

Научная статья
УДК 621.791.14:62-97
<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2024-2/12-20>

Технология сварки трением с перемешиванием алюминиевого сплава

Владимир Николаевич Стаценко¹✉, Майя Владимировна Бернавская²

¹Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Российская Федерация

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉ vladsta@mail.ru

Аннотация. Проведенные расчеты и эксперименты показали, что при сварке трением с перемешиванием алюминиевых сплавов типа АМг3 наибольшее значение температуры наблюдается в области задней кромки инструмента, где перемешивание уже закончилось, при этом разница температур на задней и передней кромках инструмента может составлять 50–250 °С. Для выявления скорости разогрева металла пластины из алюминиевого сплава АМг3 за счет трения при неподвижном положении вращающегося инструмента нами проведен эксперимент с использованием четырех хромель-копелевых термопар диаметром 0,2 мм. Термопары зачеканены в пластине на расстояниях 5–10 мм от центра инструмента. В результате экспериментов выявлено, что с увеличением скорости вращения с 70 до 88 рад/с время разогрева от температур 60–100 до 450–500 °С уменьшается со 110 до 30 с. Кроме того, выявлено, что при этом нагреве температура материала под заплечиком имеет одинаковые значения на всей его площади. В результате анализа этих данных предлагается задать циклический режим движения вращающегося инструмента с периодическими остановками для разогрева материала свариваемых пластин, используя две схемы. По первой схеме измерение температуры свариваемых пластин производится вдоль передней кромки заплечика – при достижении температуры сварки задается время, необходимое для догрева материала в области передней кромки заплечика, вращающийся инструмент перемещается на шаг, равный 0,4–0,5 диаметра заплечика. По второй схеме предлагается использовать расчетное значение времени, необходимое для догрева материала под заплечиком до значения температуры сварки, которое определено по результатам экспериментов для алюминиевого сплава типа АМг3 толщиной 4 мм.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием, температурные поля, эксперимент, технология, цикличность, температура передней кромки, время догрева

Для цитирования: Стаценко В.Н., Бернавская М.В. Технология сварки трением с перемешиванием алюминиевого сплава // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2024. № 2(59). С. 12–20.

Original article

Friction stir welding technology of aluminum alloy

Vladimir N. Statsenko¹, Maya V. Bernavskaya²

¹Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

²Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation

✉ vladsta@mail.ru

Abstract. Calculations and experiments have shown that during friction stir welding of aluminum alloys of the АМg3 type, the highest temperature value is observed in the area of the trailing edge of the tool, where stirring has already ended, while the temperature difference at the trailing and leading edges of the tool can be 150–250 °C. To determine the rate of heating of the metal of a plate made of aluminum alloy АМg3 due to friction when the rotating tool is stationary, we conducted an experiment using 4 Chromel-Copel thermocouples with

a diameter of 0.2 mm. Thermocouples are stamped into the plate at distances of 5–10 mm from the center of the tool. As a result of experiments, it was revealed that with an increase in rotation speed from 70 to 88 rad/s, the heating time from temperatures of 60–100 °C to 450–500 °C decreases from 110 to 30 s. In addition, it was revealed that during this heating the temperature of the material under the shoulder has the same values over its entire area. As a result of the analysis of these data, it is proposed to set the motion mode of the rotating tool as cyclic with periodic stops to heat up the material of the plates being welded. During stops, heat input from the tool due to friction occurs evenly around the pin and shoulder, and the maximum temperature develops around the pin, and not in the area of the trailing edge of the tool. It is proposed to use two schemes. According to the first scheme, it is proposed to measure the temperature of the plates being welded along the leading edge of the shoulder – when its welding temperature is reached, the rotating tool moves by a step equal to 0.4–0.5 of the diameter of the shoulder. According to the second scheme, it is proposed to use the calculated value of the time required to heat the material under the shoulder to the welding temperature, which was determined from the results of experiments for an aluminum alloy of the AMg3 type with a thickness of 4 mm.

