

**HEAT TREATMENT OF ALUMINIUM CONDUCTIVE BUSES
MADE OF AD31 ALLOY AFTER FRICTION STIR TREATMENT**

Andrey Evgenievich Medvedev^{1a}, *Aleksei Sergeevich Selivanov*², *Artur Vilevich Ganeev*³,
*Yuri Vladimirovich Logachev*², *Valerii Vladimirovich Atroshchenko*²

¹ Research Laboratory for Metals and Alloys under Extreme Impacts, Ufa University of Science and Technology, 32 Zaki Validi St., 450076, Ufa, Russia

² "SvarkaTechService" Attestation Center LLC, 155/1 Parkhomenko St., 450001, Ufa, Russia

³ Unified Innovation Complex, Ufa University of Science and Technology, 32 Zaki Validi St., 450076, Ufa, Russia

^a medvedevandreyrf@gmail.com

ABSTRACT

In this study, the effect of different heat treatment modes on the structure and properties of a conductive busbar made of aluminum alloy AD31, subjected to friction stir processing according to five different schemes, was investigated. Heat treatment was carried out in three modes – T1, T4 and T6, standard for aluminum alloys of the Al-Fe-Si system. It is shown that the morphology of crystallites remains virtually unchanged as a result of T1, T4 and T6 treatments. The electrical conductivity of the studied samples remains within the error limits relative to the original material. T6 treatment leads to an increase in electrical conductivity in all studied samples by an average of 2 MS/m. The maximum increase in electrical conductivity is observed in areas corresponding to the strongest drop in electrical conductivity as a result of FSP.

KEYWORDS

Friction stir processing; Al-Mg-Si; aluminium alloy; fine-grained structure; microhardness; electrical conductivity.

**ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА АЛЮМИНИЕВЫХ
ТОКОПРОВОДЯЩИХ ШИН ИЗ СПЛАВА АД31
ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ ТРЕНИЕМ ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ**

Андрей Евгеньевич Медведев^{1a}, *Алексей Сергеевич Селиванов*²,
*Артур Вилевич Ганеев*³, *Юрий Владимирович Логачев*²,
*Валерий Владимирович Атрощенко*²

¹ НИЛ «Металлы и сплавы при экстремальных воздействиях», Уфимский университет науки и технологий, 450076, Россия, Уфа, ул. Заки Валиди, 32

² ООО «АЦ СваркаТехСервис», 450001, Россия, Уфа, ул. Пархоменко, 155/1

³ Единый инновационный комплекс, Уфимский университет науки и технологий, 450076, Россия, Уфа, ул. Заки Валиди, 32

^a medvedevandreyrf@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Было исследовано влияние разных режимов термической обработки на структуру и свойства токопроводящей шины из алюминиевого сплава АД31, подвергнутой обработке трением перемешиванием по пяти различным схемам. Термическая обработка проводилась по трем режимам – Т1, Т4 и Т6, стандартных для алюминиевых сплавов системы Al-Fe-Si. Показано, что морфология кристаллитов практически не меняется в результате обработок Т1, Т4 и Т6. Электропроводность исследуемых образцов остается в пределах погрешности относительно исходного материала. Обработка Т6 приводит к росту электропроводности во всех исследуемых образцах в среднем на 2 МСм/м. Максимальный рост электропроводности наблюдается на участках, соответствующих наиболее сильному падению электропроводности вследствие ОТП.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Обработка трением перемешиванием; АД31; Al-Mg-Si; алюминиевый сплав; мелкозернистая структура; микротвердость; электропроводность.

Введение

Алюминий играет важную роль в современной промышленности, а его производство является одним из стратегических направлений в цветной металлургии [1, 2]. Низкая плотность, высокая теплопроводность, низкое электросопротивление, высокая пластичность, коррозионная стойкость, хорошая технологичность, рециклируемость и ряд эксплуатационных характеристик делают алюминиевые сплавы основным конструкционным материалом в аэрокосмической промышленности, строительстве, железнодорожном транспорте, автомобилестроении и судостроении [3–5]. Спектр применения алюминиевых сплавов постоянно расширяется. Появляются новые методы получения алюминия и сплавов на его основе, а также получения изделий и полуфабрикатов из них. В то же время для современного машиностроения актуальны вопросы разработки новых и совершенствования существующих технологий [6–8].

В последние годы активно развиваются направления создания градиентных структур в материалах, в том числе на основе алюминия [9, 10]. Структура таких матери-

алов характеризуется наличием заданных неоднородностей, которые придают материалу различные свойства, недостижимые при равномерной структуре материала. Наиболее распространенным методом получения градиентных структур является обработка поверхности; поскольку этот процесс относительно доступен, на данный момент существует множество способов такой обработки.

Одним из подходов к обработке поверхности для получения градиентной структуры является обработка трением перемешиванием (ОТП) [11, 12]. Существует множество методов обработки трением, включая сварку трением перемешиванием, обработку трением перемешиванием, радиальную сварку трением, пайку трением и т. д., из которых наиболее распространенным является ОТП [13–15].

ОТП представляет собой технологию, направленную на изменение структуры и свойств поверхности материала в твердом состоянии, что позволяет избежать таких негативных эффектов, как плавление, приводящее к окислению металла, пережог или снижение прочностных свойств [16, 17]. Область исследования ОТП достаточно разви-

та, и на данный момент существует множество работ, направленных на исследование структуры и свойств алюминиевых сплавов, подвергнутых ОТП [14, 18].

В проведенных ранее исследованиях группа авторов сумела подобрать оптимальные для сплава АД31 режимы и схемы реализации ОТП [19–21]. Однако, природа изменения свойств в исследуемых образцах не была установлена. Наблюдаемые изменения электропроводности образцов могли быть связаны с рядом структурных факторов, одновременно изменяющихся в ходе такого комплексного воздействия, как ОТП.

