

## СВАРКА, РОДСТВЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ТЕХНОЛОГИИ / WELDING, RELATED PROCESSES AND TECHNOLOGIES

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.96>

## МЕТОД ПОСЛЕСВАРОЧНОЙ ОБРАБОТКИ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА

Научная статья

Абдуллин Т.З.<sup>1,\*</sup><sup>1</sup> ORCID : 0009-0001-0141-7559;<sup>1</sup> Высотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара, Москва, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (timabdullin85[at]gmail.com)

**Аннотация**

Сварное соединение из термообработанного алюминиевого сплава показало размягчение в зоне плавления и зоне термического воздействия. Предложен метод послесварочной обработки композита, который позволяет избежать размягчения соединения за счет сочетания солюбилизационной обработки, обработки старением и холодной прокатки. Были исследованы процессы послесварочной обработки композитов, чтобы выявить влияние взаимодействия между дисперсионным упрочнением и рабочим упрочнением на механические свойства соединения. Результаты экспериментов показали, что процесс обработки композита после сварки позволяет повысить микротвердость до уровня исходного основного металла, а прочность и пластичность соединения могут достигать 100%.

**Ключевые слова:** алюминиевый сплав, сварное соединение, зона плавления, термическая обработка, прочность.

## METHOD OF POST-WELD TREATMENT OF COMPOSITE MATERIALS TO IMPROVE MECHANICAL PROPERTIES OF ALUMINIUM ALLOY WELDED JOINTS

Research article

Abdullin T.Z.<sup>1,\*</sup><sup>1</sup> ORCID : 0009-0001-0141-7559;<sup>1</sup> High-tech research institute of inorganic materials named after academician A.A. Bochvar, Moscow, Russian Federation

\* Corresponding author (timabdullin85[at]gmail.com)

**Abstract**

A welded joint made of heat-treated aluminium alloy showed softening in the fusion zone and heat-treated zone. A post-weld treatment method for the composite was proposed to avoid softening of the joint by combining solubilization treatment, ageing treatment and cold rolling. The post-weld treatment processes of composites were studied to identify the effect of the interaction between dispersion hardening and work hardening on the mechanical properties of the joint. Experimental results showed that the post-weld processing of the composite can increase the microhardness to the level of the original base metal, and the strength and ductility of the joint can reach 100%.

**Keywords:** aluminium alloy, welded joint, fusion zone, heat treatment, strength.**Введение**

Алюминий является одним из перспективных материалов для использования в автомобильной промышленности благодаря сочетанию благоприятных свойств, которые включают коррозионную стойкость, высокую удельную прочность, хорошую пластичность и относительно низкую стоимость [1], [2], [3]. Сварка алюминия вызывает большие проблемы, и в последние годы ей уделяется значительное внимание с использованием таких технологий, как сварка трением с перемешиванием [4], [5], [6] и сварка плавлением [7], [8], [9]. По сравнению со сваркой трением с перемешиванием, сварка плавлением обладает значительными преимуществами, начиная от высокой эффективности обработки и заканчивая низкой стоимостью [9]. Однако сварка плавлением не считается подходящей для алюминия из-за высокой теплоотдачи, связанной с процессом сварки [10]. Высокая теплоотдача является прямой причиной размягчения соединения и снижения эффективности соединения на 30-40% [11]. Это крайне неудовлетворительно с точки зрения безопасности и ударопрочности [12], [13]. Улучшение механических свойств соединения алюминия, сваренного плавлением, стало важной темой в области материаловедения.

Термообработанный алюминиевый сплав содержит большое количество упрочняющих фаз, которые существенно влияют на его механические свойства [14], [15]. При сварке плавлением размягчение шва происходит в основном в зоне термического воздействия и зоне плавления с грубой микроструктурой и выгоранием упрочняющих элементов из сплава [8]. Хотя присадочные металлы могут компенсировать выгорание элемента, присадочная проволока Al-Mg не поддается термической обработке. Процесс термообработки после сварки, включающий в себя процесс солюбилизационной обработки, закалку в воде и последующий процесс обработки старением, является наилучшим методом восстановления механических свойств зоны термического воздействия путем повторного осаждения [16]. Однако процесс термообработки после сварки не способен полностью улучшить размягчение зоны плавления из-за испарения Mg во время сварки и из-за того, что присадочный металл не поддается термической обработке. В исследовании [17] показано, что процесс холодной прокатки после сварки, который включал сварку вольфрамовым электродом в инертном газе с присадочной проволокой и последующую прокатку упрочняющего слоя, уменьшил

размягчение соединения. Однако упрочняющий эффект, производимый прокаткой арматуры сварного шва, проявлялся в основном в зоне плавления и зоне термического воздействия, близкой к зоне плавления, а размягчение все еще наблюдалось в зоне термического воздействия на некотором расстоянии от зоны плавления [17].

