

DOI.org/10.5281/zenodo.1286013

УДК 621.791.14:62-97

В.Н. Стаценко, А.Е. Сухорада, В.В. Романова, К.А. Полуцкий

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

СУХОРАДА АЛЕКСЕЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ – аспирант, e-mail: alexeyman_09@mail.ru

РОМАНОВА ВИКТОРИЯ ВЯЧЕСЛАВОВНА – магистрант,

e-mail: viki1994.1994@mail.ru

Кафедра сварочного производства Инженерной школы

ПОЛУЦКИЙ КОНСТАНТИН АЛЕКСАНДРОВИЧ – магистрант,

e-mail: konstantin-poluckii@yandex.ru

Кафедра технологий промышленного производства Инженерной школы

Дальневосточный федеральный университет

Суханова ул., 8, Владивосток, 690091

Тепловложение при точечной сварке трением с перемешиванием

Аннотация: Представлен анализ технологии процесса точечной сварки методом трения с перемешиванием. Важным элементом этой технологии является определение температуры материала в зоне перемешивания, которую возможно определить расчетом по величине тепловложения, вносимого в зону сварки. Для определения этой величины авторами данной статьи проведены экспериментальные исследования зависимости тепловложения от скорости вращения трубки, моделирующей свариваемый алюминиевый сплав. В результате расчетов получено распределение тепловложения по концентрическим кольцам инструмента с учетом изменения момента трения и потерь теплоты теплопроводностью и конвекцией, а также зависимость суммарного тепловложения от диаметра инструмента.

Ключевые слова: точечная сварка трением с перемешиванием, алюминиевый сплав, инструментальная сталь, технологические параметры, тепловложение, концентрические кольца, эксперимент.

Введение

Сварку трением с перемешиванием (СТП) запатентовал в 1991 г. британский институт The Welding Institute (TWI) [7]. Суть данного вида сварки состоит в том, что пластичные материалы путем воздействия вращающегося инструмента на заготовку соединяются не в жидкой (расплавленной) фазе, а нагреваются за счет сил трения, доводятся до пластичного состояния, перемешиваются и при остывании образуют сварное соединение. Помимо шовной СТП достаточное распространение получило нахлесточное соединение точечной сваркой трением с перемешиванием (ТСТП) деталей из сплавов цветных металлов на основе алюминия и меди. В настоящее время разработана точечная сварка погружением (PFSW), которая запатентована фирмой Mazda (Япония) [6] (см. рис. 1, а). При этом вращающийся инструмент погружается в деталь, доводя металл до пластичного состояния и перемешивая его под буртом. После этого инструмент поднимается, оставляя характерное углубление в детали.

Цель данной работы: нахождение значений тепловложений при точечной сварке трением с перемешиванием, а также оценка диаметра инструмента для заданной тепловой мощности.

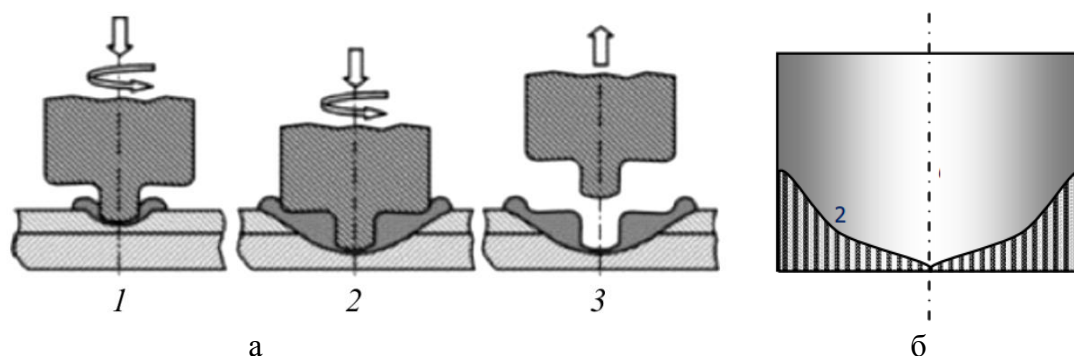


Рис. 1. Схема точечной сварки с погружением (а), неравномерное распределение тепловой мощности по радиусу площади контакта (б):
1 – погружение инструмента; 2 – перемешивание металла деталей (образование сварного соединения); 3 – вывод инструмента.

