



## РАЗДЕЛ 2. ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ

Научная статья

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

УДК 669.715

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.019



### ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 7075, ПОЛУЧЕННОГО ПРОВОЛОЧНО-ДУГОВЫМ АДДИТИВНЫМ СПОСОБОМ

Дмитрий Николаевич Лабунский<sup>1</sup>, Ирина Алексеевна Панченко<sup>2</sup>,  
Сергей Валерьевич Коновалов<sup>3</sup>,  
Владислав Константинович Дробышев<sup>4</sup>, Данил Александрович Бессонов<sup>5</sup>

1, 2, 3, 4, 5 Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия

<sup>1</sup> info@kana-t.ru

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

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

<sup>4</sup> drobyshev\_v.k@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1532-9226>

<sup>5</sup> dabess@yandex.ru

**Аннотация.** *Алюминий и сплавы на его основе сегодня являются наиболее важными и часто используемыми материалами в мире за счет малой плотности, высокой прочности, коррозионной стойкости и аналогичным свойствам. Сплавы серии 7xxx представляют собой алюминиевые сплавы на основе системы -Zn-Mg(-Cu). Они широко используются в высокопроизводительных конструкционных аэрокосмических и транспортных отраслях. Были проведены исследования структуры сплава и образцов, подвергнутых испытаниям на усталость. Методами оптической и сканирующей электронной микроскопии показано, что в исследуемом материале после испытаний на усталость присутствуют области микротрещин, которые в процессе приводят к разрушению образцов. Проведённое исследование микротвердости по Виккерсу установило, что полученные значения имеют минимальные отклонения и алюминиевый сплав 6%Zn, 2,5%Mg, 1,6%C и имеет однородное распределение микротвердости. Методами современного физического материаловедения показано, что размеры зерен структуры полученного сплава варьируются в пределах 5–30 мкм. Показано, что в микроструктуре алюминиевого сплава 7075, полученного проволочно-дуговым аддитивным методом, присутствуют округлые поры причиной образования, которых может быть специфика технологии процесса наплавки.*

**Ключевые слова:** *Алюминиевый сплав 7075, метод дугового алюминиевого производства, структура, микротвердость, рентгенофазовый анализ.*

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

**Для цитирования:** *Исследование структуры и свойств алюминиевого сплава 7075, полученного проволочно-дуговым аддитивным способом / Д. Н. Лабунский [и др.]. // Ползуновский вестник. 2023. № 2. С. 147–154. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.019. EDN: <https://elibrary.ru/SWVHET>.*

Original article

## STUDY OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF ALUMINUM ALLOY 7075 PRODUCED BY A WIRE-ARC ADDITIVE MANUFACTURING

Dmitry N. Labunsky<sup>1</sup>, Irina A. Panchenko<sup>2</sup>, Sergey V. Konovalov<sup>3</sup>,  
Vladislav K. Drobyshev<sup>4</sup>, Danil A. Bessonov<sup>5</sup>

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

<sup>1</sup> info@kana-t.ru

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

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

<sup>4</sup> drobyshev\_v.k@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1532-9226>

<sup>5</sup> dabess@yandex.ru

**Abstract.** Aluminum and aluminum are the most important and commonly used materials in the world due to their small stature, high strength, corrosion resistance and similar properties. Alloys of the 7xxx series became aluminum alloys on the basis of the new -Zn-Mg (-Cu) system. They are widely used in high performance structural aerospace and commercial applications. Studies were carried out on the structure of the alloy and specimens identified by fatigue tests. Optical and scanning electron microscopy methods have shown that microcracks are present in the initial material after fatigue tests, which subsequently lead to the destruction of the samples. A study of Vickers microhardness found that the obtained values have minimal deviations and the aluminum alloy has a uniform microhardness. Using the methods of modern physical materials science, it is shown that the grain sizes of the structure of the resulting alloy vary within 5–30 μm. It is shown that in the microstructure of aluminum alloy 7075, obtained by the wire-arc additive method, there are rounded formation pores, which may be the technology of a specific surfacing process.

**Keywords:** Aluminum alloy 7075, aluminum arc production method, structure, microhardness, X-ray phase analysis.

**Acknowledgements:** 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:** Labunsky, D.N., Panchenko, I.A., Konovalov, S.V., Drobyshev, V.K. & Bessonov, D.A. (2023). Study of the structure and properties of aluminum alloy 7075 produced by a wire-arc additive manufacturing. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 147-154. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.019. EDN: <https://elibrary.ru/SWVHET>.

