
УДК 621.791.14

The use of non-destructive inspection methods to assess the quality of welded joints of aluminum alloys obtained by friction stir welding

Использование методов неразрушающего контроля для оценки качества сварных соединений алюминиевых сплавов, полученных сваркой трением с перемешиванием

*R. E. Artemyev¹, A. F. Sitdikova², V. V. Atroshchenko³, M. P. Savichev⁴, A. S. Selivanov⁵
P. E. Артемьев¹, А. Ф. Ситдикова², В. В. Атрощенко³, М. П. Савичев⁴, А. С. Селиванов⁵*

WeldingTechService, Parkhomenko Str. 155/1, Ufa, 450001, Russia

¹aruslan98@mail.ru, ⁴savichevmax@mail.ru

СваркаТехСервис, Россия, 450001, Уфа, ул. Пархоменко 155/1

¹aruslan98@mail.ru, ⁴savichevmax@mail.ru

ABSTRACT

Friction stir welding is a new effective method of joining parts, the use of which is associated with reduced energy consumption, and also leads to a reduction in the total weight of the welded structures. Due to this, this method is used in such industries as rocket science, shipbuilding, construction and many others. At the same time, in some cases, there is a risk of defects in welded joints, which are not visually determined, but reduce the stability of the structures. One example of such a defect is the «smoothed non-weld». In this paper, an attempt is made to study the possibilities of various methods of non-destructive testing for evaluating the quality of welds of aluminum alloys obtained by friction welding with mixing (STP). The literature review of the known technologies of STP control is carried out. It is revealed that this welding method has a number of specific defects. One of the most reliable methods for detecting defects in the resulting welded structures is ultrasonic flaw detection with phased antenna arrays, which, however, does not fully reveal the imperfections of the joint line. In general, the analysis of the literature showed that the data on the methods used vary greatly. Non-destructive testing methods were tested, such as: visual measurement control, color flaw detection, luminescence control, radiographic control. The obtained control results are compared.

KEYWORDS

Friction stir welding; welding of aluminum alloys; non-destructive testing; friction welding; destructive testing.

АННОТАЦИЯ

Сварка трением с перемешиванием (СТП) – новый эффективный способ соединения деталей, применение которого ассоциировано с пониженными энергозатратами, а также приводит к уменьшению общего веса свариваемых конструкций. Благодаря этому, указанный метод находит применение в таких отраслях как ракетостроение, судостроение, строительство и многих других. При этом в ряде случаев существует опасность возникновения дефектов сварных соединений, которые не определяются визуально, но снижают стабильность работы конструкций. Одним из примеров такого дефекта является «заглаженный непровар». В данной работе предпринята попытка изучения возможностей различных методов неразрушающего контроля для оценки качества сварных швов алюминиевых сплавов, полученных сваркой трением с перемешиванием. Проведен литературный обзор известных технологий контроля СТП. Выявлено, что данный способ сварки имеет ряд специфических дефектов. Одним из наиболее надежных методов, позволяющих выявить дефекты в получаемых свариваемых конструкциях, является ультразвуковая дефектоскопия с фазированными антенными решетками, которая, однако не позволяет в полной мере выявить несовершенства линии стыка. В целом анализ литературы показал, что данные о применяемых методах сильно разнятся. Опробованы методы неразрушающего контроля, такие как: визуально измерительный контроль, цветная дефектоскопия, люминесцентный контроль, радиографический контроль. Проведено сравнение полученных результатов контроля.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Сварка трением с перемешиванием; сварка алюминия; неразрушающий контроль; сварка трением; разрушающий контроль.

Введение

Проблема сварки алюминиевых сплавов традиционным способом заключается в склонности металла шва с высокой теплопроводностью, коэффициентом теплового расширения в сравнительно широком диапазоне температуры застывания и растворимостью водорода в алюминии в расплавленном состоянии к усадке в два раза большей при затвердевании, разрушению в зонах теплового воздействия по стыкам деталей и образованию дефектов – несплошностей, цепочек пор в шве и у зоны сплавления, трещин в высокотемпературной зоне термического влияния, включений прочной оксидной пленки и ферросплавов в шве. Одним из вариантов решения указанной проблемы является использование сравнительно нового сварочного процесса – сварки трением с перемешиванием (СТП).