Keywords: friction stir welding, temperature fields, experiment, technology, cyclicity, leading edge temperature, reheating time

For citation: Statsenko V.N., Bernavskaya M.V. Friction stir welding technology of aluminum alloy. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2024, no. 2(59), pp. 12–20. (In Russ.).

Введение

Сварка трением с перемешиванием (СТП) – достаточно новая технология, реализованная в современном виде в 1991 г. *The Welding Institute (TWI)*, Великобритания [1]. С момента патентования способ сварки трением с перемешиванием (СТП) стал широко использоваться в разных областях промышленности для соединения сплавов, плохо свариваемых традиционными способами (алюминиевые сплавы, содержащие цинк, медь, литейные сплавы магния), металлов и сплавов, не образующих эвтектик и твердых растворов, а также вследствие его преимуществ в сравнении с другими способами соединения деталей путем сварки [2, 3].

Специальный инструмент процесса СТП состоит из заплечика и рабочего выступа – пина (рис. 1). Вращающийся инструмент, закрепленный в шпинделе фрезерного станка, поворачивают углом вперед на угол α относительно вертикали. Затем включают вращение инструмента и медленно погружают его встык до тех пор, пока заплечик инструмента не углубится на 0,2–0,3 мм в основной металл. Включается продольное перемещение стола вдоль стыка со скоростью сварки, в результате трения пина и заплечика о заготовку выделяется теплота, которая доводит металл вокруг инструмента до пластифицированного состояния.



Рис. 1. Схема процесса СТП

Fig. 1. FSW process diagram

Пластифицированный металл за счет сил трения закручивается относительно оси вращения инструмента вокруг пина. В процессе перемещения инструмента по стыку свариваемых поверхностей происходят перемешивание и перенос металла с формированием сварного шва.

Качество сварного соединения зависит от степени перемешивания пластифицированных кромок свариваемых деталей, которая, в свою очередь, зависит от тепловложения от инструмента в результате трения, влияющего на температуру размягченного металла.

Экспериментальное измерение состояния температурного поля очень сложно и связано с техническими трудностями: 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 оси сварного шва, в таких случаях необходимы поправки на расчет температур в зоне перемешивания. Большинство работ, посвященных расчету распределения температуры в процессе СТП и её динамики, основано на решении уравнения теплопроводности [4–8], для чего используются различные численные методы, реализуемые в виде компьютерных программ. В частности, моделируют трехмерное температурное поле образца [9]. Математическая модель представляет собой нелинейное уравнение нестационарной теплопроводности. Зона максимальных температур располагается на поверхности заплечика в зоне его контакта с деталью, где генерируется основное количество тепла.

Двумерная математическая модель для исследования температуры в «макроскопическом» приближении с учетом границы контакта инструмента и заготовки в области сварки, возникающей при работе вращающегося инструмента внутри свариваемого материала, учитывает тепловыделение в зоне контакта инструмента со свариваемым материалом, теплообмен с окружающей средой и теплоотвод в инструмент [10]. Разработан численный метод расчета температур.

Рассчитаны распределения температурных полей в области сварного шва при СТП пластин из алюминиевого сплава АМг6 [11]. Установлено, что температура в области контакта инструмента с пластиной близка к температуре плавления.

Математическое моделирование в сочетании с экспериментальными видами исследований позволяет воссоздать наиболее полную картину физико-механических процессов, протекающих при таком виде сварки. Однако результаты расчётов разных авторов различаются значительным разбросом значений температур нагрева в зоне сварки алюминиевых сплавов – от 450 до 660 °С [5, 9, 11–13].

В результате наших исследований получены зависимости удельного и полного тепловложения от скоростей вращения ω и перемещения (сварки) $V_{св}$ инструмента и его диаметра [14, 15]. В результате разработанной нами расчетной модели и проведенных расчетов при сварке пластин толщиной 4 мм из алюминиевого сплава АМг3 получено распределение температур в области перемешивания под инструментом диаметром 20 мм для разных режимов его движения (рис. 2) [14].

