ВЕСТНИК ИНЖЕНЕРНОЙ ШКОЛЫ ДВФУ. 2021. № 3(48)

Технология и организация судостроения и судоремонта

DOI: https://doi.org/10.24866/2227-6858/2021-3-8 УДК 621.791.14:62-97

В.Н. Стаценко, Е.Н. Негода, М.А. Суханов

СТАЦЕНКО ВЛАДИМИР НИКОЛАЕВИЧ – д.т.н., профессор (автор, ответственный за переписку), SPIN: 8321-3805, vladsta@mail.ru НЕГОДА ЕВГЕНИЙ НИКОЛАЕВИЧ – к.т.н., профессор, negoda60@mail.ru СУХАНОВ МИХАИЛ АЛЕКСЕЕВИЧ – магистрант, miklsuhanov@gmail.com Политехнический институт Дальневосточный федеральный университет Владивосток, Россия

Моделирование температурных полей в процессе сварки трением с перемешиванием

Аннотация: В процессе сварки трением с перемешиванием температурные поля в зоне соединения определяют физическую возможность пластического течения разогретого материала и качественного формирования структуры шва. В данной работе представлены результаты расчетного исследования распределения температур в пластине из алюминиевого сплава АМгЗ вокруг инструмента и под ним с использованием экспериментальных данных по тепловыделениям при линейной сварке трением с перемешиванием при разных скоростях вращения и перемещения инструмента различных диаметров. Для этих расчетов авторами разработана программа в пакете *Mathlab*, в которой инструмент представлен совокупностью элементарных источников нагрева, равномерно распределенных по его площади. Диаметр инструмента разбивается на 100 ячеек, для каждой из них рассчитывается тепловыделение в зависимости от окружной скорости вращения и скорости сварки. Температурное поле рассчитывалось как сумма температур от каждого элементарного источника. Результаты расчетов приведены в виде полей температур и изотерм на поверхности пластины из алюминиевого сплава АМг3 толщиной 4 мм для инструмента диаметром 20 мм и следующих режимов: скорости его вращения 40 и 100 рад/с, скорости сварки – 0,42 и 1,67 мм/с. После этого область в зоне нагрева пластины и внутри инструмента разбивается на участки шириной по 2 мм и получают зависимости распределения температур по средней линии сварки. Основной результат проведенных расчетов: максимальное значение температуры и наибольшее размягчение свариваемого материала наблюдается не в центре инструмента вокруг пина, где происходит перемешивание, а в области задней кромки инструмента за пином, при этом максимальное значение смещено относительно средней линии сварки на 5-8 мм в направлении, противоположном вращению инструмента. Это смещение температуры объясняется совместным влиянием скоростей вращения и сварки и больше проявляется на малых радиусах инструмента, а также с уменьшением скорости вращения и при увеличении скорости сварки. Результаты исследований могут быть использованы при разработке конструкции, геометрии и технологических схем инструмента для сварки трением с перемешиванием судовых конструкций из алюминиевых сплавов.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием, температурные поля, математическая модель, скорость вращения, скорость сварки, диаметр рабочего инструмента, асимметрия изотерм

Введение

Сварка трением с перемешиванием (СТП) проводится вращающимся металлическим рабочим инструментом, который представляет собой стержень с буртом (заплечиком), из него выступает пин. При сварке заплечик инструмента разогревает металл за счет трения и защищает место сварки от воздействия окружающей среды. В результате нагрева и приложенного давления

[©] Стаценко В.Н., Негода Е.Н., Суханов М.А., 2021

Статья: поступила: 21.07.2021; рецензия: 30.07.2021; финансирование: Дальневосточный федеральный университет.

металл переходит в пластифицированное состояние, и при перемешивании этого металла за инструментом образуется сварной шов.

