

Сравнительный анализ химического состава и механических свойств различных участков сварного соединения дюралюмина, полученного сваркой трением с перемешиванием

© 2024

Щапов Геннадий Валерьевич¹, аспирант, младший научный сотрудник

Казанцева Наталья Васильевна*², доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник
Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения РАН, Екатеринбург (Россия)

*E-mail: kazantseva@imp.uran.ru

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2106-6381>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4143-1064>

Поступила в редакцию 27.06.2023

Принята к публикации 21.11.2023

Аннотация: Сварка трением с перемешиванием в авиастроении и машиностроении является передовым способом соединения различных металлов и сплавов, плохо свариваемых или несвариваемых обычными способами. Активно используемый в авиастроении высокопрочный алюминиевый сплав Д16 плохо поддается сварке плавлением, что связано с образованием дендритной структуры в зоне сплавления, приводящей к снижению механической прочности соединения. В работе исследована микроструктура и микротвердость сварного шва алюминиевого сплава Д16, полученного методом сварки трением с перемешиванием. Методами сканирующей электронной микроскопии и оптической металлографии выявлено наличие трех зон: ядра шва, зоны термомеханического воздействия и зоны термического воздействия. В центральной части сварного соединения (в ядре) обнаружена слоистая структура «луковичных колец». Обнаружено изменение химического состава твердого раствора алюминия в различных областях зон сварного шва, а также присутствие концентрационного градиента внутри каждой зоны. В верхней части сварного шва наблюдается обогащение твердого раствора кремнием и обеднение медью. Благодаря обеднению твердого раствора легирующими элементами содержание алюминия в зоне сварного соединения в твердом растворе выше по сравнению с исходным состоянием. Значения микротвердости в различных областях сварного соединения коррелируют с изменением химического состава. В зоне сварного соединения обнаружено значительное снижение микротвердости по сравнению с исходным состоянием, а также наблюдается изменение микротвердости, связанное с градиентом химического состава внутри каждой зоны.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием; дюралюмин; алюминий; слоистая структура; структура «луковичных колец».

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема «Аддитивность», № 121102900049-1).

Статья подготовлена по материалам докладов участников XI Международной школы «Физическое материаловедение» (ШФМ-2023), Тольятти, 11–15 сентября 2023 года.

Для цитирования: Щапов Г.В., Казанцева Н.В. Сравнительный анализ химического состава и механических свойств различных участков сварного соединения дюралюмина, полученного сваркой трением с перемешиванием // Frontier Materials & Technologies. 2024. № 2. С. 113–119. DOI: 10.18323/2782-4039-2024-2-68-10.

ВВЕДЕНИЕ

Сварка трением с перемешиванием (СТП) – относительно новый метод получения неразъемных соединений материалов, предложенный в 1991 г. Институтом сварки Великобритании. Сварка трением с перемешиванием представляет собой процесс соединения в твердом состоянии, при котором не происходит объемного плавления основного материала [1; 2]. Исследования последних лет показали, что СТП является эффективным способом получения качественных соединений конструкций различных размеров и форм, включая листы, трехмерные профильные конструкции и трубы. Его применяют для восстановления изношенных деталей, заварки трещин и дефектов литья. По сравнению с традиционными методами сварки плавлением, при СТП отсутствуют признаки литой структуры в зоне соединения, соединяемые детали имеют малую деформацию и остаточные напряжения,

нет необходимости проведения операций по очистке поверхности от окислов перед процессом сварки, а также отсутствуют дефекты, возникающие в результате плавления и затвердевания.

Соединение деталей осуществляется путем фрикционного нагрева и пластической деформации, как правило, при температурах ниже абсолютной температуры плавления соединяемых сплавов. Это достигается за счет взаимодействия вращающегося инструмента, состоящего из штифта и выступа (пина), с сопрягаемыми поверхностями, в которые он погружается до тех пор, пока выступ не соприкоснется с верхней поверхностью заготовок, а затем перемещается по границе раздела заготовок (рис. 1). Обладая широкими технологическими возможностями получения неразъемных соединений деталей или узлов, СТП может быть использована как альтернатива заклепочным соединениям, электродуговой сварке, электронно-лучевой и лазерной сварке, а также для сварки разнородных материалов.



