899X/450/2/022019

9. Method for determination of technological mode parameters of electron-beam welding based on the application of optimality criterion with the view on the weld pool uniform heating / V.D. Laptanok, Y.N. Seregin, A.V. Murygin, V.S. Tynchenko // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – № 467(1). DOI: 10.1088/1757-899X/467/1/012013

10. Detecting overdispersion in count data: A zero-inflated Poisson regression analysis / S.A.M. Jamil, M.A.A. Abdullah, S.L. Kek, M.E. Nor, M. Mohamed, N. Ismail // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – № 890(1). DOI: 10.1088/1742-6596/890/1/012170

11. Ramli M., Ratnasari V., Budiantara I.N. Estimation of Matrix Variance-Covariance on Nonparametric Regression Spline Truncated for Longitudinal Data // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – № 1562(1). DOI: 10.1088/1742-6596/1562/1/012014

12. Saputro D.R.S., Sukmayanti A., Widyaningsih P. The nonparametric regression model using Fourier series approximation and penalized least squares (PLS) (case on data poverty in East Java) // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – № 1188(1). DOI: 10.1088/1742-6596/1188/1/012019

13. Santoso R., Prahutama A., Devi A.R. Modeling longitudinal data based on Fourier regression // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – № 1217(1). DOI: 10.1088/1742-6596/1217/1/012105

14. Drapper N.R., Smith H. Applied regression analysis 2. – New York: Marcel Dekker, 1998. – 715 p.

15. HSoE, National research university, regression analysis. – URL: <https://srosovet.ru/content/editor/Method/regression/9lekciyaKolcov.pdf>

16. Серегин Ю.Н., Курашкин С.О. Моделирование режима ЭЛС для прогнозирования параметров сварного шва // Электронно-лучевая сварка и смежные технологии. – 2017. – С. 26–36.

17. Analytical characteristics of the electron beam distribution density over the heated spot for optimizing the electron-beam welding process / S.O. Kurashkin, V.D. Laptanok, A.V. Murygin, Y.N. Seregin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – № 681(1). DOI: 10.1088/1757-899X/681/1/012021

18. Seregin Y.N., Kurashkin S.O. Modeling the thermal process using the temperature functional by electron beam welding // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – № 734(1). DOI: 10.1088/1757-899X/734/1/012003

References

1. 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 Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, no. 611(1). DOI: 10.1088/1757-899X/611/1/012009
2. Kasitsyn A.N., Agafonov R.Y., Leonov A.V., Grigoriev G.V. Control of electron beam welding parameters based on the gap scanning system data during the welding process. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, no. 759(1). DOI: 10.1088/1757-899X/759/1/012013
3. Kharitonov I.A., Dragunov V.K., Goncharov A.L., Martynov V.N. Electron beam welding features of cermet membranes. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, no. 1109(1). DOI: 10.1088/1742-6596/1109/1/012022
4. Tsonevska T.S., Koleva E.G., Koleva L.S., Mladenov G.M. Modeling the shape of electron beam welding joints by neural networks. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, № 1089(1). DOI: 10.1088/1742-6596/1089/1/012008
5. Belenkiy V.Y. Scanning of an electron beam along an x-shaped trajectory as a means of reducing defects in the root of a weld in EBW. *Automatic welding*, 1986, vol. 9, pp. 35-37.
6. Akopianc K.S., Emchenko-Ribko A.V., Neporohin V.Y., Shilov G.A. Prevention of the formation of root defects in EBW with non-penetration of up to 60 mm depth. *Automatic welding*, 1989, vol. 4, pp. 30-34.
7. Seregin Y.N., Murygin A.V., Laptanok V.D., Tynchenko V.S. Modeling of electron beam distribution in electron beam welding. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, no. 450(3). DOI: 10.1088/1757-899X/450/3/032036
8. Tynchenko V.S., Murygin A.V., Seregin Y.N., Milov A.V. Modeling of the welded seam parameters at electron-beam welding. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, no. 450(2). DOI: 10.1088/1757-899X/450/2/022019
9. Laptanok V.D., Seregin Y.N., Murygin A.V., Tynchenko V.S. Method for determination of technological mode parameters of electron-beam welding based on the application of optimality criterion with the view on the weld pool uniform heating. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, no. 467(1). DOI: 10.1088/1757-899X/467/1/012013
10. Jamil S.A.M., Abdullah M.A.A., S Kek.L., Nor M.E., Mohamed M., Ismail N. Detecting over dispersion in count data: A zero-inflated Pois-

son regression analysis. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, no. 890(1). DOI: 10.1088/1742-6596/890/1/012170

