ВЕСТНИК ИНЖЕНЕРНОЙ ШКОЛЫ ДВФУ. 2021. № 2(47)

Судовые энергетические установки

DOI: https://doi.org/10.24866/2227-6858/2021-2-3 УДК 621.791.14:62-97

В.Н. Стаценко, А.Е. Сухорада

СТАЦЕНКО ВЛАДИМИР НИКОЛАЕВИЧ – д.т.н., профессор (автор, ответственный за переписку), SPIN: 8321-3805, vladsta@mail.ru СУХОРАДА АЛЕКСЕЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ – инженер, alexeyman_09@mail.ru Политехнический институт Дальневосточный федеральный университет Владивосток, Россия

Обобщение распределения тепловыделений в процессе сварки трением с перемешиванием

Аннотация: Сварка трением с перемешиванием – перспективный высокотехнологичный и высокопроизводительный процесс. Важный элемент этой технологии – определение температуры материала в зоне перемешивания, ее можно рассчитать по величине тепловыделения, вносимого в зону сварки торцом вращающегося инструмента. В данной работе представлены результаты авторского экспериментального исследования тепловыделений при точечной и линейной сварке трением с перемешиванием при различных скоростях вращения инструмента и скоростях сварки. Для нахождения этой величины авторы статьи выбрали схему экспериментов, в которой свариваемый материал – алюминиевый сплав АМг5 моделируется в виде рабочей трубки диаметром 20 мм, а инструмент из стали Р6М5 – в виде рабочей пластины. В лаборатории Департамента промышленной безопасности Политехнического института ДВФУ авторы спроектировали и изготовили два экспериментальных стенда для исследования момента трения и удельного тепловыделения при точечной и линейной сварке для скоростей вращения экспериментальной трубки 0,4–1,3 м/с (42–105 рад/с) и скорости перемещения инструмента (скорости сварки) в диапазоне 0,42–1,67 мм/с. Зависимость удельного тепловыделения от линейной скорости вращения рабочей трубки при разных скоростях сварки имеет экспоненциальный вид. При этом максимальные значения и интенсивность изменения удельного тепловыделения уменьшаются с повышением линейной скорости вращения инструмента и увеличением скорости сварки. Полученные результаты удельного тепловыделения обобщены в виде уравнения, с его помощью рассчитаны тепловыделения на всей площади торца рабочего инструмента, который предназначен для сварки трением с перемешиванием. При этом задавались разные его диаметры при разных скоростях вращения и сварки. В процессе экспериментов на стенде учтены тепловые потери теплопроводностью вдоль стержня (на котором закреплена рабочая трубка) и от рабочей пластины через изолирующую прокладку на рабочий стол станка, а также потери конвекцией от поверхности вращающейся рабочей трубки в окружающую среду.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием, момент трения, удельное тепловыделение, скорость вращения, скорость сварки, диаметр рабочего инструмента, тепловые потери

Введение

Сварка трением с перемешиванием (СТП) проводится вращающимся металлическим рабочим инструментом, который представляет собой стержень с буртом (заплечиком), из него выступает пин. При сварке инструмент, вращаясь с частотой ω , погружается в свариваемый металл и перемещается вдоль стыка деталей со скоростью сварки V_{св}. При этом заплечик разогревает металл за счет трения и защищает место сварки от воздействия окружающей среды. В результате нагрева и приложенного давления металл под буртом переходит

[©] Стаценко В.Н., Сухорада А.Е., 2021

Статья: поступила: 20.02.2021; рецензия: 16.03.2021; финансирование: Дальневосточный федеральный университет.

в размягченное пластифицированное состояние. За счет перемешивания этого металла с помощью пина и приложения к нему давления за инструментом образуется сварной шов.

Сварка трением с перемешиванием относится к способам сварки в твердой фазе, поэтому важно знать температурные режимы в зоне нагрева. Экспериментальное измерение температуры в зоне нагрева связано с определенными трудностями, так как рабочий инструмент в этот момент вращается и закрывает зону нагрева плоской торцевой поверхностью. Большинство публикаций (см., например, [1–4]), посвященных расчету распределения температур в процессе СТП, основаны на решении уравнения теплопроводности. Но для таких вычислений необходим основной параметр – величина тепловой мощности, выделяемой в зоне нагрева за счет трения (тепловыделение).