Описание технического решения

Сварка трением с перемешиванием (СТП) относится к способам сварки в твердой фазе, поэтому важно знать температурные режимы. Экспериментальное измерение температуры в зоне нагрева связано с определенными трудностями, так как инструмент в этот момент вращается и закрывает зону нагрева плоской торцевой поверхностью. В большинстве своем публикации [1, 2, 5], посвященные расчету распределения температур в процессе СТП, основаны на решении уравнения теплопроводности и предлагают численные методы расчета. Но для расчетов основным необходимым параметром является величина тепловой мощности, подаваемой в зону нагрева (тепловложение).

Распределение тепловой мощности (тепловложения) по радиусу площади контакта инструмента с заготовкой при классической сварке трением имеет параболический вид [8] (рис. 1, б). Это связано с неравномерным распределением линейной скорости вращения торца инструмента по радиусу площади нагрева. Эта скорость изменяется от нуля в центре до максимума на внешнем радиусе. Изменение величины крутящего момента при этом не учитывается. Вероятно, такая же зависимость характерна и для процесса ТСТП.

При экспериментальном измерении тепловложения предполагается исключение поглощенной энергии на деформацию кристаллической решетки, при этом вся механическая энергия переходит в тепловую. Тогда удельная тепловая мощность определяется зависимостью [1, 4]

$$q = \frac{M_{\text{тр}} \cdot \omega}{S}, \text{ Вт/м}^2, \quad (1)$$

где $M_{\text{тр}}$ – крутящий момент сил трения, Н·м; ω – угловая скорость вращения инструмента, с^{-1} ; S – площадь контакта, м^2 .

Для определения распределения тепловложения по радиусу площадь контакта инструмента и свариваемого материала разбивается на концентрические кольца разных диаметров и для каждого кольца находится величина момента трения M_{tri} и его площадь.

$$S_i = \frac{\pi}{4} (d_{\text{нап}}^2 - d_{\text{вн}}^2), \text{ м}^2, \quad (2)$$

где $d_{\text{нап}}^2$, $d_{\text{вн}}^2$ – наружный и внутренний диаметры рабочего участка инструмента, м.

Полная тепловая мощность на каждом участке W_i определяется как

$$W_i = q_i \cdot S_i, \text{ Вт}, \quad (3)$$

Методика эксперимента

Для исследования зависимости момента трения и тепловложения по радиусу инструмента авторами в 2017 г. был спроектирован и изготовлен лабораторный стенд.

Основным его элементом является цилиндрическая трубка из алюминиевого сплава АМг6, наружный диаметр которой составляет 20 мм, толщина стенки – 2 мм, длина – 40 мм. Эта трубка моделирует материал свариваемых пластин. Она вращается по поверхности пластины из инструментальной быстрорежущей стали Р6М5, которая моделирует инструмент для точечной сварки трением с перемешиванием. Благодаря изменению скорости вращения трубки можно задавать разные линейные скорости вращения торцевой поверхности инструмента относительно поверхности стальной пластины, соответствующие скоростям вращения инструмента на различных радиусах.

Схема и внешний вид стенда представлены на рис. 2, а, б.

