

THE INFLUENCE OF TRACK OVERLAP VALUE DURING MULTI-PASS FRICTION STIR PROCESSING OF A CONDUCTIVE AD31 ALLOY BUSBAR

Andrey Evgenievich Medvedev^{1a}, *Albert Rustamovich Bogdanov*¹,
*Aleksei Sergeevich Selivanov*², *Vladislav Sergeevich Lobachev*², *Yuri Vladimirovich Logachev*²,
*Mikhail Viktorovich Gorbatkov*³, *Valerii Vladimirovich Atroshchenko*²

¹ Ufa University of Science and Technology, 32 Zaki Validi str., Ufa 450076 Russia

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

³ Krus-Zapad LLC, 1/2 Blukher str., Ufa 450075 Russia

^a medvedevandreyrf@gmail.com

ABSTRACT

This paper examines the influence of track overlap value during friction stir processing (FSP) on the microstructure and properties of a busbar made of AD31T aluminium alloy. In particular, the influence of 6 parallel tracks with an overlap of 10 mm and 5 mm on the formation of structure and volumetric defects in the volume of the stir zone was studied. It has been shown that carrying out FSP at a tool rotation speed of 1120 rpm and a linear tool speed of 200 mm/min ensures the absence of macroscopic defects in the volume of the treated area in both cases. Reducing the amount of overlap to 5 mm made it possible to achieve the formation of a homogeneous structure and the absence of untreated zones. This type of processing, with given tool geometry and FSP regimes, can be recommended as a method for processing the surface and subsurface layer of aluminium alloys to increase their hardness without significant loss of their electrical conductivity.

KEYWORDS

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

ВЛИЯНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ПЕРЕКРЫТИЯ ТРЕКОВ ПРИ МУЛЬТИПРОХОДНОЙ ОБРАБОТКЕ ТРЕНИЕМ ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ ТОКОПРОВОДЯЩЕЙ ШИНЫ ИЗ СПЛАВА АД31

Андрей Евгеньевич Медведев^{1a}, *Альберт Рустамович Богданов*¹,
*Алексей Сергеевич Селиванов*², *Владислав Сергеевич Лобачев*², *Юрий Владимирович Логачев*²,
*Михаил Викторович Горбатков*³, *Валерий Владимирович Атрощенко*²

¹ Уфимский университет науки и технологий, Россия, 450076, Уфа, ул. Заки Валиди, 32

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

³ ООО «Крус-Запад», Россия, 450075, Уфа, ул. Блюхера, 1/2

^a medvedevandreyrf@gmail.com

АННОТАЦИЯ

В данной работе рассмотрено влияние величины перекрытия треков при обработке трением перемешиванием (ОТП) на микроструктуру и свойства шины из алюминиевого сплава АД31Т. В частности, было изучено влияние 6 параллельных треков с перекрытием в 10 мм и 5 мм на формирование структуры и объемных дефектов в объеме обрабатываемой зоны. Показано, что проведение ОТП при скорости вращения инструмента 1120 об/мин и линейной скорости перемещения инструмента 200 мм/мин обеспечивает отсутствие макроскопических дефектов в объеме обрабатываемой зоны в обоих случаях. Уменьшение величины перекрытия до 5 мм позволило добиться формирования однородной структуры и отсутствия необработанных зон. Данный вид обработки при заданных геометрии инструмента и режимах ОТП может быть рекомендован как способ обработки поверхности и приповерхностного слоя алюминиевых сплавов для повышения их твердости без существенной потери их электрической проводимости.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

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

Введение

С учетом дефицитности и дороговизны меди роль алюминия, как проводникового материала, неуклонно возрастает [1]. К безусловным достоинствам алюминия можно отнести его высокую пластичность, теплопроводность и теплоемкость, хорошую технологичность и коррозионную стойкость [2–4]. Основным недостатком алюминия является его относительно низкая прочность [5]. Одним из способов упрочнения алюминия является создание сплавов на его основе. Общая закономерность легирования алюминия заключается в том, что добавки других элементов, приводя к росту прочности алюминиевого сплава, ведут к снижению его электропроводности [6, 7].