Рис. 1. Схема процесса сварки трением с перемешиванием
Fig. 1. The diagram of the process of friction stir welding

Выбору режимов сварки трением с перемешиванием посвящено большое количество работ. Обычно варьируют скорость вращения и перемещения инструмента [3; 4], форму пина [5], предварительный нагрев образца [6]. При этом подробного исследования изменения химического состава и механических свойств в разных областях сварного соединения, включая верхнюю и нижнюю его часть, в литературе не обнаружено.

Высокопрочный дюралюмин марки Д16 авиационного назначения, как правило, плохо поддается сварке плавлением, поскольку при использовании этого вида сварки в зоне сплавления образуется дендритная структура, что приводит к резкому снижению механической прочности [7]. Согласно [8–10] при СТП металл не достигает температуры плавления, поэтому СТП можно получать высококачественные бездефектные сварные швы при правильном выборе параметров сварки высокопрочных сплавов Д16, а также избегая тяжелых циклов нагрева и охлаждения, возникающих при сварке плавлением.

При применении СТП важно изучить механизмы и выявить физические закономерности формирования структурного состояния и факторы, приводящие к образованию структурных неоднородностей и несплошностей в сварном шве. Выявление таких закономерностей позволит выбрать оптимальные характеристики СТП и сделать прогноз эксплуатационных свойств сварного изделия. Большое влияние на механические свойства оказывает изменение химического состава твердого раствора сплава. Для дисперсионно-упрочняющихся алюминиевых сплавов, кроме основных упрочняющих интерметаллидных фаз, возможно присутствие вторичных

фаз, которые при определенных термомеханических взаимодействиях могут в значительной мере обеднять твердый раствор и за счет коагуляции частиц снижать общие прочностные свойства материала [11; 12].

Цель исследования – анализ распределения химического состава и механических свойств в зоне сварного шва, полученного сваркой трением с перемешиванием стыкового соединения из сплава Д16.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования использовали пластины из дюралюмина марки Д16 ГОСТ 4784-2019 (зарубежные аналоги AA2024, AlCuMg2). Прямое стыковое сварное соединение было получено методом сварки трением с перемешиванием с помощью экспериментального стенда. Использовался сварочный инструмент из быстрорежущей стали Р6М5, диапазон скорости вращения инструмента 400–600 об/мин, скорость перемещения инструмента 320 мм/мин. Вырезанные с помощью электроискровой установки образцы исследовались в поперечном и продольном сечении сварного соединения. Химический состав исходных пластин сплава Д16 и химический состав согласно ГОСТ 4784-2019 приведен в таблице 1.

Структурные исследования выполняли с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM 6490 с системой энергодисперсионного и волнового микроанализа Oxford Inca и оптического микроскопа «Микромед МЕТ» с возможностью съемки в поляризованном свете. Анализ структуры и химического состава твердого раствора в зоне сварного шва проводили по

Таблица 1. Химический состав сплава Д16, мас. %
Table 1. Chemical composition of the D16 alloy, wt. %

Состав сплава	Al	Mg	Cu	Fe	Si	Mn	Zn	Ti	Cr
Согласно ГОСТ 4784-2019	Основа	1,2–1,8	3,8–4,9	<0,5	<0,5	0,3–0,9	<0,25	<0,15	<0,1
Исходный образец	93,34	1,31	4,23	0,3	0,16	0,54	0,08	0,04	0,004

трассам А, Б, В через каждые 4 мм. За первую точку отсчета брали центр нижнего края сварного шва. Область с нулевым положением соответствовала исходному материалу. Размер анализируемой области, не включающей выделения интерметаллидных фаз, составил 5×5 мкм, диаметр зонда в растровом электронном микроскопе – 3 мкм. Микротвердость измерялась с помощью прибора «Металаб-502», нагрузка составила 0,490 Н, время 10 с. Значение микротвердости определяли по 5 измерениям.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 2 приведен оптический снимок поперечного сечения сварного шва исследованного сплава Д16. На оптическом снимке в сварном соединении хорошо видны три различные зоны, отличающиеся цветом: зона ядра, зона термомеханического воздействия и зона термического воздействия. В центральной части сварного соединения (в ядре) можно видеть слоистую структуру «луковичных

колец» (рис. 2, трассы А, Б). В нашем случае трасса В проходит через зону термомеханического воздействия, а трасса Г – через зону термического воздействия (рис. 2).

