

Технология и организация судостроения и судоремонта

Научная статья

УДК 621.791.14:62-97

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-2/39-46>

В.Н. Стаценко, М.В. Бернавская, Р.Х. Садыков

СТАЦЕНКО ВЛАДИМИР НИКОЛАЕВИЧ – д.т.н., профессор, vladsta@mail.ru

Политехнический институт

Дальневосточный федеральный университет

Владивосток, Россия

БЕРНАВСКАЯ МАЙЯ ВЛАДИМИРОВНА – доцент, bernavskaya@mail.ru

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

Санкт-Петербург, Россия

САДЫКОВ РУСЛАН ХАНАФЬЕВИЧ – заведующий лабораторией разрушающего контроля,
sadykov_rh@bk.ru

ООО «Тихоокеанский ГАЦ»

Владивосток, Россия

Асимметрия температурных полей при сварке трением с перемешиванием

Аннотация. В процессе сварки трением с перемешиванием температурные поля в зоне соединения и их распределение существенным образом влияют на процессы массопереноса и фазовые превращения. В данной работе представлены результаты анализа выявленной асимметрии распределения температур в области их максимальных значений в пластине из алюминиевого сплава АМгЗ при обработке его инструментами разных диаметров. Для этих расчетов разработана программа в пакете *Mathlab*, в которой использованы экспериментальные данные по тепловыделениям при линейной сварке трением с перемешиванием при разных скоростях вращения и перемещения инструмента различных диаметров. Результаты расчетов приведены в виде полей изотерм на поверхности пластины из алюминиевого сплава АМгЗ толщиной 4 мм для инструментов диаметрами 10, 14 и 20 мм и следующих режимов: скорости его вращения 40-100 рад/с, скорости сварки – 0,42-67 мм/с. Параметры асимметрии изотерм характеризуются удалением зоны максимальных температур от оси вращения инструмента и смещением ее от линии сварки; эти параметры выражаются в процентах от величины радиуса инструмента. Основным результатом проведенных расчетов: с увеличением скорости вращения инструмента максимальные температуры удаляются от его оси, то есть находятся практически на внешнем диаметре инструмента, при этом смещение максимальных температур от линии сварки значительно уменьшается. С увеличением скорости сварки удаление от оси вращения и смещение от линии сварки практически не изменяются. С уменьшением диаметра инструмента максимальные температуры приближаются к оси вращения и удаляются от линии сварки.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием, температурные поля, асимметрия изотерм, удаление и смещение максимальных температур

Для цитирования: Стаценко В.Н., Бернавская М.В., Садыков Р.Х. Асимметрия температурных полей при сварке трением с перемешиванием // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2022. № 2(51). С. 39–46.

Введение

В процессе сварки трением с перемешиванием (СТП) температура в зоне сварки и ее распределение по металлу существенным образом влияют на процессы массопереноса и фазовые превращения. Скорость диффузионных процессов, обеспечивающих надежное соединение

свариваемых деталей, сильно зависит от температуры в области сваривания. Нагрев металла проводится до температуры, которая не вызывает изменения основных свойств, благодаря чему обеспечивается высокое качество получаемого соединения [2].

Таким образом, несмотря на многочисленные исследования, до настоящего времени в полной мере не изучен процесс тепловыделения и распределения температур в зоне перемешивания и формирования структуры в ядре сварного шва при СТП. Среди исследователей нет единого мнения о действующих механизмах структурообразования при этом способе сварки.

Экспериментальное измерение состояния температурного поля в связи с техническими трудностями – очень сложный процесс, так как зона нагрева при СТП закрыта вращающимся инструментом. Измерения возможны только кратковременно, до разрушения датчиков при перемещении инструмента. В некоторых исследованиях термопары размещали на поверхности образца на некотором удалении от продольной линии сварного шва, что требует поправки на расчет температур в зоне перемешивания [7].

Математическое моделирование в сочетании с другими видами исследований позволяет получить наиболее полную картину физико-механических процессов, протекающих при сварке. Однако результаты расчетов, получаемые в разных исследованиях, различаются значительным разбросом значений температур нагрева в зоне сварки алюминиевых сплавов — от 450 до 660 °С [1, 3–6].