Другим принципиальным подходом к повышению прочности алюминия и алюминиевых сплавов является применение методов холодной деформации [8]. У таких методов есть как несомненные преимущества, так и недостатки: объемный характер воздействия, увеличение плотности дефектов [9, 10]. Уменьшить влияние деформации можно за счет применения методов локального, или поверхностного упрочнения. К отдельной группе методов, направленных на модификацию поверхности и поверхностного слоя

материала, относят методы, основанные на эффекте поверхностного трения [11, 12]. К наиболее популярным и применимым в промышленности обычно относят сварку трением перемешиванием (СТП) и обработку трением перемешиванием (ОТП) [13–15].

Обработка трением перемешиванием – это технология, направленная на изменение структуры и свойств поверхности и приповерхностного слоя материалов в твердой фазе. Работы, направленные на изучение ОТП, достаточно быстро показали, что данный метод способен модифицировать поверхностный слой обрабатываемого материала, обеспечивая структуру и свойства, отличные от обрабатываемого материала. Вследствие того, что ОТП предполагает обработку материала в твердой фазе, основное внимание уделялось мягким материалам, таким, как алюминиевые, магниевые и медные сплавы [16, 17]. Также существует ограниченный набор публикаций по ОТП титановых сплавов и сталей.

В статьях исследуют методы сварки трением перемешиванием, в том числе по следующим схемам: внахлест, двухпроходное соединение в одном направлении и в противоположных, с двух сторон свариваемого образца. В данных исследовани-

ях утверждается, что такие методы могут обеспечивать хорошую текучесть и перемешивание разнородных металлов, уменьшение размера зерен и дефектов на их границах, а двухпроходное соединение позволяет значительно увеличить прочностные свойства сварного соединения, снизить износ и получить минимальные затраты перемешивающегося инструмента [18]. Также на примере других алюминиевых сплавов было показано, что ОТП поверхности образца с наложением треков ОТП приводит к модификации поверхности и приповерхностного слоя, что влечет за собой изменение свойств обрабатываемого материала [19–21].

Несмотря на достаточно большой пласт информации, касающейся ОТП алюминиевых сплавов, данных о влиянии такого метода обработки на электрическую проводимость алюминиевых сплавов достаточно мало. В частности, отсутствуют данные о влиянии такого способа обработки на уровень электропроводности в токопроводящих изделиях, изготовленных из алюминиевых сплавов.

Данное исследование ставит своей целью раскрыть влияние величины перекрытия треков при ОТП на микроструктуру и свойства токопроводящей шины из алюминиевого сплава АД31. Исследование является продолжением работ, посвященных ОТП токопроводящих шин из алюминиевого сплава АД31 [22]. В предыдущей работе был установлен рациональный режим ОТП, позволяющий при заданной геометрии обрабатываемого инструмента получить обрабатываемую зону без объемных дефектов.

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.

Рентгенологический контроль осуществлялся на аппаратно-программном комплексе цифровой рентгенографии «Цифракон». Исследования микроструктуры проводили на оптическом микроскопе Olympus Q150R. Для металлографического анализа изготавливали макрошлифы путем разрезания по середине 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 ¼ 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:

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

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. 1 представлен макрошлиф поперечного среза исходной шины. Согласно этим данным, шина из исследуемого сплава в исходном состоянии характеризуется тре-

мя зонами: центральной, промежуточной и периферийной. Центральная зона характеризуется относительно мелкими, вытянутыми зернами. В промежуточной зоне зерна характеризуются большим размером и формой, близкой к равноосной. Периферийная зона состоит из крупных равноосных кристаллов размером до 700 мкм, расположенных в 1–2 ряда.

