



Научная статья

2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)

УДК669.715

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.04.023

 EDN: LSESWH

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СПЛАВА AA7075, ПОЛУЧЕННОГО АДДИТИВНЫМ СПОСОБОМ

Владислав Константинович Дробышев<sup>1</sup>, Ирина Алексеевна Панченко<sup>2</sup>,  
Сергей Валерьевич Коновалов<sup>3</sup>, Дмитрий Николаевич Лабунский<sup>4</sup>

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия

<sup>1</sup> drobyshev\_v.k@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1532-9226>

<sup>2</sup> i.r.i.ss@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4863-0000>

<sup>3</sup> ksv@ssau.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4809-8660>

<sup>4</sup> info@kana-t.ru

**Аннотация.** Повышение прочностных свойств поверхностных слоев легких металлов и сплавов, таких как алюминиевые сплавы системы Al-Zn-Mg, является достаточно актуальным в настоящее время, это связано с широким применением данных сплавов в автомобилестроении и авиакосмической промышленности. С постоянным ростом требований к изготавливаемым деталям может стать решение освоения новых технологий производства изделий, таких как аддитивное производство. Как известно, чем выше прочностные и трибологические свойства поверхности детали или изделия, тем более эффективно оно сопротивляется внешним нагрузкам в процессе эксплуатации. Технология проволочно-дугового аддитивного производства является высокоэффективным и недорогим методом получения крупногабаритных и сложных структур, и данный метод можно использовать для упрочнения поверхности изготавливаемых деталей. Дальнейшее исследование осуществлялось по режиму наплавки № 2, усталостная долговечность которого на 7,3 % выше, чем у образцов, полученных по режиму наплавки № 1. Проведение испытаний на растяжение, нанотвердости и исследования структуры осуществлялось в различных слоях полученной заготовки. Предел прочности образцов в средней области составил 126 МПа, что на 35 % больше по сравнению с образцами с нижней области. В областях с более высокой скоростью охлаждения за счет межслоевого охлаждения значение нанотвердости повышалось до  $2,3 \pm 0,3$  ГПа. Также стоит отметить, что в средней области исследуемой заготовки присутствует больше зон твердости, чем в верхних и нижних областях, что указывает на образование твердых фаз.

**Ключевые слова:** алюминиевый сплав 7075, технология проволочно-дугового аддитивного производства, нанотвердость, предел прочности, усталостная долговечность.

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10245, <https://rscf.ru/project/22-79-10245/>.

**Для цитирования:** Исследование механических свойств сплава AA7075, полученного аддитивным способом. / В. К. Дробышев [и др.] // Ползуновский вестник. 2024. № 4. С. 156–160. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.04.023, EDN: <https://elibrary.ru/LSESWH>.

Original article

## STUDY OF MECHANICAL PROPERTIES OF AA7075 ALLOY PRODUCED BY ADDITIVE METHOD

Vladislav K. Drobyshev<sup>1</sup>, Irina A. Panchenko<sup>2</sup>, Sergei V. Konovalov<sup>3</sup>,  
Dmitry N. Labunsky<sup>4</sup>

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

<sup>1</sup> drobyshev\_v.k@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1532-9226>

<sup>2</sup> i.r.i.ss@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4863-0000>

<sup>3</sup> ksv@ssau.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4809-8660>

<sup>4</sup> info@kana-t.ru

© Дробышев В. К., Панченко И. А., Коновалов С. В., Лабунский Д. Н., 2024

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СПЛАВА AA7075, ПОЛУЧЕННОГО АДДИТИВНЫМ СПОСОБОМ

**Abstract.** Increasing the strength properties of surface layers of light metals and alloys, such as aluminum alloys of the Al-Zn-Mg system, is quite relevant at the present time, this is due to the widespread use of these alloys in the automotive and aerospace industries. With the constant increase in requirements for manufactured parts, a solution may be to master new technologies for producing products, such as additive manufacturing. As is known, the higher the strength and tribological properties of the surface of a part or product, the more effectively it resists external loads during operation. Wire-arc additive manufacturing technology is a highly efficient and inexpensive method for producing large and complex structures and this method can be used to harden the surface of manufactured parts. Further research was carried out using surfacing mode № 2, the fatigue life of which is 7.3% higher than that of samples obtained using surfacing mode № 1. Tensile tests, nanohardness tests and structure studies were carried out in various layers of the resulting workpiece. The tensile strength of the samples in the middle region was 126 MPa, which is 35% more than the samples from the lower region. In areas with a higher cooling rate due to interlayer cooling, the nanohardness value increased to  $2.3 \pm 0.3$  GPa. It is also worth noting that in the middle region of the workpiece under study there are more zones of hardness than in the upper and lower regions, which indicates the formation of solid phases.