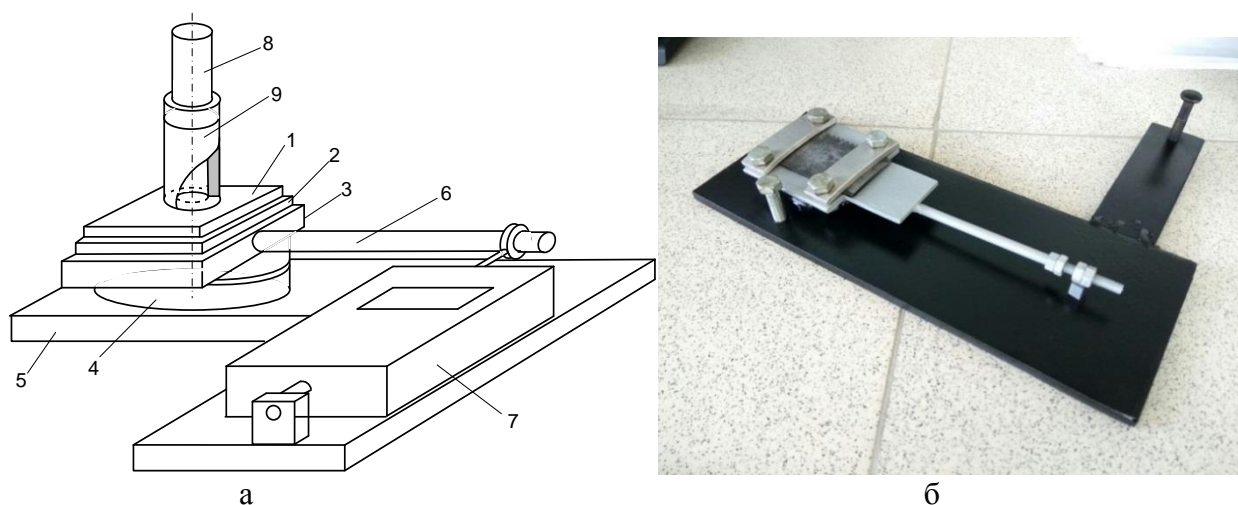


Рис. 2. Схема (а) и внешний вид (б) лабораторного стенда:

- 1 – рабочая пластина; 2 – паронитовая прокладка; 3 – рабочий стол; 4 – упорный шариковый подшипник; 5 – основание; 6 – стержень; 7 – электронный динамометр; 8 – хвостовик; 9 – цилиндрическая трубка из алюминиевого сплава.

На рабочем столе 3 стенда через паронитовую прокладку 2 закреплена пластина 1 из инструментальной быстрорежущей стали Р6М5. Рабочий стол 3 закреплен на подвижной части упорного шарикового подшипника 4, его неподвижная часть закреплена на основании 5. При подаче вращения через хвостовик 8 на рабочую трубку из алюминиевого сплава 9 и прижатии ее с определенным усилием к пластине 1 момент трения определяется через длину l стержня 6 и силу F , измеряемую электронным динамометром 7.

Крутящий момент силы трения определяется зависимостью:

$$M_{\text{тр}} = P \cdot l, \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (4)$$

где P – сила, Н; l – длина плеча, м.

Эксперименты по тепловложению проводились на универсальном вертикально-фрезерном станке ВМ127, скорость вращения шпинделя задавалась в диапазоне 1000–1600 об/мин (105–167 с⁻¹). При измерении момента трения задается усилие сжатия трубки относительно пластины, которое поддерживает постоянной температуру места контакта на всех режимах. Остальные измерения аналогичны используемым в [4].

Данные, полученные экспериментально, пересчитываются для реального инструмента по следующей методике (ниже).

1. Инструмент радиусом 10 мм разбивается на концентрические участки (кольца) шириной по 2 мм и радиусом от $r_1=1$ мм до $r_5=9$ мм.

2. Выбирается оптимальная скорость вращения инструмента $n_{\text{опт}}=1600$ об/мин ($\omega=174$ с⁻¹).

3. Рассчитывается линейная скорость вращения для каждого кольца

$$V_i = \omega \cdot r_i, \text{ м/с.} \quad (5)$$

4. Рассчитывается угловая скорость экспериментальной рабочей трубки, которая соответствует линейной скорости каждого кольца рабочего инструмента

$$\omega_i = \frac{V_i}{r_0}, \text{ с}^{-1}, \quad (6)$$

где $r_0 = 9 \text{ мм}$ – радиус на экспериментальной трубке.

5. Рассчитывается удельное тепловложение для каждого кольца рабочего инструмента по зависимости, полученной экспериментально (рис. 3)

$$q_i = f(\omega_i), \text{ Вт/м}^2. \quad (7)$$

6. Находится площадь контакта каждого кольца по формуле (2).

7. Рассчитывается полное тепловложение на каждом кольце по формуле (3).

8. Находится суммарное полное тепловложение на инструменте

$$W_{\Sigma} = \sum W_i, \text{ Вт.} \quad (8)$$

При проведении экспериментов определялись тепловые потери теплопроводностью вдоль стержня 8, на котором закреплена экспериментальная трубка 9, а также от рабочей пластины из инструментальной стали 1, через паронитовую прокладку 2, на рабочий стол 3, и потери за счет конвекции от поверхности вращающейся экспериментальной трубки 8 в окружающую среду. После проведенных необходимых замеров результаты расчетов этих тепловых потерь показали, что на разных режимах потери теплопроводностью вдоль стержня составляют 8–10%, на рабочий стол – не превышают 9–10%, отвод тепла конвекцией от цилиндрической поверхности экспериментальной трубки составляет 3–4,5%. Эти потери учтены в расчетах тепловложения.

