

УДК 621.791.14

Friction stir welding aluminum alloy AMg2m thickness of 1.5 mm
Сварка трением с перемешиванием алюминиевого сплава АМг2М
толщиной 1,5 мм

V. V. Atroshchenko, E. I. Kagarmenov, A. S. Selivanov, S. D. Shugaipov
B. B. Амрощенко, Э. И. Кагарманов, А. С. Селиванов, Ш. Д. Шугаипов

Ufa State Aviation Technical University, Marx Str. 12, Ufa, 450008, Russia
91250@mail.ru

Уфимский государственный авиационный технический университет, Россия, 450008, Уфа, ул. К. Маркса, 12
91250@mail.ru

ABSTRACT

Among the huge number of different welding technologies, it is worth noting friction welding with mixing. This process does not involve the use of protective gases and consumable welding materials. At the same time, it is possible to obtain a high-quality connection without the use of high temperature. The technology is used in most cases in the processing of aluminum and some other alloys and is increasingly being used as an alternative method of joining, used instead of other types of welding – electric arc, laser, as well as bolt and rivet connections due to reduced energy consumption and the total weight of the resulting structures. At the same time, the quality of the resulting seam directly depends on the processing parameters and the material of the tool used. In this paper, in the course of experimental studies of the technology of friction welding with mixing of plates of aluminum alloy AMg2M known for its high corrosion resistance, ductility and good weldability with a thickness of 1.5 mm, a tool for friction stir welding was developed, welding modes were determined and the study of welded joints was conducted.

KEYWORDS

Friction stir welding; FSW; welding of aluminum alloys; welding of AMg2M.

АННОТАЦИЯ

Среди огромного количества различных технологий сварки стоит отметить сварку трением со смешиванием. Такой процесс не предполагает использование защитных газов и расходных сварочных материалов. При этом существует возможность получить качественное соединение без применения высокой температуры. Технология используется в большинстве случаев при обработке алюминия и некоторых других сплавов и находит все большее применение в качестве альтернативного метода соединения, применяемого взамен других видов сварки – электродуговой, лазерной, а также болтовым и заклепочным соединениям, благодаря снижению энергопотребления и общего веса получаемых конструкций. При этом качество получаемого шва напрямую зависит от параметров обработки и материала используемого инструмента. В данной работе в процессе экспериментальных исследований технологии сварки трением с перемешиванием пластин алюминиевого сплава АМг2М, известного своей высокой коррозионной стойкостью, пластичностью и хорошей свариваемостью толщиной 1,5 мм, был разработан инструмент для сварки трением с перемешиванием (СТП), определены режимы сварки и проведено исследование сварных соединений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Сварка трением с перемешиванием; сварка алюминиевых сплавов; сварка сплава АМг2М.

Введение

Проблема сварки алюминиевых сплавов дуговыми способами сварки, а также лазерной или электронно-лучевой сваркой заключается в склонности металлического шва к разрушению в зонах теплового воздействия по стыкам деталей и образованию дефектов: рыхлот, цепочек пор в шве и у зоны сплав-

ления, трещин в высокотемпературной ЗТВ, включений прочной оксидной пленки в шве [1, 2]. Одним из вариантов решения указанной проблемы является использование сравнительно нового сварочного процесса – сварки трением с перемешиванием, известного в России с 1967 г. [3] и реализованного в Великобритании [4] в 1990-х гг. в Британском институте сварки (TWI) [5].

СТП является эффективным способом получения высококачественных соединений конструкций различной геометрии, включая листовые материалы, пространственные профильные конструкции, трубы, восстановления изношенных деталей, модифицирования и улучшения структуры материалов, заживления трещин и литейных дефектов. Обладая широкими технологическими возможностями по получению неразъемных соединений деталей узлов, она может быть использована в качестве альтернативы заклепочным соединениям, контактной, шовной электродуговой, электроннолучевой и лазерной сваркам, сваривания разнородных материалов. Таким образом, СТП становится универсальной технологией, имеющей большие перспективы в различных отраслях производства [6, 7]. Зарубежными и отечественными авторами описаны исследования сварки трением с перемешиванием (СТП) алюминиевых сплавов толщиной от 0,5 мм [7–15].

Цель данной работы – определение параметров режима СТП и оценка свойств сварных соединений сплава АМГ2М толщиной 1,5 мм.

1. Методика проведения исследований

Для определения режимов сварки использовался инструментальный широкоуниверсальный станок модели 6В75.