**Keywords:** Aluminum alloy 7075, wire-arc additive manufacturing technology, nanohardness, tensile strength, fatigue life.

**Acknowledgments:** This study is funded by a grant of the Russian Science Foundation, project 22-79-10245. <https://rscf.ru/en/project/22-79-10245/>.

**For citation:** Drobyshev, V.K., Panchenko, I.A., Konovalov, S.V. & Labunsky, D.N. (2024). Study of mechanical properties of aa7075 alloy produced by additive method. *Polzunovskiy vestnik*. (4), 156-160. (In Russ). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.04.023, EDN: <https://elibrary.ru/LSESWH>.

### ВВЕДЕНИЕ

Повышение прочностных свойств поверхностных слоев легких металлов и сплавов, таких как алюминиевые сплавы системы Al-Zn-Mg [1–2], является достаточно актуальным в настоящее время [3], это связано с широким применением данных сплавов в автомобилестроении [4–6] и авиакосмической промышленности [7–9]. Требования к изготавливаемым деталям постоянно растут. Решением может стать освоение новых технологий производства деталей, такое как аддитивное производство. Как известно, чем выше прочностные и трибологические свойства поверхности детали или изделия, тем более эффективно оно сопротивляется внешним нагрузкам в процессе эксплуатации.

Аддитивное производство проволоочной дуги – это метод, используемый для производства сплава без учета влияния человеческого фактора, предлагается в качестве превосходящей альтернативы другим методам, таким как плавление в вакууме, плазменно-дуговое плавление, селективное лазерное плавление или электронно-лучевое плавление [10]. Технология проволоочно-дугового аддитивного производства (WAAM), включая сплавление в порошковым слое (PBF), прямое энергетическое осаждение (DED), экструзию материалов (ME) и струйную обработку связующего (BJ), используется для изготовления компонентов с хорошей точностью размеров и качеством поверхности [11]. Было показано, что WAAM является высокоэффективным и недорогим методом получения

крупногабаритных и сложных структур и данный метод можно использовать для упрочнения поверхности изготавливаемых деталей.

Детали из алюминиевого сплава Al-Zn-Mg-Cu обладают многими преимуществами, что делает их идеальными для использования в различных отраслях промышленности. Они обеспечивают приемлемую механическую прочность и износостойкость, а также обладают легкостью и экономически выгодны при производстве с использованием аддитивных технологий.

Рассмотрим процесс изменения зависимости механических свойств таких, как нанотвердость предел прочности, текучести, усталостная долговечность образцов из сплава AA7075 в зависимости от режимов получения заготовки и области исследования.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Для изготовления образцов методом аддитивной технологии использовалась проволока диаметра 1,2 мм следующего химического состава (масс. %): 0,04–0,05 Si; 0,09–0,10 Fe; 0,3 Mn; 1,60–1,77 Cu; 2,49–2,51 Mg; 0,18 Cr; 6,02–6,10 Zn; 0,02 Ti; Al – остальное. Данный состав соответствует сплаву 7075 (AlZn5, 5MgCu) по ГОСТ 4784-2017. Было подобрано несколько режимов работы наплавочного комплекса. Толщина подложки из алюминия, на которую наносили аддитивную наплавку, составляла 7 мм. Режимы наплавки имели следующие параметры; 1 режим: скорость подачи проволоки 6,1 м/мин, напряжение 16,1 В, скорость движения горелки – 0,2 м/мин, сила тока 130–140 А, расход газа Ar 17,5 л/мин; 2 режим: скорость подачи проволоки 5 м/мин, напряжение 15,5 В, скорость движения горелки – 0,2 м/мин, сила

тока 130–140 А, расход газа Ar – 13 л/мин.

Для проведения механических испытаний из объемной заготовки размера 150x200x30 мм были изготовлены с помощью электроэрозионного проволочно-вырезного станка струйного типа ДК7732 М11 плоские образцы для растяжения в виде двухсторонних лопаток (длина 48 мм, ширина лопаток 14 мм, ширина рабочей области – 9 мм, толщина – 2,4 мм) (рис. 1, а). Для испытаний на усталостную долговечность образцы имели форму параллелепипеда размерами 4x12x130 мм с двумя концентраторами напряжений в виде полукруга радиусом 20 мм (рис. 1, а).

