УДК 621.79

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ СТАЛЬНЫХ И АЛЮМИНИЕВЫХ ЛИСТОВ ВНАХЛЕСТ**¹Гоц А.Н., ²Гусев Д.С., ¹Гуськов В.Ф., ¹Люхтер А.Б.**¹ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», Владимир, e-mail: hotz@mail.ru;²ООО «ИЦ при ВлГУ», Владимир, e-mail: gusev@laser33.ru

В работе предложена методика выбора источника теплоты и уточнены начальные и граничные условия теплообмена в процессе лазерной сварки стального и алюминиевого листов внахлест. Для моделирования температурных полей в процессе лазерной сварки размеры и форму сварочной ванны выбирают по микрошлифу поперечного сечения сварного шва. Расчет температурных полей свариваемых деталей основывается на решении уравнения нестационарной теплопроводности. Введенная формализация источника теплоты в процессе лазерной сварки стальных и алюминиевых листов внахлест позволила обеспечить корректное задание начальных и граничных условий теплообмена при численном решении методом конечных элементов уравнения нестационарной теплопроводности. Теплосодержание сварочной ванны определяется удельным теплосодержанием металлов свариваемых деталей, температурой плавления наиболее тугоплавкого металла и геометрическими размерами сварочной ванны. Выявлены условия теплообмена, оказывающие преобладающее влияние на отдельные стадии процесса теплопроводности при лазерной сварке листов, что позволяет осуществить целенаправленный выбор начальных и граничных условий теплообмена при нагреве и охлаждении деталей. При экспериментальных исследованиях изменение теплового состояния образца при лазерной сварке регистрировалось хромель-алюмелевыми термопарами. Получена удовлетворительная сходимость результатов расчетных и экспериментальных исследований. Результаты исследований теплового состояния свидетельствуют о значительной температурной неравномерности, возникающей в образце в процессе лазерной сварки, что приведет к появлению в нем остаточных напряжений.

Ключевые слова: источник теплоты, сварочный шов, температурное поле, сварочная ванна, теплосодержание, граничные условия

CALCULATION OF TEMPERATURE FIELDS IN THE PROCESS OF OVERLAP LASER WELDING OF STEEL TO ALUMINIUM SHEETS**¹Gots A.N., ²Gusev D.S., ¹Guskov V.F., ³Lyukhter A.B.**¹Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, e-mail: hotz@mail.ru;²EC at VSU LLC, Vladimir, e-mail: gusev@laser33.ru

The paper proposes a method of choosing a heat source and specifies the initial and boundary conditions of heat transfer in the process of laser welding of steel and aluminum sheets overlap. To simulate the temperature fields in the laser welding process, the size and shape of the weld pool is selected by the cross-sectional micro-section of the weld. The calculation of the temperature fields of welded parts is based on the solution of the equation of unsteady thermal conductivity. The introduced formalization of the heat source in the process of laser welding of steel and aluminum sheets overlap, allowed to ensure the correct setting of the initial and boundary conditions of heat transfer in the numerical solution of the finite element equation of unsteady thermal conductivity. The heat content of the weld pool is determined by the specific heat content of the metals of the welded parts, the melting point of the most refractory metal and the geometric dimensions of the weld pool. The conditions of heat exchange, which have a predominant effect on the individual stages of the thermal conductivity process in laser welding of sheets, which allows for a targeted selection of the initial and boundary conditions of heat transfer during heating and cooling of parts. In experimental studies, the change in the thermal state of the sample during laser welding was recorded by chromel-aluminum thermocouples. The satisfactory convergence of the results of computational and experimental studies is obtained. The results of studies of the thermal state indicate a significant temperature unevenness that occurs in the sample during laser welding, which will lead to the appearance of residual stresses in it.

