



УДК 532.5:621.9.044

Князева И.А. – аспирант

E-mail: iraida_knyazeva@mail.ru

Вятский государственный университет

Адрес организации: 610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36

Золотоносов Я.Д. – доктор технических наук, профессор

E-mail: zolotonosov@mail.ru

Багаутдинова А.Г. – кандидат технических наук, доцент

E-mail: bagoutdinova@rambler.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

Выбор математической модели для описания теплового процесса лазерной сварки пружинно-витых каналов

Аннотация

Данная статья посвящена выбору математической модели описания теплового процесса лазерной сварки для производства пружинно-витых каналов теплообменных аппаратов, которые являются базовым элементом высокоеффективных кожухотрубчатых теплообменных аппаратов нового поколения. Предлагаемая математическая модель основывается на решении уравнения теплопроводности Фурье. Приведены выражения и обоснование их выбора для построения термических циклов сварки тонких пластин линейным быстродвижущимся источником тепла.

Ключевые слова: лазерная сварка, термический цикл, математическая модель, быстродвижущийся линейный источник.

Прямой пружинно-витой канал представляет собой пружину круглого сечения, витки которой жестко соединены между собой. Одним из возможных вариантов процесса получения таких каналов является технология плотной намотки проволоки на оправку с последующим объединением витков наматываемой проволоки между собой при помощи лазерной сварки.

Лазерная сварка обладает рядом неоспоримых преимуществ:

- высокая производительность сварочного процесса;
- малые зоны термического влияния;
- снижение времени теплового воздействия на деталь и, как следствие, уменьшение внутренних напряжений;
- возможность управления параметрами лазерного излучения в широком диапазоне значений.

Однако, несмотря на преимущества, лазерная сварка требует повышения стабильности, управляемости процесса. Сложность физических процессов, протекающих в расплаве сварочной ванны, образованной воздействием лазерного излучения, затрудняет опытное изучение данного процесса.

Стабильность процесса лазерной сварки, качество сварного шва напрямую зависят от правильности выбора режимов лазерной обработки. Подбор режимов обработки материалов лазерным излучением, в частности лазерной сварки, является трудоёмким процессом, так как требует проведения большого количества экспериментов.

Параметры режима обработки могут быть достаточно точно и сравнительно недорого получены путем математического моделирования технологического процесса. Моделирование физических процессов лазерной сварки позволяет ускорить решение задачи получения оптимальных режимов обработки за счет использования вычислительной техники. Также математическое моделирование сокращает затраты на выполнение опытных работ.

При воздействии сварочного источника в металле возбуждаются процессы тепло- и массопереноса, которые определяют изменение структуры металла, фазовые переходы и динамику напряженно-деформационного состояния [1].

Основными параметрами теплового процесса при сварке являются температура $T(x, y, z, t)$ и плотность мощности концентрированного источника энергии $q(x, y, z, t)$

(электрической дуги, потока электронов, излучения лазера, низкотемпературной плазмы, газового пламени и т.д.). Параметры T и q распределены в пространстве, заданном декартовыми координатами x, y, z , и во времени t , поэтому процесс теплопереноса является системой с распределенными параметрами.

В теории сварочных процессов разработаны методы расчета, основанные на решении прямой задачи теплопроводности. Вычислительный эксперимент над решением прямой задачи позволяет построить распределение температуры в пространстве и во времени при заданном источнике нагрева. Модель источника строится в соответствии с выбранной схемой, а выбор режима сварки ограничивается набором расчетных схем источника.

Математической моделью теплового процесса является уравнение теплопроводности с соответствующими начальными и граничными условиями. Начальные условия задаются в виде распределения температуры в заданный момент времени, чаще при $t=0$. В качестве граничных условий задаются либо температура на границах рассматриваемой области тела (граничные условия первого рода), либо тепловой поток (граничные условия второго рода).

В качестве системы координат наиболее часто используются линейная (декартова), цилиндрическая или сферическая системы координат. Выбор системы координат определяется формой тела, его размерами и характером действия концентрированного источника энергии. Для тел вращения используют цилиндрическую систему координат, для прочих тел – линейную.

Размерность математической модели определяется количеством пространственных переменных, вдоль которых рассматривается процесс теплопереноса и время. Выбор размерности модели определяется требуемой точностью, временем расчета, располагаемыми вычислительными ресурсами и математическим описанием тела.

В данном случае необходимо рассматривать тепловой процесс при стыковой сварке тонкостенных цилиндров быстродвижущимся источником, с мощностью, равномерно распределенной по толщине свариваемых деталей. Начало системы координат находится на пересечении оси луча лазера с верхней точкой стыка двух тонкостенных цилиндров. Луч лазер движется со скоростью сварки по направлению оси x .

