

УДК 532.5:621.9.044

Князева И.А. – аспирант

E-mail: iraida_knyazeva@mail.ru

Золотонос Я.Д. – доктор технических наук, профессор

E-mail: zolotonosov@mail.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420127, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

Оптимизация мощности лазерного излучения при сварке пружинно-витого канала

Аннотация

В данной статье рассмотрена задача оптимизации мощности линейного быстродвижущегося источника нагрева – лазерного излучения при сварке пружинно-витого канала. Для решения поставленной задачи рассмотрен процесс распространения тепла в свариваемых витках. В статье представлен расчет значения оптимальной мощности быстродвижущегося линейного источника, при которой истинное распределение температуры имеет минимальное отклонение от заданного значения.

Ключевые слова: пружинно-витой канал, лазерная сварка, термический цикл, математическая модель.

Пружинно-витые каналы представляют собой пружину, витки которой жестко соединены между собой посредством лазерной сварки [1, 2].

При разработке технологических процессов сварки режим воздействия сварочного источника (режим сварки) определяется эмпирически из справочных данных или методами моделирования. Определение режима сварки с использованием методов математического и численного моделирования позволяет повысить его точность, достоверность и сократить дорогостоящий натурный эксперимент при отладке режима на сварочных образцах.

Для оценки характера распределения температурных полей при лазерной сварке можно использовать математическую модель, в которой тепловое воздействие луча лазера рассматривается как воздействие быстродвижущегося линейного источника нагрева.

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

Геометрическая форма свариваемых изделий в реальных условиях является сложной. Учет действительной формы может значительно усложнить решение температурных задач сварочных процессов. Поэтому реальную форму свариваемых элементов в тепловых расчетах упрощают [3]. В данном случае пружинно-витой канал будет рассматриваться как тонкостенная цилиндрическая оболочка, образованная узкими пластинами [4].

За основу расчетов принята модель, предложенная в работе [5].

Согласно данной модели, нагрев при однопроходной сварке кольцевых швов тонкостенных цилиндрических оболочек, может быть приравнен к случаю нагрева пластины линейным источником теплоты. Это объясняется тем, что цилиндр представляет собой развертывающуюся поверхность.

При малых диаметрах распространение тепловых потоков в меридиональном направлении стеснено. Поэтому распространение тепла от мгновенного линейного источника в цилиндре малого диаметра аналогично процессу распространения тепла от такого же источника в узкой пластине имеющей ширину, равную периметру цилиндра [5].

При наложении кольцевых или спиральных швов необходимо иметь в виду, что происходит наложение тепловых потоков от различных участков сварного шва. Так, на замыкающем участке кольцевого шва металл, на который накладывается валик, уже прогрет, учесть это можно введя фиктивный источник тепла, который начал действовать одновременно с действительным источником и движется с той же скоростью на расстоянии, равном периметру цилиндра по направлению сварки [6, 7].

Будем считать, что нагрев тонкостенного цилиндра происходит под воздействием лазерного излучения под углом $\alpha \approx 90^\circ$ к образующей цилиндра. Схема лазерной сварки приведена на рис. 1.

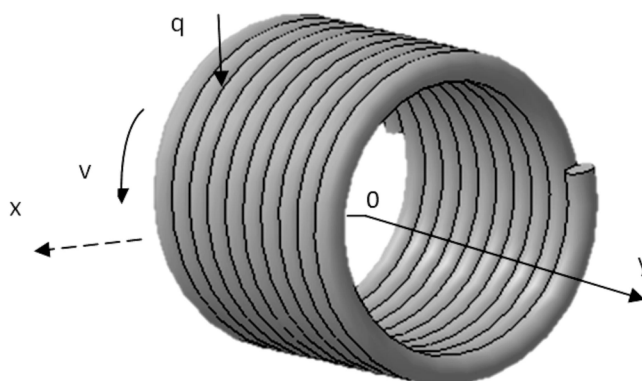


Рис. 1. Схема лазерной сварки витков пружинно-витого канала

Наложение тепловых потоков при моделировании лазерной сварки по винтовой линии учитывается путем суммирования температурных полей от действительного и фиктивного источника лазерного излучения. С учетом данного факта формула для расчета температурного цикла приобретает следующий вид:

$$T(y, t) = \frac{q}{v\delta\sqrt{4\pi\lambda c\rho t}} e^{-\frac{y^2}{4at} - bt} + \frac{q}{v\delta\sqrt{4\pi\lambda c\rho(t-t_1)}} e^{-\frac{(y+\pi a)^2}{4a(t-t_1)} - b(t-t_1)}, \quad (1)$$

где T – температура в точке y во время t , 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 воздействия действительного источника теплоты, сек;
 t_1 – время воздействия фиктивного источника теплоты, сек;
 a – коэффициент температуропроводности, м²/с;
 b – коэффициент теплоотдачи, с⁻¹.

Исходя из принятой математической модели, на основе параметров, полученных при проведении опытных работ, в системе MathCAD были построены термические циклы на расстояниях от оси шва $y=0,2$; $y=0,8$; $y=1,0$; $y=2,0$, представленные на рис. 2.