Анализ наших экспериментов и расчетов показывает, что поля температур распределены неравномерно относительно центральной части инструмента, где происходит интенсивное перемешивание разогретых слоев свариваемых материалов [8, 9]. На передней кромке инструмента температура пластины из алюминиевого сплава АМгЗ не превышает 300 °С, на задней кромке достигает 350–500 °С для разных режимов. Температура материала в зоне перемешивания (в области центра инструмента) – 330–460 °С для разных режимов, перепад температур на входе и выходе из этой зоны может составлять 50–140 °С.

Наибольшее значение температуры наблюдается не в зоне перемешивания, а в области задней кромки инструмента. При этом максимальное значение смещено относительно средней линии сварки в направлении, противоположном вращению инструмента (рис. 1). Такое смещение максимальной температуры (асимметрия) объясняется влиянием относительной скорости вращения и перемещения (сварки). При противоположных направлениях векторов относительная скорость увеличивается, соответственно повышается тепловыделение, зона максимальной температуры смещается в этом направлении.

Асимметрия изотерм относительно средней линии сварки больше проявляется на малых радиусах инструмента, где его окружные скорости относительно невелики и соизмеримы со скоростью сварки; асимметрия увеличивается с уменьшением скорости вращения и увеличением скорости сварки [10].

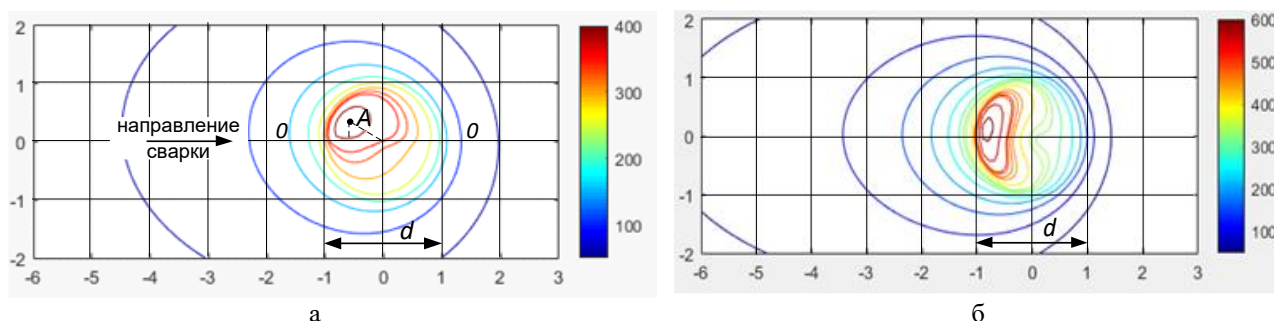


Рис. 1. Поля изотерм на поверхности пластины для инструмента $\varnothing 20$ мм при $V_{св} = 0,42$ мм/с, $\omega = 40$ с $^{-1}$ (а) и $\omega = 100$ с $^{-1}$ (б), температура указана в °С. Здесь и далее рисунки авторов

В настоящей работе проводится количественный анализ асимметрии изотерм и распределения зон наиболее высоких температур в области нагрева и перемешивания свариваемых материалов в зависимости от скоростей вращения и перемещения инструмента и его диаметров.

Техническое решение и методика расчетов

Расчеты полей температур в зоне нагрева при СТП основаны на схеме движущегося точечного источника в предельном состоянии. При этом инструмент представлен совокупностью элементарных источников нагрева, равномерно распределенных по его площади. Температурное поле рассчитывается как сумма температур от каждого элементарного (точечного) источника и производится по программе, разработанной в пакете *Mathlab*.

Диаметр инструмента разбивается на 100 ячеек, для каждой ячейки удельное тепловыделение определяется в зависимости от окружной скорости вращения V_i и скорости сварки $V_{св}$ [8]:

$$q_i = k_1 V_i^2 + k_2 V_i + k_3, \text{ МВт/м}^2, \quad (1)$$

где коэффициенты

$$k_1 = -5,198 V_{св} - 0,97, \quad (2)$$

$$k_2 = 6,83 V_{св} + 3,36, \quad (3)$$

$$k_3 = 0,099 V_{св} - 0,0072. \quad (4)$$

Температура в каждой ячейке находится в зависимости от относительной скорости $V_{отнi}$, рассчитываемой по окружной скорости вращения инструмента и скорости его перемещения [9]:

$$T_i = \frac{1}{2\pi\lambda} \sum_{i=1}^{n^2} \frac{W_i}{R_i} \exp\left(-\frac{V_{отнi}}{2 \cdot a} \cdot (x_i + R_i)\right), \quad (5)$$