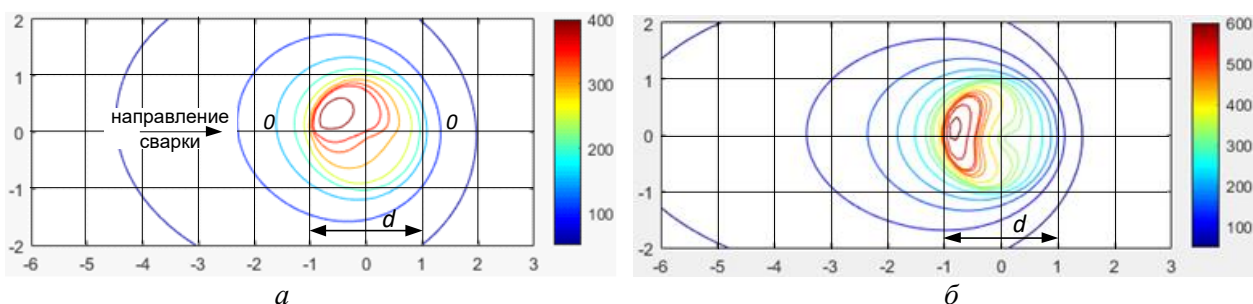


Рис. 2. Поля изотерм на поверхности пластины при $V_{св} = 0,42$ мм/с, $\omega = 40$ с⁻¹ (а) и $\omega = 100$ с⁻¹ (б) (Здесь и далее рисунки авторов)

Fig. 2. Isotherm fields on the plate surface at $VW = 0.42$ mm/s, $\omega = 40$ s⁻¹ (a) and $\omega = 100$ s⁻¹ (b) (Hereinafter, drawings by the authors)

Анализ температурных полей показал, что наибольшее значение температуры наблюдается в области задней кромки инструмента (рис. 2), разница температур на задней и передней кромках инструмента может составлять 50–250 °С.

Таким образом, можно заключить, что наилучшие условия для перемешивания свариваемых материалов с наиболее высокой температурой создаются не в зоне вокруг пина, а в области задней кромки инструмента, где перемешивание уже практически закончилось.

Техническое решение

Для выявления скорости разогрева металла пластины из алюминиевого сплава АМг3 за счет трения при неподвижном положении вращающегося инструмента нами проведен эксперимент с использованием хромель-копелевых термопар диаметром 0,2 мм каждой из проволок. Пластина имела размеры 80×300 мм и толщину 4 мм. Три термопары (№ 1, 2, 3) были зачеканены в пластину на расстоянии 5 мм друг от друга, четвертая термопара – на расстоянии 10 мм от средней (№ 2), то есть практически в области кромки заплечика (рис. 3).

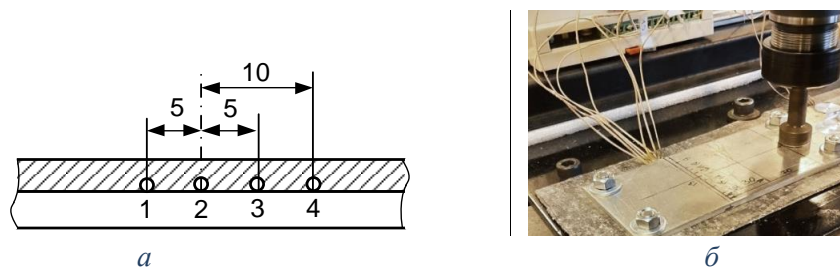


Рис. 3. Схема расположения термопар в поперечном сечении пластины (а), внешний вид экспериментального стенда (б), 1-4 – номера термопар

Fig. 3. Layout of thermocouples in the cross section of the plate (a), appearance of the experimental stand (b), 1-4 – thermocouple numbers

Вращающийся инструмент диаметром 22 мм устанавливался над средней (№ 2) термопарой. ТермоЭДС от термопар измерялась с помощью аналогово-цифрового преобразователя и выводилась на ноутбук. Скорости вращения инструмента задавались в диапазоне 50–88 с⁻¹. В результате наших экспериментов установлено, что время разогрева зависит от скорости вращения инструмента. С увеличением скорости вращения с 70 до 88 с⁻¹ это время от температур 60–100 до 450–500 °С уменьшается с 110 до 30 с. Кроме этого, выявлено, что при этом нагреве температура материала под заплечиком имеет одинаковые значения на всей его площади (рис. 4).