Keywords: heat source, welding seam, temperature field, welding bath, heat content, boundary conditions

В процессе лазерной сварки происходит неравномерный нагрев свариваемых деталей, что после охлаждения приводит к появлению остаточных напряжений. При их расчете необходимо знать распределение температурных полей для свариваемых деталей, так как от этого зависит и величина остаточных напряжений. В некоторых работах [1, 2] для моделирования температурных полей вводят понятие «источника теплоты при сварке», который представляется в виде изотермической поверхности, соот-

ветствующей форме сварочной ванны [1] или системы фиктивных источников теплоты, позволяющих получить требуемую форму и размеры сварочной ванны [3, 4]. Ранее выполненные исследования [5] показывают, что модель источника теплоты в виде полуэллипсоида с геометрическими размерами сварного шва способствует воспроизведению термического цикла дуговой сварки заготовок с погрешностью не более 15%.

Цель исследования: уточнение выбора источника теплоты и начальных и гранич-

ных условий теплообмена в процессе лазерной сварки стального и алюминиевого листов внахлест путем сравнения расчетных и экспериментальных температурных полей при расчете температурных полей методом конечных элементов (МКЭ).

Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования принята лазерная сварка опытного образца (рис. 1), осуществляемая непрерывным излучением без сквозного проплавления нижней алюминиевой заготовки и использования присадочного материала [6].

Микрошлиф поперечного сечения сварного шва и модель сварочной ванны, соответствующая поперечному сечению шва, показаны на рис. 2.

Расчет температурных полей свариваемых образцов (рис. 1) основывается на решении уравнения нестационарной теплопроводности методом конечных элементов:

$$\nabla^2 T + \frac{Q}{\lambda} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad (1)$$

где $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ – оператор Лапласа; T – температура детали; $a = \lambda / (\rho c)$ – температуропроводность соответствующего материала; ρ , c , λ – соответственно

плотность, теплоемкость, теплопроводность свариваемых образцов; τ – текущее время; Q – производительность внутренних источников теплоты (в расчетах $Q = 0$), для заданных условий однозначности, наибольшая сложность определения которых заключается в формировании начальных и граничных условий теплообмена.

При их назначении в целях упрощения целесообразно исходить из следующих допущений:

1. Нагревание свариваемых деталей образца осуществляется за счет теплосодержания расплава металлов в объеме сварочной ванны.

2. Охлаждение свариваемых деталей и расплава металлов происходит в результате теплопроводности и свободной конвекции в окружающую среду.

3. Теплосодержание сварочной ванны определяется удельным теплосодержанием металлов свариваемых деталей, температурой плавления наиболее тугоплавкого металла и геометрическими размерами сварочной ванны.

4. Скорость движения лазерного луча (сварочной ванны) v_{sv} , диаметр пятна луча лазера d_p и продолжительность нагрева от излучения τ_{sv} связаны соотношением

$$\tau_{sv} = d_p / v_{sv}. \quad (2)$$

Рис. 1. Сварной образец: 1 – сталь 20, толщина 1,5 мм; 2 – алюминиевый сплав АМг2М, толщина 3,0 мм; 3 – сварной шов

а)

б)

Рис. 2. Модель сварочной ванны: а – микрошлиф поперечного сечения сварного шва: 1 – сталь 20; 2 – алюминиевый сплав АМг2М; 3 – сварной шов; б – модель сварочной ванны: b_{sv} – ширина сварочной ванны, d_p – диаметр пятна лазерного излучения

5. Термическое сопротивление контакта между соединяемыми деталями образца отсутствует.

6. Расплав металла в объеме сварочной ванны имеет теплофизические свойства наиболее тугоплавкого металла.

Первое допущение позволяет определить теплосодержание единицы длины сварного шва по формуле

$$Q_{sv} = \frac{c_s m_s (t_s - t_0) + c_a m_a (t_s - t_0) + r_s m_s + r_a m_a}{l}, \quad (3)$$

где c_s , c_a – удельное теплосодержание при температуре плавления стали соответственно для стали и алюминия; m_s , m_a – массы стали и алюминия в сварной ванне; $t_0 = 293 \text{ K}$ – начальная температура; r_s , r_a – удельная теплота плавления стали и алюминия; l – длина сварочного шва.