Результаты экспериментов и расчетов

Эксперименты по тепловложению проводились на скоростях вращения шпинделя фрезерного станка в диапазоне 1000–1600 об/мин ($105\text{--}167 \text{ с}^{-1}$). При этом за счет регулирования усилия сжатия температура места контакта на всех режимах поддерживалась постоянной – $335 \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Результаты экспериментов представлены на рис. 3. Анализ этих данных показывает, что с увеличением угловой (и линейной) скоростей вращения с 105 до 167 с^{-1} величина тепловложения от экспериментальной трубки к рабочей пластине уменьшается с $4,1$ до $2,1 \text{ МВт/м}^2$. Это объясняется изменением пластических деформаций, протекающих в металле под воздействием вращающегося инструмента.

Обобщение этих данных имеет вид зависимости

$$q_i = -0,0002\omega^2 + 0,0206\omega + 4,024, \quad (9)$$

достоверность аппроксимации этой зависимости не превышает $R^2 = 0,984$.

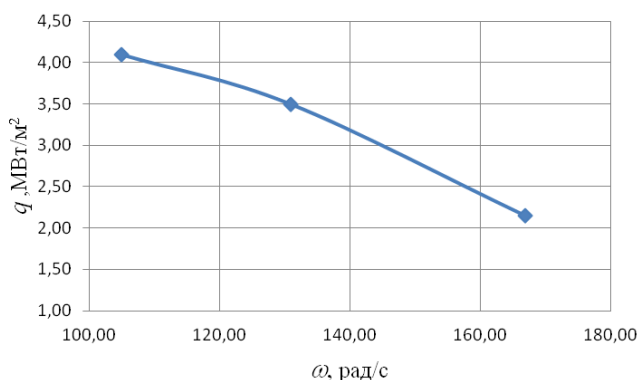


Рис. 3. Изменение удельного тепловложения с увеличением скорости вращения экспериментальной трубки.

Результаты расчета тепловложений по кольцам для реального инструмента диаметром 20 мм для оптимальной скорости вращения инструмента 1600 об/мин (167 с^{-1}) представлены в таблице. Зависимость тепловой мощности на каждом концентрическом участке от радиуса инструмента представлена на рис. 4. Эта зависимость показывает, что с увеличением радиуса площади контакта инструмента от 1 до 7 мм величина тепловложения по участкам (кольцам) увеличивается с 0,054 кВт на внутреннем кольце до 0,28 кВт – на четвертом кольце (радиусом 7 мм) и затем уменьшается до 0,175 кВт на внешнем кольце (радиусом 9 мм).

Результаты расчета тепловложений для инструмента при $n=1600$ об/мин (167 с^{-1})

№ п/п	Радиус r_i , мм	Линейная скорость вращения V_i , м/с	Угловая скорость на стенде ω_i , с^{-1}	Удельная тепловая мощность q_i , МВт/м ²	Площадь контакта S_i , м ²	Тепловая мощность по участкам W_i , кВт	Полная тепловая мощность W_{Σ} , кВт
1	1	0,17	19	4,343	$12,6 \cdot 10^6$	0,054	0,049
2	3	0,52	58	4,546	$37,7 \cdot 10^6$	0,169	0,218
3	5	0,87	97	4,14	$62,8 \cdot 10^6$	0,26	0,502
4	7	1,2	135	3,16	$87,9 \cdot 10^6$	0,28	0,851
5	9	1,57	174	1,553	$113 \cdot 10^6$	0,175	1,17

Такая зависимость определяется тем, что с увеличением радиуса удельное тепловложение уменьшается, а площадь контакта увеличивается (см. таблицу). Таким образом, максимальное тепловложение от инструмента происходит на радиусе 5–7 мм.