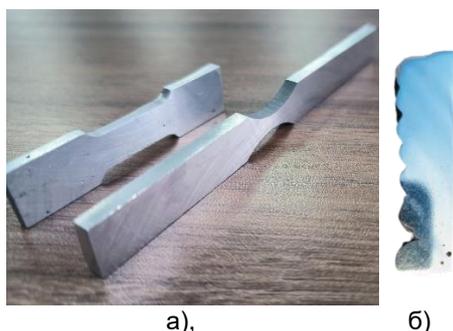


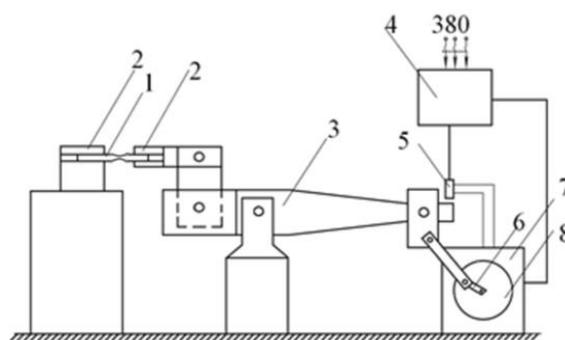
Рисунок 1 – Внешний вид образцов сплава AA7075 для механических испытаний

Figure 1 – Appearance of AA7075 alloy samples for mechanical testing

Механические испытания сплава AA7075 осуществляли путем одноосного растяжения образцов на испытательной машине «UBRAMAX PM BC-50-A-1-02-II» с постоянной скоростью 1,25 мм/мин. Одноосному растяжению подвергались образцы сплава AA7075, полученного аддитивным способом с использованием различных режимов наплавки.

Проведение испытаний на усталость осуществлялось на специальной установке по схеме циклического асимметричного консольного изгиба, внешний вид которой приведен на рисунке 3. Образец закрепляется зажимами. Один конец образца остается неподвижным, а к другому прикладывается знакопеременная нагрузка. Изгиб осуществляется с помощью рычажного механизма, который соединяется с валом. При помощи эксцентрика можно изменять амплитуду напряжений. Вал приводится во вращение с помощью электродвигателя. Фотодатчик используется для регистрации числа циклов нагружения. Изменяя напряжение, подаваемое на обмотку электродвигателя, можно изменять частоту вращения двигателя. Во время испытаний определялось число циклов, которые образцы выдерживали до разрушения. Температура испытаний во всех случаях была комнатной (~300 К). Частота нагружений образцов изгибом составляла ~ 3,3 Гц. Чтобы образец до разрушения выдерживал не менее 105 циклов нагружения, экспериментально подбирали верхнее значение напряжения цикла нагрузки и амплитуды нагружения.

158



1 – образцы; 2 – устройство для закрепления образца; 3 – рычажный механизм; 4 – система управления; включающая в себя: блок управления частотой вращения двигателя и счетчик числа циклов; фотодатчик – 5; эксцентрик – 6; двигатель – 7; вал – 8

Рисунок 2 – Принципиальная схема установки для усталостных испытаний

Figure 2 – Schematic diagram of the installation for fatigue testing

Для измерения инструментальной твердости полученного образца алюминиевого сплава AA7075 (рис. 1, б) использовался прибор «Наноскан-4D» в соответствии со стандартами ISO 14577 и ГОСТ Р 8.748-2011 с использованием алмазной трехгранной пирамидки Берковича, нагрузка составила 25 мН расстояние между отпечатками 40 мкм.

Изучение элементного и фазового состава, дефектной субструктуры образцов системы, подвергнутых облучению электронным пучком, проводили методами сканирующей электронной микроскопии [12–14].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате исследования установлено, что сплав AA7075, полученный по режиму 1 и подвергнутый испытаниям в условиях многоциклового усталости, разрушается в среднем через 218000 циклов после приложения асимметричной нагрузки с частотой ~3,8 циклов/с. Максимальное значение числа циклов до разрушения, которое выдержал образец, было получено по второму режиму и составило 235000 циклов. Использование различных параметров при наплавке аддитивным способом приводит к немонотонному изменению усталостной долговечности сплава. Повышение усталостной долговечности может быть связано за счет образования крупных зерен. Также в работе [15] основной характеристикой распространения усталостных трещин было пластическое разрушение, сопровождавшееся многочисленными вторичными трещинами и редкими усталостными полосами.