где W_i – мощность тепловыделения на элементарной площадке, Вт; $a = \lambda/c \cdot \rho$ – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$; λ – коэффициент теплопроводности, $\text{Вт/м}\cdot\text{К}$; c – удельная теплоемкость, $\text{Дж/кг}\cdot\text{К}$; ρ – плотность, кг/м^3 ; R – пространственный радиус-вектор источника тепловыделения в подвижной системе координат.

Результаты расчетов для инструмента диаметром 20 мм и диаметром 10 и 14 мм приведены в виде полей температур на поверхности рабочей пластины из алюминиевого сплава АМг3 толщиной 4 мм с постоянными значениями теплопроводности, удельной теплоёмкости и плотности (рисунки 1, 2). Режимные параметры процессов нагрева: скорости вращения инструмента $\omega = 40$ и 100 с^{-1} при скоростях сварки $V_{св} = 0,42 \text{ мм/с}$. Аналогичные поля получены при $\omega = 60$ и 80 с^{-1} и $V_{св} = 0,67, 1$ и $1,67 \text{ мм/с}$.

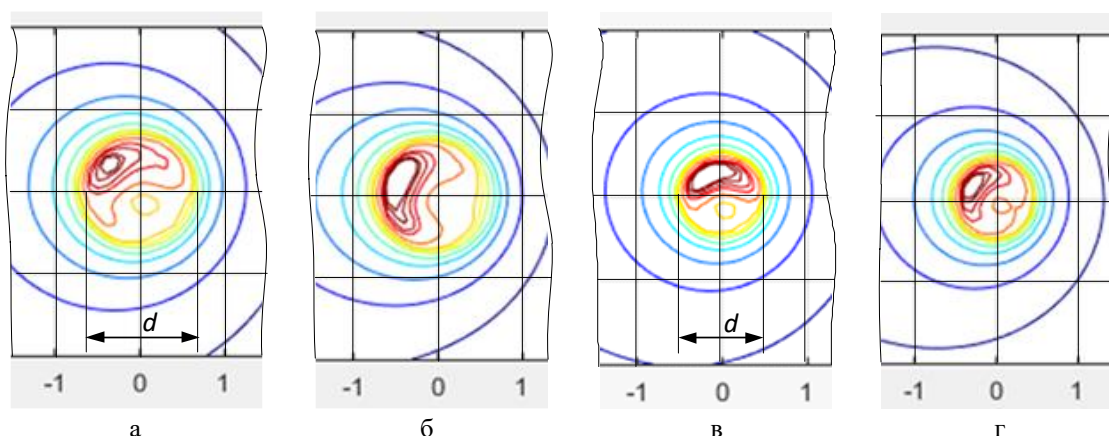


Рис. 2. Поля температур на поверхности пластины для инструментов $\varnothing 14 \text{ мм}$ (а, б) и $\varnothing 10 \text{ мм}$ (в, г) при $V_{св} = 0,42 \text{ мм/с}$, $\omega = 40 \text{ с}^{-1}$ (а, в) и $\omega = 100 \text{ с}^{-1}$ (б, г)

Для характеристики асимметрии на температурном поле выбирается центр наибольшей температуры A (см. рис. 1а) и находятся его координаты. В качестве координат выбраны удаление этого центра от оси вращения l и смещение h его относительно линии сварки $0-0$. Эти значения рассчитываются в процентах от радиуса инструмента. Для качественного перемешивания разогретого материала важное значение имеет площадь зоны максимальных температур, которая определялась по размерам соответствующих изотерм.

Результаты и анализ расчета температурных полей

Для расчета характеристик асимметрии температурных полей на пластине из алюминиевого сплава АМгЗ толщиной 4 мм для инструмента диаметром 20 (рисунки 3, 4) и диаметрами 10 и 14 мм (рис. 5) задавались следующие режимные параметры: скорости вращения инструмента $\omega = 40\text{--}100\text{ с}^{-1}$ и скорости сварки $V_{\text{св}} = 0,42\text{--}1,67\text{ мм/с}$. Результаты измерения площади зоны максимальных температур (в мм^2) приведены на рис. 6.

