

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОГРАДИЕНТНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ ПРОЦЕССОМ СВАРКИ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ УГЛЕРОДИСТЫХ И ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

Миронова Л.И.¹, Нигай Р.М.²

¹*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет);*

²*Российский университет транспорта (МИИТ), Москва*

Ключевые слова: температурное поле, сварка, сварное соединение, уравнение теплопроводности, интерполяционный сплайн, полином.

Аннотация. Предложен метод моделирования высокоградиентных температурных полей в процессах сварки оболочечных конструкций из углеродистых и высоколегированных конструкционных сталей на основе графоаналитического метода изучения поведения функции, определяемой дифференциальным уравнением теплопроводности. Метод заключается в аппроксимации семейства интерполяционных кубических сплайнов, построенных по результатам экспериментальных данных, полученных в процессе сварки оболочечных элементов, один из которых условно рассматривался как пологая оболочка. Отмечены особенности конструктивной формы свариваемых элементов и технологического процесса сварки, которые существенно влияют на распределение температурных полей в соединении. Приведены результаты измерения температуры в реперных точках сварного контура и графическое распределение температурного градиента по высоте соединения. Получены аналитические зависимости распределения температурных полей, обусловленных особенностями конструкции сварного соединения и сварочного процесса.

MODELING OF HIGH-GRADIENT TEMPERATURE FIELDS CAUSED BY THE WELDING PROCESS OF STRUCTURES MADE OF CARBON AND HIGH-ALLOY STRUCTURAL STEELS

Mironova L.I.¹, Nigay R.M.²

¹*Moscow Aviation Institute (National Research University);*

²*Russian University of Transport (MIIT), Moscow*

Keywords: temperature field, welding, welded joint, heat equation, interpolation spline, polynomial.

Abstract. A method is proposed for modeling high-gradient temperature fields in the welding processes of shell structures made of carbon and high-alloy structural steels based on a graphoanalytic method for studying the behavior of a function determined by the differential equation of thermal conductivity. The method consists in approximating a family of interpolation cubic splines constructed from the results of experimental data obtained during welding of shell elements, one of which was conventionally considered as a flat shell. The features of the structural form of the welded elements and the welding process, which significantly affect the distribution of temperature fields in the joint, are noted. The results of temperature measurement at the reference points of the welded contour and the graphical distribution of the temperature gradient along the joint height are presented. Analytical dependences of the distribution of temperature fields due to the design features of the welded joint and the welding process are obtained.

Введение

В транспортном машиностроении, в нефтегазовой и других отраслях промышленности широкое распространение находят сварные оболочечные конструкции разнообразного конструктивного исполнения. К ним относятся резервуары, днища, патрубки, крышки, пространственные трубные конструкции и пр. Вопросы прочности, устойчивости сварных соединений являются первоочередными в обеспечении эксплуатационной безопасности и во многом определяются термонапряженным состоянием конструкций в целом, обусловленных тепловыми процессами в зоне технологического влияния.

Теоретическому исследованию и математическому моделированию тепловых процессов, адаптированных к условиям сварки пространственных конструкций посвящено

немало работ [1-3]. Здесь первоочередной задачей является постановка температурной задачи и получение решения, позволяющее определять температурные поля и напряжения в зонах технологического влияния. Подтверждение полученных решений экспериментальными методами достаточно затруднено, поскольку процесс сварки протекает при высоких температурах. Это требует применение специальных измерительных устройств, позволяющих проводить измерения температуры в выбранных точках, достаточных по количеству для обработки измеренных результатов и получения достоверных данных.

Следует отметить, что тепловые процессы сварки во многом определяются: способом сварки; нагревом электрода током; скоростью и направлением движения источника тепла; защитной средой сварочной ванны. При выбранном способе электродуговой сварки режимы технологического процесса сварки не всегда являются основными в изготовлении высококачественных сварных соединений. Здесь немаловажную роль играют конструктивные особенности соединяемых элементов, заключающиеся в геометрической неоднородности, форме и протяженности свариваемых деталей. Неравномерное движение точечного источника тепла по контуру соединения приводит к неравномерному термонапряженному состоянию околошовной зоны и ее деформации [4]. Для определения температурных напряжений и деформаций необходимо решить температурную задачу, получение аналитического решения которой во многих случаях затруднено или вовсе отсутствует.