Несмотря на кажущуюся простоту, процесс СТП в действительности сложен. В нем взаимодействуют такие явления, как тепловыделение при трении, образование и разрушение металлических связей между сопряженными поверхностями инструмента и свариваемых заготовок в процессе их относительного движения, быстрый нагрев и охлаждение объемов металла при больших давлениях, пластическая деформация, упрочнение и рекристаллизация металла и др. Процессы такой сварки недостаточно изучены, выполненные исследования позволяют представить качественную картину явлений, происходящих при сварке.

Температурные поля в зоне соединения определяют физическую возможность пластического течения разогретого материала и получения качественного формирования структуры шва. Нагревание металла вызывает снижение сопротивления деформации, которое минимально у поверхности инструмента с максимальной температурой. При сварке трением с перемешиванием возникают трудности выполнения измерений в зоне формирования соединения при воздействии инструмента на металл, ввиду этого используются современные методы математического моделирования и расчетов для построения тепловых полей [1–7]. При этом математическое моделирование в сочетании с другими видами исследований позволяет получить картину физико-механических процессов, протекающих в сварке этого вида. Однако сообщаемые разными авторами результаты расчётов отличаются значительным разбросом значений температур нагрева в зоне сварки алюминиевых сплавов – от 450 до 650 °C [1–4, 6].

Анализ представленных источников позволяет сделать вывод, что определение расчетом точного количества тепла, выделяемого в процессе сварки трением с перемешиванием в области под инструментом, затруднено, поскольку существуют различные неточности, допущения и упрощения математической модели, описывающей процесс сварки.

В настоящей работе предлагается использовать для расчета температурных полей в зоне нагрева экспериментальные данные по тепловыделениям при вращении инструмента различных диаметров при разных скоростях его вращения и перемещения (сварки). Результаты этих исследований представлены в [10].

Техническое решение и методика расчетов

Расчеты полей температур в зоне нагрева при сварке трением с перемешиванием стали возможными в результате исследования тепловыделений при вращении инструмента и перемещения его вдоль сварного шва. Этот расчет основан на схеме движущегося точечного источника в предельном состоянии [8, 9].

При этом виде сварки инструмент представлен совокупностью элементарных источников нагрева, равномерно распределенных по его площади. Температурное поле рассчитывалось как сумма температур от каждого элементарного (точечного) источника по программе, разработанной авторами в пакете *Mathlab*.

На первом этапе выбирается поле для расчета температур с координатами $x = [-N1, \Delta x, +N2]$, $y = [-L1, \Delta y, +L2]$, z = const, где N и L – границы координат, $\Delta x, \Delta y - \text{шаг}$ изменения координат (рис. 1). Далее назначается толщина пластины *del*, диаметр инструмента d_a , его угловая скорость вращения ω , скорость линейного перемещения (сварки) V_{cB} , выбираются средние значения физических свойств материала (алюминиевого сплава AMr3) – теплопроводность λ , Вт/м·К; теплоемкость – c, Дж/кг·К; плотность – ρ , кг/м³.

Диаметр инструмента d_a разбивается на 100 ячеек (рис. 1), находятся их координаты x_r , y_r , размеры ячейки n_i и ее площадь

$$n_i = d_a/100, \text{ M},$$
 (1)
 $S_i = n_i^2, \text{ M}^2.$ (2)

Для каждой ячейки находится суммарная окружная скорость вращения инструмента и его перемещения (сварки), т.е. их относительная скорость

$$V_{\text{OTH}i} = V_i \pm V_{\text{CB}} = \omega \cdot r_i \pm V_{\text{CB}} , \qquad (3)$$

где $V_i = \omega \cdot r_i$, ω – окружная (м/с) и угловая (с⁻¹) скорости вращения рабочего инструмента;

 $V_{\rm CB}$ – скорость сварки, м/с;

r_i – радиус места расположения ячейки

$$r_i = \sqrt{x_{ri}^2 + y_{ri}^2}, \,\mathrm{M}.$$
 (4)

Окружная скорость вращения значительно превышает скорость сварки, их значения сопоставимы на низких скоростях вращения, больших скоростях сварки и малых радиусах инструмента. Поэтому упрощенно принято, что при расчете относительной скорости $V_{\text{отн}i}$ при совпадении направлений векторов окружной скорости вращения в зоне ячейки V и скорости сварки V_{cB} (нижняя половина пластины, рис. 1) эти скорости вычитаются, при противоположных направлениях векторов (верхняя половина пластины) – суммируются.