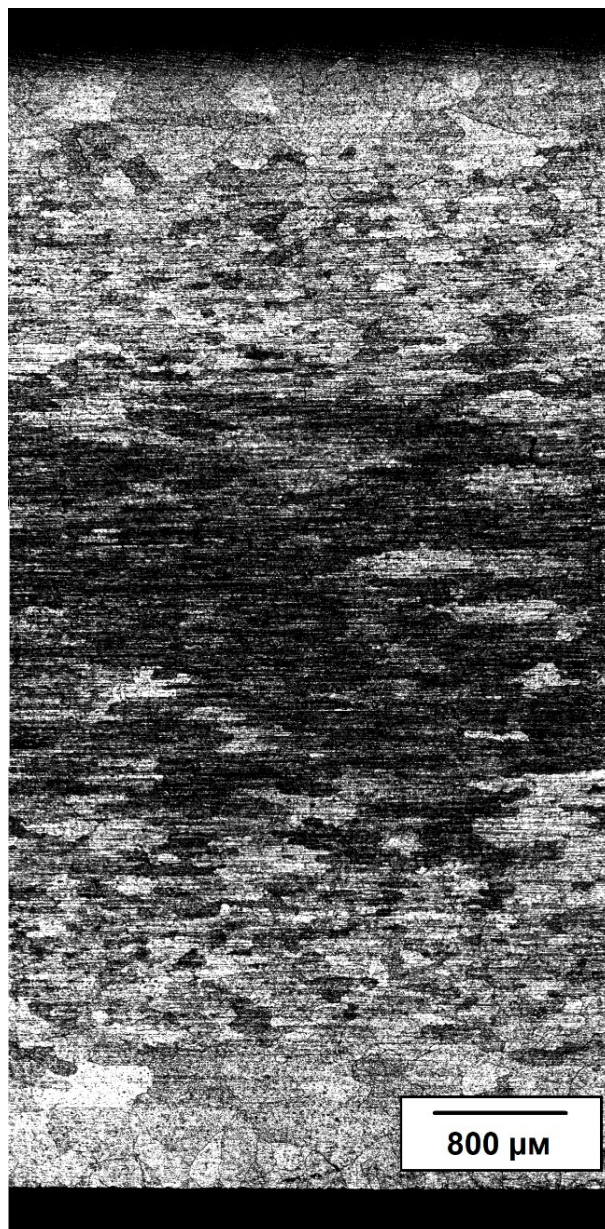


Рис. 1. Макроструктура исходной шины из алюминиевого сплава, оптическая металлография. Видны крупнозернистая структура поверхностного слоя, переходная зона с зернами меньшего размера и центральная зона с мелкими зернами

Fig. 1. Macrostructure of the original aluminum alloy busbar, optical metallography. A coarse-grained structure of the surface layer, a transition zone with smaller grains, and a central zone with fine grains are visible

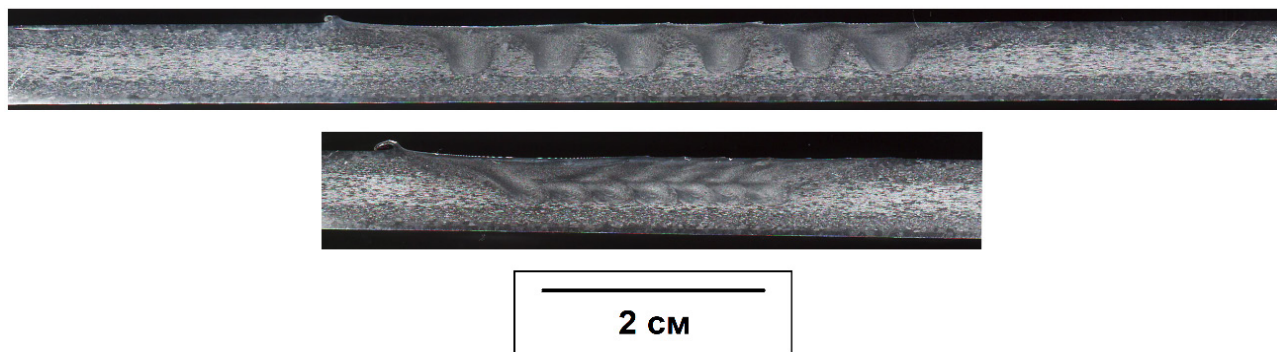


Рис. 2. Оценка макроструктуры поперечных сечений образцов с перекрытием 10 мм и 5 мм (сверху вниз)