Распределение тепловыделения по радиусу площади контакта инструмента с заготовкой имеет параболический вид [2, 4]. Это связано с неравномерным распределением линейной скорости вращения торца инструмента по радиусу площади нагрева, которая изменяется от нуля в центре до максимума на внешнем радиусе.

Цель настоящей статьи – обобщить результаты экспериментального и расчетного исследования изменения тепловыделения по площади контакта инструмента при сварке трением с перемешиванием.

Техническое решение и методика эксперимента

Для исследования зависимости момента трения и тепловыделения от скорости вращения инструмента при точечной сварке трением с перемешиванием (ТСТП) в 2018 г. нами был спроектирован и в лаборатории Департамента промышленной безопасности Политехнического института ДВФУ изготовлен экспериментальный стенд. Основной его элемент – цилиндрическая рабочая трубка из алюминиевого сплава АМг5, который моделирует материал свариваемых пластин, ее наружный диаметр составляет 20 мм, толщина стенки – 2 мм, длина – 40 мм. Трубка закреплена на стальной оправке и вращается по поверхности рабочей пластины из инструментальной быстрорежущей стали Р6М5, которая моделирует материал инструмента для сварки трением с перемешиванием. При этом рабочая пластина установлена через теплоизолирующую прокладку на подвижной верхней пластине, закрепленной (через упорный шариковый подшипник) на основании стенда и рабочего стола вертикально-фрезерного станка [5].

При вращении рабочей трубки и прижатии ее с определенным усилием к рабочей пластине момент трения определяется через силу F, измеряемую электронным динамометром, и длину стержня (плеча) L.

Крутящий момент силы трения определяется зависимостью

$$M_{\rm TD} = F \cdot L, \, \text{H-M.} \tag{1}$$

При экспериментальном измерении тепловыделения предполагается исключение поглощенной энергии на деформацию кристаллической решетки, при этом вся механическая энергия переходит в тепловую, ее удельное значение определяется зависимостью

$$q = \frac{M_{\rm Tp} \cdot \omega}{S} \cdot B_{\rm T/M^2}, \qquad (2)$$

где $M_{\rm тp}$ – крутящий момент сил трения, Н·м; ω – угловая скорость вращения инструмента, с⁻¹; *S* – площадь контакта, м².

Эксперименты по тепловыделению проводились на универсальном вертикально-фрезерном станке BM127. При этом за счет регулирования усилия сжатия рабочей трубки и рабочей пластины температура места контакта на всех режимах поддерживалась постоянной: 335±15 °C [5]. Измерение температур производилось бесконтактным методом с помощью пирометра Tecman TM900, диапазон измеряемых температур от –50 до +950 °C.

При проведении экспериментов при нагреве инструмента и рабочей пластины происходят тепловые потери теплопроводностью по телу оправки от рабочей трубки к хвостовику, закрепленному в патроне станка. Также часть теплоты теряется теплопроводностью от рабочей пластины через теплоизолирующую прокладку к подвижной верхней пластине подшипника. Кроме этого часть теплоты уносится конвекцией от вращающейся рабочей трубки в окружающий воздух. Проведенные необходимые измерения и результаты наших расчетов показали, что на разных режимах потеря теплоты вдоль стержня оправки инструмента составляет 8–10%, от рабочей пластины через теплоизолирующую прокладку – не превышает 9–15%, от цилиндрической поверхности вращающейся рабочей трубки – менее 2,5–4,5%. Эти потери учтены в наших расчетах тепловыделения.

Анализ результатов экспериментов показывает, что при равномерном увеличении скорости вращения инструмента интенсивность уменьшения момента трения различна. Интенсивность уменьшается более значительно на небольших скоростях (до 1,0 м/с) и менее значительно – на скоростях вращения более 1,0 м/с (рис. 1). Расчетная зависимость удельной мощности тепловыделения от скорости вращения при этом носит сложный характер: она увеличивается при скоростях вращения в диапазонах 0,4–0,83 м/с и 1,05–1,67 м/с и уменьшается при скоростях вращения 0,83–1,05 м/с. Такая зависимость определяется тем, что с увеличением скорости вращения момент трения уменьшается с разной интенсивностью [6].