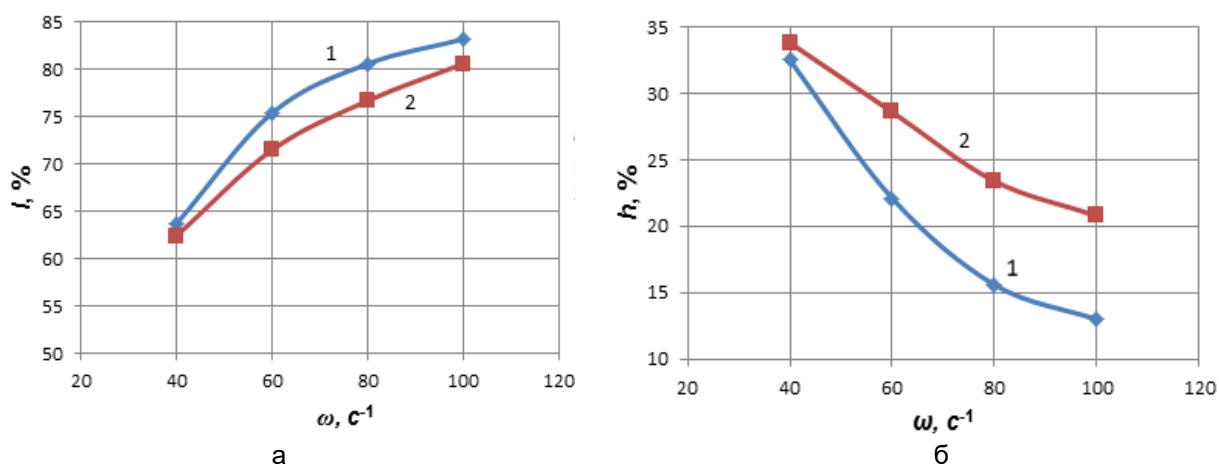


Рис. 3. Удаление от оси вращения инструмента (а) и смещение от линии сварки (б) центра максимальных температур для инструмента $\varnothing 20\text{ мм}$. 1 – $V_{\text{св}} = 0,42\text{ мм/с}$; 2 – $V_{\text{св}} = 1,67\text{ мм/с}$

Анализ этих данных позволяет сделать следующие выводы.

1. С увеличением скорости вращения инструмента максимальные температуры удаляются от его оси. Так, при скорости вращения $\omega = 40\text{ с}^{-1}$ центр максимальных температур находится на удалении от оси вращения инструмента на $l = 62\text{--}64\%$ от его радиуса, при $\omega = 100\text{ с}^{-1}$ это удаление составляет $l = 80\text{--}84\%$ (см. рис. 3а), то есть максимальные температуры находятся практически на внешнем диаметре инструмента.

2. С увеличением скорости вращения инструмента смещение максимальных температур от линии сварки значительно уменьшается. Так, при $\omega = 40\text{ с}^{-1}$ смещение составляет $32\text{--}35\%$, а при $\omega = 100\text{ с}^{-1}$ – $13\text{--}22\%$ (см. рис. 3б).

3. С увеличением скорости сварки удаление от оси вращения и смещение от линии сварки практически не изменяются (см. рис. 4).