### ВВЕДЕНИЕ

Алюминий и сплавы на его основе сегодня являются наиболее важными и часто используемыми материалами в мире за счет малой плотности, высокой прочности, коррозионной стойкости и аналогичным свойствам. Среди алюминиевых сплавов сплавы серии 7xxx составляют предпочтительную группу материалов в авиационной и космической промышленности, а также в военном секторе благодаря своей высокой прочности [1–5].

Сплавы серии 7xxx обладают высокой прочностью среди всех алюминиевых сплавов. Основными легирующими элементами являются цинк (1–9%), от 1 до 3 % магния, а также, для некоторых сплавов – до 3,0 % меди, алюминий – все остальное. Важные области применения этих сплавов связаны с их высокой прочностью. Промышленные сплавы

серии 7xxx содержат цинк, магний и медь с небольшими добавками марганца и хрома, а также циркония для контроля роста зерна и рекристаллизации.

Алюминиевые сплавы системы Al-Zn-Mg-Cu применяют для изготовления несущих элементов самолетов, таких как верхние оболочки крыльев, стрингеры, горизонтальные и вертикальные стабилизаторы. Горизонтальные и вертикальные стабилизаторы имеют такие же конструкционные критерии, как и крылья. Верхнюю и нижнюю поверхность горизонтального стабилизатора испытывают изгиб, и для них критическим является сжимающее нагружение.

Все алюминиевые сплавы системы Al-Zn-Mg-Cu проявляют самую высокую прочность. Добавление 2 % меди в комбинации с магнием и цинком значительно повышает прочностные свойства сплавов серии 7xxx.

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 7075, ПОЛУЧЕННОГО ПРОВОЛОЧНО-ДУГОВЫМ АДДИТИВНЫМ СПОСОБОМ

Алюминиевый сплав 7075 (Al-Zn-Mg-Cu) широко используется в аэрокосмической и автомобильной промышленности благодаря высокому соотношению прочности к массе и превосходной пластичности [6, 7]. Благодаря постоянному развитию высокопрочного и высокопрочного алюминиевого сплава могут быть удовлетворены требования к производству сложных и точных конструктивных частей изделий в специальных областях, таких как транспорт, судостроение и аэрокосмическая промышленность [5, 6]. Как недорогой и высокоэффективный метод аддитивное производство с проволочной дугой может быстро реализовать интегрированное формование компонентов из алюминиевого сплава, значительно сэкономить стоимость сырья, а также сократить цикл обработки, который успешно применяется в промышленности [8–10]. Известно, что изменения микроструктуры оказывают существенное влияние на механические свойства сплавов [11–14].

В последние годы все большее значение приобретают исследования и разработки в области электродугового аддитивного производства высокоэффективных алюминиевых сплавов [15–17]. Исследования по технологии изготовления плавких предохранителей из алюминиевого сплава показали, что предел прочности при растяжении и предел текучести алюминиевого сплава 7075 составляют 230,7 МПа и 148,3 МПа [18–20].

В данном исследовании рассматривается сплав, полученный с использованием проволочно-дуговой аддитивной технологии.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

В представленной работе рассматривались образцы, полученные методом наплавки алюминиевой проволоки марки 7075 на алюминиевую подложку.

Экспериментальное наплавление алюминиевой проволоки аддитивным способом производилось на лабораторном станке «Jasic». Для наплавки алюминия вместо углекислоты для газовой защиты был использован инертный газ, такой как аргон (Ar), и для уменьшения коэффициента трения был использован тефлоновый канал для подачи проволоки. Использование капельного переноса без короткого замыкания было обеспечено параметрами тока струйного переноса 130–140 А при диаметре проволоки 1,2 мм. Используемые режимы наплавки составили: скорость подачи проволоки 6,1 м/мин, напряжение 15,6 В, расход газа Ar 12 л/мин. Внешний вид материала, полученного аддитивным способом, представлен на рисунке 1. После

наплавки из полученного слитка алюминиевого сплава 7075 производилась подготовка образцов для дальнейших исследований.



Рисунок 1 – Внешний вид алюминиевого сплава 7075

Figure 1 – Appearance of aluminum alloy Al7075

Образцы, полученные из алюминиевого сплава 7075, вырезались на электроэрозионном проволочно-вырезном станке струйного типа ДК7732 М11. После пробоподготовки образцов на шлифовально-полировальном станке FORCIPOL они химически травились раствором, составленным из HCl (50 %), HF (42 %), H<sub>2</sub>O (8 %), для создания оптического контраста и структуры материала с целью исследования влияния режимов наплавки.