В математической модели процессы теплопереноса при сварке описываются квазистационарным уравнением теплопроводности, а теплообмен с окружающей средой и металлом – различными нелинейными граничными условиями.

С целью упрощения решения поставленной задачи в математическом моделировании сварочных процессов применяют схемы нагрева тела: бесконечное или полубесконечное тело, бесконечная или полубесконечная пластина, плоский слой, бесконечный или полубесконечный стержень.

Источники тепла, встречающиеся в практических случаях сварки, также разнообразны. Их классифицируют по следующим признакам [1]:

- по признаку распределенности: сосредоточенные (точечный, плоский, объемный) и распределенные (по определенному закону ввода тепла в изделие) источники тепла;
- по времени действия: мгновенно и непрерывно действующие;
- по расположению относительно рассматриваемой точки во времени: неподвижные, подвижные, быстродвижущиеся источники тепла.

Для тела цилиндрической формы это уравнение теплопроводности необходимо преобразовать в пространстве цилиндрических координат r, θ, z .

При сварке кольцевого соединения цилиндрических деталей подвижным сварочным источником, перемещающимся вдоль стыка кольцевого соединения со скоростью V (рис. 1), математической моделью теплового процесса является неоднородное дифференциальное уравнение в частных производных [2]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} \right) - \frac{V}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} + \frac{q}{C_v}, \quad (1)$$

где $T(r, \theta, z, t)$ – температурное поле в цилиндрических координатах, α – коэффициент температуропроводности.

Система цилиндрических координат r, θ, z , неподвижная. Она связана с источником, который перемещается со скоростью V вдоль стыка кольцевого соединения двух витков пружинно-витого канала.

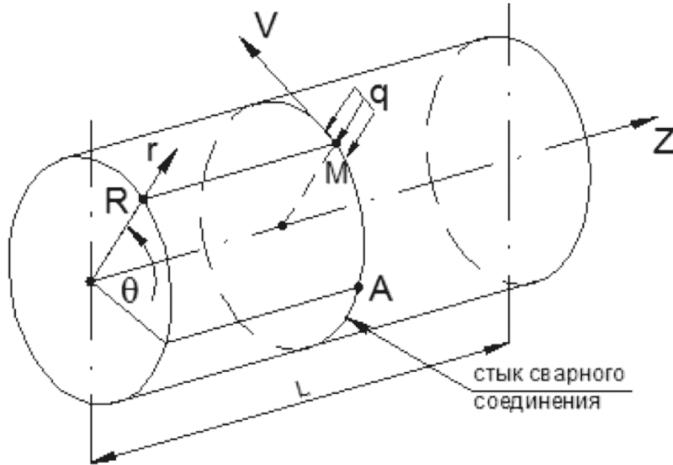


Рис. 1. Схема кольцевого соединения витков пружинно-витого канала:
 R, θ, z – система цилиндрических координат; $q (r, t)$ – плотность мощности объемного источника

Для моделирования теплового процесса используем неоднородное уравнение теплопроводности с граничными условиями второго рода.

Так как сварка ведется лазерным излучением, то в качестве источника тепла для математического моделирования процесса необходимо выбрать быстродвижущийся источник тепла. Мощный быстродвижущийся источник является частным случаем непрерывно действующих источников. При перемещении источника с большой скоростью рассматривают случай предельного состояния, когда $V \rightarrow \infty$. В этом случае предполагают, что энергия источника выделяется вдоль линии его перемещения, а тепло распространяется в направлении, перпендикулярном оси перемещения источника.

Необходимым условием лазерной сварки является то, что на удельный тепловой поток q , пространство и время воздействия источника наложены ограничения, характерные для реальных высококонцентрированных источников энергии [2]:

$$\begin{aligned} 0 &\leq q(x, y, t) \leq q_{max} \\ x, y &\in (0, d_n) \\ T &\in (0, t), \end{aligned}$$

где d_n – диаметр пятна нагрева теплового источника;
 T – время воздействия теплового источника.