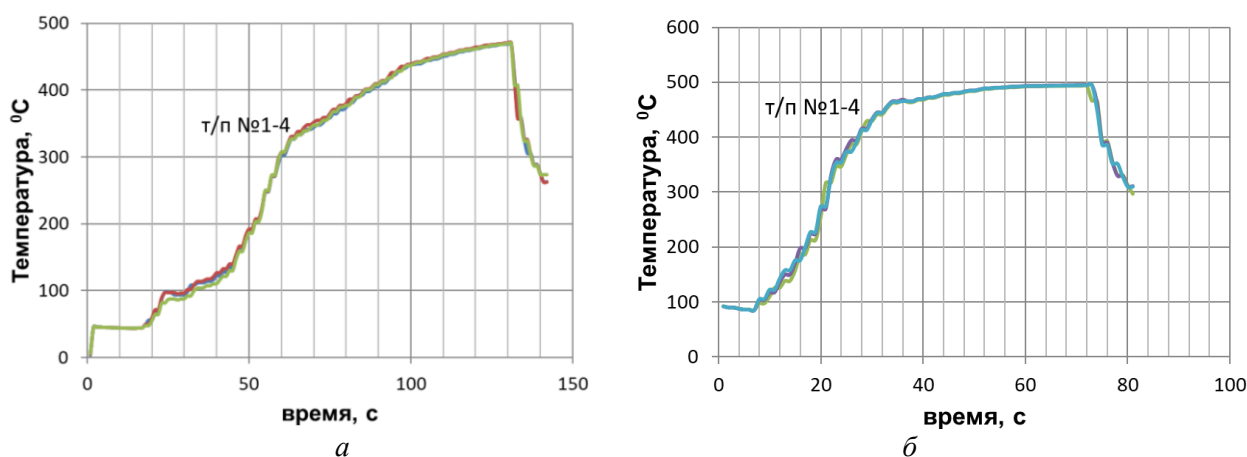


Рис. 4. Изменение температур под заплечиком в период остановки его движения: а – $\omega = 70 \text{ с}^{-1}$; б – $\omega = 88 \text{ с}^{-1}$

Fig. 4 Change in temperature under the shoulder during the period when its movement is stopped: а – $\omega = 70 \text{ с}^{-1}$; б – $\omega = 88 \text{ с}^{-1}$

Так как в расчетных исследованиях установлено, что в области передней и задней кромок заплечика температуры различаются на 50–250 °С (см. рис. 2), по данным экспериментальных

исследований рассчитано время, необходимое для догрева на величину 200 °С материала в области передней кромки заплечика:

$$\tau = 246 - 2,6\omega, \text{ с.}$$

Технология сварки трением с перемешиванием

При традиционной сварке трением с перемешиванием вращающийся инструмент движется вдоль кромок свариваемых пластин, причем режим движения инструмента непрерывный, с постоянной скоростью.

Мы предлагаем задать режим движения вращающегося инструмента циклический с периодическими остановками для разогрева материала свариваемых пластин (рис. 5). В моменты остановок тепловложение от инструмента за счет трения происходит равномерно вокруг пина и заплечика, и максимальная температура развивается вокруг пина, а не в области задней кромки инструмента. Это доказывается экспериментальными данными, представленными на рис. 3, из которых следует, что в разное время разогрева материала свариваемых пластин под вращающимся заплечиком (в период остановки) температуры под ним имеют одинаковые значения, что приводит к хорошему перемешиванию материалов кромок свариваемых пластин. Такой способ сварки трением с перемешиванием осуществляется для любого пластичного материала на стандартном оборудовании по двум схемам [16, 17].