Для определения параметров кристаллической структуры применялся рентгенофазовый анализ (РФА) на установке Shimadzu XRD-6000.

Накопление карт, спектров профилей ЭДС осуществлялось на сканирующем электронном микроскопе KYKY-EM6900 с термоэмиссионным вольфрамовым катодом, при заданных параметрах ускоряющего напряжения 20 кВ, тока эмиссии 150 мкА и точки насыщения тока накала, составляющего 2,4 А.

Для испытаний на микротвердость использовались три образца, полученных с верхней (А), средней (В) и нижней (С) зоны композитного материала, в форме прямоугольных параллелепипедов, высотой 10 мм, длиной и шириной, равной 15 мм. Процесс микроиндентирования проводился с использованием микротвердомера HVS-1000 по Виккерсу. Во время испытаний применялась нагрузка 300 г и время выдержки 10 с. Значение микротвердости с каждой позиции представляло собой среднее значение трех отпечатков. Полученные результаты обрабатывались с использованием стандартного пакета прикладных программ Microsoft Excel.

Усталостные испытания проводили на установке, разработанной в СибГИУ, по схеме циклического асимметричного консольного изгиба. Определялось число циклов образцов до разрушения, полученных с использованием аддитивной и традиционной технологии. Образцы для усталостных испытаний имели

форму параллелепипеда с параметрами 4x12x130 мм<sup>3</sup>. Имитация трещины осуществлялась двумя надрезами в виде полуокружности радиусами 22 мм.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для анализа химического состава полученного алюминиевого сплава 7075 использовался детектор ЭДС (энергодисперсионный спектрометр) Xplore, в таблице 1 представлены результаты.

Таблица 1 – Химический состав алюминиевого сплава 7075 (вес. %)

Table 1 - Chemical Composition of aluminum alloy 7075 (wt.%)

Состояние сплава	Содержание элемента, %								
	Al	Si	Fe	Mn	Cu	Mg	Cr	Zn	Ti
Основа	Основа	0,4	0,1	0,3	1,6	2,51	0,18	6,02	0,02
Основа	Основа	0,2	0,27	0,47	2,8	2,15	0,18	6,84	0,01

Рентгенофазовый анализ позволил оценить фазовый состав модифицированного слоя. Фазовый состав показывает качественные и количественные характеристики фаз слоя, такие как содержание фаз, дисперсность структуру и химический состав. На рисунке 2 рентгенофазовый анализ показал, что основные пики, обнаруженные с помощью рентгеновской дифракции, представляют собой алюминиевую фазу. Основные пики с сильной интенсивностью были обнаружены в диапазоне  $2\theta = 48,91^\circ$ ,  $57,11^\circ$  и  $85,08^\circ$  соответственно. Кроме того, отдельные слабые пики демонстрируют наличие других фаз с выводом  $\text{Cu}_2\text{Ti}_3\text{O}$ .

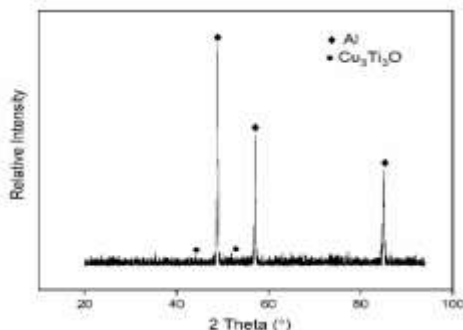


Рисунок 2 – Рентгенофазовый анализ сплава 6%Zn, 2,5%Mg, 1,6%

Figure 2 – X-ray phase analysis of alloy 6%Zn,2,5%Mg,1,6%

На рисунке 3 изображен график показаний микротвердости измеренной в верхней, средней, нижней (А,В, С) области сплава, полученного электродуговым аддитивным способом. Среднее значение в каждой области составляет  $99,05 \pm 4,31$  HV,  $89,00 \pm 3,39$  HV,  $86,75 \pm 1,06$  HV. Значение микротвердости линейно возрастает с каждым наплавленным слоем и имеет минимальное отклонение. Поэтому можно рассматривать данные значения микротвердости как однородные по всей наплавленной конструкции.