На рис. 3 представлены результаты измерения химического состава твердого раствора в различных областях сварного шва (по выделенным трассам), полученные с помощью сканирующего микроскопа. В зоне термомеханического воздействия (область 7) в нижней части соединения наблюдается повышение содержания кремния (рис. 3 а) и снижение содержания алюминия (рис. 3 б). По сравнению с исходным состоянием, содержание алюминия в зоне сварного соединения в твердом растворе в целом выше (рис. 3 б).

Можно также отметить увеличение содержания меди в твердом растворе в ядре сварного соединения и в зоне термомеханического воздействия по сравнению с исходным состоянием. При этом в центре ядра (области 2 и 3) содержание меди падает, а кремния – растет. Основной упрочняющей фазой сплава Д16 является S-фаза, однако макровыделений этой фазы нами не обнаружено.

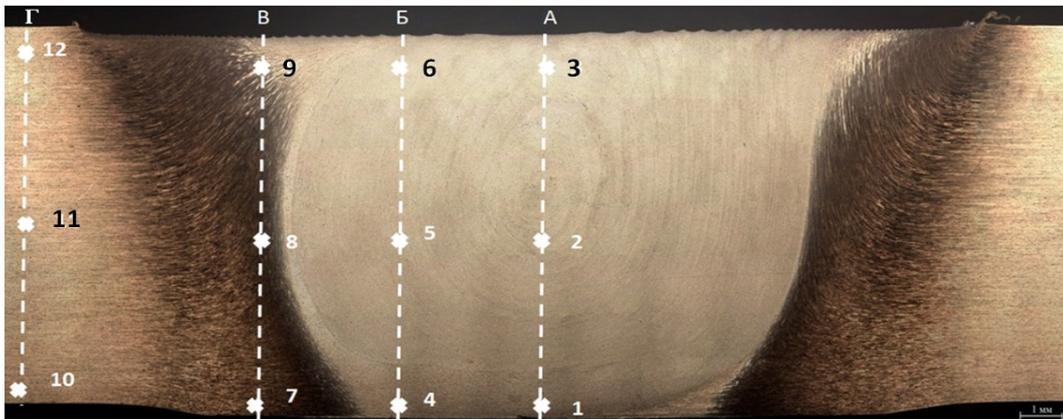


Рис. 2. Микроструктура поперечного сечения сварного соединения с указанием областей исследования
 Fig. 2. Microstructure of the welded joint cross section indicating areas of study

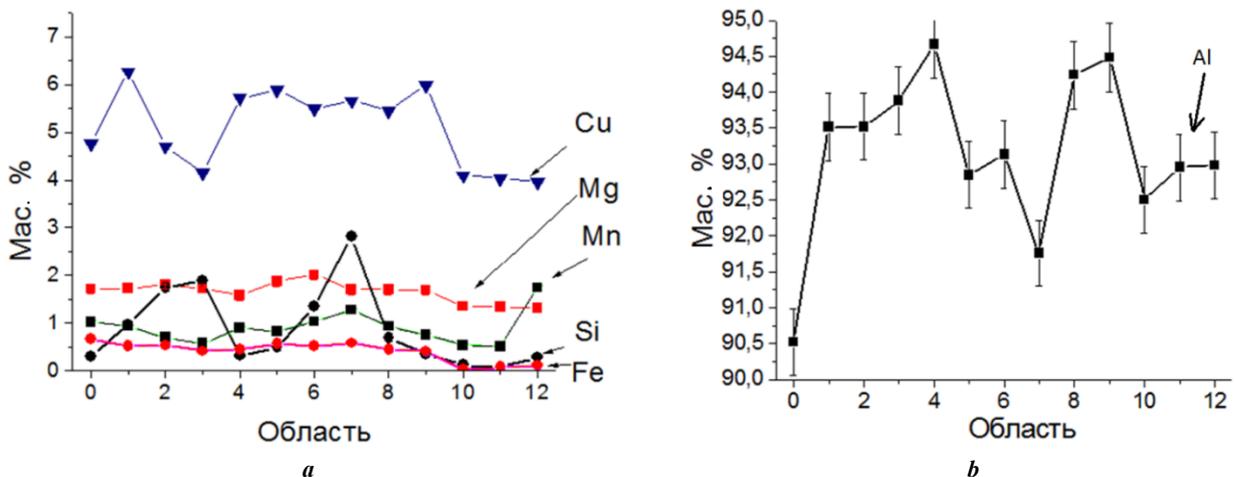


Рис. 3. Распределение легирующих элементов (а) и алюминия (б) в зоне сварного соединения
 Fig. 3. Distribution of alloying elements (a) and aluminum (b) in the welded joint area