По первой схеме предлагается измерять температуры свариваемых пластин вдоль передней кромки заплечика. На начальном этапе τ_0 производится включение вращения сварочного инструмента и погружение его пина в поверхность свариваемых пластин (рис. 5). После соприкосновения рабочей поверхности заплечика с поверхностью пластин начинается период нагрева $\tau_{н0}$, который продолжается до тех пор, пока температура пластин вдоль передней кромки заплечика не достигнет значения температуры сварки t_2 (см. процесс I-II длительностью $\tau_{н0}$).

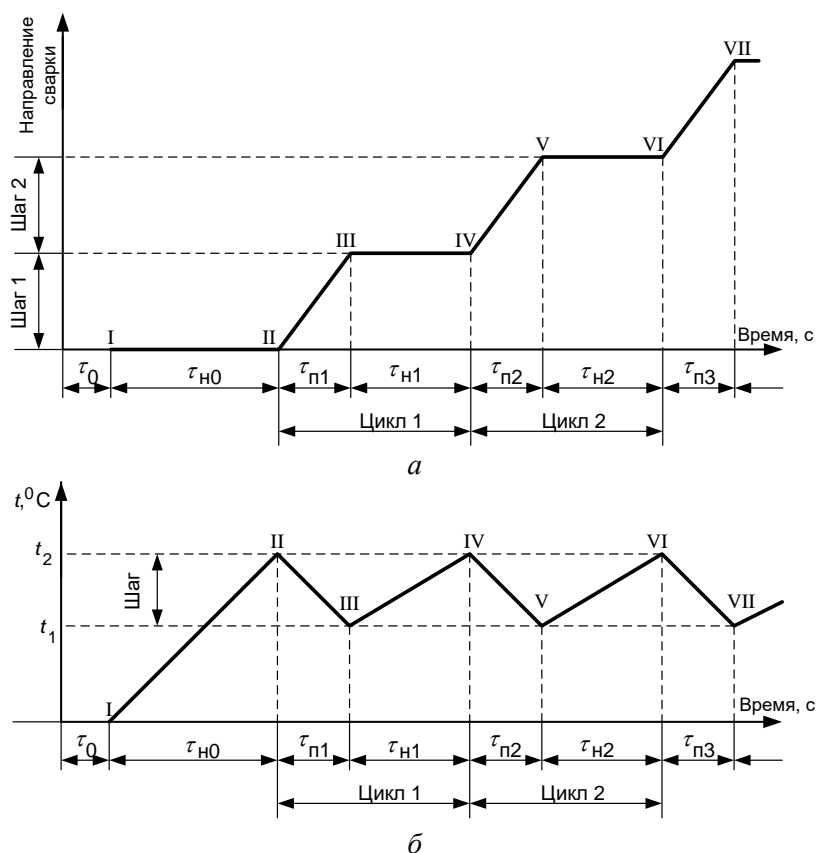


Рис. 5. Циклограммы перемещения вращающегося сварочного инструмента (а) и изменения температуры рабочей пластины в области передней кромки заплечика (б)
 Fig. 5. Cyclograms of the movement of a rotating welding tool (a) and changes in the temperature of the working plate in the area of the leading edge of the shoulder (b)

После достижения температуры сварки циклично организуется процесс сварки, причем каждый цикл состоит из двух этапов:

- при достижении температуры свариваемых пластин вдоль передней кромки заплечика значения температуры сварки t_2 вращающийся сварочный инструмент перемещается на шаг, равный 0,4–0,5 диаметра заплечика (см. процессы II–III, IV–V, VI–VII длительностью $\tau_{п1}$, $\tau_{п2}$, $\tau_{п3}$ соответственно и с температурой t_1 в конце каждого процесса;

- при остановке перемещения вращающийся сварочный инструмент разогревает алюминиевые пластины с температуры t_1 до температуры сварки t_2 (см. процессы III–IV, V–VI длительностью $\tau_{н1}$, $\tau_{н2}$ соответственно и с температурой t_2 в конце каждого процесса и соответственно цикла).

По второй схеме предлагается использовать расчетное значение времени, необходимое для догрева материала под заплечиком до значения температуры сварки t_2 . По данным экспериментов при нагреве вращающимся инструментом алюминиевого сплава типа АМг3 толщиной 4 мм это время рассчитывается (рис. 4) по зависимости

$$\tau_p = 246 - 2,6\omega, \text{ с,}$$

где ω – скорость вращения инструмента, с^{-1} .