Fig. 2. Assessment of the macrostructure of cross sections of samples with 10 mm and 5 mm overlap (from top to bottom)

В результате ОТП произошло формирование мелкозернистой структуры в обрабатываемой зоне (ОЗ) и зоне термического воздействия (ЗТВ), (рис. 2). ЗТВ сужается к основанию образца вследствие более значительного рассеяния тепла в объеме образца.

В образце с перекрытием треков 10 мм перекрытие ОЗ осуществляется лишь частично (рис. 2), оставляя незатронутые ОТП участки. В образце со смещением треков 5 мм происходит полное перекрытие ОЗ, вследствие чего происходит формирование однородной мелкозернистой структуры в образце.

На рис. 3 представлены профили микротвердости и электропроводности для образцов с перекрытием 10 мм (*а, в*) и 5 мм (*б, г*). В образце со смещением треков 10 мм микротвердость поверхностного слоя растет и оказывается выше, чем в основном материале вследствие того, что перекрытие ОЗ находится как раз около поверхности. Микротвердость нижнего слоя незначительно растет, но изменение в целом имеет незначительный характер. Профиль микротвердости среднего слоя имеет пилообразный характер, соответствующий чередующимся ОЗ (рис. 2).

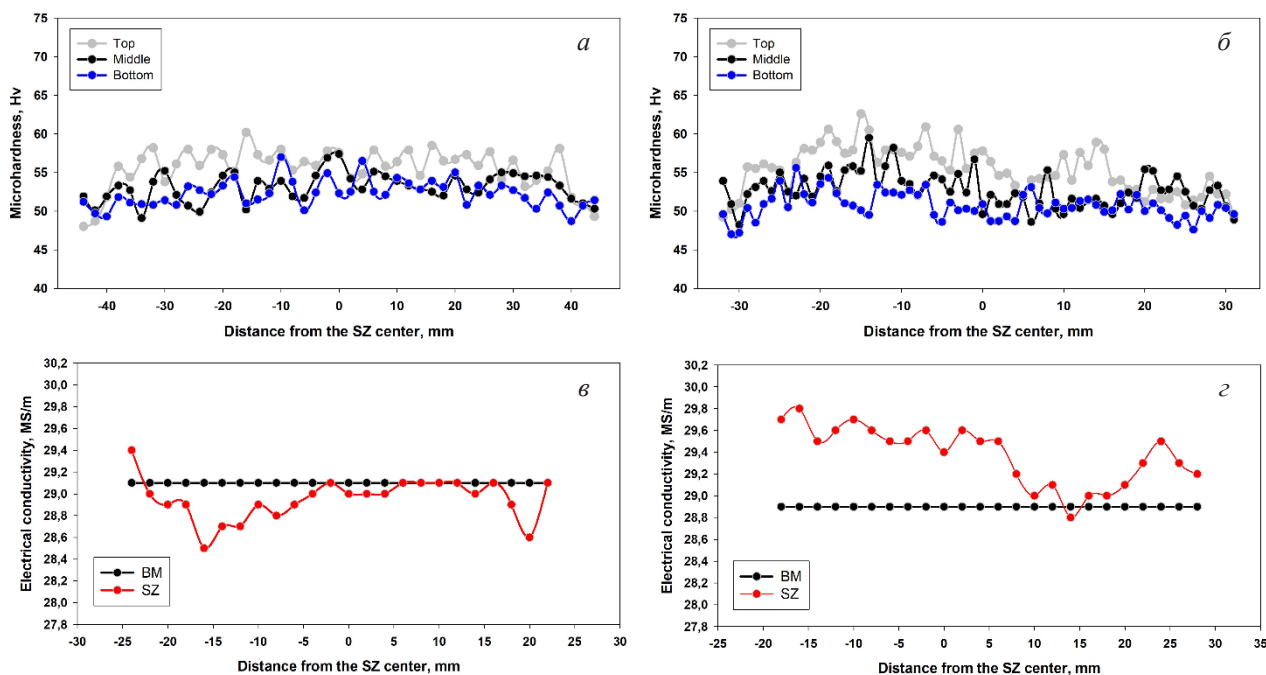


Рис. 3. Профили микротвердости (*а, б*) и электропроводности (*в, г*) образца с перекрытием 10 мм (*а, в*) и 5 мм (*б, г*)