Сварку трением с перемешиванием осуществляли специальным инструментом. Для

разработки инструмента определялись следующие параметры: диаметр пина, длина пина, диаметр заплечика, материал инструмента [1, 3, 16].

Так как инструмент предназначался для сварки тонколистовых материалов, решено было использовать заплечик с плоской формой [4, 17]. Для упрощения конструкции и, учитывая, что на инструмент будут действовать относительно небольшие нагрузки, форму пина приняли цилиндрическую [4, 18]. Диаметр пина и заплечика приняли равными 3 и 12 мм в соответствии с рекомендациями указанными в работе [4].

Длину пина определили исходя из того, что она должна быть 90–95% толщины материала [1], с учетом величины погружения заплечика в материал на 0,2–0,3 мм, а также возможные погрешности, при определении глубины погружения длину пина приняли равной 1,1 мм.

Среди рекомендуемых материалов для изготовления инструмента [13, 18] наиболее доступной оказалась сталь марки Ст3. Опираясь на вышеописанные данные, был разработан и изготовлен инструмент, представленный на рис. 1.

Сварка осуществлялась на подкладке, выполненной в виде пластины из стали Ст3 размером 120×80×6 мм. Заготовки закреплялись с помощью лапок как показано на рис. 2. Обеспечивалось плотное прилегание свариваемых кромок [19].