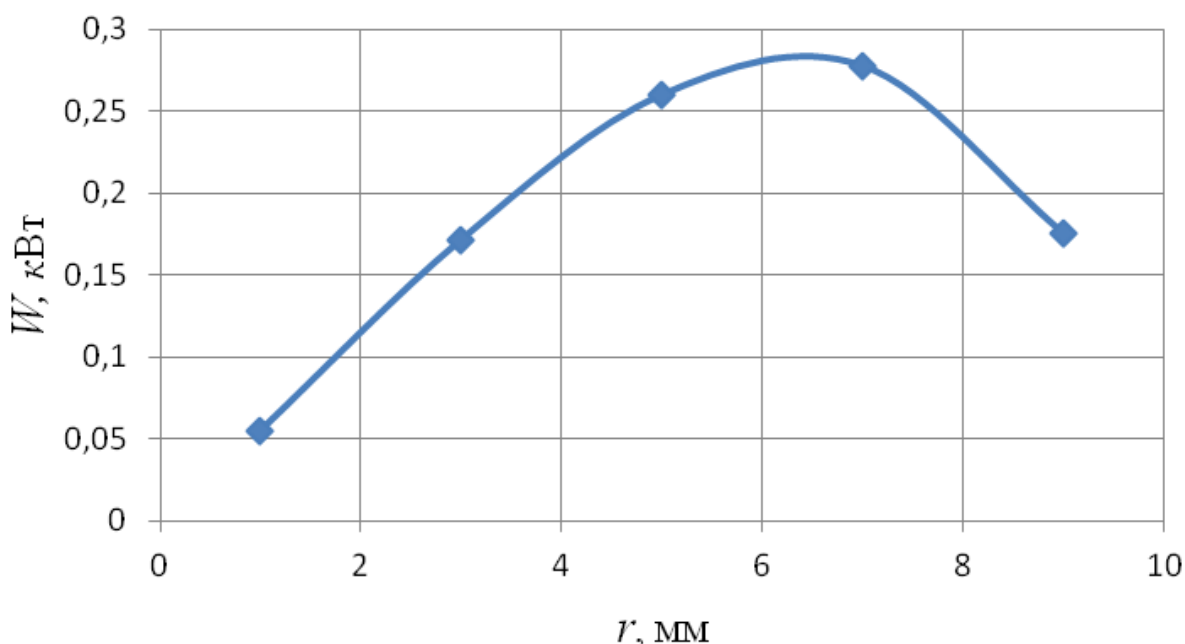


Рис. 4. Зависимость тепловой мощности на участках от радиуса инструмента, $n = 1600$ об/мин (167 с^{-1}).

Зависимость полной тепловой мощности на всей площади контакта от радиуса инструмента представлена на рис. 5. Эти данные позволяют оценить размеры (диаметр) инструмента для заданного тепловложения и при скорости его вращения $n=1600$ об/мин (167 с^{-1}).

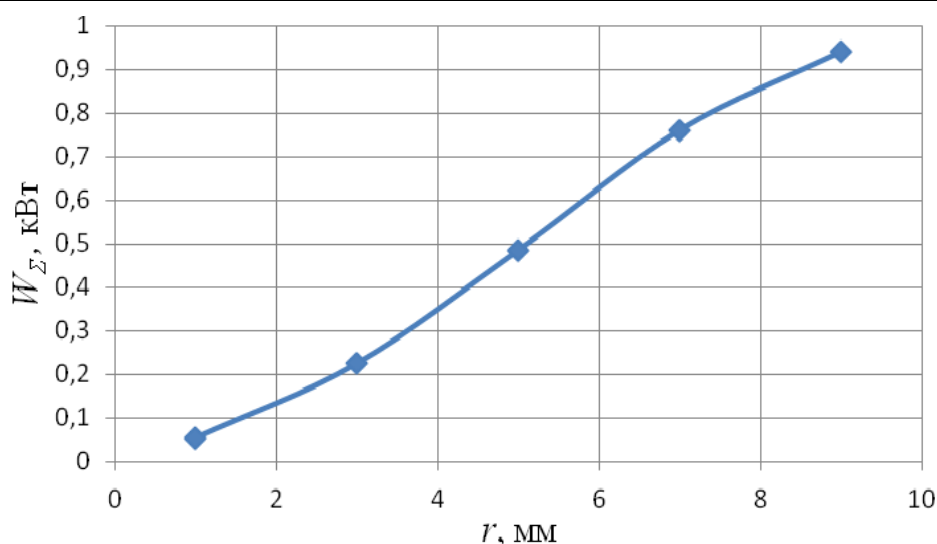


Рис. 5. Зависимость полной тепловой мощности от радиуса инструмента, $n=1600$ об/мин (167 с^{-1}).