Целью данного исследования является анализ изменения микроструктуры и свойства алюминиевого сплава АД31Т, обработанного методом ОТП по пяти различным схемам и подвергнутого термической обработке (ТО). Так как сплав АД31 относится к термически упрочняемым, были выбраны режимы Т1, Т4 и Т6 [22, 23].

1. Методика исследований

В качестве материала исследования использовались горячекатаные шины из алюминиевого сплава АД31 (аналог АА6063) с габаритами 10×100×30000 мм.

Обработка материала проводилась на вертикально-консольно-фрезерном станке ФСС-400, адаптированном для ОТП, по 2 различным схемам обработки: с величиной перекрытия параллельных треков 10 мм и 5 мм. Параметры ОТП: скорость вращения инструмента 1120 об/мин, линейная скорость инструмента 200 мм/мин. Во время ОТП проникновение уступа составило 0,635 мм при угле наклона инструмента 3°. Время пребывания инструмента после погружения составляло 10 секунд. Инструмент был изготовлен из стали, содержащей 0,2 вес.% С и 13 вес.% Cr (ближайший аналог – AISI 420). Перед применением инструмент закаливался до твердости 580 НВ. Схемы реализации ОТП представлены в табл. 1 и на рис. 1.

Таблица 1. Схемы реализации ОТП

Table 1. Schemes for the FSP implementation

Образец / Sample	Схема ОТП / FSP scheme
226	Два однонаправленных трека, расположенные на одной линии, по одной от каждой поверхности (верхней и нижней) пластины / Two unidirectional tracks located in line, one from each surface (top and bottom) of the plate
227	Два однонаправленных трека, расположенные на одной линии, друг над другом, на одной поверхности пластины / Two unidirectional tracks located in line, one above the other, on the same surface of the plate
228	Два встречно направленных трека, расположенные на одной линии, друг над другом, на одной и той же поверхности пластины / Two counter-directional tracks located in line, one above the other, on the same surface of the plate
229	Несколько однонаправленных пересекающихся треков на одной поверхности, перекрытие 10 мм / Multiple unidirectional intersecting tracks on one surface, 10mm overlap
233	Несколько однонаправленных пересекающихся треков на одной поверхности, перекрытие 5 мм / Multiple unidirectional intersecting tracks on one surface, 5mm overlap

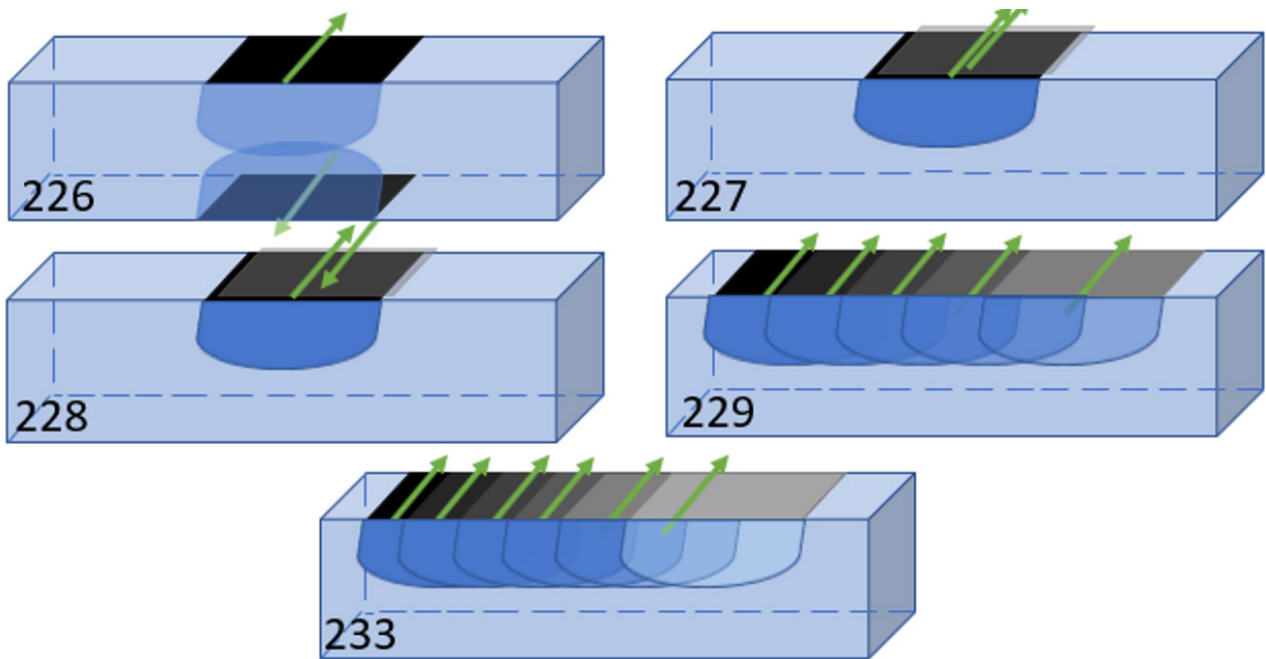


Рис. 1. Схемы реализации ОТП

Fig. 1. Schemes for the FSP implementation

Термическая обработка (ТО) проводилась в атмосферной печи Nabertherm В 180 по режимам, представленным в табл. 2.