В теории сварочных процессов актуальной является задача определения мощности q сварочного источника, которую можно определить в зависимости от заданного распределения температуры.

Решение задачи определения режима как обратной задачи сводится к поиску функции источника q по заданному распределению температуры T' . Заданное распределение температуры T' строится с учетом размеров сварного шва (ширины шва, глубины проплавления), формы его поперечного сечения, ширины зоны термического влияния, распределения максимальных температур нагрева и т.д.

Оптимизацию режима лазерной сварки пружинно-витого канала следует выполнять на основе моделирования теплового процесса сварки [8].

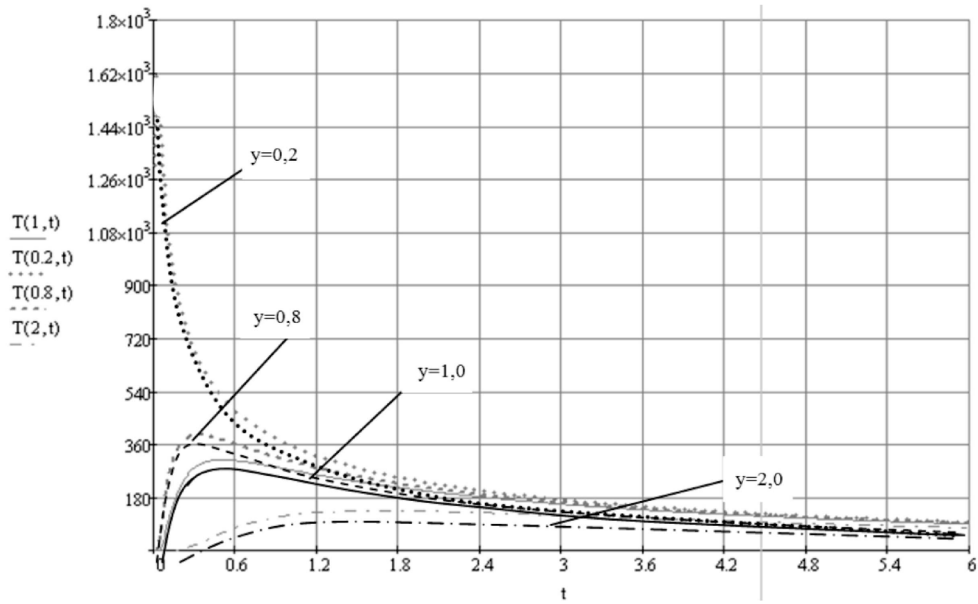


Рис. 2. Термические циклы на расстояниях от оси шва $y=0,2$; $y=0,8$; $y=1,0$; $y=2,0$

Функция заданной температуры с равномерным распределением ее максимального значения T_m на отрезке от y_1 до y_2 определяется следующим образом:

$$T'(y) = \begin{cases} T_m, & y \in (y_1, y_2) \\ 0, & y \in (-\infty, y_1) \cup (y_2, +\infty) \end{cases} \quad (2)$$

Очевидно, что не при каких значениях параметра сварки заданное значение температуры не будет совпадать с действительным. Задачей оптимизации режимов лазерной сварки является определение мощности быстро движущегося источника, при которой действительное распределение температуры имеет минимальное отклонение от заданного.

Исходя из вышеизложенного, необходимо построить функционал на невязках уравнения (2). Квадратичный функционал в этом случае имеет вид:

$$J[q_0] = \int_{-\infty}^{+\infty} (T'(y) - T(y,t))^2 dy. \quad (3)$$

После преобразований квадратичный функционал принимает вид:

$$J[q_0] = \int_{y_1}^{y_2} T_m^2 dy - 2T_m \int_{y_1}^{y_2} T(y,t) dy + \int_{-\infty}^{+\infty} T^2(y,t). \quad (4)$$

Или же:

$$J[q_0] = Aq_0^2 - Bq_0 + C, \quad (5)$$

где

$$A = \frac{1}{(V\delta)^2 4\pi\lambda c\gamma t'} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{y^2}{4\alpha t} - bt} dy + \frac{1}{(V\delta)^2 4\pi\lambda c\gamma (t-t')} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{(y+\pi d)^2}{4\alpha(t-t')} - b(t-t')} dy, \quad (6)$$

$$B = \frac{2T_m}{v\delta\sqrt{4\pi\lambda c\gamma t'}} \int_{y_1}^{y_2} e^{-\frac{y^2}{4\alpha t} - bt} dy + \frac{2T_m}{v\delta\sqrt{4\pi\lambda c\gamma (t-t')}} \int_{y_1}^{y_2} e^{-\frac{(y+\pi d)^2}{4\alpha(t-t')} - b(t-t')} dy, \quad (7)$$

$$C = T_m^2 (y_2 - y_1). \quad (8)$$

Оптимальное значение мощности лазерного излучения определяется при минимальном значении $J[q_0]$.