При этом температура кромок свариваемых пластин достигает значений, достаточных для получения его пластифицированного состояния (450–500 °С для алюминиевого сплава типа АМг3), после этого вращающийся инструмент сдвигается вдоль кромок с шагом, равным (0,4–0,5), от диаметра заплечика. При этом пин будет постоянно находиться в пластифицированной зоне.

Периодичность перемещения инструмента складывается из времени разогрева материала, времени его движения вдоль свариваемых кромок на длину половины диаметра заплечика:

$$\tau = \tau_p + \tau_{дв} = 246 - 2,6\omega + \frac{d_3}{2V_{св}}, \text{ с,} \tag{1}$$

где τ_p – время разогрева материала, с;

$\tau_{дв}$ – время движения вдоль свариваемых кромок, с;

$V_{св}$ – скорость сварки, мм/с;

d_3 – диаметр заплечика, мм.

Результаты расчета периодичности перемещения инструмента вдоль свариваемых кромок для разных скоростей вращения ω и скоростей сварки $V_{св}$ для пластин из алюминиевого сплава типа АМг3 толщиной 4 мм представлены на рис. 6. Из этих данных следует, что для разных скоростей вращения инструмента при увеличении скорости сварки с 0,5 до 2,0 мм/с периодичность перемещения инструмента снижается на 16–18 с.

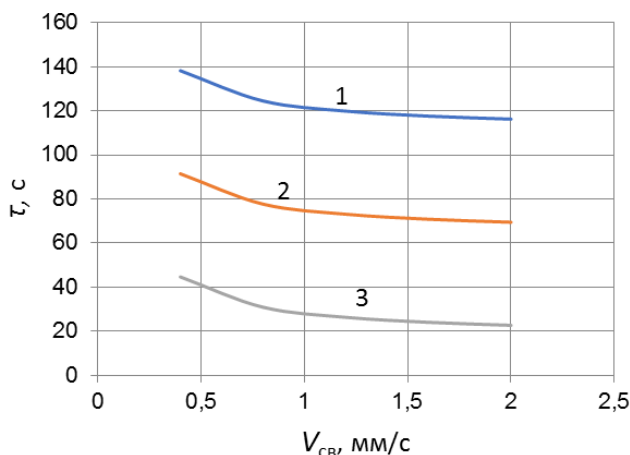


Рис. 6. Периодичность перемещения инструмента:
1 – $\omega=52 \text{ с}^{-1}$; 2 – 70 с^{-1} ; 3 – 88 с^{-1}

Fig. 6. Frequency of tool movement:
1 – $\omega=52 \text{ s}^{-1}$; 2 – 70 s^{-1} ; 3 – 88 s^{-1}

Заключение

В предлагаемой технологии сварки трением с перемешиванием рекомендуется использовать не постоянную скорость сварки, то есть скорость движения вращающегося инструмента вдоль свариваемых поверхностей, а циклический с периодическими остановками для разогрева материала пластин. В моменты остановок тепловложение от инструмента за счет трения происходит равномерно вокруг пина и заплечика, и максимальная температура развивается вокруг пина, а не в области задней кромки инструмента. При достижении значения температуры, достаточной для получения его пластифицированного состояния (450–500 °С для алюминиевого сплава типа АМг3), вращающийся инструмент сдвигается вдоль кромок свариваемых пластин с шагом, равным (0,4–0,5), от диаметра заплечика. При этом пин будет постоянно находиться в пластифицированной зоне.

При таком режиме сварки можно получать более качественное перемешивание материалов, более прочное сварное соединение.

Для контроля температуры в области передней кромки можно использовать инфракрасный пирометр либо применять расчетную зависимость периодичности перемещения инструмента вдоль свариваемых кромок, полученную на основе проведенных экспериментальных исследований.