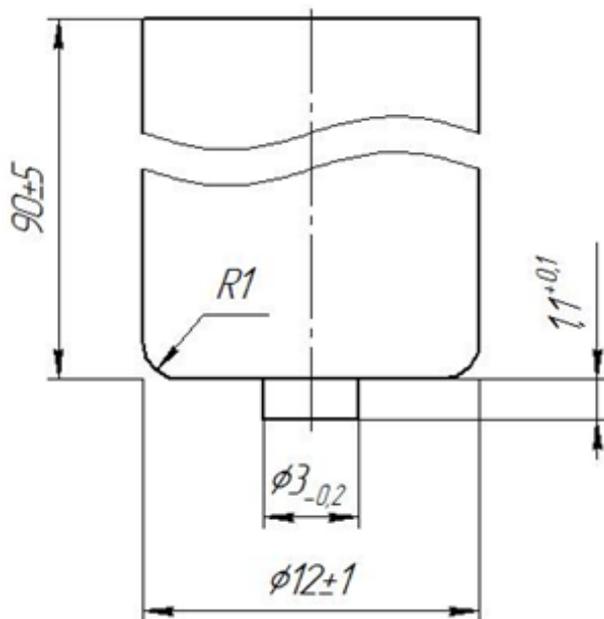


Рис. 1. Инструмент для СТП сплава АМГ2М толщиной 1,5 мм

Fig. 1. Tool for STP alloy AMG2M with a thickness of 1.5 mm

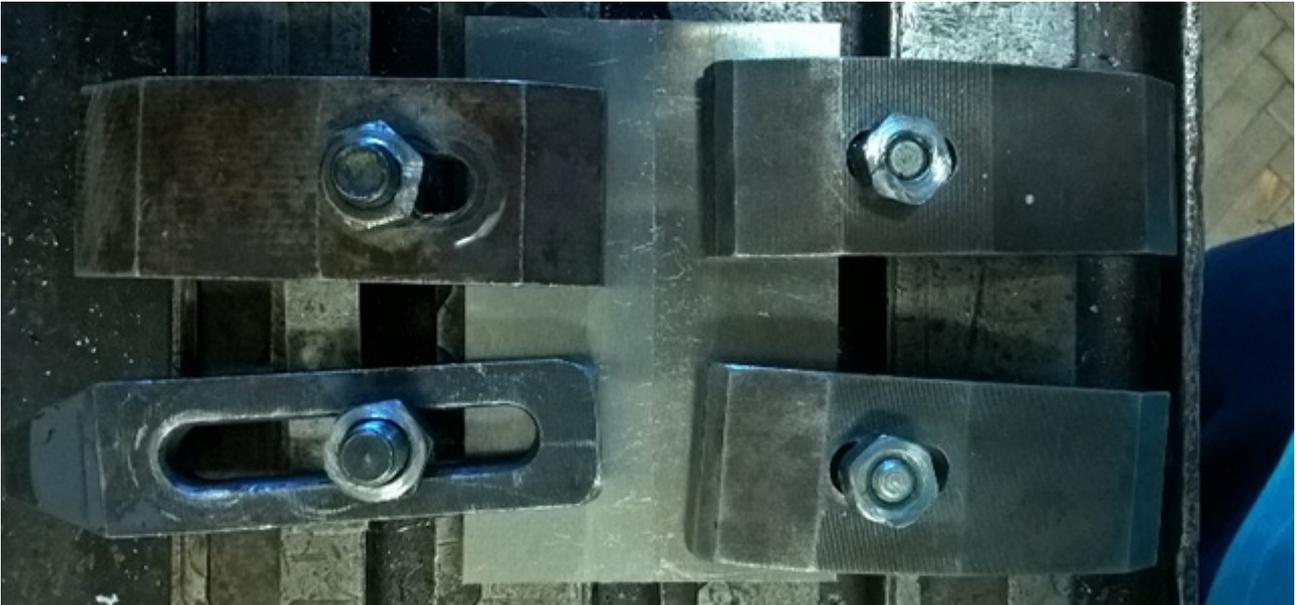


Рис. 2. Схема закрепления образцов на станке 6B75

Fig. 2. Scheme of fixing samples on the 6B75 machine

Экспериментальные исследования производились в 2 этапа. На первом этапе определялись диапазоны параметров режимов – частоты вращения и скорости сварки, обеспечивающие формирование сварного соединения. Образцы признавались годными при отсутствии на поверхности видимых дефектов в виде непроваров, трещин, несплошностей и других дефектов, выявляемых визуально. Для определения необходимых диапазонов параметров режима при наименьшем числе опытов, были получены соединения при максимальных, минимальных средних значениях режимов и различных их комбинаций.

На втором этапе определялись свойства сварных соединений, полученные на режимах, обеспечивающих формирование сварных соединений.

Полученные образцы были подвергнуты рентгенографическому контролю, а для исследования свойств сварных соединений образцы испытывались на статическое растяжение и статический изгиб.

2. Результаты исследования

В ходе поискового эксперимента были определены диапазоны параметров режимов – частоты вращения и скорости сварки, обеспечивающие формирование сварного соединения.

Собрав и проанализировав экспериментальные данные, построили график (рис. 3), на котором видно, что сварное соединение

начинает формироваться при скорости вращения инструмента от 790 об/мин и выше.

Следует отметить, что в процессе сварки при недостаточном прижатии заготовок к подкладке происходило их коробление заготовок по ходу движения инструмента, что подтверждают наблюдения других авторов [20].

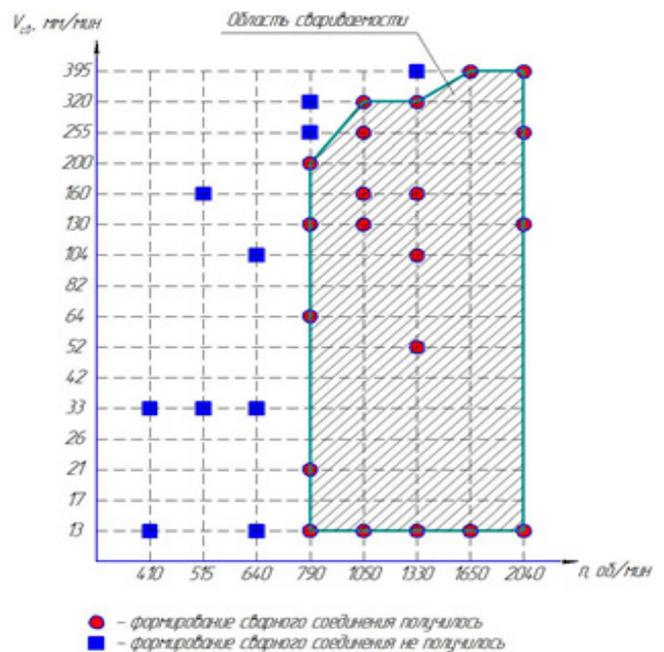


Рис. 3. График режимов сварки

Fig. 3. Schedule of welding modes

На рис. 4 показан пример одного из образцов, полученного в ходе поискового эксперимента.