Таблица 2. Параметры термической обработки шины из сплава АД31

Table 2. Parameters of the AD31 alloy busbar heat treatment

Вид ТО / HT type	Параметры ТО / HT parameters
T1	Гомогенизирующий отжиг (520 °С, 2 ч), охлаждение на воздухе и естественное старение (24 ч) / Homogenizing annealing (520 °С, 2 h), air-cooling and natural aging (520 °С, 2 h)
T4	Закалка (520 °С) и естественное старение (24 ч) / Quenching (520 °С) and natural aging (24 h)
T6	Закалка (520 °С) и искусственное старение (175 °С, 8 ч) / Quenching (520 °С) and artificial aging (175 °С, 8 h)

Рентгенологический контроль осуществлялся на аппаратно-программном комплек-

се цифровой рентгенографии «Цифракон». Исследования микроструктуры проводили на оптическом микроскопе Olympus Q150R. Для металлографического анализа изготавливали макрошлифы путем разрезания посередине длины обработанной зоны в направлении, перпендикулярном направлению обработки. Обработку поверхности проводили в 3%-ном растворе плавиковой кислоты для выявления макроструктуры. Микротвердость (HV) оценивали методом Виккерса на приборе Buehler MicroMet 5101 при нагрузке 1 Н и времени выдержки под нагрузкой 10 с. Значение HV рассчитывали с использованием программного обеспечения Omnimet Imaging System. Микротвердость измеряли на поперечных срезах образцов по линиям, параллельным поверхности исходной пластины. Измерения проводились на середине толщины образца и на $\frac{1}{4}$ высоты от нижней и верхней поверхностей пластины. Удельную электропроводность (ω) образцов сплава определяли с относительной погрешностью 2% на вихретоковом электропроводном измерителе ВЭ-27НЦ/4-5

по стандарту ASTM E1004-09. Величину электропроводности образцов относительно отожженной меди (International Annealed Copper Standard) рассчитывали по формуле:

$$\text{IACS} = \omega_{\text{Al}} / \omega_{\text{Cu}} * 100 [\%],$$

где ω_{Al} – экспериментально определенное значение электропроводности образца алюминиевого сплава; ω_{Cu} – электропроводность отожженной меди, равная 58 МСм/м. Электропроводность измерялась в 10 точках на линии, расположенной посередине толщины образца.

2. Результаты и их обсуждение

На рис. 2 представлены панорамные снимки поперечного сечения образца 226

после T1, T4 и T6. Как режим T1, так и режимы T4 и T6 предполагали нагрев образцов после ОТП выше температуры гомогенизации (520 °С) и выдержку в течение 2 часов. Нагрев до такой температуры был направлен на снятие напряжений структуры, а также рекристаллизацию зерен с критической степенью деформации. Тем не менее, структура как приповерхностного слоя образца (два ряда крупных кристаллов), так и структуры промежуточного (мелкие кристаллы) и центрального слоев (кристаллы среднего размера) шины не претерпели видимых изменений. Также не наблюдается изменений непосредственно в обрабатываемой зоне (ОЗ).