ВКЛАД АВТОРОВ | CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

В.Н. Стаценко – постановка задач исследования, обработка результатов экспериментов, оформление статьи, М.В. Бернавская – анализ литературных источников, анализ и интерпретация результатов; подготовка и редактирование текста. Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

V. Statsenko – formulation of research problems, processing of experimental results, preparation of the article, M. Bernavskaya – analysis of literary sources, analysis and interpretation of results; preparation and editing of text. All authors read and approved the final version of the manuscript.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ | CONFLICT OF INTEREST

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Thomas W.M., Nicholas E.D., Needham J.C., Murch M.G., Temple-Smith P., Dawes C.J. Friction stir butt welding. GB Patent № 9125978.8. International patent application PCT/GB92/02203. 1991.
2. Резников А.Н., Резников Л.А. Тепловые процессы в технологических системах. Москва: Машиностроение, 1990. 288 с.
3. Штрикман М.М. Состояние и развитие процесса сварки трением линейных соединений (обзор). Ч. 2. Совершенствование инструмента и технологических схем сварки // Сварочное производство. 2007. № 10. С. 25–32.
4. Колубаев Е.А. Особенности формирования структуры сварного соединения, полученного сваркой трением с перемешиванием // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6. Ст. 887. EDN: RVDAXF
5. Котлышев Р.Р., Шучев К.Г., Крамской А.В. Расчет температур при сварке трением с перемешиванием алюминиевых сплавов // Вестник Донского государственного технического университета. 2010. Т.10, № 5(48). С. 693–699. EDN: NBYPVZ
6. Медведев А.Ю., Павлинич С.П., Атрощенко В.В., Маркелова Н.И. Моделирование температурного поля при линейной сварке трением // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2010. Т. 14, № 2(37). С. 75–79. EDN: OHMOLG
7. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. Москва: Машгиз, 1951. 296 с.
8. Grujicic 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 // Journal of Materials Engineering and Performance. 2010. № 19(5). P. 672–684. <https://doi.org/10.1007/s11665>
9. Майстренко А.Л., Лукаш В.А., Заболотный С.Д., Страшко Р.В. Применение процесса трения с перемешиванием для соединения магниевых сплавов и модификации их структуры // Автоматическая сварка. 2016. № 5-6(753). С. 74–81.

10. Ильющенко А.Ф., Громыко Г.Ф., Радченко А.А., Шевцов А.И., Бубен Д.В. Моделирование тепловых процессов при сварке трением с перемешиванием // Порошковая металлургия. Республиканский межведомственный сборник научных трудов. 2020. Вып. 43. С. 25–35.
11. Клопотов А.А., Абзаев Ю.А., Потекаев А.И., Клименов В.А., Курган К.А., 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. EDN: VBFVIZ
12. Ерофеев В.А. Карпукhin 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. EDN: MRYFYH
13. Покляцкий А.Г. Особенности распределения температур в тонколистовом алюминиевом сплаве АМг5М при сварке трением с перемешиванием // Автоматическая сварка. 2011. № 8(700). С. 48–51. EDN: THGBFL
14. Стаценко В.Н. Тепловые процессы при сварке трением с перемешиванием: монография. Владивосток: Изд-во ДВФУ, 2021. 120 с. <https://doi.org/10.24866/7444-5191-2>
15. Statsenko V., Sukhorada A., Bernvskaya M. Research of heat input in friction stir welding // Materials Science Forum. 2019. Vol. 945. P. 634–638. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.945.634>
16. Стаценко В.Н., Бернавская М.В. Способ сварки алюминиевых сплавов трением с перемешиванием // Патент на изобретение № 2814426, заявка №2023117921. Приоритет от 07.07.2023, дата регистрации 28.02.2024.
17. Стаценко В.Н., Бернавская М.В. Способ сварки алюминиевых сплавов трением с перемешиванием // Патент на изобретение № 2815342, заявка № 2023117922. Приоритет от 07.07.2023, дата регистрации 13.03.2024.