Размягчение сварных соединений значительно ограничивает возможности применения алюминия, но ни один процесс не может синхронно и эффективно упрочнить зону плавления и зону термического воздействия сварных соединений алюминия. Предлагается процесс послесварочной обработки композита, направленный на упрочнение соединения путем сочетания дисперсионного упрочнения процесса термообработки после сварки в зоне термического воздействия и рабочего упрочнения процесса холодной прокатки после сварки в зоне плавления. В исследовании также было проанализировано влияние взаимодействия между упрочнением в процессе обработки и дисперсионным упрочнением на механические свойства соединения и выявлено значение синхронного упрочнения зоны плавления и зоны термического воздействия для прочности и пластичности соединения.

#### Методика

В настоящем исследовании алюминиевый сплав АД-33 (рис. 1) подвергался закалке в следующем режиме: выдержка при температуре 530 °С в течение 1 часа, закалка в воде, а затем при температуре 170 °С в течение 8 ч). Габариты образца для соединения 200 мм × 100 мм × 2 мм. Перед сваркой поверхности листа были отшлифованы водостойким абразивом и очищены ацетоном.

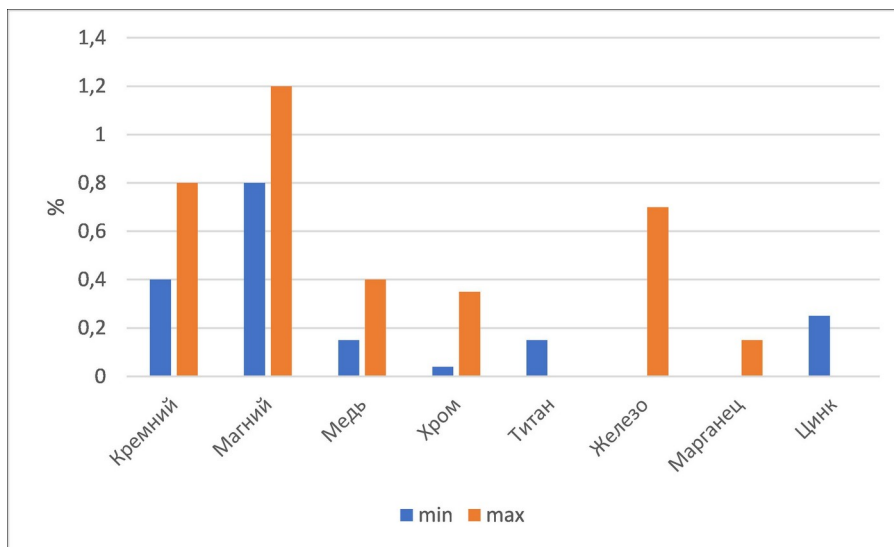


Рисунок 1 - Состав сплава АД-33 (кроме алюминия) по ГОСТ 4784-97  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.96.1>

Стыковое соединение было выполнено с помощью сварки вольфрамовым электродом в инертном газе в режиме переменного тока. Присадочная проволока Св-АМг5 диаметром 1,2 мм была использована с устройством управления устройством подачи проволоки. Параметры сварки следующие: сила тока 130 А, скорость перемещения 350 мм/мин и скорость подачи проволоки 5000 мм/мин. Для уменьшения влияния высокой температуры сварки на свойства соединения из алюминиевого сплава АД-33, процесс сварки проводился в условиях охлаждения на месте с использованием установки, описанной в [17]. Для образцов, подвергнутых охлаждению на месте, в медной подложке была проделана охлаждающая канавка шириной 4 мм и глубиной 2 мм. Расстояние зажима между медной накладкой и центром сварного шва оставалось постоянным и составляло 5 мм. Сварочное приспособление, обеспечивающее охлаждение на месте, охлаждалось с помощью воды, которая циркулировала по медной подложке и медной крышке (рис. 2).