В России СТП активно применяется при разработке принципиально новых образцов техники и прорывных промышленных технологий – автомобильных полуприцепов, железнодорожных вагонов и цистерн, пешеходных мостов и др. Предложены технологии и оборудование для неразрушающего контроля (НК) баков ракеты-носителя «Ангара», сварные швы которых выполнены СТП. Однако данному способу сварки присущи специфические дефекты, например, «заглаженный непровар» в виде стыковой линии неправильной формы толщиной в доли микрона. Разработка технологий НК становится первоочередной задачей, в том числе для оборонно-промышленного комплекса и Роскосмоса.

В настоящее время на кафедре современных методов сварки и неразрушающего контроля конструкций (СМСиКК) ФГБОУ ВО УГАТУ проводятся опытные работы по разработке технологии СТП алюминиевых сплавов. Из-за отсутствия российских нормативных документов, регламентирующих НК СТП, одной из ключевых задач является выбор технологии оценки качества полученных соединений.

Целью исследования является практическая проверка эффективности различных методов НК для оценки качества сварных соединений алюминиевых сплавов, полученных СТП.

В ходе проведенного литературного обзора выяснилось, что выбор методов НК существенно различается. В источнике [1] изучены возможности применения ультразвуковой дефектоскопии фазированными антенными решетками (УЗК с ФАР), вихретоковый метод (ВК) и тепловизионный контроль (ТК) в ходе сварки, а также металлографические исследования полученных структур. Установлено, что наиболее надежным методом для обнаружения дефектов (за исключением линии стыка) является УЗК с ФАР. Преимущество УЗК с ФАР подтверждается и в источниках [2, 18]. В публикации [3] утверждается, что удалось определить дефект в виде «заглаженного» непровара, необнаруженного визуально-измерительным контролем (ВИК), тремя методами: рентгенографическим (РК), УЗК и ТК. Результаты подтверждены металлографическими исследованиями. В статье [15] указана возможность применения метода вихретокового контроля. Однако в статье [5] опыт применения вихретокового контроля не оказался удачным, указана необходимость изготовления специальных датчиков для СТП. Разработанные [10] специальные датчики для ВК позволяют эффективно выявлять поверхностные микродефекты. В работах [6, 7] обоснована актуальность выбора метода акустической эмиссии (АЭ) при контроле различных типов дефектов СТП. В статье [8] предложены технологии и оборудование для НК сварных швов баков ракеты-носителя «Ангара», выполненных СТП. Рекомендовано использовать комплекс методов НК – УЗК с ФАР и ВК. В работе [11] успешно применяется комплекс, совмещающий ВИК и РК. Однако в статье [9] указывается на неэффективность радиографического контроля и рекомендуется применение компьютерной радиографии и микрофокусных источников ионизирующего излучения. Аналогичные результаты получены [18], где несмотря на эффективность РК при обнаружении скоплений пор, несплавление в корне шва удалось обнаружить только УЗК. В работе [16] сварные швы, полученные СТП, оценивали ВИК вместе с компьютерной РК, а также исследованиями микроструктуры и микротвердости. Есть сведения об использовании иммерсионного УЗК для обнаружения корневых дефектов [11]. А также использовании автоматической комбинированной

системы НК, объединяющей УЗК методом дифракции по времени (ToFD) и ВК [19]. Встречаются также данные [17, 20] о применении метода АЭ.

Для определения возможностей и сопоставления результатов различных методов НК, а также определения реальных размеров дефектов, исследования должны сопровождаться испытаниями на изгиб и металлографическими исследованиями [4, 13].

1. Методика проведения исследований

В настоящее время на кафедре СМСиКК проводятся НИР по разработке технологии СТП алюминиевых сплавов с использованием переоборудованного под СТП вертикально-фрезерного станка SSS-400. На момент публикации на переоборудованном под СТП фрезерном станке 6В75 было получено несколько пробных образцов листа АМг2М толщиной 1,5 мм на стальной подкладке при частоте вращения инструмента $n = 950$ об/мин и скорости $v = 20-50$ мм/мин (рис. 1).