Для определения масс m_s и m_a расплавленных металлов поверхность сварного шва представляется в виде квадратов со стороной b_{sv} , описывающих пятно лазерного луча, а глубина сварочной ванны определяется с использованием микрошлифа поперечного сечения сварного шва для используемого технологического режима сварки (рис. 2).

В объеме сварочной ванны из-за воздействия лазерного луча продолжительностью τ_{sv} происходит перемешивание металлов, что позволяет принять температуру расплава равной температуре плавления стали. Такая формализация источника теплоты упрощает задание начальных и граничных условий теплообмена в процессе сварки.

На рис. 3 схематично представлено перемещение объема сварочной ванны и из-

менение температуры расплава металла в ней по направлению сварки.

В момент времени τ_i температура в объеме ванны 1 мгновенно повышается до температуры плавления стали. В течение времени τ_{sv} осуществляется перенос теплоты от сварочной ванны 1 через ее граничные поверхности А, И, Ж в металл заготовки. По завершению времени $\tau_i + \tau_{sv}$ в качестве источника теплоты выступает последовательно следующий 2 и другие объемы сварочной ванны по направлению сварки с аналогичным интервалом времени τ_{sv} и граничными поверхностями. Охлаждение сварного шва и образца при перемещении источника теплоты и окончании сварки осуществляется путем теплопроводности в металл образца и свободной конвекции в окружающую среду.

В соответствии с описанной моделью нагрева и охлаждения образца при сварке начальные условия теплообмена $\tau = 0$: $T = f(x, y, z)$, где T – температура плавления стали; x, y, z – координаты изотермической поверхности (поверхности сварочной ванны); $T = T_0$, где $T_0 = 293 \text{ K}$ – начальная температура образца.

Граничные условия теплообмена на наружных поверхностях образца, кроме поверхности сварочной ванны, задаются граничными условиями теплообмена третьего рода. Условия теплообмена на поверхности соприкосновения стальной и алюминиевой заготовок в предположении идеального контакта между ними описываются граничными условиями четвертого рода, устанавливающими равенство тепловых потоков, проходящих через рассматриваемую поверхность.

Рис. 3. Схема задания начальных и граничных условий теплообмена в сварном шве: а – схема для шага расчета τ_{sv1} ; б – схема для шага расчета τ_{sv2} ; буквами обозначены поверхности, контактирующие со стальным (А, Б, В) и алюминиевым (И, К, Л) листами, окружающей средой (Г, Д, Е) и соседней сварочной ванной (Ж); в – расчетный термический цикл для сварочных ванн в момент времени τ_i и $\tau_i + \tau_{sv}$

Теплофизические характеристики стали 20 и АМг2М в зависимости от температуры

Характеристики	Материал	Температура, °С					
		0	100	300	600	1000	1530
Теплопроводность, Вт/(м·К)	Сталь 20	55	52	48	34	28	25
	АМг2М	155	159	168	173	174	175
Коэффициент теплового расширения $\times 10^{-6}$, 1/К	Сталь 20	11,1	12,3	13,8	15,1	13,3	13,3
	АМг2М	23	24,9	28,8	30	30,5	31
Плотность, кг/м ³	Сталь 20	7859	7834	7770	7659	7600	7600
	АМг2М	2680					
Удельное теплосодержание, Дж/(кг·К)	Сталь 20	325	358	446	579	628	760
	АМг2М	904	963	1037	1228	1177	1177
Удельная теплота плавления, кДж/кг	Сталь 20	271					
	АМг2М	390					

Кроме начальных и граничных условий теплообмена условия однозначности формируются заданием теплофизических параметров формой и геометрическими размерами образца в виде конечно-элементной модели.

Теплофизические параметры материалов сварных образцов задаются в зависимости от температуры (таблица) по справочным данным [7].

Подтверждением корректности выбора источника теплоты и начальных и граничных условий теплообмена является удовлетворительная сходимость расчетных и экспериментальных температур образца в процессе лазерной сварки.