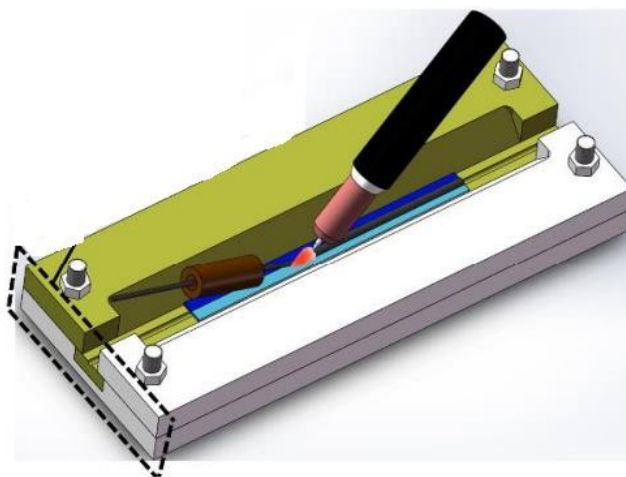


Рисунок 2 - Принципиальная схема процесса сварки в условиях стационарного охлаждения  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.96.2>

*Примечание: источник [17]*

Процесс холодной прокатки после сварки проводился путем однократной прокатки сварного шва при комнатной температуре. Расстояние между двумя роликами было установлено равным 1,5 мм. Различные комбинации процессов термообработки после сварки и холодной прокатки после сварки рассмотрены ниже, чтобы оценить влияние взаимодействия между дисперсионным упрочнением и рабочим упрочнением на механические свойства соединения.

1. Процесс обработки композита, в котором преобладает послесварочное упрочнение. Кратковременный процесс упрочнения после процесса холодной прокатки после сварки приведет к недостаточному повторному растворению избыточной фазы упрочнения и к тому, что останется большее количество дислокаций.

2. Процесс обработки композита с преобладанием дисперсионного упрочнения после сварки. Длительный процесс солюбилизационной обработки после процесса холодной прокатки после сварки приведет к значительному уменьшению количества дислокаций, а достаточное повторное растворение избыточной фазы упрочнения может привести к повторному осаждению фазы упрочнения во время последующего процесса старения.

3. Процесс обработки композита, в котором преобладает послесварочное упрочнение и дисперсионное упрочнение. Процесс холодной прокатки после сварки после длительных процессов солюбилизационной обработки и старения приводит к большому количеству дислокаций и фаз упрочнения.

Для оценки характеристик упрочнения соединения была использована карта микротвердости по Виккерсу. Во время измерения использовалась нагрузка 0,5 кг, время выдержки 15 с и расстояние между углублениями 250 мкм. Свойства соединений при растяжении были измерены с помощью универсальной машины для испытания на растяжение со скоростью вращения траверсы 1,0 мм/мин. Полученные значения предела прочности при растяжении и относительного удлинения при разрушении были средними по результатам трех испытаний. Тип и содержание упрочняющих фаз в соединении были проанализированы с помощью дифференциального сканирующего калориметра, который позволяет точно и качественно анализировать характеристики упрочняющих фаз в больших масштабах. Образцы для исследования были вырезаны в зоне термического воздействия вблизи линии срачивания и обработаны со скоростью 10 °С/мин. Для анализа характеристик дислокаций были получены карты EBSD из зоны термического воздействия вблизи линии слияния с помощью сканирующего электронного микроскопа SM-20.

### **Результаты**

На рис. 3 показаны свойства соединений при растяжении без усиления сварным швом для трех комбинаций режимов постобработки, описанных выше. Это убедительно доказывает важность эффективного и синхронного усиления зон плавления и термического воздействия для прочности и пластичности соединения. По сравнению с другими образцами, подвергнутыми послесварочной обработке, образец 3 с относительно однородным распределением микротвердости и без какого-либо размягчения шва обладал наилучшими свойствами при растяжении, практически как у базового металла.