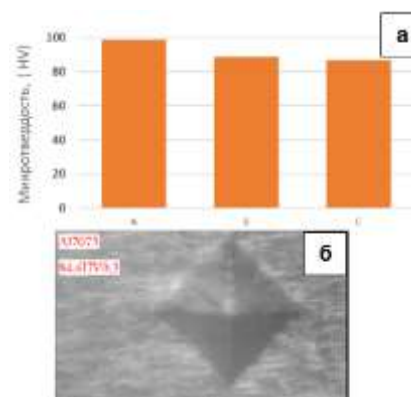


Рисунок 3 – Микротвердость для сплава 6%Zn, 2,5%Mg, 1,6%Cu

а – Средние значения микротвердости, в различных зонах сплава 6%Zn, 2,5%Mg, 1,6%Cu  
б – Фотография отпечатка индентора с параметрами нагрузки

Figure 3 – Microhardness for the alloy 6%Zn, 2.5%Mg,1.6%Cu

a - Average values of microhardness, in different zones of the alloy 6%Zn, 2.5% Mg, 1.6%Cu  
b - Photo of the indenter print with load parameters

На рисунке 4 показаны микрофотографии, выполненные на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) структуры алюминиевого сплава на различных расстояниях от края образца. Пористость исследуемого сплава в основном сосредоточена в области ближе к поверхности. При анализе снимков СЭМ были обнаружены поры округлой формы, представленные на рисунке 4 (а) и пустоты, которые можно наблюдать на рисунке 4 (б). Пористость алюминия в основном сосредоточена в области ближе к поверхности. Для исследования состава второй фазы была проведена рентгеновская энергодисперсионная спектрометрия в разных точках случайной области исследуемого сплава.



ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 7075, ПОЛУЧЕННОГО ПРОВОЛОЧНО-ДУГОВЫМ АДДИТИВНЫМ СПОСОБОМ

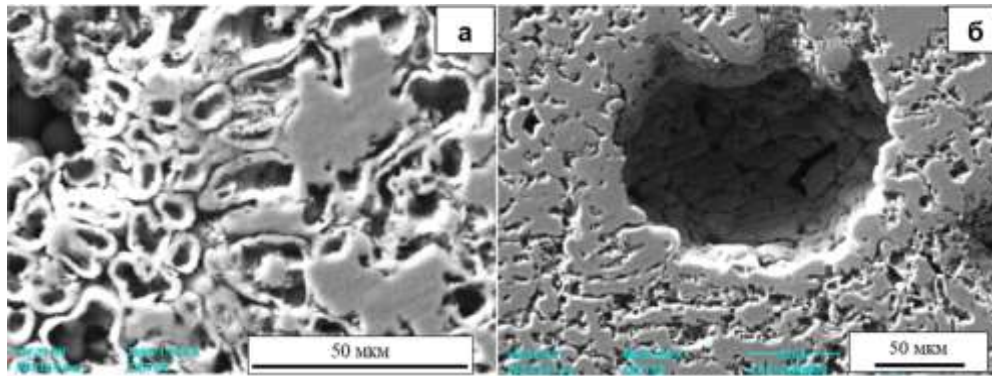


Рисунок 4 – Структура сплава 6%Zn, 2,5%Mg, 1,6%, полученные на сканирующем микроскопе: а – 1000 мкм; б – 500 мкм от края шлифа

Figure 4 – The structure of 6%Zn,2,5%Mg,1,6% obtained on a scanning microscope: a – 1000 μm; b – 500 μm from the edge of the section

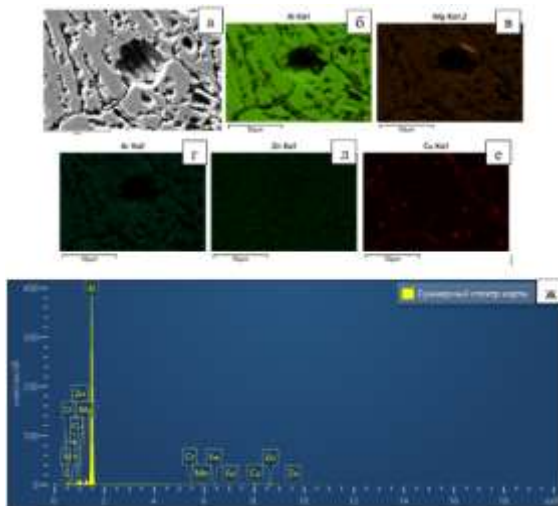


Рисунок 5 – СЭМ для сплава 6%Zn, 2,5%Mg, 1,6%Cu, ЭДС-анализ (карта распределения элементов) (а–е); ж – энергодисперсионная рентгеновская спектрограмма

Figure 5 – Micrograph of alloy 6%Zn, 2,5%Mg, 1,6%Cu (a), EDM analysis (element distribution map) (b–f); g - EDM spectrum in the deposited layer of 6%Zn, 2,5%Mg, 1,6%Cu

внутренние зерна и вторая фаза в основном состоят из Zn, Mg и Cu, а также некоторых микроэлементов.