Рис. 1. Математическая модель расчета температурных полей: [0, +L2] – верхняя половина пластины; [0, -L1] – нижняя половина пластины; x_k, y_k – координаты поля температур; x_r, y_r – координаты ячеек тепловыделений. Здесь и далее рисунки авторов.

Далее определяется удельное тепловыделение в ячейке в зависимости от окружной скорости вращения *V_i* и скорости сварки *V_{cb}* [10]

$$q_i = k_1 V_{\rm CB}^2 + k_2 V_{\rm CB} + k_3, \, \text{MBT/M}^2, \tag{5}$$

где коэффициенты

 $k_1 = -5,198 \, V_{\rm CB} - 0,97,\tag{6}$

$$k_2 = 6,83 \, V_{\rm CB} + 3,36,\tag{7}$$

$$k_3 = 0,099 \, V_{\rm CB} - 0,0072 \; . \tag{8}$$

Тепловыделение в каждой ячейке рассчитывается по зависимости

$$W_i = q_i \cdot S_i, B_{\mathrm{T}}.\tag{9}$$

При расчете тепловыделение находится только для ячеек, расположенных внутри диаметра инструмента.

Расчет суммарного тепловыделения под инструментом производится по зависимости

$$W_{\Sigma} = \sum_{0}^{i} W_{i}, \text{Br.}$$
(10)

Температура в каждой ячейке находится по зависимости [10]

$$T_{i} = \frac{1}{2\pi\lambda} \sum_{i=1}^{n^{2}} \frac{W_{i}}{R_{i}} exp\left(-\frac{V_{\text{отн}i} \cdot c \cdot \rho}{2 \cdot \lambda} \cdot (x_{i} + R_{i})\right),\tag{11}$$

где λ -теплопроводность, Вт/м·К;

с – теплоемкость, Дж/кг К;

 ρ – плотность, кг/м³;

R – пространственный радиус-вектор источника тепловыделения в подвижной системе координат, т.е. расстояние рассматриваемой точки *A* от начала координат

$$R_i = \sqrt{(x_k + x_{ri})^2 + (y_k + y_{ri})^2},$$
(12)

где индекс *i* относится к расстоянию от *i*-го источника до рассматриваемой точки;

 x_k, x_{ri} – векторы координаты x;

 y_k, y_{rj} – векторы координаты у (рис. 1).

Расчеты ограничиваются температурой 600 °С – значением, близким к температуре плавления алюминия.

Расчет температур в каждой ячейке пластины и построение графиков изотерм по зависимости (11) производится с помощью функций *pcolor* и *contour* в пакете программ *MATLAB*.

Результаты и анализ расчета температурных полей

При проведении вычислений по разработанной математической модели выбраны следующие режимы для инструмента диаметром 20 мм: скорости его вращения $\omega = 40$ и 100 с⁻¹ и скорости сварки $V_{cB} = 0,42$ и 1,67 мм/с, материал рабочей пластины – алюминиевый сплав АМг3 толщиной 4 мм с постоянными значениями теплопроводности $\lambda = 170$ Вт/м·К и удельной теплоёмкости c = 880 Дж/кг·К и плотности $\rho = 2670$ кг/м³.

Результаты расчетов приведены на графиках (рисунки 2–4) в виде полей температур и изотерм на поверхности рабочей пластины, шаг между изотермами составляет 50 °C. Аналогичные поля изотерм получены при скоростях вращения инструмента и $\omega = 60$ и 80 с⁻¹ и скоростях сварки $V_{\rm cB} = 0,67$ и 1 мм/с.