На рис. 4 приведены результаты измерения микротвердости в различных областях сварного соединения. В зоне сварного соединения происходит значительное снижение микротвердости по сравнению с исходным состоянием (точка 0) (рис. 4). Точка 9 – граница между ядром и термомеханической зоной, в которой наблюдается резкое повышение микротвердости.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Согласно литературным данным, в сварном соединении можно выделить три зоны: ядро шва, зону термомеханического воздействия и зону термического воздействия [12]. Эти три зоны хорошо видны на рис. 2. Согласно [12], слоистая структура «луковичных колец» формируется при вращении инструмента в пластифицированном металле, что и наблюдалось в центре сварного соединения.

Наноразмерные выделения упрочняющей *S*-фазы в сплаве AA2024 (российский аналог Д16) после сварки трением с перемешиванием были обнаружены в локальных участках сварного соединения с повышенной микротвердостью только с помощью просвечивающей электронной микроскопии [13]. Это объясняет факт отсутствия *S*-фазы в нашем случае при оптическом и сканирующем электронно-микроскопическом исследованиях.

Изменение химического состава твердого раствора в сварном соединении можно объяснить выделением вторичных фаз, обогащенных медью и кремнием. В сплаве

AA2024 системы Al–Cu–Mg (российский аналог Д16) в работах [14; 15] были обнаружены вторичные интерметаллидные микроструктурные фазы, содержащие кремний и медь: Al_2Cu , $AlCuFeMnSi$, Mg_2Si , Al_7Cu_2Fe , $Al_{12}(Fe,Mn)_3Si$, $Al_{20}Mg_3Cu_2$. В зонах и термомеханического воздействия и ядра сварного соединения, согласно литературным данным, возможно повышение температуры до 500 °С [16–18], что может вызывать выделения вторичных интерметаллидных фаз, приводящих к изменению содержания твердого раствора.

Повышение температуры способствует ускорению диффузии химических элементов в алюминиевых сплавах. В таблице 2 представлены коэффициенты диффузии химических элементов в алюминии, полученные в работе [16], из которой можно видеть, что кремний является самым подвижным элементом при температуре 500 °С. Коэффициент самодиффузии алюминия близок к коэффициенту диффузии меди. Самым «медленным» элементом является марганец. Учитывая, что диффузионный фронт движется со скоростью самого «медленного» элемента, при этой температуре можно ожидать медленный рост фаз, содержащих марганец. Поэтому появление таких фаз может быть вызвано не только термическим, но и деформационным воздействием.

Изменения микроструктуры в различных зонах оказывают большое влияние на механические свойства соединения после сварки [19]. Подобное обнаруженному в нашей работе изменению микротвердости в зоне сварного соединения наблюдали в [20; 21]. В работе [3]

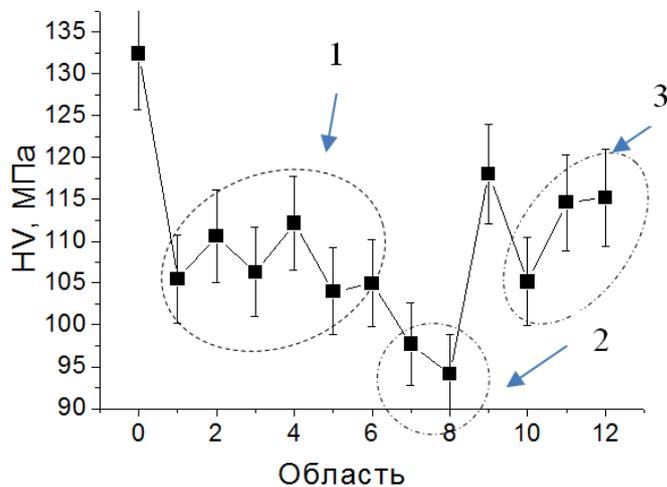


Рис. 4. Результаты измерения микротвердости в зоне сварного соединения: 1 – ядро; 2 – зона термомеханического воздействия; 3 – зона термического воздействия