В данной статье предложен метод моделирования высокоградиентных температурных полей, обусловленных сваркой элементов конструкций, по результатам полученных экспериментальных данных. Частичное изложение эксперимента, результаты которого легли в основу предложенного метода моделирования, приведено в работе [5].

Методика проведения эксперимента

Проведено исследование тепловых и деформационных процессов при сварке соединения «оболочка – пластина». Такое соединение было условно рассмотрено, как соединение цилиндра с полой оболочкой. Материал пластины – низкоуглеродистая сталь 20, материал оболочки (трубы) – высоколегированная сталь аустенитного класса 08X18N10. Технологические свойства указанных сталей по свариваемости – хорошие. Тип соединения – угловое, неповоротное, способ сварки – ручная дуговая сварка покрытыми электродами.

Выделим некоторые особенности технологического процесса сварки. Осуществляется многопроходная сварка с разгонкой сварного шва. Формирование сварного шва таким способом позволяет полностью перекрывать зазоры и обеспечивать целостность конструкции. Швы выполняются ручным способом с разбивкой контура стыка на несколько участков.

Целью проведенных экспериментов являлось изучение влияния неоднородности геометрических параметров элементов сварного соединения на термонапряженное состояние конструкции, обусловленное неоднородным высокоградиентным локальным температурным воздействием в зоне технологического влияния.

На рисунке 1 приведены сварное соединение «труба-основание» и схема наложения валика в процессе сварки.

В реперных точках контура сварного шва по направлению

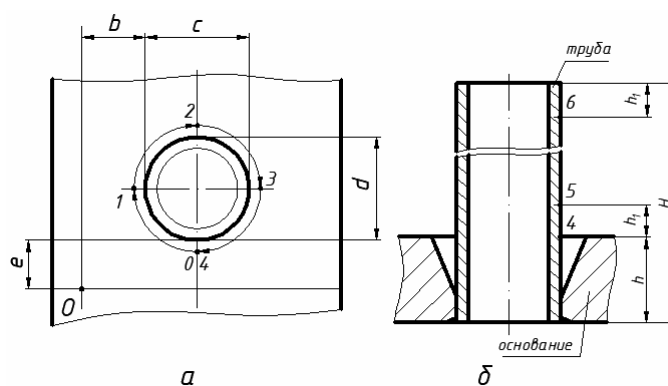


Рис. 1. Образец и схема наложения сварного шва: а – схема наложения валика; б – схема измерения температуры; 1, 2, 3, 4, 5, 6 – точки измерения температуры; 0-1, 1-2, 2-3, 3-4 – стыковые участки наложения валика по направлению движения дуги; b, c, d, e – контролируемые размеры образца после каждого прохода сварки; h, h_1, H – характерные размеры свариваемых элементов

движения дуги (0-1; 1-2; 2-3; 3-4, рис. 1) и по высоте конструкции (в точках 4, 5, 6, рис. 1) после каждого сварочного прохода измерялась температура контактным термометром ТК-5 через определенные интервалы времени в соответствии с разработанной методикой. Сварное соединение охлаждалось в естественных условиях на воздухе при температуре 20°C. Результаты измерения температуры приведены в таблице 1.

Табл. 1. Данные измерения температуры в реперных точках сварной конструкции

Номер точки измерения температуры	$T_1, ^\circ\text{C}$	$T_2, ^\circ\text{C}$	$\Delta T, ^\circ\text{C}$	$ \Delta T / \Delta \tau, ^\circ\text{C}/\text{c}$
3	270	210	-60	0.2
4	303	250	-53	0.176
5	332	235	-97	3.23
6	97	102	-5	0.016

На рисунке 2 приведен график скорости изменения температуры по высоте трубы при заданных режимах сварки. На оси абсцисс отложена высота цилиндра в миллиметрах и обозначены точки измерения температуры. По оси ординат отложена скорость изменения температуры, которая определялась по формуле

$$\frac{\Delta T}{\Delta \tau} = \frac{|T_2 - T_1|}{\tau_2 - \tau_1}. \quad (1)$$

Здесь T_1 и T_2 – температура при первом и втором измерении, τ_2 и τ_1 промежуточные значения времени измерения температуры составляли $\tau_1 = 120$ с, $\tau_2 = 420$ с. Интервал времени, в течение которого определялась скорость охлаждения сварного соединения, составил $\Delta \tau = 300$ с.

Из графика (рис. 2) судить о распределении температурного поля по высоте трубы крайне сложно, поскольку зависимость изменения температуры построена примитивно, т.е. в линейной постановке. Исследования были проведены, результаты получены и проанализированы.