REFERENCES

1. Thomas W.M., Nicholas E.D., Needham J.C., Murch M.G., Temple-Smith P., Dawes C.J. Friction stir butt welding. *GB Patent* No. 9125978.8. International patent application PCT/GB92/02203. 1991.
2. Reznikov A.N., Reznikov L.A. Thermal processes in technological systems. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1990. 288 p. (In Russ.).
3. Shtrikman M.M. State and development of the process of friction welding of linear connections (review). Part 2. Improvement of tools and technological schemes of welding. *Welding production*, 2007, vol. 10, pp. 25–32. (In Russ.).
4. Kolubaev E.A. Distinctions of structure forming of welded joints produced by friction stir welding. *Modern problems of science and education*, 2013, no. 6, art. 887. (In Russ.).
5. Kotlyshev R.R., Shuchev K.G., Kramskoy A.V. Temperature calculations in friction stir welding with aluminium alloys. *Vestnik of Don State Technical University*, 2010, vol. 10, no. 5, pp. 693–699. (In Russ.).
6. Medvedev A.Yu., Pavlinich S.P., Atroshchenko V.V., Markelova N.I. Modeling of the temperature field at linear welding by the friction. *Vestnik UGATU*, 2010, vol. 14, no. 2, pp. 75–79. (In Russ.).
7. Rykalin N.N. Calculations of thermal processes in welding. Moscow, Mashgiz Publ., 1951. 296 p. (In Russ.).
8. Grujicic 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. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2010, vol. 19, no. 5, pp. 672–684. <https://doi.org/10.1007/s11665>
9. Maistrenko A.L., Lukash V.A., Zabolotny S.D., Strashko R.V. Application of the friction stirring process for joining magnesium alloys and modifying their structure. *Automatic welding*, 2016, no. 5-6(753), pp. 74–81. (In Russ.).
10. 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. Republican interdepartmental collection of scientific works*. 2020. Iss. 43. P. 25–35. (In Russ.).
11. Klopotov A.A., Abzaev Yu.A., Potekaev A.I., Klimenov V.A., Kurgan K.A., Marchenko E.S. Structural-phase state and modeling of the distribution of temperature fields for friction stir welding in 1561 alloy. *Fundamental problems of modern materials science*, 2018, vol. 15, no. 3, pp. 416–423. (In Russ.).
12. Erofeev V.A. Karpukhin E.V. Logvinov R.V. Study of physical phenomena when a tool impacts metal during friction welding. *Welding and diagnostics*, 2010, vol. 1, pp. 27–33. (In Russ.).

13. Poklyatsky A.G. Features of temperature distribution in thin-sheet aluminum alloy AMg5M during friction stir welding. *Automatic welding*, 2011, no. 8(700), pp. 48–51. (In Russ.).
14. Statsenko V.N. Thermal processes in friction stir welding. Vladivostok, Publishing House of FEFU, 2021. 120 p. (In Russ.). <https://doi.org/10.24866/7444-5191-2>
15. Statsenko V., Sukhorada A., Bernvskaya M. Research of heat input in friction stir welding. *Materials Science Forum*, 2019, vol. 945, pp. 634–638. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.945.634>
16. Statsenko V.N., Bernavskaya M.V. Friction stir welding method for aluminum alloys. *Patent for invention*. No. 2814426, application No. 2023117921. Priority dated 07/07/2023, registration date 02/28/2024. (In Russ.)
17. Statsenko V.N., Bernavskaya M.V. Friction stir welding method for aluminum alloys. *Patent for invention*. No. 2815342, application No. 2023117922. Priority dated 07/07/2023, registration date 03/13/2024. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Стаценко Владимир Николаевич – доктор технических наук, профессор, Политехнический институт, Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Российская Федерация, vladsta@mail.ru

Vladimir N. Statsenko, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Polytechnic Institute, Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation, vladsta@mail.ru

Бернавская Майя Владимировна – доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация, bernavskaya@mail.ru

Maya V. Bernavskaya, Associate Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation, bernavskaya@mail.ru

Статья поступила в редакцию / Received: 12.04.2024.

Доработана после рецензирования / Revised: 06.06.2024.

Принята к публикации / Accepted: 10.06.2024.