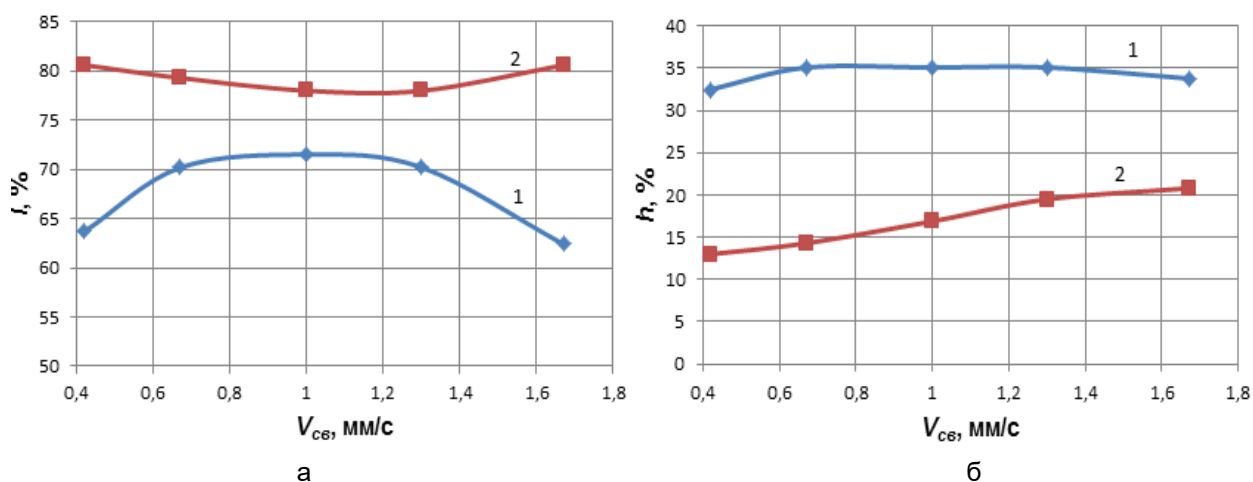


Рис. 4. Удаление от оси вращения инструмента (а) и смещение от линии сварки (б) центра максимальных температур для инструмента $\varnothing 20\text{ мм}$. 1 – $\omega = 40\text{ с}^{-1}$; 2 – $\omega = 100\text{ с}^{-1}$

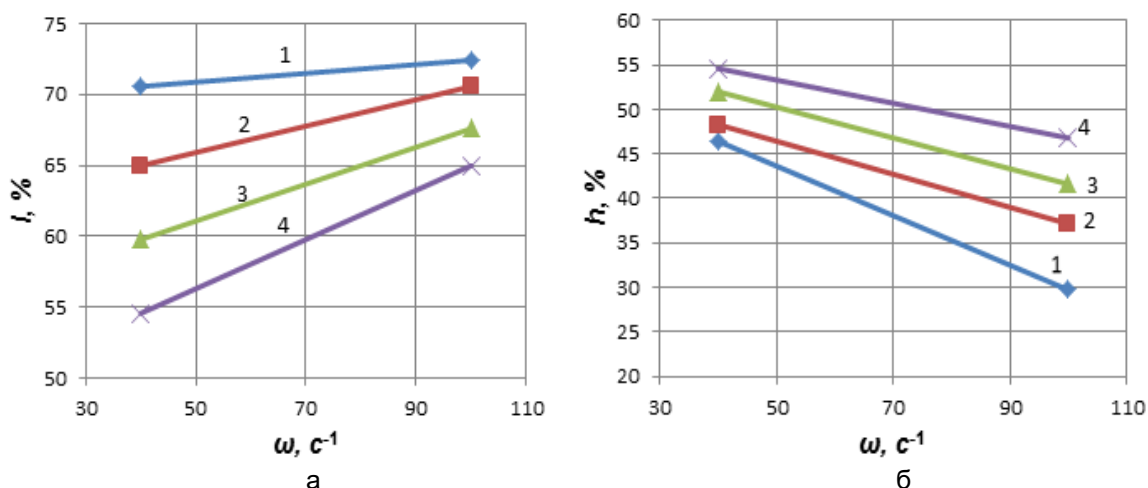
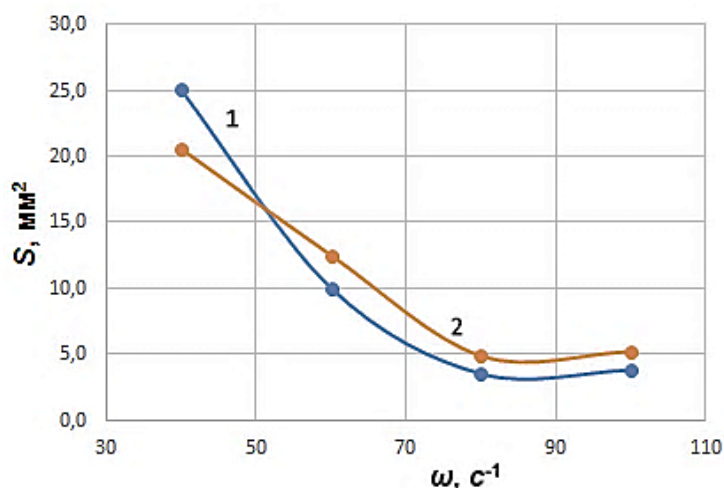