Теоретическое описание теплового процесса сварки с учетом конструктивных особенностей свариваемых элементов соединения и материалов возможно провести на основе имитационного моделирования. Предлагается следующий подход.

Постановка задачи

Предлагаемый метод моделирования построен на изучении поведения функции, определяемой дифференциальным уравнением и заданной некоторыми точками по известным результатам, полученных в ходе измерения параметров.

Согласно рассуждениям Пуанкаре [6], полное исследование любой функции состоит из качественной и количественной частей данного процесса, к которым относятся:

- геометрическое изучение кривой, определяемой этой функцией;
- определение численных значений исследуемой функции.

Задачу адаптируем к изучению температурных полей, обусловленных процессом сварки элементов конструкции, на основе полученных измерений температуры с учетом особенностей сварной конструкции и протекающих физических процессов.

К особенностям физического процесса сварки отнесем:

- высококонцентрированный местный нагрев свариваемых кромок металла до температуры плавления, обеспечиваемый движущимся источником тепла;

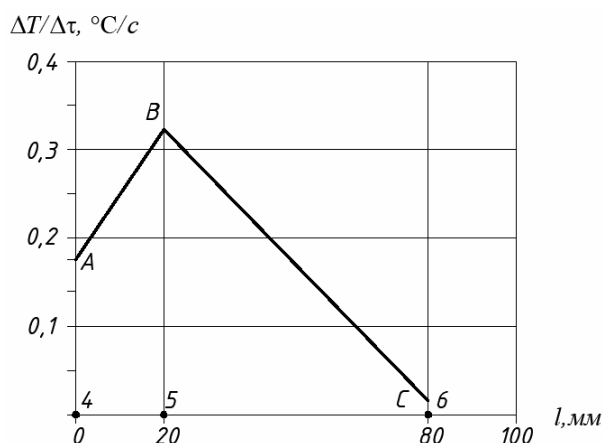


Рис. 2. Распределение температурного градиента по высоте сварного соединения в точках 4, 5, 6 (рис. 1)

- высокоинтенсивный отвод тепла в холодную массу металла вследствие его теплопроводности;
- предположение, что при ручной сварке подвижный источник тепла перемещается по металлу с большой скоростью [3].

К особенностям сварной конструкции отнесем соединение, образованное пересечением двух оболочечных конструкций с различной толщиной стенки.

Вполне понятно, что при сварке обеспечить равномерное измерение температуры в сварном контуре не представляется возможным. При этом процесс охлаждения шва и околошовной зоны можно рассчитать с приемлемой точностью в инженерной практике [3].

Исследование дифференциального уравнения проведем на основе аппроксимирующего решения, полученного графоаналитическим методом в виде построения кубического сплайна, проходящего через заданные точки упрощенной функции, представленной графически по результатам эксперимента.

Основной подход и описание метода

Введем следующие основные понятия, которыми мы будем оперировать в дальнейшем.

Упрощенную функцию, представленную графически по результатам эксперимента, назовем функцией-свидетелем.

Вспомогательную графическую функцию, интерполирующую функцию-свидетеля, назовем интерполирующей функцией.

Аналитическую функцию, полученную по результатам аппроксимации интерполирующей функции, назовем аппроксимирующей функцией.

Исследованиям процессов распространения тепла мгновенным точечным источником посвящены многие работы, например [2, 3]. В их основе лежит рассмотрение дифференциального уравнения теплопроводности. Например, для двумерного распространения тепла в теле оно имеет вид [7, 8]

$$\frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial y^2} - \frac{1}{a} \frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial \tau} = 0. \quad (2)$$

Здесь T – температура; x, y – координаты точек тела; a – коэффициент температуропроводности; τ – время.

Для простых задач полученные аналитические решения хорошо известны. Для более сложных задач разработаны численные методы и алгоритмы решения уравнения (2).

С учетом вышеприведенных особенностей рассматриваемого процесса будем искать приближенное решение уравнения (2) с помощью аппроксимации интерполирующего кубического сплайна с заданными краевыми условиями, следуя работе [9].