Изменение теплового состояния образца при сварке целесообразно регистрировать хромель-алюмелевыми термопарами. Схема установки термопар в образце и функциональная схема измерения температуры приведены на рис. 4.

Рис. 4. Функциональная схема измерения температуры

Термопары устанавливались в срединной плоскости стального листа, расположенной перпендикулярно к сварному шву, в пяти сверлениях диаметром 1 мм и глубиной 0,3 мм на расстоянии 0,3; 1,0; 1,7; 3,5; 6,0 мм от кромки сварного шва. Контакт термопары с образцом обеспечивался их приваркой к металлу с помощью разряда конденсатора. Экспериментальное измерение температур проводилось при сварке пяти образцов.

Сварка осуществлялась на лазерном роботизированном комплексе ЛРК-С с максимальной выходной мощностью лазера 3 кВт в лаборатории лазерной сварки научно-образовательного центра ВлГУ.

Непрерывная регистрация сигналов от термопар осуществлялась с помощью самописца цифрового многоканального S-Recorder L. Началом регистрации являлся сигнал включения лазерного источника, который поступал с контроллера робота и дублировался на вольтметр. Последующий переход от величины сигнала термопары к значениям температур осуществлялся через номинальные статические характеристики преобразования термопар по ГОСТ Р 8.585-2001.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты расчетного и экспериментальных исследований теплового состояния образца (рис. 5) при сварке приведены на рис. 6. Разработанная для моделирования теплового состояния трехмерная конечно-элементная модель образца со средними размерами конечного элемента в зоне термического влияния 0,05–0,2 мм, а в сварочном шве и околошовной области – 0,5 мм состояла из около 670 тыс. элементов и 3,88 млн узлов. Расчетные величины теплосодержания единицы длины сварного

шва Q_{sv} с принятой формой поперечного сечения (рис. 2) и времени нагрева τ_{sv} составляют для образца (рис. 1) и режима лазерной сварки со скоростью движения пятна излучения лазера диаметром $d_p = 2,56$ мм, равной $v_{sv} = 18$ мм/с соответственно $Q_{sv} = 535$ Дж/см и $\tau_{sv} = 0,142$ с.

Анализ результатов показывает, что относительная погрешность между значениями температур образца, полученных в расчете и эксперименте, при нагреве и охлаждении в процессе сварки не превышает соответственно 10% и 7%.

Согласно экспериментальным данным воздействие лазерного луча приводит

к быстрому нагреву за 0,2 с околошовной зоны образца до максимальной температуры, затем в течение короткого промежутка времени $\tau_{exp} = 0,15$ с температура практически не изменяется и при дальнейшем перемещении лазерного луча температура уменьшается с 1109 °C до 442 °C за 1 с. Следует отметить, что временной интервал неизменной максимальной температуры в непосредственной близости (0,3 мм) от сварного шва, полученный в эксперименте $\tau_{exp} = 0,15$ с, практически не отличается от расчетного $\tau_{sv} = 0,142$ с. После завершения сварки через 2 с наступал регулярный тепловой режим.

Рис. 5. Зависимость температуры стальной заготовки в виде функции времени при лазерной сварке образца: непрерывная линия – данные эксперимента, пунктирная – данные компьютерного моделирования при $Q_{sv} = 535$ Дж/см: 1 – 0,3 мм от шва, 2 – 1,0 мм от шва, 3 – 1,7 мм от шва, 4 – 3,5 мм от шва, 5 – 6,0 мм от шва

Рис. 6. Распределение температур в сварном образце в ходе и после сварки: а–г – через 0,142; 0,426; 1,278 и 1,664 с после начала сварки соответственно; д – тепловой след хвостовой части сварочной ванны; е – по длине сварного шва (точка В) в плоскости соприкосновения стального и алюминиевого листов при $Q_{sv} = 535$ Дж/см по завершению сварки через: 1 – 0 с; 2 – 0,2 с; 3 – 0,4 с; 4 – 0,6 с; 5 – 1,4 с

Отмеченное позволяет разделить процесс теплопроводности на несколько стадий с целью уточнения условий теплообмена при расчетных исследованиях теплового состояния деталей в условиях лазерной сварки. Первая стадия определяется значительной зависимостью температурного поля от начальных условий. Вторая стадия, характеризующая постоянством максимальной температуры, зависит от граничных условий первого рода и третьего рода. Третья стадия, включающая регулярный режим, характеризуемый монотонной зависимостью изменения температуры во времени, определяется граничными условиями третьего рода.