Рис. 2. Поля температур (а) и изотерм (б) на поверхности пластины при $V_{\rm CB}$ = 0,42 мм/с, ω =40 с⁻¹





ВЕСТНИК ИНЖЕНЕРНОЙ ШКОЛЫ ДВФУ. 2021. № 3(48)





Для анализа распределения температур вдоль средней линии сварки использовался метод, при котором область в зоне нагрева и диаметра инструмента разбивается на участки по 2 мм. На данных участках фиксируются показатели температуры, по которым строится ее зависимость по средней линии сварки. Результаты значений температур для скоростей вращения инструмента $\omega = 40$ и 100 с⁻¹ и сварки $V_{c_B} = 0,42$ и 1,67 мм/с представлены на рис. 5.

Анализ этих данных показывает следующее.

Изотермы вокруг инструмента образуют концентрические окружности, вытянутые в направлении, противоположном скорости сварки.

На передней кромке инструмента температура пластины не превышает 300 °С, на задней кромке температура достигает 350–500 °С для разных режимов.



Рис. 5. Распределение температур по центральному сечению при *V*_{св} = 0,42 мм/с (а) и *V*_{св} = 1,67 мм/с (б); 1 – ω = 40 с⁻¹; 2 – ω = 100 с⁻¹

1. Температура материала в зоне перемешивания (в области центра инструмента) составляет 330–460 °C для разных режимов, перепад температур на входе и выходе из этой зоны может составлять 50–140 °C.

2. Наибольшее значение температуры наблюдается не в зоне перемешивания, а в области задней кромки инструмента, при этом максимальное значение смещено относительно средней линии сварки на 5–8 мм в направлении, противоположном вращению инструмента (рисунки 2–5). Это смещение максимальной температуры (асимметрия) объясняется влиянием относительной скорости вращения и сварки. При совпадении направлений векторов окружной скорости вращения в зоне ячейки и скорости сварки (рис. 1) скорости вычитаются, при противоположных направлениях векторов – суммируются. При противоположных направления векторов относительная скорость увеличивается, соответственно повышается тепловыделение, зона максимальной температуры смещается в этом направлении.

3. Асимметрия изотерм увеличивается с уменьшением скорости вращения и радиуса инструмента и при увеличении скорости сварки.

4. С увеличением скорости вращения инструмента с 40 до 100 с⁻¹ максимальная температура повышается на 100–150 °С. Это объясняется увеличением интенсивности процесса трения в месте контакта и повышением тепловыделения.

5. С увеличением скорости сварки с 0,42 до 1,67 мм/с максимальная температура понижается на 50–100 °С. Это объясняется более интенсивным охлаждением пластины при более высокой скорости сварки.

6. В зоне перед инструментом распределение температур практически не зависит от скоростей вращения и сварки. В зоне за инструментом с повышением скорости вращения с 40 до 100 с⁻¹ температура пластины увеличивается на 50–100 °C. От скорости сварки распределение температур в этой зоне практически не зависит.

Заключение

Основным результатом расчетов является то, что максимальное значение температуры и наибольшее размягчение свариваемого материала наблюдается не в центре инструмента вокруг пина, где происходит перемешивание, а в области задней кромки инструмента за пином, при этом максимальное значение смещено относительно средней линии сварки на 5–8 мм в направлении, противоположном вращению инструмента. Это смещение максимальной температуры объясняется совместным влиянием скоростей вращения и сварки. Полученные данные по вычислениям и измерениям температурного поля в свариваемых деталях дают возможность оперативно прогнозировать степень нагрева и его состояние в зонах исследуемой области и получить представление об изменении температур в процессе сварки в тех зонах исследуемой области, где очень сложно или невозможно измерить температуру.