Для исследования зависимости момента трения и тепловыделения от скорости вращения инструмента и линейной скорости его перемещения (скорости сварки) при линейной сварке трением с перемешиванием (ЛСТП) нами был спроектирован и в лаборатории Департамента промышленной безопасности изготовлен второй экспериментальный стенд, аналогичный предыдущему (рис. 2). Основное его отличие: рабочая трубка при вращении касается рабочей пластины только одной стороной торцовой поверхности. При этом рабочая пластина установлена под небольшим углом через теплоизолирующую прокладку и угловую вставку к подвижной верхней пластине. Эта пластина через подшипник и шариковую опору закреплена на основании стенда и рабочем столе вертикально-фрезерного станка.



Рис. 1. Зависимость удельного тепловыделения от скорости вращения рабочей трубки при ТСТП

Так как рабочая трубка касается пластины только одной стороной торцовой поверхности, площадь контакта рассчитывается как площадь сегмента круга:

$$S = \frac{1}{2} \cdot R^2 (\alpha - \sin \alpha), \, \mathrm{M}^2, \tag{3}$$

где
$$\alpha = 2 \arccos \left(1 - \frac{h}{R} \right)$$
 – угол сегмента, рад;
 $R = d_2/2$ – радиус круга, м;
 $h = \frac{1}{2} (d_2 - d_1)$ – высота сегмента, м;
 d_2, d_1 – наружный и внутренний диаметры рабочей трубки, м.
Остальные измерения аналогичны используемым в [5].



Рис. 2. Схема экспериментального стенда для исследования тепловыделений при ЛСТП: 1 – рабочая трубка; 2 – стальная оправка; 3 – рабочая пластина; 4 – теплоизолирующая прокладка; 5 – угловая вставка; 6 – подвижная верхняя пластина; 7 – подшипник; 8 – основание; 9 – тяга; 10 – электронный динамометр. Здесь и далее рисунки авторов

Результаты экспериментов и расчетов

Эксперименты по тепловыделению при ЛСТП проводились нами в лаборатории Департамента промышленной безопасности на скоростях вращения шпинделя фрезерного станка ВМ127 в диапазоне 400–1000 об/мин (42–105 с⁻¹), что соответствует линейной скорости вращения рабочей трубки V = 0,4-1,3 м/с, скорость сварки варьировалась в диапазоне 25–100 мм/мин (0,42–1,67 мм/с).

Результаты измерений и расчетов удельного тепловыделения при СТП (ТСТП и ЛСТП) представлены на рис. 3.



Рис. 3. Удельное тепловыделение при СТП: 1 – V_{св} = 0 мм/с; 2 – 0,42 мм/с; 3 – 0,67 мм/с; 4 – 1,05 мм/с; 5 – 1,3 мм/с; 6 – 1,67 мм/с

Анализ этих данных показывает следующее.

Зависимость удельного тепловыделения от линейной скорости вращения рабочей трубки при разных скоростях сварки имеет экспоненциальный вид. При этом максимальные величины и интенсивность изменения этого значения повышаются с увеличением скорости сварки и уменьшением линейной скорости вращения рабочей трубки. Так, при скорости сварки $V_{cB} = 25$ мм/мин (0,42 мм/с) максимальное удельное тепловыделение составляет

2,8 MBт/м² при линейной скорости вращения рабочей трубки V = 1 м/с, соответственно при $V_{cB} = 63$ мм/мин (1,05 мм/с) – 4,8 MBт/м² (V = 0,9 м/с) и при $V_{cB} = 100$ мм/мин (1,67 мм/с) – 5,5 MBт/м² (V = 0,7 м/с).

Эти данные подтверждаются результатами, полученными при исследовании ТСТП ($V_{cB} = 0 \text{ мм/c}$), на этом режиме значение тепловыделения достигает 2,4 МВт/м² при линейной скорости вращения 1,1–1,2 м/с (кривая 1, рис. 3). Эта кривая получена по данным рис. 1 с учетом диаметра рабочей трубки.

Интенсивность изменения удельного тепловыделения значительно зависит от скорости сварки. Так, при $V_{cB} = 0$ мм/с повышение этой величины от минимального до максимального значения составляет 2,4 раза, при $V_{cB} = 0,67$ мм/с – 3,5 раза, а при $V_{cB} = 1,67$ мм/с – уже 5,5 раз.