Для исследования состава второй фазы была проведена рентгеновская энергодисперсионная спектрометрия в разных точках случайной области алюминиевого сплава 7075.

Микроструктура образца показывает наличие второй фазы на рисунке 5 (а). По данным ЭДС-анализа, элементы, образующие твердый раствор, распределены в объеме образца (рис. 5, б–е), соотношение элементов в материале сохраняется, результат ЭДС также показывает небольшое содержание кислорода, рисунок 5 (ж).

Результаты, полученные после усталостных испытаний, приведены в таблице 2. Из приведённых результатов установлено, что среднее значение циклов до разрушения образцов, полученных с использованием аддитивной технологии, составило  $234748 \pm 33801$  циклов, что выше на 80 % среднего значения циклов до разрушения образцов, из сплава, полученного без использования аддитивной технологии производства.

Как видно из рисунка 5, границы зерен,

Таблица 2 – Результаты по испытанию на усталость алюминиевого сплава 7075

Table 2 – Aluminum alloy 7075 fatigue test results

Образцы из алюминиевого сплава 7075, полученного традиционным способом				Образцы из алюминиевого сплава 7075, полученного проволочно-дуговым аддитивным методом			
Ср.знач. 100/сек.	Период колебаний/сек.	Частота нагружения, Гц	Ср. знач. количества циклов до разрушения	Ср.знач. 100/сек.	Период колебаний/сек.	Частота нагружения, Гц	Ср. знач. количества циклов до разрушения
31,393	0,314	3,185	$129944 \pm 16644$	23,794	0.238	4,203	$234748 \pm 33801$

Из данных, приведенных на гистограмме, представленной на рисунке 6 (б), можно сделать выводы о распределении зерен по размеру в среднем по полученному алюминиевому образцу. По результатам анализа структуры рисунка 6 (а) было установлено, что минимальный размер зерна составляет 5 мкм, а максимальный – 25 мкм.

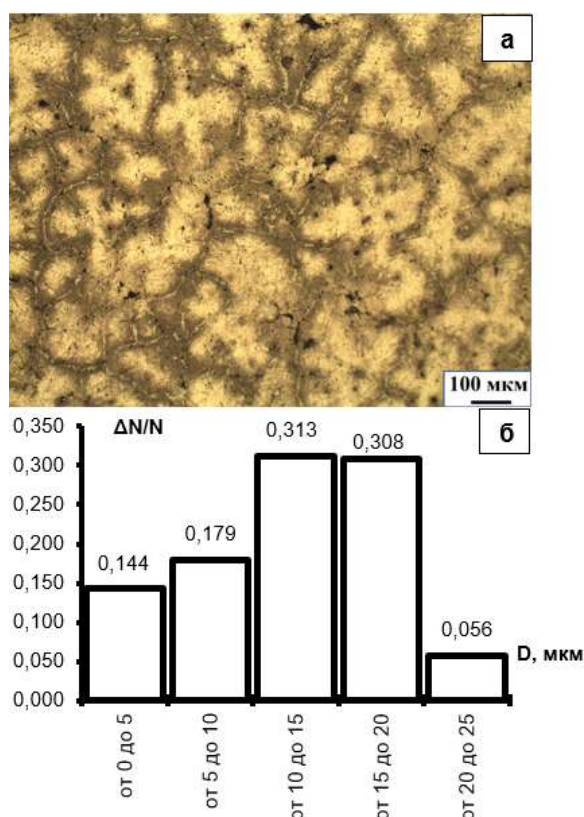


Рисунок 6 – Оптическое изображение структуры сплава 6%Zn, 2,5%Mg, 1,6%Cu и диаграммы распределения зерен:

а – оптическое изображение исходной структуры сплава 6%Zn, 2,5%Mg, 1,6%Cu

б – распределение зерен по размеру в среднем по образцу, где  $\Delta N$  – число зерен, имеющих размеры из указанного интервала;  $N$  – общее число зерен

Figure 6 – Optical image of the 6% Zn, 2.5% Mg, 1.6% Cu alloy structure and grain distribution diagrams: a - optical image of the initial structure of the alloy 6%Zn, 2.5% Mg, 1.6% Cu

b - distribution of grains by size on average over the sample, where  $\Delta N$  is the number of grains having sizes from the specified interval;  $N$  is the total number of grains