Применение схемы быстродвижущегося источника определяется условием:

$$\frac{\partial T}{\partial \theta} = \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} = \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} \equiv 0. \quad (2)$$

При математическом моделировании процесса распространения теплоты при лазерной сварке витков пружинно-витого канала, несмотря на кривизну витков, он может быть приравнен к случаю нагрева тонких пластин линейным источником теплоты, так как любую окружность можно разделить на множество прямолинейных участков. Данное обстоятельство существенно упрощает уравнение теплопроводности. Но при этом необходимо учитывать, что при сварке спиральных шовов происходит наложение тепловых потоков, так как на замыкающем участке кольцевого сварного шва уже

произошел нагрев проволоки от сварки предыдущего витка. Тогда схема лазерной сварки пружинно-витого канала будет иметь следующий вид:

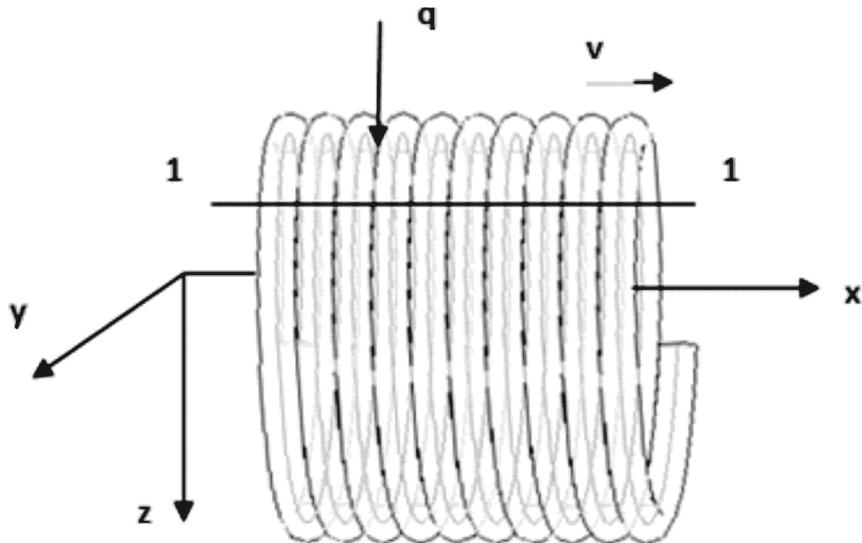


Рис. 2. Схема лазерной сварки витков пружинно-витого канала

Известно уравнение, описывающее изменение температуры в пластине при воздействии линейного источника теплоты мощностью q с равномерным распределением ее по толщине пластины, движущегося с постоянной скоростью [3]:

$$\Delta T = \frac{q}{v\delta\sqrt{4\pi\lambda c\rho t}} e^{-\frac{y^2}{4at}-bt}, \quad (3)$$

где ΔT – приращение температуры, К;
 q – эффективная мощность источника тепла, Вт;
 v – скорость перемещения источника тепла, м/ч;
 δ – толщина пластины, м;
 λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м*К);
 $c\rho$ – объемная теплоемкость, Дж/(м³К);
 t – время, с;
 a – коэффициент температуропроводности, м²/с;
 b – коэффициент температуротдачи, с⁻¹.

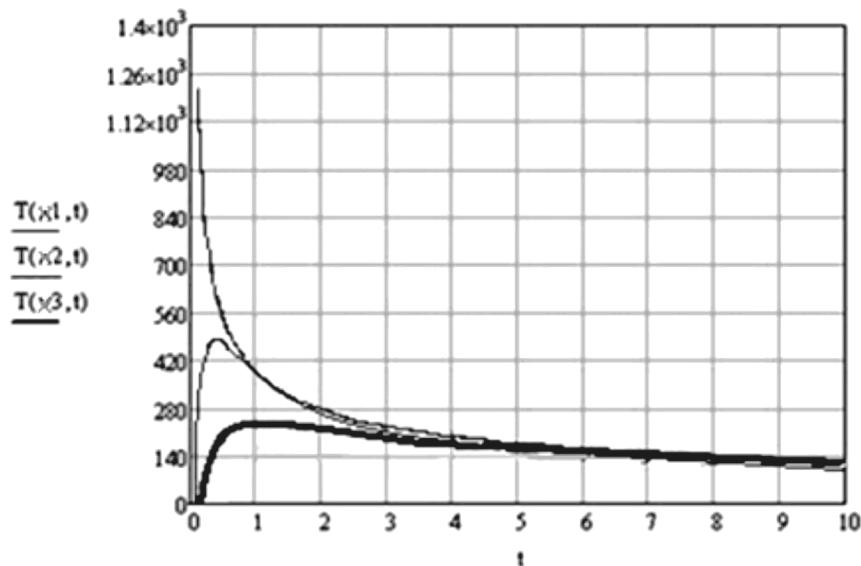
Наложение тепловых потоков при моделировании лазерной сварки по винтовой линии учитывается путем суммирования температурных полей. С учетом данного факта формула (3) приобретает следующий вид:

$$\Delta T = \sum_n \frac{q}{v\delta\sqrt{4\pi\lambda c\rho t_n}} e^{-\frac{x_n^2}{4at_n}-bt_n}, \quad (4)$$

n – число пересечений источником теплоты плоскости 1-1;

t_n – время, прошедшее с момента пересечения источником теплоты плоскости 1-1.