Рис. 1. Образец, полученный СТП

Fig. 1. Sample obtained by FSW

Для полученных образцов опробована часть методов контроля качества, выбранных в ходе литературного обзора: ВИК, Капиллярный контроль двумя методами – цветная дефектоскопия (ЦМ) и люминесцентный контроль (ЛЮМ-1ОВ), РК.

Ввиду отсутствия требований нормативной документации к размерам сварных швов, выполненных СТП, на этапе ВИК проводилась проверка отсутствия наружных дефектов.

Для проведения ЦМ использовался набор дефектоскопических материалов «Sherwin» и контрольный образец по 2 классу чувствительности ГОСТ 18442-80 с раскрытием дефекта 2,3 мкм. Контроль проводился в соответствии с инструкцией производителя, указанной на наборе: 1) очистка путем нанесения очистителя DR-60; 2) через 30 с после

нанесения сушка поверхности сухой тканью; 3) нанесение пенетранта DP-55 на поверхность ровным слоем; 4) через 10 мин удалить излишки пенетранта с поверхности до исчезновения розового фона с помощью сухой ткани или ткани, смоченной очистителем; 5) сушка поверхности; 6) нанесение проявителя DP-100.

Для проведения ЛЮМ1-ОВ использовался набор дефектоскопических материалов, рекомендованный для особо ответственных деталей: очиститель ОЖ-1, люминесцентная жидкость ЛЖ-6А, проявитель ПР-1, а также контрольный образец по 1 классу чувствительности ГОСТ 18442-80 с раскрытием дефекта 0,12...0,5 мкм. Контроль проводился в соответствии с инструкцией отраслевого авиационного стандарта ОСТ 1 90282-79: 1) очистка 5 мин в ацетоне; 2) очистка 5 мин в бензине «Нефрас»; 3) сушка на воздухе 1 ч; 4) окунание в люминесцентную жидкость ЛЖ-6А на 15 мин; 5) удаление излишек пенетранта под струей воды с использованием душевой насадки; 6) очистка в жидкости ОЖ-1 40 с с непрерывным перемешиванием; 7) проверка отсутствия «фона» путем просмотра очищенного образца в ультрафиолетовом облучении; 8) сушка не более 5 мин, образец при этом не должен полностью высохнуть; 9) нанесение проявителя ПР-1 с использованием краскопульта давлением 2...4 атм.; 10) сушка не менее 1 ч; 11) осмотр в ультрафиолетовом излучении интенсивностью с использованием фонарика «Микрокон УФ-102».

Радиографический контроль проводился с использованием источника излучения постоянного действия «Raucraft CP-250» на высококонтрастную пленку Agfa D7 без использования усиливающих экранов. Режимы просвечивания: фокусное расстояние $f = 1000$ мм; время экспозиции 18 с (0,3 мин).

Другие методы НК, упоминаемые в литературном обзоре, такие как УЗК с ФАР, ВК и ТК будут опробованы в ходе дальнейших исследований.

2. Результаты исследований

Результаты проведения ЦМ образцов представлены на рис. 2. Результаты ЛЮМ-1ОВ одного из образцов представлены на рис. 3.

Полученный в результате РК снимок образца № 4 представлен на рис. 4.

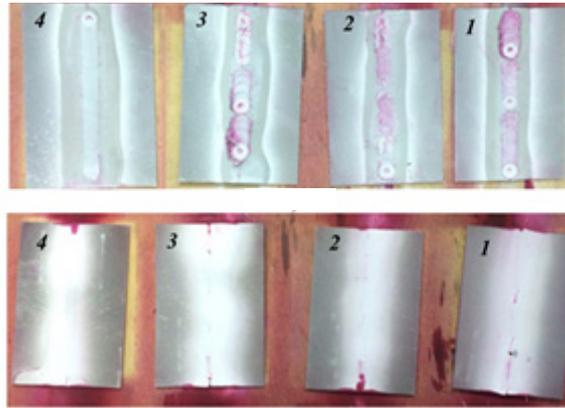


Рис. 2. Образцы с проявителем на обратной стороне образца
Fig. 2. Samples with developer on the back of the sample