Fig. 4. The results of measuring microhardness in the welded joint area: 1 – core; 2 – thermomechanical impact zone; 3 – heat effected zone

Таблица 2. Коэффициенты диффузии элементов в алюминии при 500 °С, м²/с [Привод. по 16, с. 10]
Table 2. Coefficients of diffusion of elements in aluminum at 500 °C, m²/s [Repr. from 16, p. 10]

Al	Mg	Cu	Fe	Si	Mn
$4,3 \times 10^{-14}$	$9,9 \times 10^{-14}$	$4,0 \times 10^{-14}$	$8,9 \times 10^{-16}$	13×10^{-13}	$7,4 \times 10^{-18}$

было обнаружено, что микротвердость алюминиевого сплава зависит от частоты вращения пина и скорости его перемещения. Сравнивая полученные в нашей работе результаты с данными [3], можно говорить о различной скорости перемешивания материала в различных областях сварного соединения. Согласно литературным данным, фазовое старение в алюминиевых сплавах приводит как к упрочнению, так и к разупрочнению материала. Разупрочнение связано с коагуляцией частиц вторичных упрочняющих фаз [12]. Значительное снижение микротвердости в нижней части зоны термомеханического воздействия (область 8 на рис. 2) может быть связано именно с укрупнением выделившихся вторичных фаз, обогащенных медью и кремнием. При этом рост микротвердости в верхней части зоны термомеханического воздействия (область 9 на рис. 2) может быть связан с выделением мелких вторичных фаз. Данные предположения согласуются с результатами исследований химического состава твердого раствора в этих областях (рис. 3).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Обнаружено изменение содержания алюминия и перераспределение легирующих элементов (Si, Cu) в твердом растворе в различных областях зон сварного шва. По сравнению с исходным состоянием, содержание алюминия в зоне сварного соединения в твердом растворе выше. Обнаружено увеличение содержания меди в твердом растворе в ядре сварного соединения и в зоне термомеханического воздействия, по сравнению с исходным состоянием. При этом в центре ядра содержание меди падает, а содержание кремния растет, что, предположительно, связано с выделением при деформационном воздействии вторичных фаз типа $Al_{12}(Fe, Mn)_3Si$ или $AlCuFeMnSi$, обогащенных медью и кремнием.

2. В зоне сварного соединения наблюдается значительное снижение микротвердости по сравнению с исходным состоянием, что может быть связано с коагуляцией частиц вторичных упрочняющих фаз, обогащенных медью и кремнием.