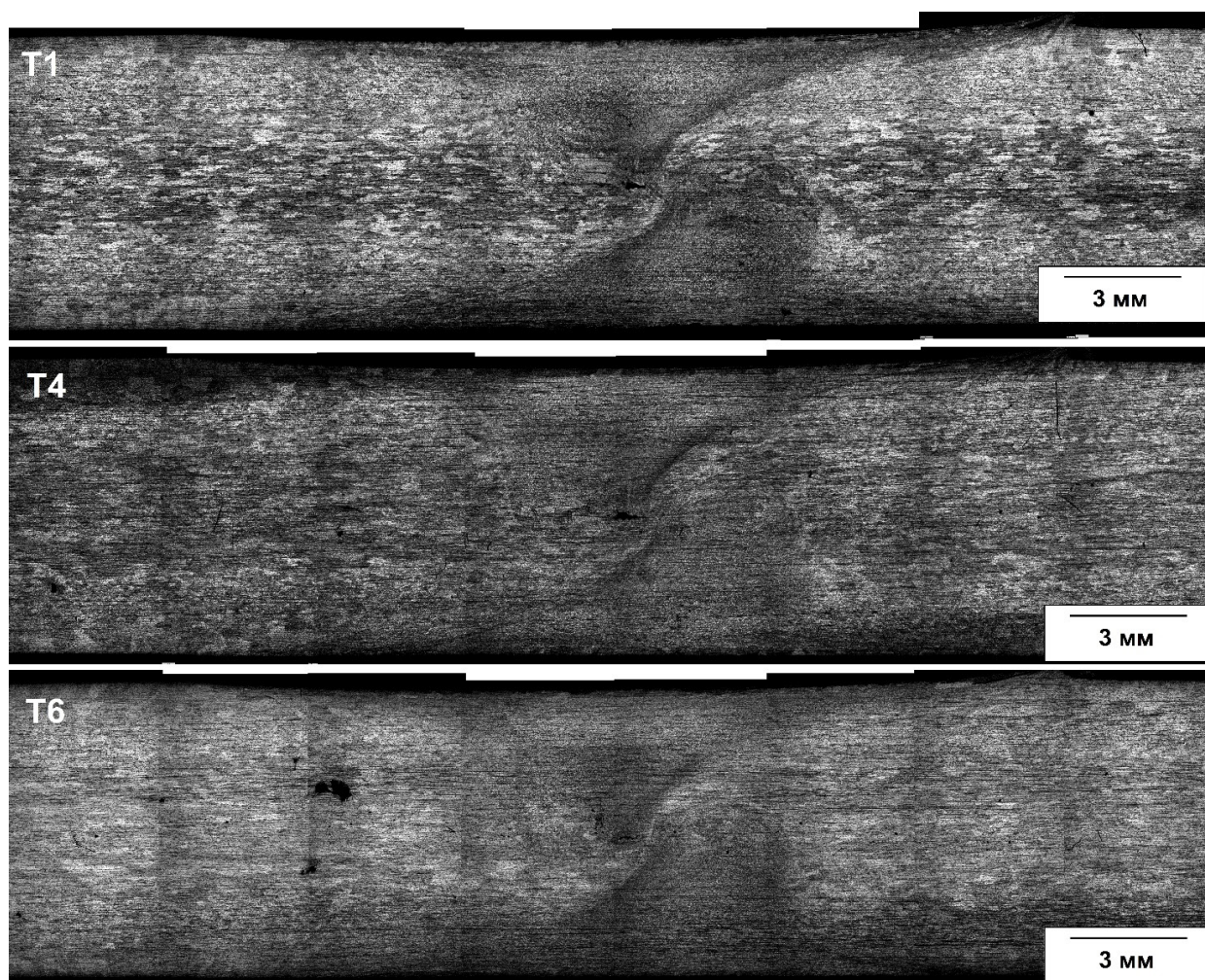


Рис. 2. Панорамное изображение макроструктуры образца 226 после ТО по режимам T1, T4 и T6, оптическая металлография

Fig. 2. Panoramic image of the 226 sample macrostructure after T1, T4 and T6 treatments, optical microscopy

Аналогичное отсутствие сколько-либо значимых изменений в видимых структурных составляющих наблюдается в образцах 227 (рис. 3) и 228 (рис. 4), обработанных по линейной схеме.

На рис. 5 представлены панорамные снимки поперечного сечения образца 229

после T1, T4 и T6. Разница в форме и размерах ОЗ объясняется тем, что снимки были сделаны с разных участков образца. Тем не менее, видно, что различия в размерах кристаллитов во всех областях образца не наблюдается.

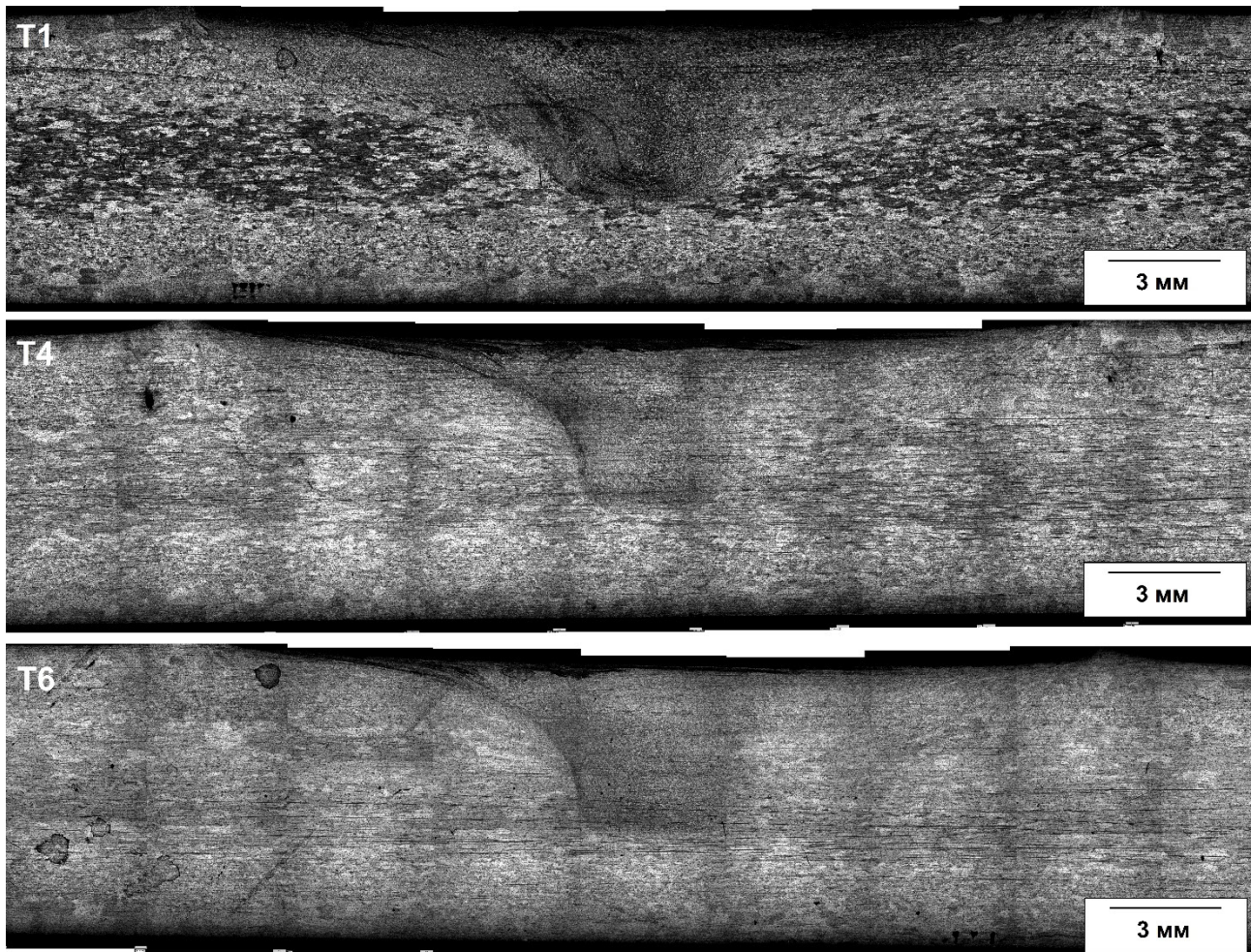


Рис. 3. Панорамное изображение макроструктуры образца 227 после ТО по режимам T1, T4 и T6, оптическая металлография