Структура излома после усталостных испытаний алюминиевого сплава 7075 представлена на рисунке 7. Очевидно, что усталостная долговечность алюминиевого сплава определяется в первую очередь структурой поверхностного слоя образца после наплавки алюминиевой проволоки. На рисунке 7 от-

чётливо видно, что в структуре алюминиевого сплава 7075 сформированы ямки, приводящие к последующему разрушению материала. Тем самым, исследуемый алюминиевый сплав после проведения испытаний на усталость показывает присутствие пор и ямок в микроструктуре, что может быть обусловлено выбором параметров для режима наплавки образца проволочно-дуговым аддитивным методом.

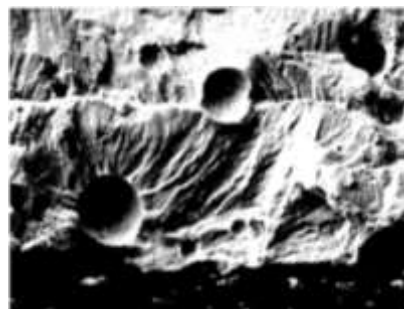


Рисунок 7 – Структура излома сплава 6%Zn, 2,5%Mg, 1,6%Cu

Figure 7 – Fracture structure of alloy 6%Zn, 2,5%Mg, 1,6%Cu

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование алюминиевого сплава проводилось методами современного материаловедения. В ходе исследования был выполнен рентгенофазовый анализ с целью выявления необходимости дальнейших проведенных термических обработок для стабилизации микроструктуры и выделения фаз сплава 6%Zn, 2,5%Mg, 1,6%Cu.

С использованием оптической микроскопии был рассчитан размер зёрен по поверхности образца. Преобладаемый размер зёрен находится в диапазоне от 10 до 20 мкм по образцу. Было установлено, что среднее значение микротвердости в каждой области исследуемого сплава составляет  $99,05 \pm 4,31$  HV,  $89,00 \pm 3,39$  HV,  $86,75 \pm 1,06$  HV. Среднее значение микротвердости по всему образцу составило  $92,72 \pm 6,43$  HV.

Морфология поверхности разрушения образцов, проведенная с помощью СЭМ, показало наличие ямок и некоторого количества углублений, расположенных рядом друг с другом.

Металлографические исследования выполнены в лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений ФГБОУ ВО СибГИУ. Исследование рентгенофазового анализа и измерение микротвердости было проведено с использованием оборудования центра коллективного пользования «Материаловедение» ФГБОУ ВО СибГИУ.

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 2 2023

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Su R.M., Qu Y.D., Li R.D., You J.-H. Influence of RRA Treatment on the Microstructure and Stress Corrosion Cracking Behavior of the Spray-Formed 7075 Alloy. *Mater Sci.* 2015. 51, 372–380. doi: 10.1007/s11003-015-9851-7.
2. Srinivasamurthy P.L., Sarada B.N., Karthik B.S., Holla S.S. Effect of retrogression and reaging heat treatment on microstructure and corrosion properties of Al-7075 [J]. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology.* 2013. 2. 6434–6441.
3. Andrzejewski D., Jakubowicz J., Borowski J. Structure and properties of 7075 aluminum alloy products obtained with the KOB0 method. *Archiv. Civ. Mech. Eng.* 2016. 16. 217–223. DOI: 10.1016/j.acme.2015.10.005.
4. Schmidt M., Merklein M., Bourell D., Dimitrov D., Hausotte T., Wegener K., Overmeyer L., Vollertsen F., Levy G.N. Laser based additive manufacturing in industry and academia // *CIRP Ann.* 2017. 66. 561–583.
5. Williams J.C., Starke A.J.E. Progress in structural materials for aerospace systems // *Acta Materialia*, 2003. 51(19). 5775–5799.
6. Tasdemir A., Nohut S. An overview of wire arc additive manufacturing (WAAM) in shipbuilding industry. *Ships Offshore Struct.* 2020. 16. 797–814.
7. Zhang X.S., Chen Y.J., Hu J.L. Recent advances in the development of aerospace materials. *Prog. Aerosp. Sci.* 2018. 97. 22–34.
8. Sokoluk M., Cao C., Pan S., Li X. Nanoparticle-enabled phase control for arc welding of unweldable aluminum alloy 7075 // *Nat. Commun.* 2019. 10. 98.
9. Tabernero I., Paskual A., Álvarez P., Suárez A. Study on arc welding processes for high deposition rate additive manufacturing // *Procedia Cirp.* 2018. 68. 358–362.
10. Williams S., Martina F., Addison A., Ding J., Pardal G., Colegrove P. Wire + arc additive manufacturing // *Mater. Sci. Technol.* 2016. 32. 641–647.
11. Huang L., Chen Xizhang, Konovalov S., Su Ch., Fan Pengfei, Wang Ya., Xiaoming P., Panchenko I. (2023). A Review of Challenges for Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM). *Transactions of the Indian Institute of Metals.* 10.1007/s12666-022-02823-y.
12. Geng Ya., Panchenko I., Chen X., Ivanov Yu., Konovalov S. (2022). Wire arc additive manufacturing Al-5.0 Mg alloy: Microstructures and phase composition. *Materials Characterization.* 187. 111875. 10.1016/j.matchar.2022.111875.
13. Su Ch., Xizang Ch., Gao Ch. (2019). Effect of heat input on microstructure and mechanical properties of Al-Mg alloys fabricated by WAAM. *Applied Surface Science.* 486. 10.1016/j.apsusc.2019.04.255.
14. Wang J., Shen Q., Kong X., Chen X. (2021). Arc Additively Manufactured 5356 Aluminum Alloy with Cable-Type Welding Wire: Microstructure and Mechanical Properties. *Journal of Materials Engineering and Performance.* 30. 10.1007/s11665-021-05905-y.
15. Morais P., Gomes B., Santos P., Gomes M.,