Поэтому дальнейшие исследования будут проведены с использованием режима наплавки № 2. Анализ механических свойств показал, что предел прочности при растяжении (рисунок 3) и относительное удлинение в образцах, вырезанных из области около подложки, составляет

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СПЛАВА АА7075, ПОЛУЧЕННОГО АДДИТИВНЫМ СПОСОБОМ

97 МПа, относительное удлинение 1,4 %. Предел прочности образцов, вырезанных из области посередине заготовки, составляет 126 МПа, а относительное удлинение 1,2 %; вырезанных из области на краю заготовки, составляет 122 МПа, а относительное удлинение – 3,1 %.

Благодаря полученной информации можно сделать предположение о повышенных механических свойствах образцов, находящихся в средней области полученной заготовки в связи с изменениями его структурных свойств.

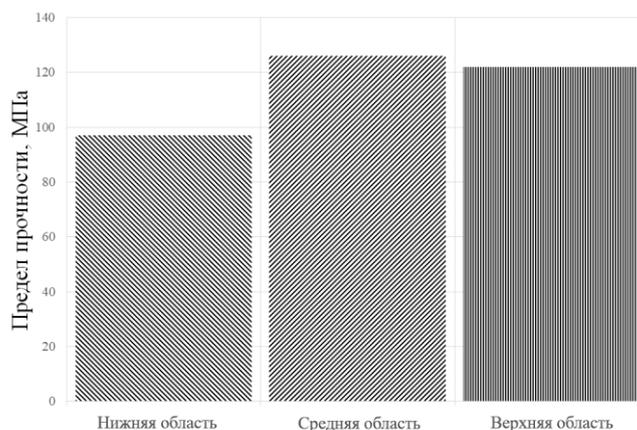


Рисунок 3 – Предел прочности образцов после испытания на растяжение

Figure 3 – Ultimate strength of samples after tensile testing

Нанотвердость изготовленного образца из сплава измерялась послойно по высоте наплавочного материала и представлена на рисунке 4. Видно, что нанотвердость верхнего слоя оказалась равной  $2,28 \pm 0,3$  ГПа.

С увеличением ширины слоя твердость детали снижалась. Установлено, что нанотвердость среднего слоя находится в пределах 2,1–

2,3 ГПа. За счет более высоких скоростей промежуточного охлаждения в средней области нанотвердость компонентов была выше, чем в нижней и верхней области. Тем самым в средней области присутствует больше зон твердости, чем в верхних и нижних областях, что указывает на образование твердых фаз.



Рисунок 4 – Электронно-микроскопическое изображение поверхности алюминиевого сплава 7075 и нанотвердость в зависимости от глубины заготовки

Figure 4 – Electron microscopic image of the surface of aluminum alloy 7075 and nanohardness depending on the depth of the workpiece

Методами сканирующей микроскопии было установлено, что исследуемый материал содержит небольшое количество пор, возникших при его производстве. Размер пор в некоторых случаях составлял около 100 мкм и был изучен в работе [15]. Такие поры в основном обнаружены в слое материала, примыкающем к подложке.

Анализ элементного состава показал, что

независимо от расстояния от подложки содержания химических элементов распределены равномерно, а именно показал следующее распределение элементов в сплаве: (масс. %): 0,2 Si; 0,27 Fe; 0,47 Mn; 2,8 Cu; 2,15 Mg; 0,18 Cr; 6,84 Zn; 0,01 Ti; Al – остальное. Небольшое отличие элементного состава от состава исходной проволоки может быть связан с особенностями технологии

формирования аддитивного материала AA7075, а именно: при нанесении слоев было выявлено разбрызгивание присадочного материала.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение можно отметить, что разностороннее изучение характеристик сплава AA7075, полученного с использованием аддитивных технологий и изученного методами современного физического материаловедения, выявило значительные преобразования как качественные, так и количественные.

1. Установлено, что усталостная долговечность образцов, полученных по второму режиму, на 7,3 % выше, чем у образцов, полученных по режиму наплавки № 1. Это произошло за счет образования крупных зерен. Основной характеристикой распространения усталостных трещин было пластическое разрушение, сопровождавшееся многочисленными вторичными трещинами и редкими усталостными полосами.

2. В процессе механических испытаний были получены значения предела прочности. Предел прочности образцов в средней области составил 126 МПа, что на 35 % больше по сравнению с образцами с нижней области. Изменение предела прочности сплава предположительно связано с изменениями его структурных свойств.