3. Внутри каждой зоны сварного шва наблюдается градиент химического состава твердого раствора, что также коррелирует с изменением микротвердости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Thomas W.M., Nicholas E.D., Needham J.C., Murch M.G., Templesmith P., Smith C.J. Friction stir butt welding: patent USA № 5460317, 1995. 10 p.
2. Дриц А.М., Овчинников В.В., Васильев П.А. Исследование структуры и механических свойств соединений сплавов системы Al–Cu–Mg, полученных сваркой трением с перемешиванием // Технология легких сплавов. 2019. № 4. С. 17–25. EDN: [NVFMZO](#).
3. Radhika Ch., Shyam Kumar N. Process Parameters Optimization of Aa2024 Alloy Friction Stir Welding using Taguchi's Technique // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering. 2019. Vol. 8. № 11. P. 1940–1945. DOI: [10.35940/ijitee.K2138.0981119](#).
4. Ridha M.H., Alkhazraji S.K., Abdull I.T. Investigation of Friction Stir Welding of AA2024-T4 Thin Sheets for Industrial Applications // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 881. Article number 012074. DOI: [10.1088/1757-899X/881/1/012074](#).
5. Luo Jian, Wang Jiafa, Lin Hongxin, Yuan Lei, Gao Jianjun, Geng Haibin. Study on the Relationship between Root Metal Flow Behavior and Root Flaw Formation of a 2024 Aluminum Alloy Joint in Friction Stir Welding by a Multiphysics Field Model // Metals. 2020. Vol. 10. № 7. Article number 913. DOI: [10.3390/met10070913](#).
6. Kubit A., Kluz R., Ochaek K., Wydrzyński D., Trzepieciński T. Friction stir welding of 2024-T3 aluminium alloy sheet with sheet pre-heating // Materials and technology. 2018. Vol. 52. № 3. P. 283–288. DOI: [10.17222/mit.2017.084](#).
7. Генри А., Логинова И.С., Кравченко К.В., Даубарайте Д.К., Рябов Д.К. Влияние иттрия на сопротивление образованию горячих трещин, микроструктуру и свойства сплава Д16 при лазерном плавлении // Технология легких сплавов. 2019. № 4. С. 26–34. EDN: [NZTBBX](#).
8. Cavaliere P., Nobile R., Pannella F.W., Squillace A. Mechanical and microstructural behaviour of 2024–7075 aluminium alloy sheets joined by friction stir welding // International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2006. Vol. 46. № 6. P. 588–594. DOI: [10.1016/J.IJMACHTOOLS.2005.07.010](#).
9. Cavaliere P., Cerri E., Squillace A. Mechanical response of 2024–7075 aluminium alloys joined by friction stir welding // Journal of Material Science. 2005. Vol. 40. P. 3669–3676. DOI: [10.1007/s10853-005-0474-5](#).
10. Zadpoor A.A., Sinke J., Benedictus R., Pieters R. Mechanical properties and microstructure of friction stir welded tailor-made blanks // Materials Science and Engineering: A. 2008. Vol. 494. № 1–2. P. 281–290. DOI: [10.1016/j.msea.2008.04.042](#).
11. Воробьев П.А., Сорокина С.А., Евстифеева В.В. Фазовый состав деформируемых алюминиевых сплавов Д16 с количественной оценкой пережога разных стадий развития // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2020. № 1. С. 68–78. DOI: [10.17073/0021-3438-2020-1-68-78](#).
12. Krishnan K.N. On the formation of onion rings in friction stir welds // Materials Science and Engineering: A. 2002. Vol. 327. № 2. P. 246–251. DOI: [10.1016/S0921-5093\(01\)01474-5](#).
13. Morozova I., Królicka A., Obrosov A., Yang Y., Doyunov N., Weiß S., Michailov V. Precipitation phenomena in impulse friction stir welded 2024 aluminium alloy // Materials Science and Engineering: A. 2022. Vol. 852. Article number 143617. DOI: [10.1016/j.msea.2022.143617](#).
14. Zhang Fan, Levine L.E., Allen A.J., Campbell C.E., Creuziger A.A., Kazantseva N., Ilavsky J. In situ structural characterization of ageing kinetics in aluminum alloy 2024 across angstrom-to-micrometer length scales // Acta Materialia. 2016. Vol. 111. P. 385–398. DOI: [10.1016/j.actamat.2016.03.058](#).
15. Mrówka-Nowotnik G., Sieniawski J. Analysis of intermetallic phases in 2024 aluminium alloy // Solid State Phenomena. 2013. Vol. 197. P. 238–243. DOI: [10.4028/www.scientific.net/SSP.197.238](#).
16. Czerwinski F. Thermal Stability of Aluminum Alloys // Materials. 2020. Vol. 13. № 15. Article number 3441. DOI: [10.3390/ma13153441](#).