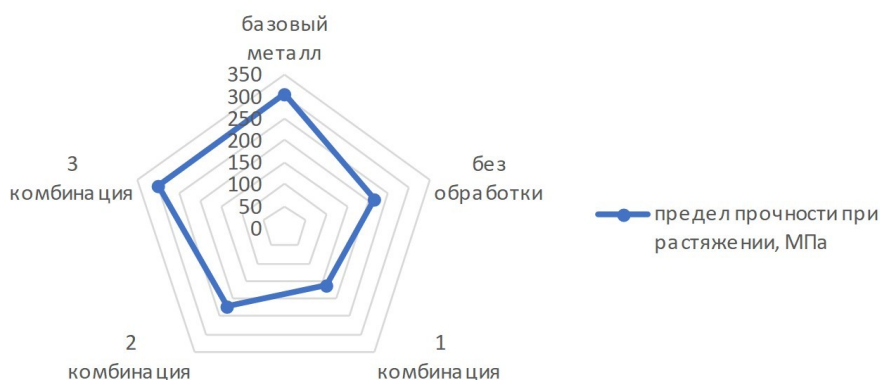


Рисунок 3 - Сравнение свойств соединения при растяжении в результате различных процессов послесварочной обработки

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.96.3>

### Заключение

В исследовании был предложен процесс послесварочной обработки композита для улучшения механических свойств сварного соединения алюминиевого сплава АД-33. Процессы солиubilизационной обработки и старения использовались для полного повторного осаждения упрочняющих фаз в зоне термической обработки образцов, сваренных вольфрамовым электродом в инертном газе с использованием присадочной проволоки. Впоследствии был проведен процесс холодной прокатки после сварки для увеличения плотности дислокации, главным образом, в зоне плавления. Послесварочный процесс в комбинации №3 позволяет повысить прочность и пластичность соединения до 100 и 67% от базового металла, соответственно. Кроме того, было отмечено, что послесварочный процесс в комбинации №3 привел к чрезмерному упрочнению (т.е. микротвердость выше, чем у базового металла) в зоне плавления и зоне термической обработки, близкой к зоне плавления. Это явление чрезмерного упрочнения, вероятно, привело к неоднородной пластической деформации во время испытания на растяжение, что снизило пластичность соединения. Поэтому в дальнейшем необходимо контролировать эффект упрочнения при обработке зон плавления и термической обработки, регулируя силу сжатия при прокатке, чтобы сделать микротвердость соединения более однородной, что еще больше улучшит пластичность соединения.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Рецензия

Рудой Е.М., АО "Сбербанк-Технологии", Королёв, Российская Федерация  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.96.4>

### Conflict of Interest

None declared.

### Review

Rudoi E.M., Sberbank Technologies JSC, Korolev, Russian Federation  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.96.4>

### Список литературы / References

1. Ширинкина И.Г. Структура и свойства алюминиевых сплавов, полученных электропластической прокаткой / И.Г. Ширинкина [и др.] // Инновации в материаловедении и металлургии. — Екатеринбург, 2012.
2. Могильных А.Е. Исследование возможности регулирования твёрдости алюминиевых сплавов при асимметричной прокатке / А.Е. Могильных [и др.] // Теория и технология металлургического производства. — 2023. — № 4(47). — С. 21–25.
3. Фридляндер И.Н. Современные алюминиевые, магниевые сплавы и композиционные материалы на их основе / И.Н. Фридляндер // Металловедение и термическая обработка металлов. — 2002. — № 7. — С. 24–29.
4. Овчинников В.В. Технологические особенности сварки трением с перемешиванием алюминиевых сплавов / В.В. Овчинников // Машиностроение и инженерное образование. — 2016. — № 4. — С. 22–45.
5. Liu F. High speed friction stir welding of ultra-thin AA6061-T6 sheets using different backing plates / F. Liu, L. Fu, H. Chen // Journal of Manufacturing Processes. — 2018. — Vol. 33. — P. 219–227.
6. Бойцов А.Г. Высокоскоростная сварка трением перемешиванием авиационных материалов и конструкций / А.Г. Бойцов, В.В. Качко, Д.Н. Курицын // Металлообработка. — 2013. — № 5-6(77-78). — С. 35–42.
7. Ковалев В.В. Особенности получения сталеалюминиевых соединений методами сварки плавлением / В.В. Ковалев, Р.С. Михеев, Н.В. Коберник // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». — 2016. — № 4(109). — С. 93–112.