Необходимым условием минимума функции является [5]:

$$2Aq - B = 0. \quad (9)$$

Исходя из этого, выражение оптимальной мощности источника при нагреве имеет следующий вид:

$$q_{opt} = T_m \cdot V \cdot \delta \cdot \sqrt{4\pi\lambda c \gamma} \cdot \exp(-b \cdot t_2) \cdot \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \exp(-\alpha^2) d\alpha, \quad (10)$$

где $\alpha = \frac{y}{\sqrt{4\alpha t}}$; $\alpha_1 = \frac{y_1}{\sqrt{4\alpha t}}$; $\alpha_2 = \frac{y_2}{\sqrt{4\alpha t}}$; t_2 – время воздействия лазерного излучения, с.

Численное определение значения q_{opt} производится с использованием системы MathCAD. Полученное значение мощности лазерного излучения при нагреве тонкостенного цилиндра является оптимальным с точки зрения минимального отклонения истинного распределения температуры от заданного в момент времени t' .

Заключение

Показана математическая модель, применяемая для описания процесса лазерной сварки пружинно-витых каналов. Приведены графики термических циклов, построенные на основе данных проведенных опытных работ. Проведена оптимизация мощности лазерного излучения при сварке пружинно-витых каналов, получено уравнение для нахождения оптимальной мощности.

Список библиографических ссылок

1. Багоутдинова А.Г., Золотоносов Я.Д., Мустакимова С.А. Энергоэффективные теплообменные аппараты на базе теплообменных элементов в виде пружинно-витых каналов // Известия КГАСУ, 2012, № 3 (21). – С. 86-95.
2. Золотоносов А.Я., Золотоносов Я.Д., Князева И.А., Багоутдинова А.Г. Змеевиковый теплообменник: пат. 133596 на пол. мод. Рос. Федерация. № 2013113048/06; заявл. 22.03.2013; опубл. 20.10.2013.
3. Князева И.А., Золотоносов Я.Д., Багоутдинова А.Г. Выбор математической модели для описания теплового процесса лазерной сварки пружинно-витых каналов // Известия КГАСУ, 2013, № 3 (25). – С. 67-72.
4. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. – М.: Машгиз, 1951. – 296 с.
5. Фролов В.В. Теория сварочных процессов. – М.: «Высшая школа», 1988. – 210 с.
6. Негода, Е.Н. Тепловые процессы при сварке: учеб. пособие; Дальневосточный государственный технический университет. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2008. – 125 с.
7. Язовских В.М. Математическое моделирование и инженерные методы расчета в сварке: в 2 ч., Ч. 2. Тепловые процессы при сварке и моделирование в пакете Mathcad. – Пермь: Изд-во ПГТУ, 2008. – 119 с.
8. Мелюков В.В. Оптимизация режима обработки материалов концентрированными потоками энергии: Учебное пособие. – Киров: Изд-во ВятГУ, 2003. – 111 с.

Knyazeva I.A. – post-graduate student

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

E-mail: zolotonosov@mail.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

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

Optimization of the laser power for welding spring-twisted channel

Resume

Today there is an active implementation of technology in laser material processing industry in Russia, and mathematical modeling significantly reduces the costs and timing of the development work.

Mathematical model of the thermal process of laser welding spring-twisted channels can be used to approximate the temperature distribution in the weld and heat affected zone.

The paper presents a mathematical model of a thermal cycle used to describe the process of laser welding spring-twisted channels. The graphs of thermal cycles that are based on data obtained in the experimental work.

The optimization of the laser power for welding spring-twisted channels to obtain an equation for finding the optimum power.

The obtained value of the laser power upon heating a thin-walled cylinder is optimum with regard to minimum deviations from the true temperature distribution at a predetermined time t' .

Keywords: spring-twisted channel, laser welding, thermal cycle, mathematical model.

Reference list

1. Bagoutdinova A.G., Zolotonosov Ya.D., Mustakimova S.A. Energy-efficient heat-exchange devices based on heat-exchange elements in the form of a spring-twisted channels // News of the KSUAE, 2012, № 3 (21). – P. 86-95.
2. Zolotonosov A.Ya., Zolotonosov Ya.D., Knyazeva I.A., Bagoutdinova A.G. Coiled heat exchanger: patent 133596 Russian Federation. № 2013113048/06; It is declared 22.03.2013; it is published 20.10.2013.
3. Knyazeva I.A., Zolotonosov Ya.D., Bagoutdinova A.G. Selecting a mathematical model to describe the heat of the laser welding spring-twisted channels // News of the KSUAE, 2013, № 3 (25). – P. 67-72.
4. Rykalin N.N. Calculations of thermal processes in welding. – M.: Mashgiz, 1951. – 296 p.
5. Frolov V.V. Theory of welding processes. – M.: «High School», 1988. – 210 p.
6. Nehoda E.N. Thermal processes in welding: Textbook. allowance; Far Eastern State Technical University. – Vladivostok: Izd. FESTU, 2008. – 125 p.
7. Yazovskih 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.
8. Melyukov V.V. Optimization of material handling concentrated flows of energy: Textbook. – Kirov: Vyatka State University, 2003. – 111 p.