17. Tang W., Guo X., McClure J., Murr L., Nunes A.C. Heat input and temperature distribution in friction stir welding // *Journal of Materials Processing and Manufacturing Science*. 1998. Vol. 7. № 2. P. 163–172.
18. Chen C.M., Kovacevic R. Finite element modeling of friction stir welding-thermal and thermomechanical analysis // *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2003. Vol. 43. № 13. P. 1319–1326. DOI: [10.1016/S0890-6955\(03\)00158-5](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00158-5).
19. Mishra R.S., Ma Z.Y. Friction stir welding and processing // *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 2005. Vol. 50. № 1-2. P. 1–78. DOI: [10.1016/j.mser.2005.07.001](https://doi.org/10.1016/j.mser.2005.07.001).
20. Dawes C.J. An introduction to friction stir welding and its development // *Welding and Metal fabrication*. 1995. P. 14–16.
21. Dawes C.J., Thomas W.M. Friction stir joining of aluminium alloys // *TWI Bulletin*. 1995. Vol. 6. P. 124–127.
9. Cavaliere P., Cerri E., Squillace A. Mechanical response of 2024–7075 aluminium alloys joined by friction stir welding. *Journal of Material Science*, 2005, vol. 40, pp. 3669–3676. DOI: [10.1007/s10853-005-0474-5](https://doi.org/10.1007/s10853-005-0474-5).
10. Zadpoor A.A., Sinke J., Benedictus R., Pieters R. Mechanical properties and microstructure of friction stir welded tailor-made blanks. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, vol. 494, no. 1-2, pp. 281–290. DOI: [10.1016/j.msea.2008.04.042](https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.04.042).
11. Vorobev R.A., Sorokina S.A., Evstifeeva V.V. Phase composition of deformable D16 and B95 aluminium alloys with the quantitative assessment of overburning of different stages of development. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy / Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya metallurgiya*, 2020, no. 1, pp. 68–78. DOI: [10.17073/0021-3438-2020-1-68-78](https://doi.org/10.17073/0021-3438-2020-1-68-78).
12. Krishnan K.N. On the formation of onion rings in friction stir welds. *Materials Science and Engineering: A*, 2002, vol. 327, no. 2, pp. 246–251. DOI: [10.1016/S0921-5093\(01\)01474-5](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(01)01474-5).
13. Morozova I., Królicka A., Obrosov A., Yang Y., Doynov N., Weiß S., Michailov V. Precipitation phenomena in impulse friction stir welded 2024 aluminium alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, vol. 852, article number 143617. DOI: [10.1016/j.msea.2022.143617](https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.143617).
14. Zhang Fan, Levine L.E., Allen A.J., Campbell C.E., Creuziger A.A., Kazantseva N., Ilavsky J. In situ structural characterization of ageing kinetics in aluminum alloy 2024 across angstrom-to-micrometer length scales. *Acta Materialia*, 2016, vol. 111, pp. 385–398. DOI: [10.1016/j.actamat.2016.03.058](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.03.058).
15. Mrówka-Nowotnik G., Sieniawski J. Analysis of intermetallic phases in 2024 aluminium alloy. *Solid State Phenomena*, 2013, vol. 197, pp. 238–243. DOI: [10.4028/www.scientific.net/SSP.197.238](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.197.238).
16. Czerwinski F. Thermal Stability of Aluminum Alloys. *Materials*, 2020, vol. 13, no. 15, article number 3441. DOI: [10.3390/ma13153441](https://doi.org/10.3390/ma13153441).
17. Tang W., Guo X., McClure J., Murr L., Nunes A.C. Heat input and temperature distribution in friction stir welding. *Journal of Materials Processing and Manufacturing Science*, 1998, vol. 7, no. 2, pp. 163–172.
18. Chen C.M., Kovacevic R. Finite element modeling of friction stir welding-thermal and thermomechanical analysis. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2003, vol. 43, no. 13, pp. 1319–1326. DOI: [10.1016/S0890-6955\(03\)00158-5](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00158-5).
19. Mishra R.S., Ma Z.Y. Friction stir welding and processing. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 2005, vol. 50, no. 1-2, pp. 1–78. DOI: [10.1016/j.mser.2005.07.001](https://doi.org/10.1016/j.mser.2005.07.001).
20. Dawes C.J. An introduction to friction stir welding and its development. *Welding and Metal fabrication*, 1995, pp. 14–16.
21. Dawes C.J., Thomas W.M. Friction stir joining of aluminium alloys. *TWI Bulletin*, 1995, vol. 6, pp. 124–127.