Особую важность эти данные имеют при разработке конструкции, геометрии и технологических схем инструмента для сварки трением с перемешиванием судовых конструкций из алюминиевых сплавов.

Вклад авторов в статью: В.Н. Стаценко – постановка задач исследования, обработка результатов расчетов, оформление статьи; Е.Н. Негода – разработка методики расчетов; М.А. Суханов – поиск и анализ литературных источников, обработка результатов расчетов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ерофеев В.А., Карпухин Е.В., Логвинов Р.В. Исследование физических явлений при воздействии инструмента на металл в процессе фрикционной сварки // Сварка и диагностика. 2010. № 1. С. 27–33.

2. Клопотов А.А., Абзаев Ю.А., Потекаев А.И., Клименов В.А., Курган К.А., Клопотов В.Д., Марченко Е.С. Структурно-фазовое состояние и моделирование распределения температурных полей при сварке трением с перемешиванием в сплаве АМг6 // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2018. Т. 15, № 3. С. 416–423.

3. Котлышев Р.Р., Шучев К.Г., Крамской А.В. Расчет температур при сварке трением с перемешиванием алюминиевых сплавов // Вестник ДГТУ. 2010. Т. 10, № 5(48). С. 648–654.

4. Майстренко А.Л., Нестеренков В.М., Дутка В.А., Лукаш В.А., Заболотный С.Д., Ткач В.Н. Моделирование тепловых процессов для улучшения структуры металлов и сплавов методом трения с перемешиванием // Автоматическая сварка. 2015. № 1. С. 5–14.

5. Медведев А.Ю., Павлинич С.П., Атрощенко В.В., Маркелова Н.И. Моделирование температурного поля при линейной сварке трением // Вестник УГАТУ. 2010. Т. 14, № 2(37). С. 75–79.

6. Покляцкий А.Г. Особенности распределения температур в тонколистовом алюминиевом сплаве АМг5М при сварке трением с перемешиванием // Автоматическая сварка. 2011. № 8. С. 48–51.

7. Рзаев Р.А., Джалмухамбетов А.У., Смирнов В.В., Атуев Ш.М. Динамика температурного поля и оценка технологических параметров при сварке трением с перемешиванием биметаллических пластин // Известия Самарского научного центра РАН. 2016. Т.18, №1(2). С. 274–278.

8. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. М.: Машгиз, 1951. 296 с.

9. Стаценко В.Н., Негода Е.Н., Сухорада А.Е. Исследование тепловложения и температурных полей при сварке трением с перемешиванием // Вестник Инженерной школы ДВФУ. 2017. № 3(32). С. 150–155. DOI: DOI.org/10.5281/zenodo.897023

10. Стаценко В.Н., Сухорада А.Е. Обобщение распределения тепловыделений в процессе сварки трением с перемешиванием // Вестник Инженерной школы ДВФУ. 2021. № 2(47). С. 21–28. DOI: https://doi.org/10.24866/2227-6858/2021-2-3

FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN. 2021. N 3/48 *Technology and Organization of Shipbuilding and Ship Repair*

www.dvfu.ru/en/vestnikis

DOI: https://doi.org/10.24866/2227-6858/2021-3-8

Statsenko V., Negoda E., Sukhanov M.

VLADIMIR STATSENKO, Doctor of Engineering Sciences, Professor (Corresponding Author), vladsta@mail.ru EVGENY NEGODA, Candidate of Engineering Sciences, Professor, negoda60@mail.ru MIKHAIL SUKHANOV, MS-Student, miklsuhanov@gmail.com Polytechnical Institute, *Far Eastern Federal University* Vladivostok, Russia