Рис. 5. Удаление от оси вращения инструмента (а) и смещение от линии сварки (б) центра максимальных температур для инструментов $\varnothing 14$ мм (1, 2) и $\varnothing 10$ мм (3, 4) при $V_{\text{св}} = 0,42$ мм/с (1, 3) и $V_{\text{св}} = 1,67$ мм/с (2, 4)

4. С уменьшением диаметра инструмента от 20 до 10 мм при разных скоростях сварки и скорости вращения $\omega = 40 \text{ с}^{-1}$ удаление центра максимальных температур слабо изменяется в диапазоне 60–70%; при скорости $\omega = 100 \text{ с}^{-1}$ это удаление снижается с 80–85 до 63–67%, то есть с уменьшением диаметра максимальные температуры приближаются к оси вращения (рис. 5а).

5. С уменьшением диаметра инструмента от 20 до 10 мм при разных скоростях сварки и скорости вращения $\omega = 40 \text{ с}^{-1}$ смещение центра максимальных температур увеличивается от 30–35 до 50–55%, при скорости вращения $\omega = 100 \text{ с}^{-1}$ это смещение увеличивается от 13–20 до 45%, то есть с уменьшением диаметра максимальные температуры удаляются от линии сварки (см. рис. 5б).



**Рис. 6. Площадь зоны максимальных температур для инструмента $\varnothing 20$ мм
1 - $V_{\text{св}} = 0,42$ мм/с; 2 - $V_{\text{св}} = 1,67$ мм/с**

6. С увеличением скорости вращения инструмента площадь зоны максимальных температур при скоростях сварки $V_{\text{св}} = 0,42\text{--}1,67$ мм/с значительно уменьшается – от 20–25 до 4–5 мм^2 , скорость сварки слабо влияет на площадь этой зоны (см. рис. 6).

7. С уменьшением диаметра инструмента от 20 до 10 мм при скорости вращения $\omega = 40 \text{ с}^{-1}$ площадь зоны максимальных температур уменьшается от 20–25 до 4–7 мм^2 , при скорости вращения $\omega = 100 \text{ с}^{-1}$ эта площадь изменяется незначительно – в пределах 4–5 мм^2 .

Заключение

Основным результатом расчетов является то, что центр максимальных температур находится на удалении от оси вращения инструмента на $l = 62\text{--}84\%$ от его радиуса, то есть практически в зоне задней кромки инструмента. При этом с увеличением скорости вращения инструмента смещение максимальных температур от линии сварки существенно уменьшается. С увеличением скорости сварки удаление и смещение практически не изменяются. С уменьшением диаметра инструмента максимальные температуры приближаются к оси вращения и удаляются от линии сварки. Площадь зоны максимальных температур с увеличением скорости вращения инструмента значительно уменьшается, скорость сварки слабо влияет на площадь этой зоны.

Полученные данные по асимметрии температурных полей имеют важное значение при разработке конструкции, геометрии и технологических схем инструмента для сварки трением с перемешиванием.

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

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. Ильющенко А.Ф., Г.Ф. Громыко, А.А. Радченко, А.И. Шевцов, Д.В. Бубен Моделирование тепловых процессов при сварке трением с перемешиванием // Порошковая металлургия. 2020. Вып. 43. С. 25–35.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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 Российской академии наук. 2016. Т.18, № 1(2). С. 274–278.
7. Покляцкий А.Г. Особенности распределения температур в тонколистовом алюминиевом сплаве АМг5М при сварке трением с перемешиванием // Автоматическая сварка. 2011. № 8. С. 48–51.
8. Стаценко В.Н., Сухорада А.Е. Обобщение распределения тепловыделений в процессе сварки трением с перемешиванием // Вестник Инженерной школы Дальневост. федерал. ун-та. 2021. № 2(47). С. 21–28. doi: 10.24866/2227-6858/2021-2-3
9. Стаценко В.Н., Негода Е.Н., Суханов М.А. Моделирование температурных полей в процессе сварки трением с перемешиванием // Вестник Инженерной школы Дальневост. федерал. ун-та. 2021. № 2(47). С. 21–28. doi: 10.24866/2227-6858/2021-3-8

Original article

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-2/39-46>

Statsenko V., Bernavskaya M., Sadykov R.