REFERENCES

1. Thomas W.M., Nicholas E.D., Needham J.C., Murch M.G., Templesmith P., Smith C.J. *Friction stir butt welding*: patent USA no. 5460317, 1995, 10 p.
2. Drits A.M., Ovchinnikov V.V., Vasilev P.A. Studies of structure and mechanical properties of Al–Cu–Mg alloy joints made by friction stir welding. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2019, no. 4, pp. 17–25. EDN: [NVFMZO](https://www.edn.ru/NVFMZO).
3. Radhika Ch., Shyam Kumar N. Process Parameters Optimization of Aa2024 Alloy Friction Stir Welding using Taguchi's Technique. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 2019, vol. 8, no. 11, pp. 1940–1945. DOI: [10.35940/ijitee.K2138.0981119](https://doi.org/10.35940/ijitee.K2138.0981119).
4. Ridha M.H., Alkhazraji S.K., Abdull I.T. Investigation of Friction Stir Welding of AA2024-T4 Thin Sheets for Industrial Applications. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 881, article number 012074. DOI: [10.1088/1757-899X/881/1/012074](https://doi.org/10.1088/1757-899X/881/1/012074).
5. Luo Jian, Wang Jiafa, Lin Hongxin, Yuan Lei, Gao Jianjun, Geng Haibin. Study on the Relationship between Root Metal Flow Behavior and Root Flaw Formation of a 2024 Aluminum Alloy Joint in Friction Stir Welding by a Multiphysics Field Model. *Metals*, 2020, vol. 10, no. 7, article number 913. DOI: [10.3390/met10070913](https://doi.org/10.3390/met10070913).
6. Kubit A., Kluz R., Ochaek K., Wydrzyński D., Trzpieciński T. Friction stir welding of 2024-T3 aluminium alloy sheet with sheet pre-heating. *Materials and technology*, 2018, vol. 52, no. 3, pp. 283–288. DOI: [10.17222/mit.2017.084](https://doi.org/10.17222/mit.2017.084).
7. Genri A., Loginova I.S., Kravchenko K.V., Daubarayte D.K., Ryabov D.K. An effect of yttrium on hot cracking resistance, microstructure and properties of D16 alloy produced by laser melting. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2019, no. 4, pp. 26–34. EDN: [NZTBX](https://www.edn.ru/NZTBX).
8. Cavaliere P., Nobile R., Pannella F.W., Squillace A. Mechanical and microstructural behaviour of 2024–7075 aluminium alloy sheets joined by friction stir welding. *International Journal of Machine Tools*

Comparative analysis of the chemical composition and mechanical properties of duralumin welded joint produced by friction stir welding

© 2024

Gennady V. Shchapov¹, postgraduate student, junior researcher

Nataliya V. Kazantseva*², Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Associate Professor, chief researcher
M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of RAS, Yekaterinburg (Russia)

*E-mail: kazantseva@imp.uran.ru

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2106-6381>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4143-1064>

Received 27.06.2023

Accepted 21.11.2023

Abstract: Friction stir welding is an advanced method of joining various metals and alloys in the aircraft and mechanical engineering industries. This type of welding is used to join materials that are difficult to weld or not weldable by conventional methods. The high-strength D16 aluminum alloy is difficult to weld by fusion, which is associated with the formation of a dendritic structure in the fusion zone leading to a decrease in the mechanical strength of the joint. In the work, the microstructure and microhardness of a welded seam of the D16 aluminum alloy produced by friction stir welding was studied. Using scanning electron microscopy and optical metallography, the authors identified the presence of three zones: the weld core, the thermomechanical impact zone, and the heat affected zone. In the central part of the welded joint (in the core), a laminated onion ring structure was discovered. A change in the chemical composition of the aluminum solid solution was identified in different areas of the weld zones, as well as the presence of a concentration gradient within each zone. In the upper part of the welded seam, the solid solution is silicon-enriched and depleted in copper. Due to the solid solution depletion in alloying elements, the aluminum content in the solid solution in the zone of the welded joint is higher compared to the initial state. The microhardness values in different areas of the welded joint correlate with changes in the chemical composition. In the welded joint zone, a significant decrease in microhardness was found compared to the initial state, and a change in microhardness associated with the chemical composition gradient within each zone was also observed.

Keywords: friction stir welding; duralumin; aluminum; laminated structure; onion ring structure.

Acknowledgments: The work was carried out within the state assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (topic "Additivity", No. 121102900049-1).

The paper was written on the reports of the participants of the XI International School of Physical Materials Science (SPM-2023), Togliatti, September 11–15, 2023.

For citation: Shchapov G.V., Kazantseva N.V. Comparative analysis of the chemical composition and mechanical properties of duralumin welded joint produced by friction stir welding. *Frontier Materials & Technologies*, 2024, no. 2, pp. 113–119. DOI: 10.18323/2782-4039-2024-2-68-10.