Теоретический аспект применяемого метода заключается в следующем. Пусть кубический сплайн $S(x)$ задан на сетке $\Delta: a = x_1 < \dots < x_n = b$. И

$$S(x_i) = y_i; \quad x_i = (b-a) i/n, \quad i = 0, 1, \dots, n. \quad (3)$$

Положим, что

$$S(x_{1/2}) = y_{1/2}; \quad S(x_{n-1/2}) = y_{n-1/2}, \quad (4)$$

где

$$x_{1/2} = (b-a)/2n; \quad x_{n-1/2} = (b-a)(2n-1)/2n. \quad (5)$$

Приближенное решение краевой задачи определяется соотношениями [9]

$$y'' + p(x)y' + q(y)S(y) = r(x); \quad y(a) = y(b) = 0. \quad (6)$$

Краевые и дополнительные условия имеют следующий вид

$$S(a) = y_0 = S(b) = y_n = 0; \quad S''(y) + pS'(y) + q(y)S(y) = r(y). \quad (7)$$

где $y = x_{1/2}, x_1, \dots, x_{n-1}, x_{n-1/2}$.

Таким образом, рассматривается система $n + 1$ уравнений с $n + 1$ неизвестными $y_{1/2}, y_1, y_2, \dots, y_{n-1}, y_{n-1/2}$.

Однако данный метод позволяет получать желаемый результат при равномерном распределении точек сетки. В случае если интервалы точек измерений достаточно значительные, к тому же, координаты этих точек не могут совпадать с узлами выбранной сетки, то возникают трудности с выбором краевых условий.

Для изучения дифференциального уравнения (2) рассмотрим обратную задачу путем вычерчивания интерполирующей функции по заданным точкам функции-свидетеля, построенной по результатам эксперимента. В качестве интерполирующей функции возьмем кубический сплайн, который принимаем в виде семейства сплайнов

$$S = \{S_0, S_1, \dots, S_i\}; i = 0, 1, \dots, n. \quad (8)$$

Некоторые трудности при вычерчивании семейства кривых по точкам исключим заменой координат точек функции-свидетеля.

Семейство кубических сплайнов отнесем к классу естественных кубических сплайнов. Таким образом, каждый кубический сплайн из этого семейства будет являться полиномом третьей степени. В нашем случае данный полином и есть аппроксимирующая функция. Аналитическая формула полинома семейства сплайнов имеет вид

$$y_i = a_i x^3 + b_i x^2 + c_i x + d_i. \quad (9)$$

Первая и вторая производные определяются уравнениями

$$y'_i = 3a_i x^2 + 2b_i x + c_i; y''_i = 6a_i x + 2b_i. \quad (10)$$

Здесь a_i, b_i, c_i, d_i – коэффициенты многочлена.

Для определения коэффициентов искомого полинома необходимо задать как минимум четыре условия.

Интерполирующий сплайн является непрерывной функцией и на отрезке $[x_0, x_n]$ имеет непрерывную первую и вторую производные и удовлетворяет условию

$$S(x_i) = y_i = f(x_i); i = 0, 1, \dots, n. \quad (11)$$

Остальные три условия определим графическим методом по кривой интерполирующего кубического сплайна, используя программные средства CAD системы.

Расчеты будем проводить в координатной плоскости XOY, используя координаты точек в принятом масштабе (рис. 3,а). Характерными точками функции-свидетеля являются точки A (0; 35,2), B (20;64,6), C (80; 3,2).

Точка B (рис. 2) разделяет график функции-свидетеля на две прямые, одна из которых характеризует ее возрастание (AB), вторая – убывание (BC). Интерполирующая сплайн-функция претерпевает в окрестности точки B свой экстремум, координаты которого определяются стандартным образом.

Окончательно запишем все условия семейства кубических сплайнов

$$S_i(x_i) = y_i = a_i x_i^3 + b_i x_i^2 + c_i x_i + d_i; \quad (12)$$

$$S'_i(x_i) = y'_i = 3a_i x_i^2 + 2b_i x_i + c_i = k_{1i}; k_{1i} = \operatorname{tg} \alpha_i; \quad (13)$$

$$S''_i(x_i) = y''_i = 6a_i x_i + 2b_i = k_{2i}. \quad (14)$$

Здесь α_i – угол наклона касательной к кривой в рассматриваемой точке x_i (задан графически).

Дополнительные условия найдем из краевых условий, когда в точках x_i справедливо соотношение

$$S_i(y_i) = S_{i-1}(y_{i-1}). \quad (15)$$

Тогда коэффициенты полинома a_i и b_i принимаем в виде

$$a_i = a_{i-1}; b_i = b_{i-1}. \quad (16)$$

Коэффициенты c_i и d_i будут определяться из условий (12) и (13).