11. Ramli M., Ratnasari V., Budiantara I.N. Estimation of Matrix Variance-Covariance on Nonparametric Regression Spline Truncated for Longitudinal Data. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, no. 1562(1). DOI: 10.1088/1742-6596/1562/1/012014

12. Saputro D.R.S., Sukmayanti A., Widyaningsih P. The nonparametric regression model using Fourier series approximation and penalized least squares (PLS) (case on data poverty in East Java). *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, no. 1188(1). DOI: 10.1088/1742-6596/1188/1/012019

13. Santoso R., Prahutama A., Devi A.R. Modeling longitudinal data based on Fourier regression. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, no. 1217(1). DOI: 10.1088/1742-6596/1217/1/012105

14. Drapper N.R., Smith H. Applied regression analysis 2. New York: Marcel Dekker, 1998, 715 p.

15. HSoE, National research university, regression analysis, available at: <https://srosovnet.ru/content/editor/Metod/regression/9lekciyaKolcov.pdf>

16. Seregin Iu.N., Kurashkin S.O. Modelirovanie rezhima ELS dlia prognozirovaniia parametrov svarnogo shva [Modeling of the EBW mode for predicting the parameters of the weld]. *Elektronno-luchevaia svarka i smezhnye tekhnologii*, 2017, pp. 26-36.

17. Kurashkin S.O., Laptinok V.D., Murygin A.V., Seregin Y.N. Analytical characteristics of the electron beam distribution density over the heated spot for optimizing the electron-beam welding process. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, no. 681(1). DOI: 10.1088/1757-899X/681/1/012021

18. Seregin Y.N., Kurashkin S.O. Modeling the thermal process using the temperature functional by electron beam welding. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, no. 734(1). DOI: 10.1088/1757-899X/734/1/012003

Сведения об авторах

Курашкин Сергей Олегович (Красноярск, Россия) – аспирант кафедры «Информационно-управляющие системы» Сибирского государственного университета науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнева (660037, Красноярск, пр. им. газеты «Красноярский рабочий», 31, e-mail: scorpion_ser@mail.ru).

Тынченко Вадим Сергеевич (Красноярск, Россия) – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Информационно-управляющие системы» Сибирского государственного университета науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнева (660037, Красноярск, пр. им. газеты «Красноярский рабочий», 31, e-mail: vadimond@mail.ru).

Мурьгин Александр Владимирович (Красноярск, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационно-управляющие системы» Сибирского государственного университета науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнева (660037, Красноярск, пр. им. газеты «Красноярский рабочий», 31, e-mail: avm514@mail.ru).

Рогова Дарья Васильевна (Красноярск, Россия) – студентка, Сибирского государственного университета науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнева (660037, Красноярск, пр. им. газеты «Красноярский рабочий», 31, e-mail: dasha_28_05@mail.ru).

About the authors

Kurashkin Sergei Olegovich (Krasnoyarsk, Russian Federation) is a Graduate Student Department of Information-Control Systems Siberian State University of Science and Technology named after academician M.F. Reshetnev (660037, Krasnoyarsk, 31, Krasnoyarsky rabochy ave., e-mail: scorpion_ser@mail.ru).

Tynchenko Vadim Sergeyeovich (Krasnoyarsk, Russian Federation) is a Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor Department of Information-Control Systems Siberian State University of Science and Technology named after academician M.F. Reshetnev (660037, Krasnoyarsk, 31, Krasnoyarsky rabochy ave., e-mail: vadimond@mail.ru).

Murygin Aleksandr Vladimirovich (Krasnoyarsk, Russian Federation) is a Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Information-Control Systems Department Siberian State University of Science and Technology named after academician M.F. Reshetnev (660037, Krasnoyarsk, 31, Krasnoyarsky rabochy ave., e-mail: avm514@mail.ru).

Rogova Daria Vasilyevna (Krasnoyarsk, Russian Federation) is a Student Siberian State University of Science and Technology named after academician M.F. Reshetnev (660037, Krasnoyarsk, 31, Krasnoyarsky rabochy ave., e-mail: dasha_28_05@mail.ru).

Получено 07.10.2020