VLADIMIR N. STATSENKO, Doctor of Technical Sciences, Professor, vladsta@mail.ru✉

Polytechnical Institute

Far Eastern Federal University

Vladivostok, Russia

MAYA V. BERNAVSKAYA, Associate Professor, bernavskaya@mail.ru

St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great

Saint-Petersburg, Russia

RUSLAN K. SADYKOV, Head of the Laboratory of Destructive Control, sadykov_rh@bk.ru

OOO "Pacific GAC"

Vladivostok, Russia

Temperature fields asymmetry in friction stir welding

Abstract. In friction stir welding, temperature fields in the joint zone and their distribution significantly affect the processes of mass transfer and phase transformations. This paper reveals the asymmetry in the temperature distribution and the region of their maximum values in a plate made of aluminum alloy AMg3 during its processing with tools of different diameters. For these calculations, a program was developed in the Mathlab package, which uses experimental data on heat release during linear friction stir welding at different speeds of rotation and movement of a tool of various diameters. The calculation results are shown as isotherm fields on the surface of a AMg3 aluminum alloy plate 4 mm thick for tools with diameters of 10, 14 and 20 mm and the following modes: its rotation speed is 40-100 rad/s, welding speed is 0.42-67 mm/ from. The asymmetry parameters of isotherms are characterized by the removal of the zone of maximum temperatures from the axis of rotation of the tool and its displacement from the welding line. These parameters are expressed as a percentage of the tool radius. The main result of the performed calculations is that with an increase in the rotation speed of the tool, the maximum temperatures move away from its axis, i.e. are located almost on the outer diameter of the tool, while the offset of maximum temperatures from the welding line is significantly reduced. With an increase in the welding speed, the distance from the axis of rotation and the displacement from the welding line practically do not change. As the tool diameter decreases, the maximum temperatures approach the axis of rotation and move away from the welding line.

Keywords: friction stir welding, temperature fields, asymmetry of isotherms, removal and shift of maximum temperatures

For citation: Statsenko V., Bernavskaya M., Sadykov R. Temperature fields asymmetry in friction stir welding. FEFU: School of Engineering Bulletin. 2022;(2):39-46. (In Russ.).

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

1. Erofeev V.A. Karpukhin E.V. Logvinov R.V. Investigation of physical phenomena when a tool acts on a metal during friction welding. *Welding and Diagnostics*. 2010;(1):27–33.
2. Ilyushchenko A.F., Gromyko G.F., Radchenko A.A., Shevtsov A.I., Buben D.V. Modeling of thermal processes in friction stir welding. *Powder metallurgy*. 2020;43:25–35.
3. Klopotov A.A. Abzaev Yu.A., Potekaev A.I., Klimenov V.A., Kurgan K.A., Klopotov V.D., Marchenko E. Structural-phase state and modeling of distribution of temperature fields during friction stir welding in AMg6 alloy. *Fundamental problems of modern materials science*. 2018; 15(3):416–423.

4. Kotlyshev R.R., Shuchev K.G., Kramskoy A.V. Calculation of temperatures in friction stir welding of aluminum alloys. *Vestnik DSTU*. 2010;10(5):648–654.
5. Maistrenko A.L., Nesterenkov V.M., Dutka V.A., Lukash V.A., Zabolotny S.D., Tkach V. N. Modeling of thermal processes to improve the structure of metals and alloys by friction with stirring. *Automatic welding*. 2015;(1):5–14.
6. Poklyatsky A.G. Features of temperature distribution in thin-sheet aluminum alloy AMg5M during friction stir welding. *Avtomaticheskaya svarka*. 2011;(8):48–51.
7. Rzaev R.A., Dzhalukhambetov A.U., Smirnov V.V., Atuev Sh.M. Temperature field dynamics and assessment of technological parameters in friction stir welding of bimetallic plates. *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2016;18(1):274–278.
8. Statsenko V.N., Sukhorada A.E. Generalization of the distribution of heat release during friction stir welding. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2021;(2):21–28. doi: 10.24866/2227-6858/2021-2-3
9. Statsenko V.N., Negoda E.N., Sukhanov M.A. Modeling of temperature fields in the process of friction stir welding. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2021;(20):21–28. doi: 10.24866/2227-6858/2021-3-8