Gradinger R., Schnall M., Bozorgi S., Klein T., Fleischhacker D., Warczok P., Characterisation of a high-performance AlAl-Zn-Mg-Cu-Cr alloy designed for wire arc additive manufacturing // *Materials.* 2020. 13. 1610.

16. Klein T., Schnall M., Gomes B., Warczok P., Fleischhacker D., Morais P. Wire-arc additive manufacturing of a novel high-performance AlAl-Zn-Mg-Cu-Cr alloy: Processing, characterization and feaë101663.

17. Chang T., Liu B., Fang X., Huang K., Lu B. Development status and prospect of aluminum alloy additive manufacturing. *Aerosp // Mater. Technol.* 2022. 52. 76–84.

18. Ma G., Liu D., Shi J., Wang R., Niu F., Wu D. Microstructure and mechanical properties of 7075 aluminum alloy prepared by wire and arc additive manufacturing // *Aeronaut. Manuf. Technol.* 2022. 65. 14–19.

19. Oropeza D., Hofmann D.C., Williams K., Firdosy S., Bordeenithikasem P., Sokoluk M., Liese M., Liu J., Li X. Welding and additive manufacturing with nanoparticle-enhanced aluminum 7075 wire // *J. Alloy. Compd.* 2020. 834. 154987.

20. Oropeza D., Hofmann D.C., Williams K., Firdosy S., Bordeenithikasem P., Sokoluk M., Liese M., Liu J., Li X. Welding and additive manufacturing with nanoparticle-enhanced aluminum 7075 wire // *J. Alloy. Compd.* 2020. 834. 154987.

### Информация об авторах

*Д. Н. Лабунский – аспирант 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.*

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

*Д. А. Бессонов – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Управления научных исследований Сибирского государственного индустриального университета.*

### REFERENCES

1. Su, R.M., Qu, Y.D., Li, R.D., You, J.-H. (2015). Influence of RRA Treatment on the Microstructure and Stress Corrosion Cracking Behavior of the Spray-Formed 7075 Alloy. *Mater Sci* 51, 372-380 doi: 10.1007/s11003-015-9851-7.