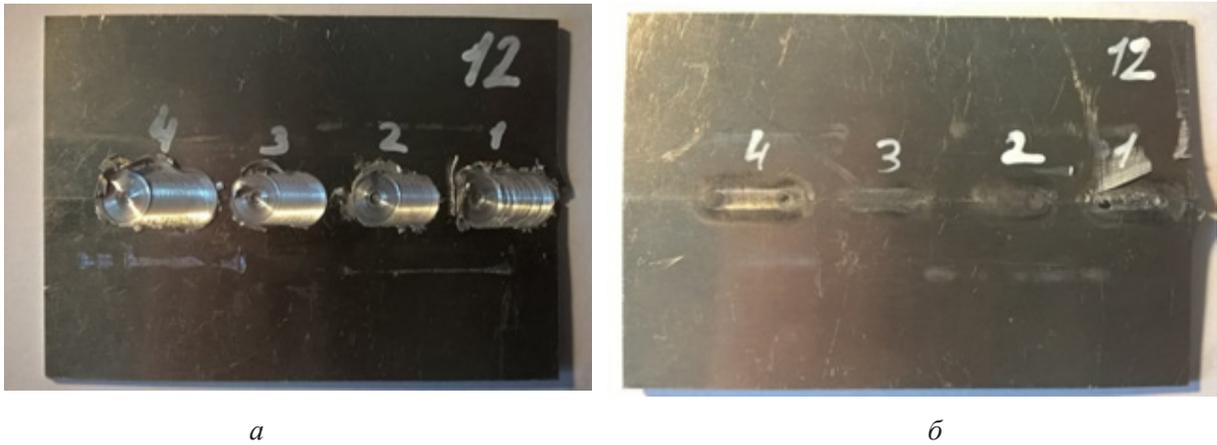


Рис. 4. Образец № 12: а – лицевая сторона; б – обратная сторона

Fig. 4. Sample No. 12: a – front side; б – back side

Для исследования свойств сварных соединений из полученного диапазона режимов были выбраны несколько режимов сварки, обеспечивающих формирование сварного соединения и проведена сварка образцов. В табл. 1 представлены номера образцов и выбранные режимы сварки.

Рентгенографический метод контроля дефектов не выявлял. Отсутствие дефектов на снимках не говорит о том, что их нет. Возможно, для выявления дефектов не хватило чувствительности примененного метода контроля.

Таблица 1
Table 1

Образцы при определенных режимах

Samples under certain modes

Номер образца	Частота вращения инструмента, об/мин	Скорость движение инструмента, мм/мин
17	790	13
18	790	21
19	790	255
3 и 5	1330	33
15 и 16	2040	395



Рис. 5. Рентгеновский снимок сварного соединения

Fig. 5. X-ray of a welded joint

В результате механических испытаний на статический изгиб было выявлено, что около 70% полученных заготовок, вне зависимости от режима сварки, сгибаются до соприкосновения без образования трещины (рис. 6). У 25% заготовок начало образования трещины происходило при угле загиба свыше 150° (рис. 7).



Рис. 6. Образец после испытания

Fig. 6. Sample after testing



Рис. 7. Образец с трещиной при угле изгиба более 150°

Fig. 7. Sample with a crack at a bending angle of more than 150°

У 5% образцов трещины начали проявляться при угле изгиба $90-120^\circ$, что показано на рис. 8.



Рис. 8. Образец с трещиной, проявившейся при угле 95°

Fig. 8. Specimen with a crack manifested at an angle of 95°

Результаты испытаний на статическое растяжение показали, что сваренные образцы разрушались либо по основному металлу, как показано на рис. 9, или разрушение происходило по шву, как показано на рис. 10.