Fig. 3. Microhardness (*a, b*) and electrical conductivity (*v, g*) profiles of the sample with an overlap of 10 mm (*a, v*) and 5 mm (*b, g*)

Рост микротвердости в верхней и средней зонах образца со смещением треков 5 мм носит более выраженный характер, нежели в образце со смещением треков 10 мм, и, в целом, величина упрочнения в нем больше. Характерным отличием образца со смещением треков 5 мм является резкое снижение микротвердости на границе ОЗ – там, где заканчиваются перекрытия ОЗ, в ЗТМВ, причем это снижение наиболее заметно в верхнем и среднем слоях образца.

По результатам измерения электрической проводимости ОЗ и ЗТМВ среднее значение удельной электрической проводимости (УЭС) основного металла составило 28,8–29,1 МСм/м. Изменение значения УЭС для каждого образца носит отличный характер.

В целом электропроводность ЗТМВ образца со смещением треков 10 мм соответствует электропроводности основного материала, за исключением участков на границе ОЗ (рис. 3, в). Электропроводность образца со смещением треков 5 мм почти на всем протяжении выше, чем в основном материале, и снижается только на границе ОЗ (рис. 3, г).

Выводы

В данной работе были реализованы схемы с величиной перекрытия треков 10 мм и 5 мм по следующему режиму: линейная скорость перемещения инструмента – 200 мм/мин, скорость вращения инструмента – 1120 об/мин.

1. Обе схемы, реализованные на токопроводящей шине толщиной 10 мм из алюминиевого сплава АД31Т (система Al-Mg-Si, аналог АА6063), обеспечили бездефектную структуру.

2. При реализации каждой схемы в объеме обрабатываемой зоны происходило уменьшение среднего размера зерна, сопровождавшееся упрочнением и падением электропроводности. В областях термического воздействия на периферии обрабатываемой зоны происходили обратные процессы.

3. Перекрытие треков в 10 мм не обеспечило равномерной обработки структуры, и оставило области, свободные от деформационного воздействия, в то время как при перекрытии треков в 5 мм обработанная зона является равномерной.

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

- Polmear I., StJohn D., Nie J.-F., Qian M. Light Alloys: Metallurgy of the Light Metals. 5th ed. Butterworth-Heinemann, 2017. P. 544.
- Ardika R. D., Triyono T., Muhayat N., Triyono. A review porosity in aluminum welding // Procedia Structural Integrity. 2021. V. 33. P. 171–180. DOI: 10.1016/j.prostr.2021.10.021.
- Jawalkar C. S., Kant S. A Review on use of Aluminium Alloys in Aircraft Components // I-Manager’s Journal on Material Science. 2015. V. 3. P. 33–38. DOI: 10.26634/jms.3.3.3673.
- Aamir M., Giasin K., Tolouei-Rad M., Vafadar A. A review: drilling performance and hole quality of aluminium alloys for aerospace applications // Journal of Materials Research and Technology. 2020. V. 9, Iss. 6. P. 12484–12500. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.09.003.
- Valiev R. Z., Murashkin M., Sabirov I. A nanostructural design to produce high-strength Al alloys with enhanced electrical conductivity // Scr Mater. 2014. V. 76. P. 13–16. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2013.12.002.
- Mondolfo L. F. Aluminum Alloys: Structure and Properties. Elsevier Ltd., 1976. P. 982. DOI: 10.1016/B978-0-408-70932-3.50404-6.
- Mondolfo L. F., Zmeskal O. Engineering metallurgy. New York: McGraw-Hill Book Co., Inc., 1955. P. 397.
- Zhu C., Ma A., Jiang J., Li X., Song D., Yang D., Yuan Y., Chen J. Effect of ECAP combined cold working on mechanical properties and electrical conductivity of Conform-produced Cu-Mg alloys // J Alloys Compd. 2014. V. 582. P. 135–140. DOI: 10.1016/j.jallcom.2013.08.007.