Fig. 3. Panoramic image of the 227 sample macrostructure after T1, T4, and T6 treatments, optical microscopy

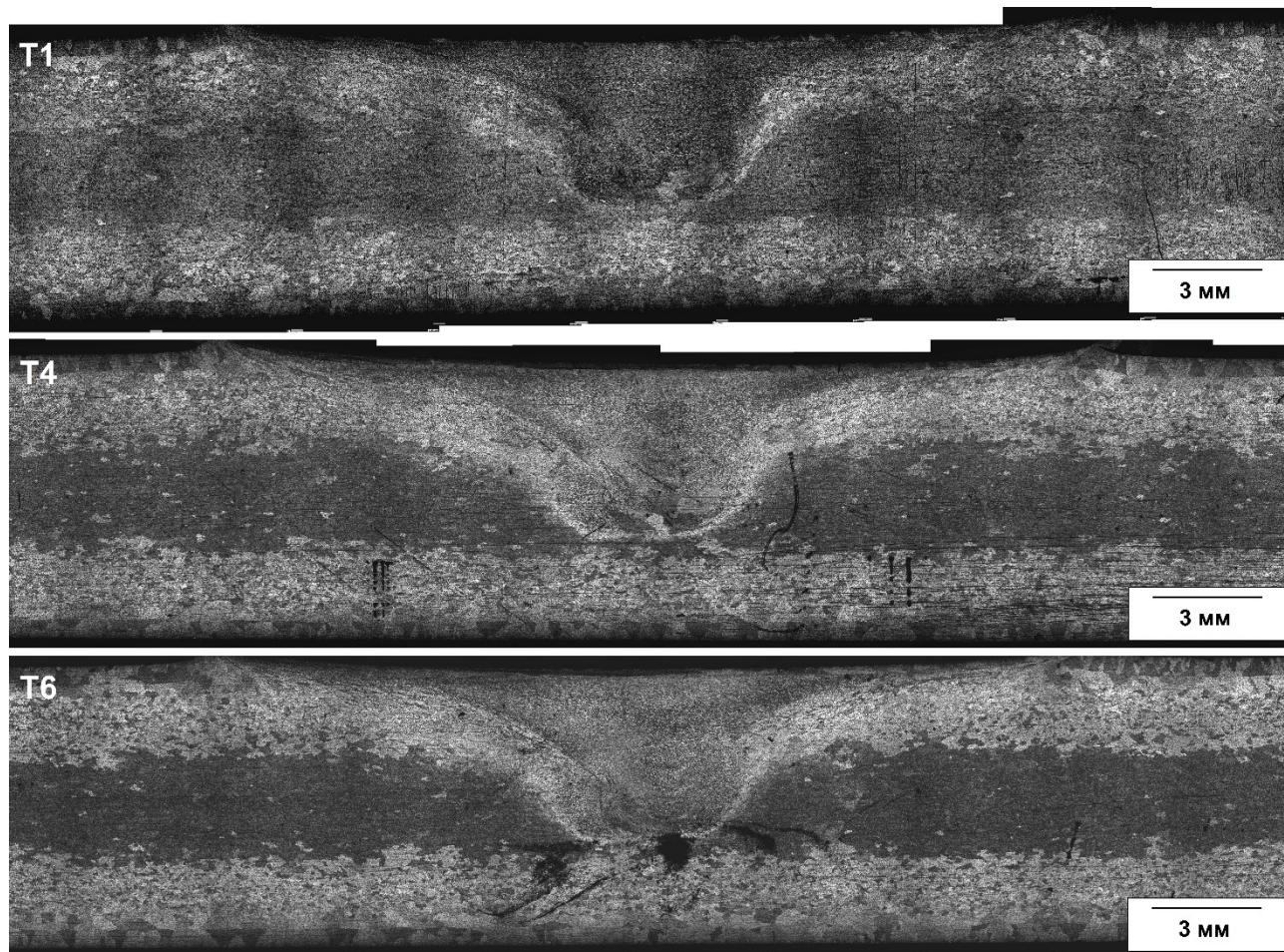


Рис. 4. Панорамное изображение макроструктуры образца 228 после ТО по режимам T1, T4 и T6, оптическая металлография

Fig. 4. Panoramic image of the 228 sample macrostructure after T1, T4 and T6 treatments, optical microscopy