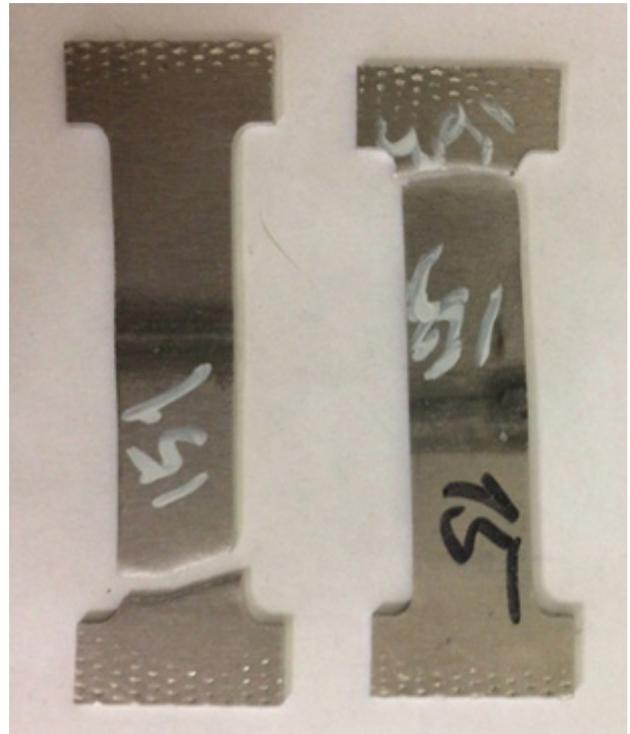


Рис. 9. Разрушение образцов по основному металлу

Fig. 9. Destruction of samples on the base metal



Рис. 10. Разрушение образцов по сварному шву

Fig. 10. Failure of samples along the weld

Результаты испытаний на статическое растяжение для каждого исследованного режима СТП показаны в табл. 2.

Сопоставив данные, полученные в табл. 3 и области свариваемости, построим график, показанный на рис. 11 с указанием значений предела прочности при различных режимах СТП.

Видно, что предел прочности сварного соединения в пределах области свариваемости колеблется в зависимости от режима сварки в пределах 5%. При выходе за область свариваемости

соединение либо не формируется, либо наблюдается более значительное падение предела прочности сварного соединения.

Максимальное значение предела прочности сварного соединения (157,8 МПа), полученное по результатам исследований, сравнимо с пределом прочности основного металла и составляет 98–99%.

Максимальное значение относительного удлинения, полученное по результатам исследований, сравнимо с относительным удлинением основного металла и составляет 88,4%.

Таблица 2
Table 2

Значения пределов прочности образцов
Tensile strengths of samples

Номер режима	Частота вращения инструмента, об/мин	Скорость движения инструмента, мм/мин	Предел прочности σ_B , МПа	Относительное удлинение, мм
Основной металл	Основной металл	Основной металл	159,87	16,27
1	790	13	150,22	10,95
2	790	21	154,35	13,3
3	790	255	142,13	9,8
4	1330	33	157,82	14,38
5	2040	395	156,31	13,8

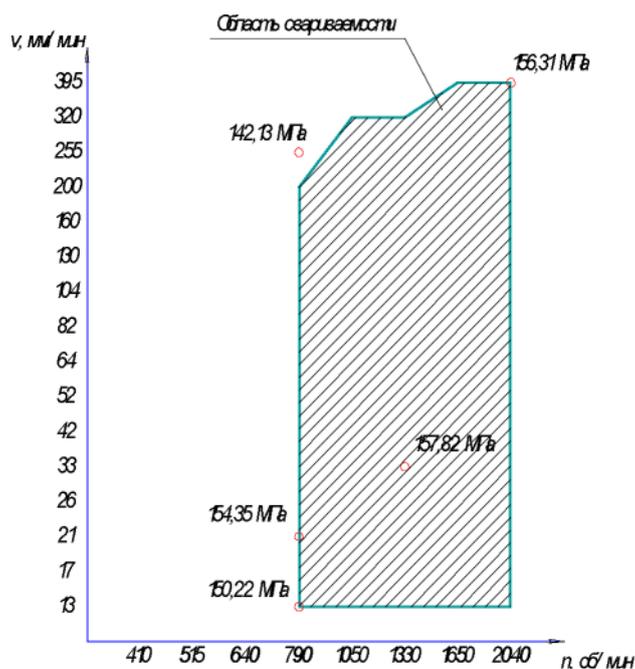


Рис. 11. Предел прочности при данных режимах
Fig. 11. Ultimate strength under these conditions

Выводы

В результате экспериментальных исследований были определены диапазоны параметров режимов – частоты вращения и скорости сварки, обеспечивающие формирование сварного соединения АМг2М толщиной 1,5 мм при заданной форме инструмента.

Установлено, что надежное закрепление заготовок, обеспечивающее их неподвижность в процессе сварки, является важным условием формирования сварного соединения.

Испытание сварных соединений методом РГК не позволяет выявить дефекты, вследствие низкой чувствительности метода на малых толщинах.

Механические испытания сварных соединений на статический изгиб выявили, что 70% заготовок согнулись на 180° без образования трещин, у 30% – происходило при угле загиба от 150° и выше.

Механические испытания на статическое растяжение показали, что предел прочности сварного соединения в пределах области свариваемости колеблется в зависимости от режима сварки в пределах 5%. При выходе за область свариваемости соединение либо не формируется, либо наблюдается значительное падение предела прочности сварного соединения.