Покажем реализацию данного подхода на примере вычисления коэффициентов искомого полинома, аппроксимированных сплайн-функциями $S_1(y_{M1})$ и $S_2(y_{M2})$ (рис. 3,б). Данные расчетов сведены в таблице 2.

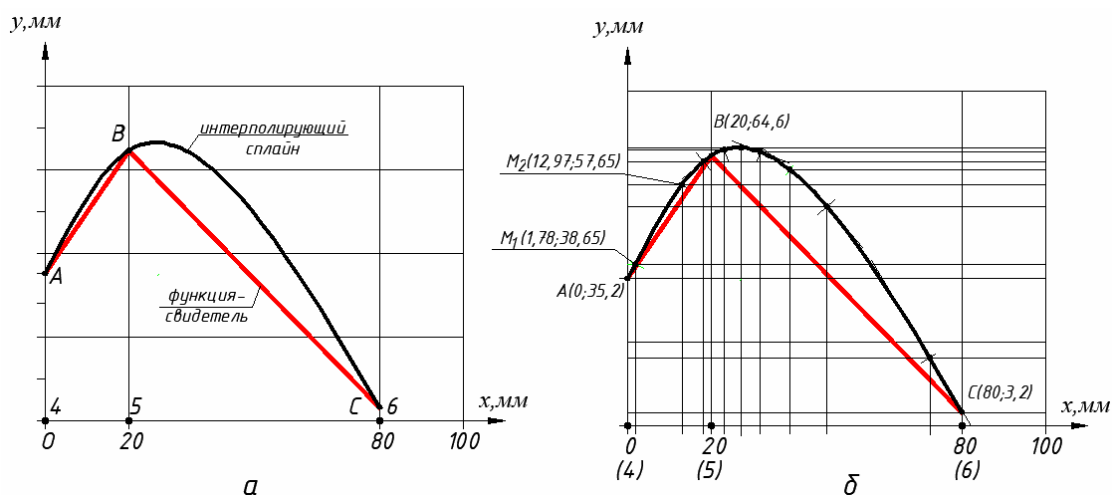


Рис. 3. а – графическое представление интерполирующей функции и функции-свидетеля; б – к расчету коэффициентов аппроксимирующей функции

Из условия (14) каждый следующий интерполирующий сплайн определяется соотношениями

$$\begin{aligned}
 S_0 &= f(y_0); y_0 = f(x_0); \\
 S_1 &= f(\Delta y_1); \Delta y_1 = y_1 - y_0; \Delta y_1 = f(x_1 - x_0); \\
 S_i &= f(\Delta y_i); \Delta y_i = y_i - y_{i-1}; \Delta y_i = f(x_i - x_{i-1}).
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

Для упрощения расчетов принимаем коэффициенты $a_0 = b_0 = 1$.

Табл. 2. Расчетные данные

S_i	Δy_i	Δx_i	k_{1i}	a	b	c	d
S0	35,2	0	1,47	1	1	1,47	35,2
S1	3,45	1,78	1,928	1	1	-11,1372	6,507
S2	19,0	11,14	1,331	1	1	-393,25	2823,24

Аппроксимирующие функции имеют следующий вид

$$\begin{aligned}
 S_0 &= \Delta y_0 = x^3 + x^2 + 1,47x + 35,2 = 35,2; \\
 S_1 &= \Delta y_1 = x^3 + x^2 - 11,14x + 6,507 = 3,45; \\
 S_2 &= \Delta y_2 = x^3 + x^2 - 393,25x + 2823,24 = 19,0.
 \end{aligned}$$

Обсуждение результатов

Полученное семейство полиномов аппроксимировано на семействе интерполяционных сплайнов с заданными условиями (12)-(16) в заданном масштабе и принятыми коэффициентами (17).

Сходимость результатов обеспечивается геометрическим смыслом первой производной, а именно, конкретным значением тангенса угла наклона касательной к кривой в рассматриваемой точке (12). Этим обеспечивается форма кривой аппроксимирующей функции (выпуклость сверху, выпуклость снизу).

В случае принятия других значений коэффициентов (16) мы получим другое семейство полиномов.

Отсюда возникает вопрос о единственности решения рассматриваемой задачи. Однако данное обстоятельство можно обойти формализацией особенностей рассматриваемых процессов.

Изменение масштаба не влияет на конечные результаты, поскольку окончательные результаты являются параметрами процесса, и есть суть замены выбранной системы координат в исходную.