Исходя из принятой математической модели, на основе параметров, полученных при проведении опытных работ, в системе MathCAD были построены термические циклы в точках $x=0,1$, $x=0,5$, $x=2,0$, представленные на рис. 2.

Рис. 4. Термические циклы в точках $x=0,1$, $x=0,5$, $x=2,0$

Как видно из графика, на расстоянии 0,1 мм от оси шва максимальная температура составляет 1250°C . На основании термических циклов можно судить о физических процессах, происходящих в сварочной ванне и структуре металла сварного шва.

Заключение

Описана математическая модель, применяемая для математического моделирования процесса лазерной сварки пружинно-витых каналов. Приведены зависимости и графики термических циклов, построенные на основе данных проведенных опытных работ. Установлено, что для построения более точной математической модели необходимо учитывать форму свариваемых деталей, что в значительной степени усложнит процесс построения модели, но позволит более качественно подобрать режимы лазерной сварки. Данный факт будет учтен в последующих работах по математическому моделированию процесса лазерной сварки, решению прямой и обратной задачи теплопроводности для определения режимов изготовления змеевиковых теплообменных элементов.

Список литературы

- Петров Г.Л., Тумарев А.С. Теория сварочных процессов (с основами физической химии). – М.: Высшая школа, 1977. – 392 с.
- Коновалов А.В., Куркин А.С., Неровный Э.Л., Якушин Б.Ф. Теория сварочных процессов: Учебник для вузов / Под ред. В.М. Неровного. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 752 с.
- Негода Е.Н. Тепловые процессы при сварке: учеб. пособие; Дальневосточный государственный технический университет. – Владивосток: Изд- во ДВГТУ, 2008. – 125 с.
- Язовских В.М., Беленъкий В.Я., Трушников Д.Н. Построение математических моделей сварки цилиндрических тел // Вестник ПГТУ. Сварка. – Пермь, 2012. – С. 5-17.
- Язовских В.М. Математическое моделирование и инженерные методы расчета в сварке: Ч. 2. Тепловые процессы при сварке и моделирование в пакете Mathcad. – Пермь: Изд-во ПГТУ, 2008. – 119 с.

Knyazeva I.A. – post-graduate student

E-mail: iraida_knyazeva@mail.ru

Vyatka State University

The organization address: 610000, Russia, Kirov, Moskovskaya st., 36

Zolotonosov Ya.D. – doctor of technical sciences, professor

E-mail: zolotonosov@mail.ru

Bagoutdinova A.G. – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: bagoutdinova@rambler.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Selection of mathematical model to describe the thermal process of the laser welding of spring-twisted channels

Resume

Modeling of physical processes of laser welding speeds up the solution of optimum processing conditions with the help of computer technology. The same mathematical simulation reduces the cost of implementation of the experimental work.

Mathematical models of the thermal conductivity of the process with the appropriate boundary conditions. There are several methods for detecting the heat equation. They differ from each other in the accepted system of coordinates, and as a source.

This article deals with the choice of a mathematical model describing the heat of the laser welding for the production of spring-twisted-channel heat exchangers, which are the basic element of high-performance shell and tube heat exchangers of the new generation. Dependence of thermal cycles and graphs based on experimental studies conducted with data. Found that for the construction of more precise mathematical models must take into account the form of blanks, which greatly complicates the process of model building, but will allow higher quality modes to choose laser welding.

Keywords: laser welding, thermal cycle, mathematical model, a fast-moving line source.

References

1. Petrov G.L., Tumarev A.S. The theory of welding processes (with the fundamentals of physical chemistry). – M.: High. School, 1977. – 392 p.
2. Konovalov A.V., Kurkin A.S., Nerovny E.L., Jakushin B.F. The theory of welding processes: Textbook for Universities / ed. V.M. Nerovny. – M.: Publishing House of the MSTU. NE Bauman, 2007. – 752 p.
3. Nehoda E.N. Thermal processes in welding: studies. allowance; Far Eastern State Technical University. – Vladivostok: Publishing house FENTU, 2008. – 125 p.
4. Yazovskikh V.M., Belenky V.Y., Trushnikov D.N. Construction of mathematical models of welding cylindrical bodies // Herald PGTU. Welding. – Perm, 2012. – P. 5-17.
5. Yazovskikh V.M. Mathematical modeling and computational methods in engineering welding: in 2 Part 2. Thermal processes in welding and modeling package Mathcad. – Perm: Perm State Technical University Publishing House, 2008. – 119 p.