Modeling temperature fields during friction stir welding

Abstract: In the process of friction stir welding, the temperature fields in the joint zone determine the physical possibility of the plastic flow of the heated material and obtaining a high-quality formation of the weld structure. This paper presents the results of a computational study of the temperature distribution in a plate of AMg3 aluminum alloy around and under the tool, using experimental data on heat release in linear friction stir welding when rotating tools of different diameters at different speeds of rotation and movement. For these calculations, a program has been developed in which the tool is represented by a set of elementary heating sources evenly distributed over its area. The temperature field was calculated as the sum of temperatures from each elementary (point) source and is produced using the program developed in the *Mathlab* package. The tool diameter is divided into 100 cells, for each of them the heat release is calculated depending on the peripheral rotation speed and the welding speed. After determining their relative velocity, the temperatures are calculated based on the scheme of a moving point source in the limiting state.

The calculation results are presented in the form of temperature fields and isotherms on the surface of a plate made of 4 mm thick AMg3 aluminum alloy for a tool with a diameter of 20 mm and the following modes – its rotation speeds of 40 and 100 rad/s and welding of 0.42 and 1.67 mm/s. After that, the area in the heating zone of the plate and inside the tool is divided into sections 2 mm wide and the dependences of the temperature distribution along the center line of welding are obtained. The main result of the performed calculations is that the highest temperature value is observed in the region of the trailing edge of the tool, while the maximum value is shifted relative to the centerline of welding by 5–8 mm in the direction opposite to the rotation of the tool. This asymmetry of isotherms is more pronounced at small radii of the tool, where its peripheral speeds are relatively low and comparable with the welding speed, as well as with a decrease in the rotation speed and with an increase in the welding speed.

Keywords: friction stir welding, temperature fields, mathematical model, rotation speed, welding speed, working tool diameter, maximum temperature, isotherm asymmetry

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

REFERENCES

1. Erofeev V.A., Karpukhin E.V., Logvinov R.V. Investigation of physical phenomena under the influence of a tool on metal in the process of friction welding. Welding and Diagnostics. 2010(1):27–33.

- Klopotov A.A., Abzaev Yu.A., Potekaev A.I., Klimenov V.A., Kurgan K.A., Klopotov V.D., Marchenko E.S. Structural-phase state and modeling of the distribution of temperature fields during friction stir welding in the AMg6 alloy. Fundamental Problems of Modern Materials Science. 2018;15(3):416–423.
- Kotlyshev R.R., Shuchev K.G., Kramskoy A.V. Calculation of temperatures in friction stir welding of aluminum alloys. Bulletin of DSTU, 2010;10(48):648–654.
- 4. Maystrenko A.L., Nesterenkov V.M., Dutka V.A., Lukash V.A., Zabolotny S.D., Tkach V.N. Simulation of thermal processes to improve the structure of metals and alloys by the method of friction with stirring. Automatic Welding. 2015(1):5–14.
- 5. Medvedev A.Yu., Pavlinich S.P., Atroshchenko V.V., Markelova N.I. Modeling the temperature field in linear friction welding. Vestnik USATU. 2010;14(37):75–79.
- 6. Poklyatskiy A.G. Features of temperature distribution in thin-sheet aluminum alloy AMg5M during friction welding with stirring. Automatic Welding. 2011(8):48–51.
- Rzayev R.A., Dzhalmukhambetov A.U., Smirnov V.V., Atuev Sh.M. Temperature field dynamics and assessment of technological parameters in friction stir welding of bimetallic plates. Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2016;18:(2):274–278.
- 8. Rykalin N.N. Calculations of thermal processes during welding. M., Mashgiz, 1951, 296 p.
- Statsenko V.N., Negoda E.N., Suhorada A.E. Investigation of heat input and temperature fields in friction stir welding. FEFU: School of Engineering Bulletin. 2017(32):150–155. DOI: DOI.org/10.5281/zenodo.897023
- 10. Statsenko V.N., Suhorada A.E. Generalization of heat generation distribution during friction stir welding. FEFU: School of Engineering Bulletin. 2021;(47):21–28. DOI: https://doi.org/10.24866/2227-6858/2021-2-3