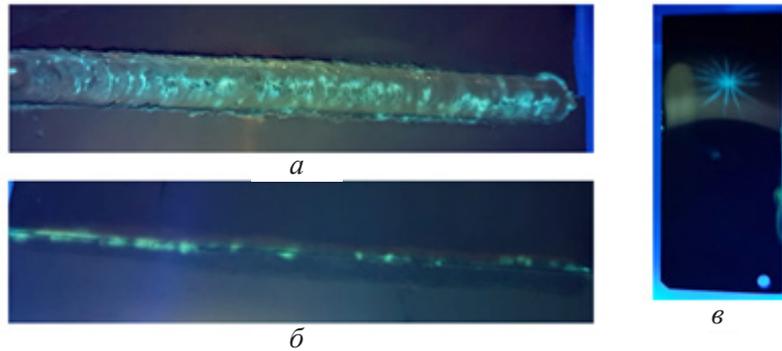


Рис. 3. ЛЮМ-10В образца № 1 по 1 классу чувствительности ГОСТ 18442-80:
a – со стороны «усиления» шва; б – со стороны корня шва; в – контрольный эталон чувствительности
Fig. 3. LUM-10V sample No. 1 according to the 1st class of sensitivity ISO 3452-1:
*a – from the side of the «reinforcement» of the seam; б – from the side of the root of the seam;
 в – reference standard of sensitivity*

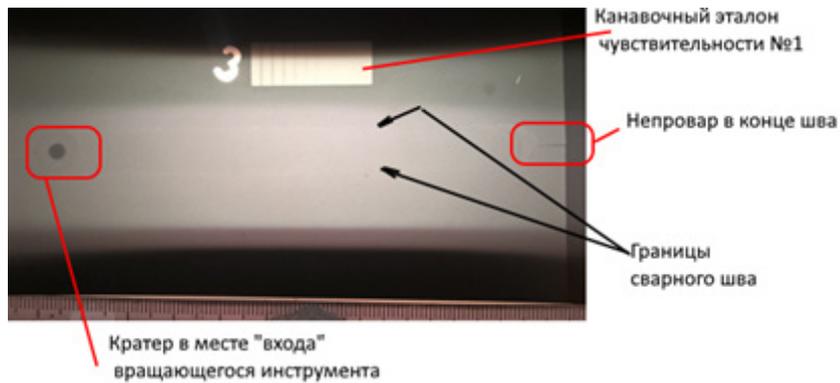


Рис. 4. Снимок образца № 4
Fig. 4. Snapshot of sample No. 4

Выводы

1. Цветная дефектоскопия позволяет обнаружить непровары в корне, пропущенные при ВИК. Однако со стороны усиления шва контроль затруднителен из-за фона, вызванного большой шероховатостью поверхности.

2. Люминесцентный контроль позволил выявить не только непровары в корне, но и множество наружных дефектов. Преимуще-

ство люминесцентного метода по сравнению с цветной дефектоскопией оказалось не только в большей чувствительности контроля, но и в отсутствии фона, вследствие лучшего удаления пенетранта на этапе очистки.

3. Радиографический контроль позволил выявить только непровар в корне. Требуется дальнейшая проверка выявляемости дефектов шва, типичных для СТП (несплавлений

по кромке и пр.), путем сравнения полученных радиографических пленок с данными металлографических исследований.

4. В ходе дальнейших исследований необходима опробация других вышеупомянутых методов НК: УЗК с ФАР, ВК и ТК. После получения достаточного количества сварных образцов предполагается проведение РОС-анализа эффективности различных методов неразрушающего контроля.

Список литературы

1. Использование методов неразрушающего контроля для диагностики дефектов в сварных швах, полученных сваркой трением с перемешиванием / В. Е. Рубцов и др. // Контроль. Диагностика. 2015. № 2. С. 51–58. DOI: 10.14489/td.2015.02.pp.051-058.

2. Рубцов В. Е., Колубаев Е. А., Тарасов С. Ю. Методика ультразвукового контроля сварных соединений, полученных сваркой трением с перемешиванием, с использованием технологии фазированной антенной решетки // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. С. 229.

3. Определение дефекта в виде заглаженного непровара после сварки трением с перемешиванием при неразрушающем контроле / А. В. Филиппов и др. // Фундаментальные исследования. 2015. № 6-2. С. 296–300.