2. Srinivasamurthy, P.L., Sarada, B.N., Karthik, B.S., Holla, S.S. (2013). Effect of retrogression and reaging heat treatment on microstructure and corrosion properties of Al-7075 [J]. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 2: 6434-6441.
3. Andrzejewski, D., Jakubowicz, J., Borowski, J. (2016). Structure and properties of 7075 aluminum alloy products obtained with the KOBO method. *Archiv. Civ. Mech. Eng* 16, 217-223 doi: 10.1016/j.acme.2015.10.005.
4. Schmidt, M., Merklein, M., Bourell, D., Dimitrov D., Hausotte, T., Wegener, K., Overmeyer, L., Vollertsen, F., Levy, G.N. (2017). Laser based additive manufacturing in industry and academia. *CIRP Ann* 66:561-583.
5. Williams, J.C., Starke, A.J.E. (2003). Progress in structural materials for aerospace systems. *Acta Materialia*, 51(19): 5775-5799.
6. Tasdemir, A., Nohut, S. (2020). An overview of wire arc additive manufacturing (WAAM) in shipbuilding industry. *Ships Offshore Struct.* 16, 797-814.
7. Zhang, X.S., Chen, Y.J., Hu, J.L. (2018). Recent advances in the development of aerospace materials. *Prog. Aeronaut. Sci.* 97, 22-34.
8. Sokoluk, M., Cao, C., Pan, S., Li, X. (2019). Nanoparticle-enabled phase control for arc welding of unweldable aluminum alloy 7075. *Nat. Commun.* 10, 98.
9. Taberero, I., Paskual, A., Álvarez, P., Suárez, A. (2018). Study on arc welding processes for high deposition rate additive manufacturing. *Procedia Cirp*. 68, 358-362.
10. Williams, S., Martina, F., Addison, A., Ding, J., Pardal, G., Colegrove, P. (2016). Wire + arc additive manufacturing. *Mater. Sci. Technol.* 32, 641-647.
11. Huang, L., Chen, Xizhang, Konovalov, S., Su, Ch., Fan, Pengfei, Wang, Ya., Xiaoming, P., Panchenko, I. (2023). A Review of Challenges for Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM). *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 10.1007/s12666-022-02823-y.
12. Geng, Ya., Panchenko, I., Chen, X., Ivanov, Yu., Konovalov, S. (2022). Wire arc additive manufacturing Al-5.0 Mg alloy: Microstructures and phase composition. *Materials Characterization*. 187, 111875. 10.1016/j.matchar.2022.111875.
13. Su, Ch., Ch, Xizhang, Gao, Ch. (2019). Effect of heat input on microstructure and mechanical properties of Al-Mg alloys fabricated by WAAM. *Applied Surface Science*. 486. 10.1016/j.apsusc.2019.04.255.
14. Wang, J., Shen, Q., Kong, X., Chen, X. (2021). Arc Additively Manufactured 5356 Aluminum Alloy with Cable-Type Welding Wire: Microstructure and Mechanical Properties. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 30. 10.1007/s11665-021-05905-y.
15. Morais, P., Gomes, B., Santos, P., Gomes, M., Gradinger, R., Schnall, M., Bozorgi, S., Klein, T., Fleischhacker, D., Warczok, P. (2020). Characterisation of a high-performance AlAl-Zn-Mg-Cu-Cr alloy designed for wire arc additive manufacturing. *Materials* 2020, 13, 1610.
16. Klein, T., Schnall, M., Gomes, B., Warczok, P., Fleischhacker, D., Morais, P. (2021). Wire-arc additive manufacturing of a novel high-performance AlAl-Zn-Mg-Cu-Cr alloy: Processing, characterization and feasibility demonstration. *Addit. Manuf.* 37, 101663.
17. Chang, T., Liu, B., Fang, X., Huang, K., Lu, B. (2022) Development status and prospect of aluminum alloy additive manufacturing. *Aerosp. Mater. Technol.* 52, 76-84.
18. Ma, G., Liu, D., Shi, J., Wang, R., Niu, F., Wu, D. (2022). Microstructure and mechanical properties of 7075 aluminum alloy prepared by wire and arc additive manufacturing. *Aeronaut. Manuf. Technol.* 65, 14-19.
19. Oropeza, D., Hofmann, D.C., Williams, K., Firdosy, S., Bordeenithikasem, P., Sokoluk, M., Liese, M., Liu, J., Li, X. (2020). Welding and additive manufacturing with nanoparticle-enhanced aluminum 7075 wire. *J. Alloy. Compd.* 834, 154987.
20. Oropeza, D., Hofmann, D.C., Williams, K., Firdosy, S., Bordeenithikasem, P., Sokoluk, M., Liese, M., Liu, J., Li, X. (2020). Welding and additive manufacturing with nanoparticle-enhanced aluminum 7075 wire. *J. Alloy. Compd.* 834, 154987.

#### **Information about the authors**

*D.N. Labunskiy - post-graduate student 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.*

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

*D.A. Bessonov - Candidate of Technical Sciences, senior researcher at the Siberian State Industrial University.*

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

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

*Статья поступила в редакцию 10.01.2023; одобрена после рецензирования 13.05.2023; принята к публикации 11.06.2023.*

*The article was received by the editorial board on 10 Jan 2022; approved after editing on 13 May 2023; accepted for publication on 11 June 2023.*