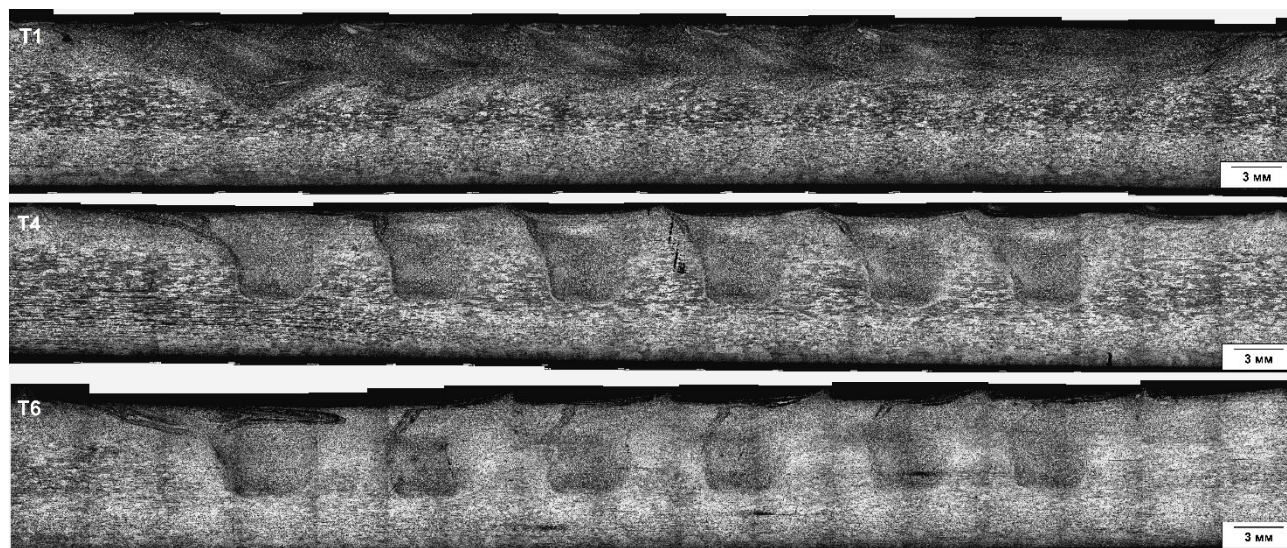


Рис. 5. Панорамное изображение макроструктуры образца 229 после ТО по режимам T1, T4 и T6, оптическая металлография

Fig. 5. Panoramic image of the 229 sample macrostructure after T1, T4 and T6 treatments, optical microscopy

На рис. 6 представлены панорамные снимки поперечного сечения образца 233 после T1, T4 и T6. Образец 233 отличается от образца 229 перекрытием треков, которое образует непрерывную ОЗ. Образец 233, так же как и образец 229, характеризуется отсутствием морфологических изменений кристаллитов после всех исследуемых режимов ТО.

Отсутствие морфологических изменений кристаллитов во всех исследуемых образцах после нагрева до температуры гомогенизации можно объяснить тем, что во время ОТП происходил нагрев образца и, следовательно, процессы динамического возврата и/или рекристаллизации, вследствие которых накопленная степень деформации оказалась недостаточной, чтобы инициировать статическую рекристаллизацию при нагреве под гомогенизацию/закалку [23].

На рис. 7 приведены значения электропроводности для образцов 226–228, на рис. 8 – для образцов 229 и 233. Для режимов 226 и 227 трендом является незначительное повышение электропроводности после ОТП, для режима 228 – ее заметное снижение в центре образца, что обуславливается схемой ОТП – в этой области находится перекрытие зоны обработки (ЗО) от треков. Образец 229 характеризуется снижением электропроводности относительно базового уровня по краям ЗО, где, наиболее вероятно, деформационные процессы превалировали над процессами возврата. В образце 233 наблюдается рост электропроводности на всей ЗО за исключением края, соответствующего набегавшей стороне ОТП, и не подвергавшегося последующим проходам.

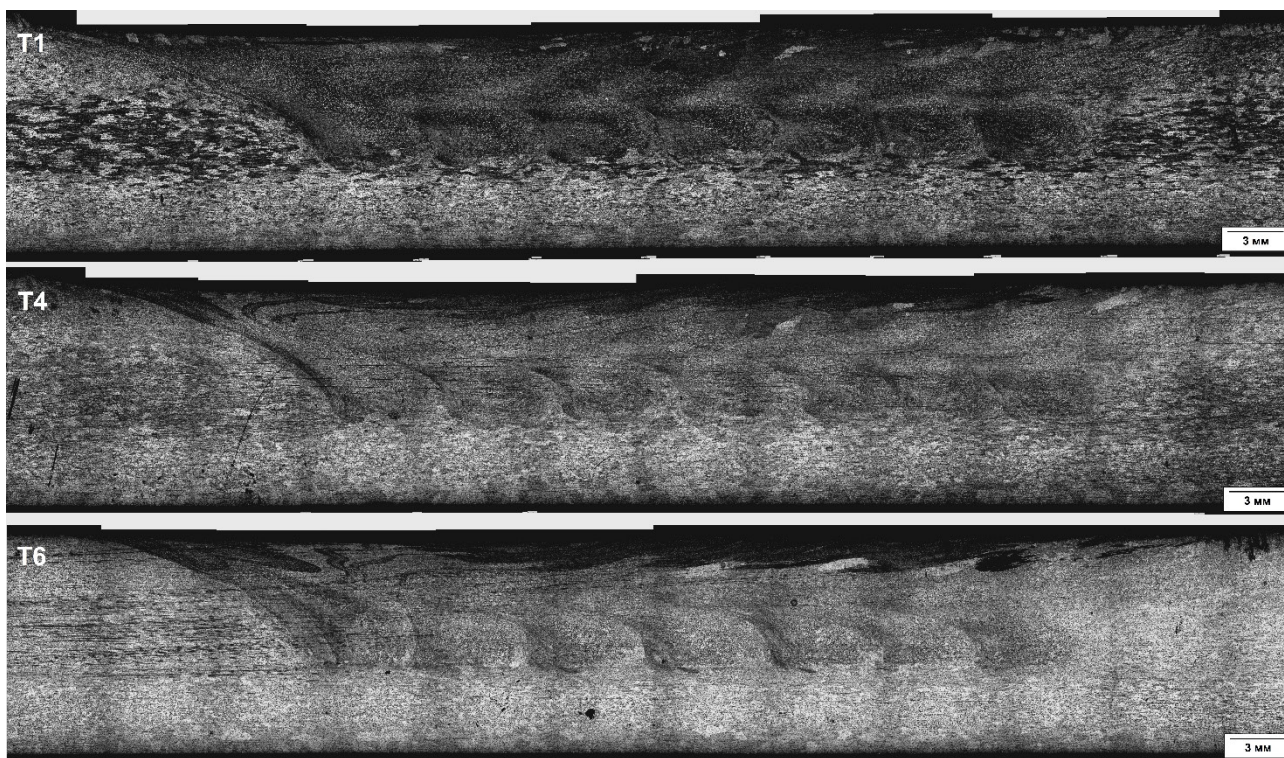


Рис. 6. Панорамное изображение макроструктуры образца 233 после ТО по режимам T1, T4 и T6, оптическая металлография