8. Rodríguez-Hernández T. First assessment on the microstructure and mechanical properties of gtaw-gmaw hybrid welding of 6061-t6 AA / T. Rodríguez-Hernández [et al.] // Journal of Manufacturing Processes. — 2020. — Vol. 59. — P. 658–667.
9. Huang M. Effect of external magnetic field on resistance spot welding of aluminum alloy AA6061-T6 / M. Huang [et al.] // Journal of Manufacturing Processes. — 2020. — Vol. 50. — P. 456–466.
10. Kalinenko A. Microstructure-strength relationship in friction-stir welded 6061-T6 aluminum alloy / A. Kalinenko [et al.] // Materials Science and Engineering: A. — 2020. — Vol. 793. — P. 139858.
11. Cheng J. Review of techniques for improvement of softening behavior of age-hardening aluminum alloy welded joints / J. Cheng [et al.] // Materials. — 2021. — Vol. 14. — № 19. — P. 5804.
12. Khan M.S. A review on the laser welding of coated 22MnB5 press-hardened steel and its impact on the production of tailor-welded blanks / M.S. Khan [et al.] // Science and Technology of Welding and Joining. — 2020. — Vol. 25. — № 6. — P. 447–467.
13. Пантелеев М.Д. Технологические особенности сварки плавлением алюминиевого сплава В-1579 / М.Д. Пантелеев [и др.] // Авиационные материалы и технологии. — 2018. — № 3(52). — С. 11–17.
14. Bardel D. Integrated modelling of a 6061-T6 weld joint: From microstructure to mechanical properties / D. Bardel [et al.] // Acta Materialia. — 2016. — Vol. 117. — P. 81–90.
15. Мыльников В.В. Исследование влияния количества упрочняющей фазы дисперсно-упрочненного композиционного материала на основе алюминия на закономерности процесса разрушения / В.В. Мыльников, А.Д. Романов, Е.А. Чернышов // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. — 2018. — № 3. — С. 55–63.
16. Pérez J.S. Recovery of mechanical properties of a 6061-T6 aluminum weld by heat treatment after welding / J.S. Pérez [et al.] // Metallurgical and Materials Transactions A. — 2016. — Vol. 47. — P. 3412–3422.
17. Cheng J. Improving heat-affected zone softening of aluminum alloys by in-situ cooling and post-weld rolling / J. Cheng [et al.] // Journal of Materials Processing Technology. — 2022. — Vol. 306. — P. 117639.