На рис. 6 представлены результаты расчетов теплового состояния образца в процессе лазерной сварки и на стадии охлаждения.

Распределение температур в сварном образце в процессе сварки подтверждает принятое допущение о форме сварочной ванны как источника теплоты (рис. 6, д).

Распределение температур по длине сварного шва в плоскости соприкосновения стального и алюминиевого листов (точка В поперечного сечения шва, рис. 6, е) позволяет оценить неравномерность температур, возникающую в процессе сварки. В частности, температура в точке В на участке сварки длиной 30 мм уменьшается с температуры плавления стали 1530 °С до температуры 440 °С, а через 1,4 с после завершения сварки температура выравнивается до уровня 280–300 °С.

Заключение

В работе выполнена формализация источника теплоты в процессе лазерной сварки стальных и алюминиевых листов внахлест, обеспечивающая корректное задание начальных и граничных условий теплообмена при численном решении МКЭ уравнения нестационарной теплопроводности. Выявлены условия теплообмена, оказывающие преобладающее влияние на отдельные стадии процесса теплопроводности при ла-

зерной сварке листов, что позволяет осуществить целенаправленный выбор начальных и граничных условий теплообмена при нагреве и охлаждении деталей, обеспечивающий удовлетворительную сходимость расчетных и экспериментальных результатов. Результаты исследований теплового состояния свидетельствуют о значительной температурной неравномерности, возникающей в образце в процессе лазерной сварки, что приведет к появлению в нем остаточных напряжений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации. Соглашение о предоставлении субсидии № 14.577.21.0158 от 28 ноября 2014 г. Уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI57714X0158.

Список литературы

1. Sudnik W., Radaj D., Erofeev W. Computerised simulation of laser beam welding, modelling and verification. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 1996. vol. 29. no. 11. P. 2811–2817. DOI: 10.1088/0022-3727/29/11/013.
2. Schwenk C. Modeling of thermomechanical phenomena in fusion welding. *Welding Fundamentals and Processes*. 2011. vol. 6. P. 830–841. DOI: 10.13140/2.1.2440.9602.
3. Кархин В.А., Хомич П.Н., Иванов С.Ю. Модели источников теплоты для прогнозирования тепловых полей при сварке плавлением // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2010. № 4–1. С. 241–254.
4. Слезкин Д.В., Цвелев Р.В., Ерофеев В.А., Масленников А.В., Судник В.А. Методика расчетно-экспериментального определения эффективных мощности и радиуса теплового потока дуги при сварке стали плавящимся электродом в смеси защитных газов // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2012. № 9. С. 172–181.
5. Судник В.А., Ерофеев В.А., Масленников А.В. Методика определения характеристик эквивалентного источника теплоты для выполнения расчетов деформаций при сварке // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2015. № 6–2. С. 32–43.
6. Люхтер А.Б., Шлегель А.Н., Гусев Д.С., Самарин С.С. Исследование процесса формирования сварного соединения, полученного лазерной сваркой внахлест алюминия АМг2М и стали Ст3 // *Материаловедение*. 2018. № 1. С. 26–30.
7. Колесников К.С., Румянцев В.В., Леонтьев А.И., Полежаев Ю.В. и др.; под общ. ред. Колесникова К.С., Леонтьева А.И. *Машиностроение. Энциклопедия. Теоретическая механика. Термодинамика. Теплообмен*. М.: Машиностроение, 1999. Т. 1–2. 600 с.