Выводы

Предложенный подход и метод обработки экспериментальных данных позволяет получить аналитическую формулу семейства аппроксимирующих функций, а также с достаточной точностью в инженерной практике смоделировать процесс формирования температурных полей, обусловленных сваркой металлов.

Решение температурной задачи предложенным методом позволяет специалистам исследовать термонапряженное состояние сварной конструкции и определять уровни остаточных напряжений в зонах технологического влияния, оптимизировать сварную конструкцию по геометрическим параметрам и применяемым материалам еще на стадии проектирования изделий.

Полученные формулы позволяют с использованием ЭВМ рассчитывать достаточно широкий круг динамических задач, адаптированных к технологическим процессам изготовления сложных конструкций [10].

Список литературы

1. Mironova L.I., Fedik I.I. The Local Thermal Loading of Two Intersecting Cylindrical Rotational Shells with a Variable Wall Thickness // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2015, vol. 44, no. 8, pp. 720-725.
2. Мельников Н.П. Конструктивные формы и методы расчета ядерных реакторов. – М.: Атомиздат, 1972. – 550 с.
3. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. – М.: ГЛТИМН, 1951. – 297 с.
4. Винокуров В.А. Сварочные деформации и напряжения. – М.: Машиностроение, 1968. – 236 с.
5. Nigay R., Nigay E., Mironova L. Investigation of thermal and deformation processes in the welding of shell structures made of carbon and high-alloy structural steels // Journal of Physics: Conference Series. 2020, vol. 1431, p. 012039. DOI: 10.1088/1742-6596/1431/1/012039.
6. Пуанкаре А. О кривых определяемых дифференциальными уравнениями. – М.-Л.: ОГИЗ, 1947. – 392 с.
7. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел / Перев. с англ. – М.: Наука, 1964. – 488 с.
8. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.
9. Албук Дж., Нильсон Э., Уолш Дж. Теория сплайнов и ее приложения. – М.: Мир, 1972. – 316 с.
10. Миронова Л.И., Нигай Р.М., Яковлева Е.В. Программная реализация метода исследования температурных напряжений в стыковом контуре сварного соединения из углеродистых и высоколегированных конструкционных сталей // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред. Материалы XXVIII международного симпозиума имени А.Г. Горшкова. – Москва, 2022. – С. 137-139.

References

1. Mironova L.I., Fedik I.I. The Local Thermal Loading of Two Intersecting Cylindrical Rotational Shells with a Variable Wall Thickness // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2015, vol. 44, no. 8, pp. 720-725.
2. Mel'nikov N.P. Design forms and methods of calculation of nuclear reactors. – М.: Atomizdat Publ., 1972. – 550 p.
3. Rykalin N.N. Calculations of thermal processes in welding. – М.: LTIMN, 1951. – 297 p.
4. Vinokurov V.A. Welding strains and stresses. – М.: Mechanical Engineering, 1968. – 236 p.
5. Nigay R., Nigay E., Mironova L. Investigation of thermal and deformation processes in the welding of shell structures made of carbon and high-alloy structural steels // Journal of Physics: Conference Series. 2020, vol. 1431, p. 012039. DOI: 10.1088/1742-6596/1431/1/012039.
6. Poincare A. On curves defined by differential equations Russian translation. – М.-L.: GITL, 1947. – 392 p.
7. Carslaw H.S., Jaeger J.C. Conduction of Heat in Solids. – М.: Science, 1964. – 488 p.
8. Lykov A.V. Theory of heat conductivity. – М.: Higher school, 1967. – 559 p.
9. Ahlberg J.H., Nilson E.N., Walsh J.L. The theory of splines and their applications. – М.: World, 1972. – 316 p.
10. Mironova L.I., Nigay R.M., Yakovleva E.V. Software implementation of the method for studying temperature stresses in the butt contour of a welded joint made of carbon and high-alloy structural steels // Dynamic and technological problems of mechanics of structures and continuous media. The XXVIII International Symposium named after A.G. Gorshkov Materials. – Moscow, 2022. – P. 137-139.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Миронова Любовь Ивановна – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Проектирование сложных технических систем»	Mironova Lyubov' Ivanovna – doctor of technical sciences, associate professor, professor of the Department "Design of complex technical systems"
Нигай Руслан Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрификация и электроснабжение»	Nigai Ruslan Mikhailovich – candidate of technical sciences, associate professor of the Department "Electrification and power supply"
mironova_lub@mail.ru	

Получена 03.07.2023