3. Установлено влияние температурного градиента скоростей охлаждения на нанотвердость сплава в областях с более высоким температурным градиентом за счет межслоевого охлаждения, что привело к повышению нанотвердости до  $2,3 \pm 0,3$  ГПа.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Otani B. Silumin and its structure. J. Inst. Met. 2021. 36.
2. Geng, Y., Panchenko, I., Chen, X., Ivanov, Y., Konovalov, S. Wire arc additive manufacturing Al-5.0 Mg alloy: microstructures and phase composition. Mater Charact 187, 111875 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2022.111875>.
3. Marukovich, E., Stetsenko, V. // Lityoi Metallurgiya. 2018. p. 12-15.
4. Anantha Padmanaban, D., Kurien, G. Advanced Materials and Processes. 2012. 170. 28-30.
5. Goenka, M., Nihal, Ch., Ramanathan, R., Gupta, P., Parashar A., Joel J. // Materials Today: Proceedings. № 22. p. 2525-2531.
6. Javidani, M., Larouche, D. // International Materials Reviews. 2014. V. 59. No. 3. Pp. 132-158.
7. Robles-Hernández, F., Herrera Ramirez, J. Al-Si Alloys. R. 2017 10.1007/978-3-319-58380-8.8.
8. Zhang, X., Li, S., Pan, B., Pan, D., Liu, L., Hou, X., Chu, M., Kondoh, K, Zhao, M. Regulation of interface between carbon nanotubes/aluminum and its strengthening effect in CNTs reinforced aluminum matrix nanocomposites // Carbon N Y/ 2019. 155. P. 686-696. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.09.016>.
9. Alekseev, A.V., Yesikov, M.A., Strekalov, V.V., Mali, V.I., Khasin, A.A., Predtechensky, M.R. Effect of single wall carbon nanotubes on strength properties of aluminum composite produced by spark plasma sintering and extrusion // Mate-

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

*The authors declare that there is no conflict of interest.*

*Статья поступила в редакцию 18 января 2024; одобрена после рецензирования 20 ноября 2024; принята к публикации 04 декабря 2024.*

*The article was received by the editorial board on 18 Jan 2024; approved after editing on 20 Nov 2024; accepted for publication on 04 Dec 2024.*

rials Science and Engineering A. 2020. 793 P. 139746. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139746>.

10. Zavadveev, A.V. (2023). Non-equimolar Cantor high entropy alloy fabrication using metal powder cored wire arc additive manufacturing. Additive manufacturing letters, 6:100124-100124. doi: 10.1016/j.addlet.2023.100124.

11. Tomer, Ron., A., Shirizly., Eli, Aghion. (2023). Additive Manufacturing Technologies of High Entropy Alloys (HEA): Review and Prospects. Materials, 16(6): 2454-2454. doi: 10.3390/ma16062454.

12. Inkson, B.J. // Materials Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods / K. Dos Santos (Ed.). Elsevier Ltd, 2016. pp. 17-43.

13. Primig, S., Theska, F., Haghdadi, N. Electron Microscopy Methods. 2020. 10.1016/B978-0-12-819726-4.00031-4.

14. Kuo, J. Electron Microscopy: Methods and Protocols. 2014. 10.1007/978-1-62703-776-1.

15. Panchenko, I., Gudala, S., Labunskii, D. [et al.]. Microstructural evolution and the effect of electron beam melting on the fatigue characteristics of 7075 Al alloy deposited by MIG arc additively manufacturing. Int J Interact Des Manuf (2024). <https://doi.org/10.1007/s12008-023-01729-3>.

### Информация об авторах

*В. К. Дробышев – научный сотрудник лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений Сибирского государственного индустриального университета.*

*И. А. Панченко – кандидат технических наук, заведующий лабораторией электронной микроскопии и обработки изображений Сибирского государственного индустриального университета.*

*С. В. Коновалов – доктор технических наук, профессор, проректор по научной и инновационной деятельности Сибирского государственного индустриального университета.*

*Д. Н. Лабунский – соискатель ученой степени кандидата наук, Сибирского государственного индустриального университета.*

### Information about the authors

*D.N. Labunskiy - applicant for the degree of candidate of sciences of the Siberian State Industrial University.*

*I.A. Panchenko - Candidate of Technical Sciences, Head of the Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing.*

*S.V. Konovalov - Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector on Science and Innovation at the Siberian State Industrial University; Chief Researcher of Samara National Research University.*

*V.K. Drobyshev - Junior Researcher of the Laboratory Electron Microscopy and Image Processing of the Siberian State Industrial University.*

*D.A. Bessonov - is a senior researcher at the Siberian State Industrial University.*