Fig. 6. Panoramic image of the 233 sample macrostructure after T1, T4 and T6 treatments, optical microscopy

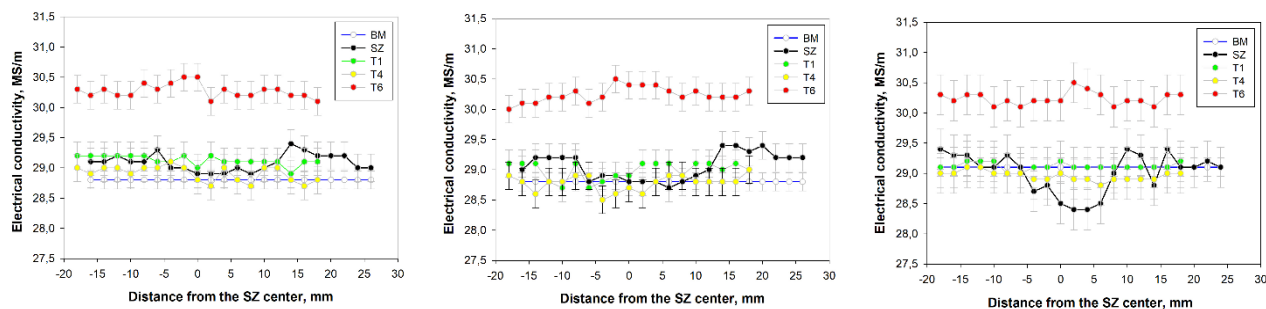


Рис. 7. Профили электропроводности образцов 226–228 после ТО

Fig. 7. Electrical conductivity profiles for samples 226–228 after HT

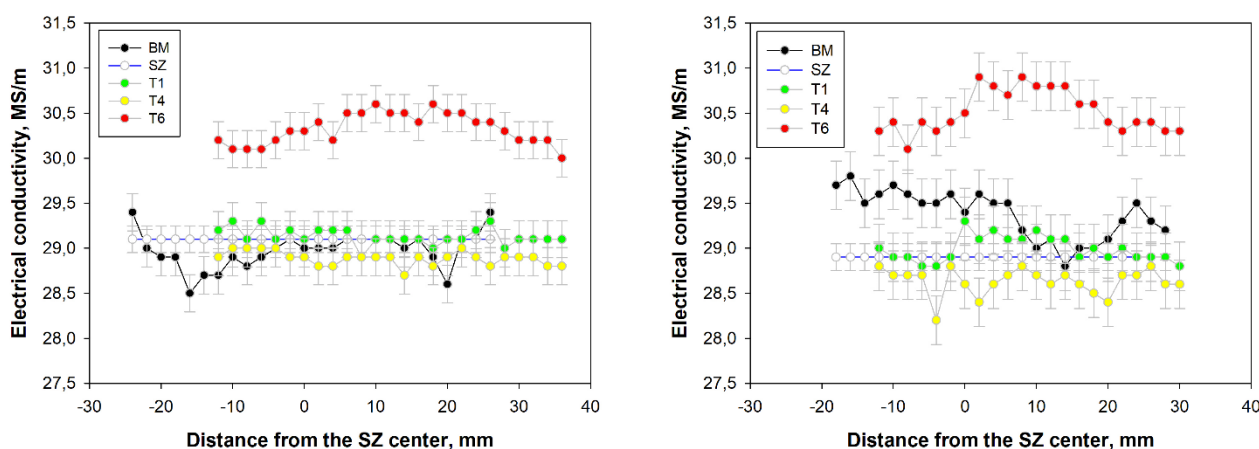


Рис. 8. Профили электропроводности образцов 229 и 233 после ТО

Fig. 8. Electrical conductivity profiles for samples 229 and 233 samples after HT

Во всех образцах режимы T1 и T4 приводят лишь к незначительным изменениям электропроводности, находящимся в пределах измерительной погрешности. ТО по режиму T6 приводит во всех образцах к росту электропроводности в среднем на 2 МСм/м, причем рост электропроводности наблюдается на тех участках, на которых наблюдалось наибольшее падение электропроводности.

Данная закономерность объясняется тем, что режим T6 подразумевает формирование пересыщенного твердого раствора и его максимальный распад во время последующего старения. Падение электропроводности и ее последующий рост в результате ТО говорит о формировании твердого раствора (предположительно Mg и Si) во время закалки и его

полного максимального распада в области максимального деформационного воздействия.

Выводы

В рамках данного исследования был проведен ряд ТО по трем режимам – T1, T4 и T6 – токопроводящей шины из алюминиевого сплава АД31, подвергнутого обработке трением перемешиванием.

1. На всех трех режимах – T1, T4 и T6 – не наблюдается заметного изменения морфологии кристаллитов как в поверхностной зоне, так и в центральной и переходной зонах.

2. Режимы T1 и T4 приводят к изменению электропроводности, которые находят-

ся в границах измерительной погрешности. Режим Т6 приводит к росту электропроводности во всех исследуемых образцах в среднем на 2 МСм/м относительно исходного материала.

3. Максимальный рост электропроводности в образцах после Т6 коррелирует с областью образца, в которой наблюдалось максимальное снижение электропроводности в результате ОТП. Такой эффект связан с образованием твердого раствора Mg и Si в зоне максимальной деформации.

Благодарности / Acknowledgments

Авторы выражают особую благодарность Центру коллективного пользования «Нанотех» ФГБОУ ВО «УУНУТ».