4. Investigation of Nondestructive Testing Methods for Friction Stir Welding / Hossein Taheri et al. // Iowa state university. 2019. V. 9, No. 6. P. 5–29. DOI: 10.3390/met9060624.

5. Santos T. G., Ramos P. M., Vilaça P. Non destructive testing of friction stir welding: Comparison of planar eddy current probes // Proceedings of IMEKO TC4 Symp. Florence. Italy, 2008. No. 16. P. 507–512.

6. Применение лазерно-ультразвукового и акустико-эмиссионного методов неразрушающего контроля на различных этапах дефектообразования при сварке трением с перемешиванием / К. А. Степанова и др. // Дефектоскопия. 2020. № 3. С. 3–13. DOI: 10.31857/S013030822003001X.

7. Оценка применимости метода акустической эмиссии для контроля качества соединений, выполненных сваркой трением с перемешиванием / А. И. Кузин и др. // Сварочное производство. 2020. № 4. С. 41–47.

8. Основные направления деятельности РОНКТД в интересах развития современной производственной базы предприятий ОПК и Роскосмоса / В. Е. Прохорович и др. // В мире неразрушающего контроля. 2018. Т. 21, № 4. С. 68–75. DOI: 10.12737/article_5c3710456751a0.94545597.

9. Тарасов С. Ю., Рубцов В. Е., Колубаев Е. А. Использование микрофокусных источников рентгеновского излучения для дефектоскопии сварных швов после сварки трением с перемешиванием // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 5. С. 237.

10. Advanced technique for non-destructive testing of friction stir welding of metals / L. S. Rosado et al. // Portugal. Non-Destructive Testing of Dissimilar Friction Stir Welds. IMEKO. 2010. No. 8. P. 1021–1030. DOI: 10.1016/j.measurement.2010.02.006.

11. Non-destructive ultrasonic examination of root defects in friction stir welded butt-joints / J. Hettler et al. // Physics Procedia. 2015. No. 70. P. 660–663. DOI: 10.1016/j.ndteint.2016.02.007.

12. Imperfections in friction stir welded zones and their precision non-destructive testing. Studies on characteristics of friction stir welded joints in structural thin aluminium alloys / S. Iwaki et al. // Welding International. 2006. V. 20, No. 3. P. 197–205. DOI: 10.1080/09507110701773984.

13. Non-destructive detection of lack of penetration defects in friction stir welds / D. Levesque et al. // Science and Technology of Welding and Joining. 2012. V. 17, No. 4. P. 295–303. DOI: 10.1179/1362171812Y.0000000007.

14. Evaluation of Friction Stir Welds by X-ray Digital Radiographic Non-Destructive Approach / P. Kah et al. // Materials Science and Engineering. 2014. No. 414. P. 9–13. DOI: 10.1088/1757-899X/413/1/012035.

15. Friction stir weld inspection using the motion induced eddy current testing technique / Hartmut Brauer et al. // AIP Conf. Proc. 2019. No. 2102. P. 3–6. DOI: 10.1063/1.5099812.

16. Non-destructive testing of specimens obtained by friction stir welding for aeronautical applications / A. Manescu, et al. / W&MT. 2010. No. 3. P. 45–49.

17. Suresha C. N., Rajaprakash B. M., Sarala Upadhy. Applicability of acoustic emission

in the analysis of friction stir welded joints // International Journal of Recent Trends in Engineering. 2009. V. 1, No. 5. P. 86–89.

18. Non-destructive inspection of welding defects in friction stir welds and prediction of their fatigue life / Yoshihiko Uematsu et al. // J-Stage. 2015. No. 30. P. 220–227. DOI: 10.2207/qjws.30.220.

19. Santos T., Vilaça P., Quintino L. Developments in NDT for Detecting Imperfections in Friction Stir Welds in Aluminium Alloys // Welding in the World. 2008. V. 52, No. 9–10. P. 30–37. DOI: 10.1007/BF03266666.

20. Akinlabi E. T., Levy A. C. S., Akinlabi S. A. Non-Destructive Testing of Dissimilar Friction Stir Welds // WCE. 2012. No. 3. P. 13–18.