#### **Список литературы на английском языке / References in English**

1. Shirinkina I.G. Struktura i svojstva aluminievyyh spлавov, poluchennyh jelektroplasticheskoj prokatkoj [Structure and Properties of Aluminum Alloys Obtained by Electroplastic Rolling] / I.G. Shirinkina [et al.] // Innovacii v materialovedenii i metallurgii [Innovations in Materials Science and Metallurgy]. — Yekaterinburg, 2012. [in Russian]
2. Mogilnykh A.E. Issledovanie vozmozhnosti regulirovaniya tvjordosti aluminievyyh spлавov pri asimmetrichnoy prokatke [Investigation of the Possibility of Regulating the Hardness of Aluminum Alloys During Asymmetric Rolling] / A.E. Mogilnykh [et al.] // Teorija i tehnologija metallurgicheskogo proizvodstva [Theory and Technology of Metallurgical Production]. — 2023. — № 4(47). — P. 21–25. [in Russian]
3. Fridlyander I.N. Sovremennyye aljuminievyye, magnievyye spлавy i kompozicionnyye materialy na ih osnove [Modern Aluminum, Magnesium Alloys, and Composite Materials Based on Them] / I.N. Fridlyander // Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov [Metal Science and Heat Treatment of Metals]. — 2002. — № 7. — P. 24–29. [in Russian]
4. Ovchinnikov V.V. Tehnologicheskie osobennosti svarki treniem s peremeshivaniem aljuminievyyh spлавov [Technological Features of Friction Stir Welding of Aluminum Alloys] / V.V. Ovchinnikov // Mechanical Mashinostroenie i inzhenernoe obrazovanie [Engineering and Engineering Education]. — 2016. — № 4. — P. 22–45. [in Russian]
5. Liu F. High speed friction stir welding of ultra-thin AA6061-T6 sheets using different backing plates / F. Liu, L. Fu, H. Chen // Journal of Manufacturing Processes. — 2018. — Vol. 33. — P. 219–227.
6. Boytsov A.G. Vysokoskorostnaja svarka treniem peremeshivaniem aviacionnyh materialov i konstrukcij [High-Speed Friction Stir Welding of Aerospace Materials and Structures] / A.G. Boytsov, V.V. Kachko, D.N. Kuritsyn // Metalloobrabotka [Metalworking]. — 2013. — № 5-6(77-78). — P. 35–42. [in Russian]
7. Kovalev V.V. Osobennosti polucheniya stalealjuminievyyh soedinenij metodami svarki plavleniem [Features of Obtaining Steel-Aluminum Joints by Fusion Welding Methods] / V.V. Kovalev, R.S. Mikheev, N.V. Kobernik // Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta im. N.Je. Baumana. Serija «Mashinostroenie» [Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. Series "Mechanical Engineering"]. — 2016. — № 4(109). — P. 93–112. [in Russian]
8. Rodríguez-Hernández T. First assessment on the microstructure and mechanical properties of gtaw-gmaw hybrid welding of 6061-t6 AA / T. Rodríguez-Hernández [et al.] // Journal of Manufacturing Processes. — 2020. — Vol. 59. — P. 658–667.
9. Huang M. Effect of external magnetic field on resistance spot welding of aluminum alloy AA6061-T6 / M. Huang [et al.] // Journal of Manufacturing Processes. — 2020. — Vol. 50. — P. 456–466.
10. Kalinenko A. Microstructure-strength relationship in friction-stir welded 6061-T6 aluminum alloy / A. Kalinenko [et al.] // Materials Science and Engineering: A. — 2020. — Vol. 793. — P. 139858.
11. Cheng J. Review of techniques for improvement of softening behavior of age-hardening aluminum alloy welded joints / J. Cheng [et al.] // Materials. — 2021. — Vol. 14. — № 19. — P. 5804.
12. Khan M.S. A review on the laser welding of coated 22MnB5 press-hardened steel and its impact on the production of tailor-welded blanks / M.S. Khan [et al.] // Science and Technology of Welding and Joining. — 2020. — Vol. 25. — № 6. — P. 447–467.
13. Panteleev M.D. Tehnologicheskie osobennosti svarki plavleniem aljuminievogo spлавa V-1579 [Technological Features of Fusion Welding of Aluminum Alloy V-1579] / M.D. Panteleev [et al.] // Aviacionnyye materialy i tehnologii [Aviation Materials and Technologies]. — 2018. — № 3(52). — P. 11–17. [in Russian]
14. Bardel D. Integrated modelling of a 6061-T6 weld joint: From microstructure to mechanical properties / D. Bardel [et al.] // Acta Materialia. — 2016. — Vol. 117. — P. 81–90.

15. Mylnikov V.V. Issledovanie vlijanija kolichestva uprochnjajushhej fazy dispersno-uprochnennogo kompozicionnogo materiala na osnove aljuminija na zakonomernosti processa razrushenija [Investigation of the Influence of the Amount of Strengthening Phase in Aluminum-Based Dispersion-Strengthened Composite Materials on the Patterns of Fracture Processes] / V.V. Mylnikov, A.D. Romanov, E.A. Chernyshov // Izvestija vuzov. Poroshkovaja metallurgija i funkcional'nye pokrytija [Proceedings of Universities. Powder Metallurgy and Functional Coatings]. — 2018. — № 3. — P. 55–63. [in Russian]

16. Pérez J.S. Recovery of mechanical properties of a 6061-T6 aluminum weld by heat treatment after welding / J.S. Pérez [et al.] // Metallurgical and Materials Transactions A. — 2016. — Vol. 47. — P. 3412–3422.

17. Cheng J. Improving heat-affected zone softening of aluminum alloys by in-situ cooling and post-weld rolling / J. Cheng [et al.] // Journal of Materials Processing Technology. — 2022. — Vol. 306. — P. 117639.