The authors express special gratitude to the Center for Collective Use “Nanotech” of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ufa University of Science and Technology”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Jawalkar CS, Kant S. A Review on use of Aluminium Alloys in Aircraft Components. I-Manager’s Journal on Material Science 2015;3:33–8. <https://doi.org/10.26634/jms.3.3.3673>.
- Verma RP, Kumar Lila M. A short review on aluminium alloys and welding in structural applications. Mater Today Proc 2021;46:10687–91. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.447>.
- Kumar Sinha A, Pramanik S, Yagati KP. Research progress in arc based additive manufacturing of aluminium alloys – A review. Measurement 2022;200:111672. <https://doi.org/10.1016/J.MEASUREMENT.2022.111672>.
- Ian Polmear, David StJohn, Jian-Feng Nie, Ma Qian. Light Alloys: Metallurgy of the Light Metals. 5th ed. Butterworth-Heinemann; 2017.
- Mondolfo LF. Aluminum Alloys Structure and Properties. Elsevier Ltd.; 1976.
- Valiev RZ, Langdon TG. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement. Prog Mater Sci 2006;51:881–981. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2006.02.003>.
- Valiev RZ, Murashkin M, Sabirov I. A nanostructural design to produce high-strength Al alloys with enhanced electrical conductivity. Scr Mater 2014;76:13–6. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2013.12.002>.
- Masuda T, Sauvage X, Hirose S, Horita Z. Achieving highly strengthened Al–Cu–Mg alloy by grain refinement and grain boundary segregation. Materials Science and Engineering: A 2020;793:139668. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139668>.
- Rambabu K, Gandhi P, Susmitha M, Sravanthi K. A review on different techniques to produce gradient structured material. Mater Today Proc 2022;60:2262–5. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.418>.
- Cai SL, Wan JC, Hao YJ, Koch CC. Dual gradient microstructure to simultaneously improve strength and electrical conductivity of aluminum wire. Materials Science and Engineering: A 2020;783:139308. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139308>.
- Ma ZY. Friction stir processing technology: A review. Metall Mater Trans A Phys Metall Mater Sci 2008;39 A:642–58. <https://doi.org/10.1007/s11661-007-9459-0>.
- VICTOR CHRISTY J, ISMAIL MOURAD AH, SHERIF MM, SHIVAMURTHY B. Review of recent trends in friction stir welding process of aluminum alloys and aluminum metal matrix composites. Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition) 2021;31:3281–309. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(21\)65730-8](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(21)65730-8).
- Mishra RS, De PS, Kumar N. Friction Stir Processing. Friction Stir Welding and Processing, Springer International Publishing; 2014, p. 259–96. https://doi.org/10.1007/978-3-319-07043-8_9.
- В. В. Атрощенко, Э. И. Кагарманов, А. С. Селиванов, и Ш. Д. Шугаипов, «Сварка трением с перемешиванием алюминиевого сплава АМг2М толщиной 1,5 мм», МТД, т. 3, вып. 1 (3), сс. 16–23, апр. 2021.
- Li K, Liu X, Zhao Y. Research status and prospect of friction stir processing technology. Coatings 2019;9:129. <https://doi.org/10.3390/COATINGS9020129>.
- Mimmi A, Merzoug M, Ghazi A, Dellal N. Mechanical behavior of structures welded with friction stir lap welding process. Materials Physics and Mechanics 2023;51:151–63. https://doi.org/10.18149/MPM.5122023_14.
- Sharma V, Gupta Y, Kumar BVM, Prakash U. Friction Stir Processing Strategies for Uniform Distribution of Reinforcement in a Surface Composite. Materials and Manufacturing Processes 2016;31:1384–92. <https://doi.org/10.1080/10426914.2015.1103869>.
- Р. Е. Артемьев, А. Ф. Ситдикова, В. В. Атрощенко, М. П. Савичев, и А. С. Селиванов, «Использование методов неразрушающего контроля для оценки качества сварных соединений алюминиевых сплавов, полученных сваркой трением с перемешиванием», МТД, т. 3, вып. 1 (3), сс. 5–10, апр. 2021.

19. Medvedev A, Bogdanov A, Selivanov A, Lobachev V, Logachev Y, Gorbatkov M, et al. THE INFLUENCE OF TRACK OVERLAP VALUE DURING MULTI-PASS FRICTION STIR PROCESSING OF A CONDUCTIVE AD31 ALLOY BUSBAR. *Materials Technologies. Design*. 2024;6:31–7. https://doi.org/10.54708/26587572_2024_611631.

20. Medvedev AE, Atroshchenko V V., Selivanov AS, Bogdanov AR, Gorbatkov M V., Logachev Y V., et al. Influence of various friction stir processing (FSP) schemes on the microstructure and properties of AD31 aluminium alloy busbar. *Materials Physics and Mechanics* 2024;52:95–107. https://doi.org/10.18149/MPM.5212024_9.

21. Medvedev AE, Atroshchenko V V., Selivanov AS, Bogdanov AR, Gorbatkov M V., Logachev Y V., et al. The influence of friction stir processing on the microstructure and properties of the AD31T alloy. *Materials Physics and Mechanics* 2023;51:38–49. https://doi.org/10.18149/MPM.5142023_4.

22. B.N. Semenov BN, Smirnov I.V., Sudenkov Yu. V., Tatarinova N.V. Effect of heat treatment on the mechanical properties of ultrafine-grained aluminium. *Materials Physics and Mechanics* 2015;24:319–324.

23. Lebaal N, Chamoret D, Schlegel D, Folea M. Thermal modelling of friction stir process (FSP) and identification parameters. *Materials Physics and Mechanics* 2017;32:14–20.