9. Sabirov I., Murashkin M. Y., Valiev R. Z. Nanostructured aluminium alloys produced by severe plastic deformation: New horizons in development // *Materials Science and Engineering: A*. 2013. V. 560. P. 1–24. DOI: 10.1016/j.msea.2012.09.020.
10. Pippan R., Scheriau S., Taylor A., Hafok M., Hohenwarter A., Bachmaier A. Saturation of fragmentation during severe plastic deformation // *Annu Rev Mater Res*. 2010. V. 40. P. 319–343. DOI: 10.1146/annurev-matsci-070909-104445.
11. Singh V. P., Patel S. K., Ranjan A., Kuriachen B. Recent research progress in solid state friction-stir welding of aluminium-magnesium alloys: a critical review // *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. V. 9, Iss. 3. P. 6217–6256. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.01.008.
12. Mishra R. S., De P. S., Kumar N. Friction Stir Processing // *Friction Stir Welding and Processing*. Springer International Publishing, 2014. P. 259–296. DOI: 10.1007/978-3-319-07043-8_9.
13. Nicholas E. D. Friction Processing Technologies // *Welding in the World*. 2003. V. 47. P. 2–9. DOI: 10.1007/BF03266402.
14. Ma Z. Y. Friction stir processing technology: A review // *Metall Mater Trans A Phys Metall Mater Sci*. 2008. V. 39 A. P. 642–658. DOI: 10.1007/s11661-007-9459-0.
15. Li K., Liu X., Zhao Y. Research status and prospect of friction stir processing technology // *Coatings*. 2019. V. 9, Iss. 2. Article number 129. DOI: 10.3390/COATINGS9020129.
16. Sarmadi H., Kokabi A. H., Seyed Reihani S. M. Friction and wear performance of copper-graphite surface composites fabricated by friction stir processing (FSP) // *Wear*. 2013. V. 304, Iss. 1–2. P. 1–12. DOI: 10.1016/j.wear.2013.04.023.
17. Lee C. J., Huang J. C., Hsieh P. J. Mg based nanocomposites fabricated by friction stir processing // *Scr Mater*. 2006. V. 54, Iss. 7. P. 1415–1420. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2005.11.056.
18. Yadav D., Bauri R. Effect of friction stir processing on microstructure and mechanical properties of aluminium // *Materials Science and Engineering: A*. 2012. V. 539. P. 85–92. DOI: 10.1016/j.msea.2012.01.055.
19. Su J. Q., Nelson T. W., Sterling C. J. Friction stir processing of large-area bulk UFG aluminum alloys // *Scr Mater*. 2005. V. 52, Iss. 2. P. 135–140. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2004.09.014.
20. Su J. Q., Nelson T. W., Sterling C. J. Microstructure evolution during FSW/FSP of high strength aluminum alloys // *Materials Science and Engineering: A*. 2005. V. 405, Iss. 1–2. P. 277–286. DOI: 10.1016/j.msea.2005.06.009.
21. Su J.-Q., Nelson T. W., Sterling C. J. A new route to bulk nanocrystalline materials // *Journal of Materials Research*. 2003. V. 18, Iss. 8. P. 1757–1760. DOI: 10.1557/JMR.2003.0243.
22. Medvedev A., Atroshchenko V., Selivanov A., Bogdanov A., Gorbatkov M., Logachev Y., Lobachev V., Sadrislamov A. The influence of friction stir processing on the microstructure and properties of the AD31T alloy // *Materials Physics and Mechanics*. 2023. V. 51, Iss. 4. P. 38–49. DOI: 10.18149/MPM.5142023_4.