Выводы

Таким образом, при точечной сварке трением с перемешиванием пластинчатого материала из алюминиевого сплава АМгб с использованием инструмента из быстрорежущей стали Р6М5 для внесения тепловой мощности в 0,5 кВт надо использовать инструмент диаметром 10 мм, для тепловой мощности в 1 кВт необходим инструмент диаметром 20 мм. При этом максимальное тепловложение от инструмента происходит на радиусе 5–7 мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Медведев А.Ю., Павлинич С.П., Атрощенко В.В., Маркелова Н.И. Моделирование температурного поля при линейной сварке трением // Вестник УГТУ. 2010. Т. 14, № 2. С. 76–81.
3. 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.
4. Стаценко В.Н., Негода Е.Н., Сухорада А.Е., Полуцкий К.А. Анализ технологии сварки методом трения с перемешиванием // Вестник Инженерной школы ДВФУ. 2017. № 1(30). URL: <https://www.dvfu.ru/upload/medialibrary/59d/2017-1-2.pdf> (дата обращения: 21.02.2017).
5. Gruzicic M., Arakere G., Yalavarthy H.V., He T., Yen C.-F., Cheeseman B.A. Modeling of AA5083 Material Microstructure Evolution During Butt Friction-Stir Welding. J. of Materials Engineering and Performance. 2010(19);5:672–684.
6. Martin J. Pushing the boundaries – friction stir goes deeper than before. TWI Connect. 2006. January/February. P. 1.
7. Thomas W.M., Nicholas E.D., Needham J.C., Murch M.G., Temple-Smith P., Dawes C.J. International Patent Application N PCT/GB92/02203; GB Patent Application N 9125978.8; U.S Patent N 5, 460, 317. 1991.
8. Vill V.I. Svarka metallov treniem. Leningrad, Mashinostroenie, 1970. 176 p.

THIS ARTICLE IN ENGLISH SEE NEXT PAGE

Technology and Organization of Shipbuilding and Ship Repair

DOI.org/10.5281/zenodo.1286013

Statsenko V., Sukhorada A., Romanova V., Polutskiy K.

VLADIMIR STATSENKO, Doctor of Engineering Sciences, Professor, e-mail: vladsta@mail.ru

ALEXEY SUKHORADA, Postgraduate, e-mail: alexeyman_09@mail.ru

VICTORIA ROMANOVA, MA Student, e-mail: viki1994.1994@mail.ru

KONSTANTIN POLUTSKY, MA Student, e-mail: konstantin-poluckii@yandex.ru

Department of Welding Production, School of Engineering

Far Eastern Federal University

8 Sukhanova St., Vladivostok, Russia, 690091

The heat input at friction stir spot welding

Abstract: The article deals with the technique of friction stir spot welding. The significant element of this technique is to determine the temperature of the material in the zone of stirring which can be determined by calculating the value of the heat input in the welding zone. To determine the value, the authors have carried out experimental studies of the dependency of the heat input on the rotational speed of the experimental tube simulating the welded aluminum alloy. As a result of the calculations, the distribution of heat input along the concentric rings of the tool have been obtained taking into account changes in the friction torque and heat losses by heat conduction and convection as well as the dependency of the total heat input as a function on the diameter of the tool.

Key words: friction stir spot welding, technological parameters, aluminum alloy, tool steel, heat input, concentric rings, experiment.

REFERENCES

1. 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.
2. 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.
3. Rzaev R.A., Chularis A.A., Dzhalukhambetov 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.
4. Statsenko V.N., Negoda E.N., Suhorada A.E., Polutsky K.A. Analysis of welding technology by friction with mixing. FEFU: School of Engineering. 2017;1. URL: <https://www.dvfu.ru/upload/medialibrary/-59d/2017-1-2.pdf> – 21.02.2017.
5. Gruzicic M., Arakere G., Yalavarthy H.V., He T., Yen C.-F., Cheeseman B.A. Modeling of AA5083 Material Microstructure Evolution During Butt Friction-Stir Welding. J. of Materials Engineering and Performance. 2010(19);5:672–684.
6. Martin J. Pushing the boundaries – friction stir goes deeper than before. TWI Connect. 2006. January/February. P. 1.
7. Thomas W.M., Nicholas E.D., Needham J.C., Murch M.G., Temple-Smith P., Dawes C.J. International Patent Application N PCT/GB92/02203; GB Patent Application N 9125978.8; U.S Patent N 5, 460, 317. 1991.
8. Vill V.I. Svarka metallov treniem. Leningrad, Mashinostroenie, 1970. 176 p.