Список литературы

1. Людмирский Ю. Г., Котлышев Р. Р. Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов в строительстве // Научный вестник ВГАСУ. 2010. № 3 (19). С. 15–22.

2. Aritoshi M. Friction stir welding of magnesium alloys sheets // Journal of the Japan Welding Society. 2005. V. 74, No. 3. P. 152–157. URL: <https://doi.org/10.2207/qjjws1943.74.152>

3. Муравьев В. И., Бахматов П. В., Мелкоступов К. А. К вопросу актуальности исследования сварки трением с перемешиванием конструкций из высокопрочных алюминиевых сплавов // Ученые записки. 2010. Т. 1, № 2. С. 110–125.

4. Review of tools for friction stir welding and Processing / Y. N. Zhang et al. // Canadian Metallurgical Quarterly. 2012. V. 51, No. 3. P. 250–261. URL: <https://doi.org/10.1179/1879139512Y.0000000015>

5. Третьяк Н. Г. Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов // Автоматическая сварка. 2002. № 7. С. 12–21.

6. Покляцкий А. Г., Ищенко А. Я., Подьяльников С. В. Влияние параметров процесса сварки трением с перемешиванием на формирование швов соединений алюминиевых сплавов толщиной 1,8...2,5 мм // Автоматическая сварка. 2008. № 10. С. 27–30.

7. Comparative study of friction stir welding process and its variables / M. Vetrivel Sezhian et al. // Materials Today: Proceedings. 2020. V. 33. Part 7. P. 4842–4847. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.394>

8. Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir welded Al 6061 aluminum alloy joints / Saket Choudhary et al. // Materials Today: Proceedings. 2020. V. 25. Part 4. P. 563–569. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.05.466>

9. Ultra-thin friction stir welding on Aluminum alloy / Mruna Panchal et al. // Materials Today: Proceedings. 2020. V. 26. Part 2. P. 2888–2894. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.597>

10. Aruna Prabha K., Prasad Kumar Putha, Balla Srinivasa Prasad. Effect of Tool Rotational Speed on Mechanical Properties Of Aluminium Alloy 5083 Weldments in Friction Stir Welding // Materials Today: Proceedings. 2018. V. 5, No. 9. Part 3. P. 18535–18543. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.196>

11. Effect of pin profile and rotational speed on microstructure and tensile strength of dissimilar AA8011, AA01-T6 friction stir welded aluminum alloys / K. Palani et al. // Materials Today: Proceedings. V. 5, No. 11. Part. 3. P. 24515–24524. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.10.248>

12. Sri Satya Omkar Dadi, Chandrahas Patel, B. Appala Naidu. Effect of friction-stir welding parameters on the welding temperature // Materials Today: Proceedings. 2020. Available online. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.364>

13. Effect of an improved pin design on weld formability and mechanical properties of adjustable-gap bobbin-tool friction stir welded Al-Cu aluminum alloy joints / D. Wu et al. // Journal of Manufacturing Processes. 2020. V. 58. P. 1182–1188. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.09.015>

14. Терентьев С. А., Арзыев Т. Р. Сварка трением с перемешиванием деталей из технического алюминия // Master's journal. 2012. № 1. С. 46–49.

15. Павлова В. И., Алифиренко Е. А., Осокин Е. П. Исследование температурно-временных условий сварочного нагрева, структуры и свойств металла стыковых соединений из алюминиево-магниевого сплава, выполненных сваркой трением с перемешиванием // Вопросы материаловедения. 2009. № 4 (60). С. 74–88.
16. Mishra R. S., Ma Z. Y. Friction stir welding and processing // Materials Science and Engineering. 2005. V. 50, No. 1–2. P. 1–78. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mser.2005.07.001>
17. Руководство по эксплуатации и обслуживанию универсально-фрезерных станков моделей 6В75 и 6В75П. 1962. 67 с.
18. Review: friction stir welding tools / R. Rai et al. // Science and Technology of Welding and Joining. 2011. V. 16, No. 4. P. 325–342. URL: <https://doi.org/10.1179/1362171811Y.0000000023>
19. Сафин В. Н., Щуров И. А., Федоров В. Б. Отработка технологии сварки трением с перемешиванием для соединения труб из алюминиевых сплавов // Вестник ЮУрГУ. 2012. № 33. С. 117–121.
20. Бойцов А. Г., Качко В. В., Курицын Д. Н. Высокоскоростная сварка трением перемешиванием авиационных материалов и конструкций // Металлообработка. 2013. № 5–6 (77–78). С. 35–42.