Аппроксимацией результатов, представленных на рис. 3, получены формулы расчета удельного тепловыделения (МВт/м²) в зависимости от линейной скорости вращения и скорости сварки:

$$q_{\rm ctfl} = k_1 V^2 + k_2 V + k_3,\tag{4}$$

где коэффициенты

$$k_{I} = -5,198V_{\rm CB} - 0,97,$$

$$k_{2} = 6,83V_{\rm CB} + 3,36,$$

$$k_{3} = 0,099V_{\rm CB} - 0,0072.$$
(5)

Здесь V – линейная скорость вращения рабочей трубки, м/с; V_{св} – скорость сварки, мм/с.

Уравнение (4) обобщает аппроксимирующие кривые, представленные на рис. 3, с погрешностью не более 10%.

Зависимость оптимальной линейной скорости вращения (при которой можно получить максимальное тепловыделение) от скорости сварки представлена на рис. 4. С увеличением скорости сварки оптимальная линейная скорость вращения снижается в соответствии с зависимостью

$$V = -0.426V_{\rm cB} + 1.387.$$

Зависимость удельного тепловыделения от скорости сварки при различных значениях линейной скорости вращения представлена на рис. 5. Эти данные показывают, что значительное влияние скорость сварки оказывает на тепловыделение при значениях более 0,4–0,6 мм/с. При скорости вращения 1 м/с и скорости сварки более 1 мм/с значение удельного тепловыделения ления остается постоянным.









(6)

По зависимостям (4)–(5) для инструмента сварки трением с перемешиванием произведены расчеты удельного и полного тепловыделения на каждом кольцевом участке шириной 2 мм, а затем суммарного тепловыделения на инструменте, эти расчеты аналогичны представленным в [6]. Результаты расчета зависимости полного тепловыделения на всей площади контакта от радиуса инструмента при скоростях сварки 0, 1,05 и 1,67 мм/с представлены на рис. 6.



Эти данные позволяют оценить величину тепловыделения от инструмента разных радиусов и при разных скоростях его вращения. Так, при скорости сварки 0 мм/с на инструменте радиусом 8 мм при скорости его вращения 20 с⁻¹ можно получить тепловыделение в 0,12 кВт, а на скорости 100 с⁻¹ – 0,45 кВт. При скорости сварки 1,05 мм/с на том же инструменте при скорости вращения 20 с⁻¹ тепловыделение увеличивается до 0,32 кВт, а на скорости 100 с⁻¹ – до 1,05 кВт. Более высокое значение тепловыделения можно получить при скорости сварки 1,67 мм/с: при скорости вращения инструмента 20 с⁻¹ тепловыделение увеличивается до 0,42 кВт, а при 100 с⁻¹ – до 1,25 кВт. Аналогичные данные можно получить для любых значений радиусов инструмента и скоростей его вращения и сварки.

Заключение

При сварке трением с перемешиванием алюминиевого сплава АМг5 с использованием инструмента из быстрорежущей стали P6M5 зависимость удельного тепловыделения от линейной скорости вращения инструмента при разных скоростях сварки имеет экспоненциальный вид. При этом максимальные значения и интенсивность изменения удельного тепловыделения уменьшаются с повышением линейной скорости вращения инструмента и увеличением скорости сварки. Полное тепловыделение от инструмента зависит от его радиуса, скоростей вращения и сварки. Так, для выделения тепловой мощности в 0,8 кВт при скорости сварки 1,67 мм/с (100 мм/мин) и скорости вращения 100 с⁻¹ необходимо использовать инструмент диаметром 13 мм, при скорости вращения 40 с⁻¹ – диаметром 16 мм, а при 20 с⁻¹ можно применить диаметр 20 мм. Аналогично можно найти размеры инструмента для любых других значений тепловыделений и скоростей вращения инструмента и сварки.

В дальнейшем нам необходимо рассмотреть температурные поля в зоне нагрева при сварке трением с перемешиванием при изменении скоростей вращения инструмента и сварки.

Вклад авторов в статью: В.Н. Стаценко – проектирование стенда, обработка результатов, оформление статьи, А.Е. Сухорада – поиск и анализ литературных источников, изготовление стенда, проведение экспериментов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Карманов В.В., Каменева А.Л. Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов: сущность и специфические особенности процесса, особенности структуры сварного шва // Вестник Пермского национальн. исследовательского политехн. ун-та. Аэрокосмическая техника. 2012. № 32. С. 67–80.
- 2. 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. 693–699.
- 3. 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. С. 76–81.
- 4. Рзаев Р.А., Чуларис А.А., Джалмухамбетов А.У., Атуев Ш.М. Динамическая модель распределения температуры в металле при сварке трением с перемешиванием // Фундаментальные исследования. 2016. № 3-1. С. 47–55.
- 5. Statsenko V., Sukhorada A., Bernvskaya M. Research of Heat Input in Friction Stir Welding. Materials Science Forum. 2019, vol. 945, p. 634–638. DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.945.634
- Statsenko V., Sukhorada A., Lelyukhin V. Modeling Heat Input when Friction Stir Welding. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. Tomsk, 2019, vol. 681, N 1. DOI:10.1088/1757-899X/681/1/012042

FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN. 2021. N 2/47 *Marine Engines and Auxiliary Machinery*

www.dvfu.ru/en/vestnikis

DOI: https://doi.org/10.24866/2227-6858/2021-2-3

Statsenko V., Sukhorada A.

VLADIMIR STATSENKO, Doctor of Engineering Sciences, Professor (Corresponding Author), vladsta@mail.ru ALEXEY SUKHORADA, Engineer, alexeyman_09@mail.ru Polytechnical Institute, *Far Eastern Federal University* Vladivostok, Russia

Generalization of heat generation distribution in the process of friction stir welding

Abstract: Friction stir welding is the most promising high-tech and high-performance process. An important element of this technology is determination of the temperature of the material in the mixing zone, which can be calculated from the amount of heat generated in the friction welding zone by the edge of the rotating tool. This paper presents the results of the author's experimental study of heat release in spot and linear friction stir welding at different speeds of rotation of the tool and welding speeds. To find this value, the authors of the article chose a scheme of experiments in which the material to be welded – aluminum alloy AMg5 – is modeled in the form of a working tube with a diameter of 20 mm, and a tool made of R6M5 tool steel – in the form of

ВЕСТНИК ИНЖЕНЕРНОЙ ШКОЛЫ ДВФУ. 2021. № 2(47)

a working plate. In the laboratory of the Industrial Safety Department of FEFU Polytechnic Institute, the authors designed and manufactured two experimental stands for studying the friction moment and specific heat release during spot and linear welding for the experimental tube rotation speeds of 0.4–1.3 m/s (42–105 rad/s) and tool movement speed (welding speed) in the range of 0.42–1.67 mm/s. The dependence of the specific heat release on the linear speed of rotation of the working tube at different welding speeds has an exponential form. In this case, the maximum values and intensity of changes in the specific heat release decrease with increase in the linear speed of rotation of the tool and the respective increase of the welding speed. The obtained results of the specific heat release are generalized in the form of an equation; with the help of which the heat release over the entire area of the end face of the working tool intended for friction stir welding is calculated. At the same time, its different diameters were set at different speeds of its rotation and welding. working tube into the environment.

Keywords: friction stir welding, friction torque, specific heat release, rotation speed, welding speed, working tool diameter, heat loss

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

REFERENCES

- 1. Karmanov V.V., Kameneva A.L. Friction welding with stirring of aluminum alloys: the essence and specific features of the process, features of the structure of the welded seam. Bulletin of Perm National Research Polytechnic Univ. Aerospace Engineering. 2012(32):67–80.
- 2. Kotlyshev R.R., Shuchev K.G., Kramskoy A.V. Calculation of temperatures for friction welding with mixing of aluminum alloys. Bulletin of the DGTU. 2010(10);5:693–699.
- 3. Medvedev A.Yu., Pavlinich S.P., Atroshchenko V.V., Markelova N.I. Modeling of the temperature field for linear friction welding. Bulletin of the USATU. 2010;2:76–81.
- 4. Rzaev R.A., Chularis A.A., Dzhalmukhambetov A.U., Atuev Sh.M. Dynamic model of temperature distribution in the metal for friction welding with mixing. Fundamental Research. 2016(3–1):47–55.
- 5. Statsenko V., Sukhorada A., Bernvskaya M. Research of Heat Input in Friction Stir Welding. Materials Science Forum. 2018, vol. 945, p. 634–638. DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.945.634
- Statsenko V., Sukhorada A., Lelyukhin V. Modeling Heat Input when Friction Stir Welding. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. Tomsk, 2019, vol. 681, N 1. DOI:10.1088/1757-899X/681/1/012042