

Научная статья

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 538.911

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.01.006

## ПОСЛОЙНОЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ ИДЕНТИФИКАЦИОННОЕ СПЛАВА АА7075, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Ирина Алексеевна Панченко<sup>1</sup>, Владислав Константинович Дробышев<sup>2</sup>, Коновалов Сергей Валерьевич<sup>3</sup>, Мария Михайловна Баженова<sup>4</sup>, Лабунский Дмитрий Николаевич<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4,5</sup>Сибирский государственный индустриальный университет, ул. Кирова, 42, 654007, Новокузнецк, Россия

<sup>1</sup> panchenko.sibsiu@yandex.ru, 0000-0002-1631-9644

<sup>2</sup> drobyshev\_v.k@mail.ru, 0000-0002-1532-9226

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

<sup>4</sup> kotok04@bk.ru, 0000-0002-1751-7554

<sup>5</sup> info@kana-t.ru

**Аннотация.** Алюминиевые сплавы широко применяются в различных отраслях промышленности, включая авиацию, электронику, автомобильную и военную промышленность. Нанотвердость и модуль Юнга алюминиевых сплавов играют значимую роль в их исследовании и оптимизации, так как результаты измерения предоставляют более точную информацию о механических свойствах материалов на наноуровне, что особенно актуально при разработке новых деталей и улучшении характеристик имеющихся сплавов. Изучение нанотвердости алюминиевого сплава 7075 позволяет исследовать воздействие различных добавок и легирующих компонентов на их механические качества. Полученные данные используются для оптимизации режимов получения сплавов, методом аддитивного производства и формирования новых материалов с усовершенствованными свойствами.

Использование методов инструментального индентирования позволило установить присутствие в верхней области фаз, влияющих на нанотвердость детали. Образование вторичных фаз, имеющих плохую растворимость в металлической матрице, обусловлено более высоким градиентом температур, за счет межслоевого охлаждения. Вторичные фазы затрудняют движение границ зерен, что способствует увеличению нанотвердости и модуля упругости до  $2,3 \pm 3,27$  ГПа и  $100,1 \pm 0,6$  ГПа соответственно. Методами СЭМ установлено, что в слоях рядом с подложкой, где скорость охлаждения детали становится меньше с увеличением высоты наплавленного образца, средний размер зерна составляет от 10 до 15 мкм, а в областях с более высоким температурным градиентом за счет межслоевого охлаждения размер зерен уменьшается до 5-10 мкм.

**Ключевые слова:** нанотвердость, модуль Юнга, алюминиевый сплав, микроструктура, аддитивные технологии, межслоевое охлаждение

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

---

**Для цитирования:** Панченко И.А., Дробышев В.К., Баженова М.М. Послойное инструментальное индентирование сплава АА7075, полученного методом аддитивных технологий // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2025. Т. 22, № 1. С. 67–76. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.01.006.

---

Original article

**LAYER-BY-LAYER TOOL INDENTATION OF AA7075 ALLOY PRODUCED BY ADDITIVE TECHNOLOGY METHOD****Irina A. Panchenko<sup>1</sup>, Vladislav K. Drobyshev<sup>2</sup>, Sergey V. Konovalov<sup>3</sup>, Maria M. Bazhenova<sup>4</sup>, Dmitry N. Labunsky<sup>5</sup>**<sup>1,2,3,4,5</sup> Siberian State Industrial University, Kirova str., 42, 654006, Novokuznetsk, Russia<sup>1</sup> panchenko.sibsiu@yandex.ru 0000-0002-1631-9644<sup>2</sup> drobyshev\_v.k@mail.ru 0000-0002-1532-9226<sup>3</sup> konovalov@sibsiu.ru 0000-0003-4809-8660<sup>4</sup> kotok04@bk.ru 0000-0002-1751-7554<sup>5</sup> info@kana-t.ru

**Abstract.** Aluminum alloys are widely used in various industries, including aviation, electronics, automotive and military industries. Nanohardness and Young's modulus of aluminum alloys play a significant role in their study and optimization, since the measurement results provide more accurate information on the mechanical properties of materials at the nanolevel, which is especially important when developing new parts and improving the characteristics of existing alloys. Studying the nanohardness of aluminum alloy 7075 allows us to study the effect of various additives and alloying components on their mechanical properties. The data obtained are used to optimize the modes of obtaining alloys, by additive manufacturing and the formation of new materials with improved properties.

The use of instrumental indentation methods made it possible to establish the presence of phases in the upper region that affect the nanohardness of the part. The formation of secondary phases with poor solubility in the metal matrix is due to a higher temperature gradient due to interlayer cooling. Secondary phases hinder the movement of grain boundaries, which contributes to an increase in nanohardness and elastic modulus to  $2.3\pm 3.27$  GPa and  $100.1\pm 0.6$  GPa, respectively. SEM methods have shown that in layers near the substrate, where the cooling rate of the part becomes lower with increasing height of the deposited sample, the average grain size is from 10 to 15  $\mu\text{m}$ , and in areas with a higher temperature gradient, due to interlayer cooling, the grain size decreases to 5-10  $\mu\text{m}$ .

**Keywords:** nanohardness, Young's modulus, aluminum alloy, microstructure, additive technologies, interlayer cooling

**Acknowledgments.** The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-79-10245, <https://rscf.ru/project/22-79-10245/>.

**For citation:** Panchenko I.A., Drobyshev V.K., Bazhenova M.M. (2025). Layered instrumental indentation of alloy AA7075 obtained by the method of additive technologies. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 22(1), 67-76 (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.01.006.

**Введение**

Алюминиевые сплавы представляют собой сплав алюминия с другими элементами, такими как медь, магний, кремний, цинк и марганец [1]. Добавление различных элементов приводит к изменению свойств получаемого сплава. Медь увеличивает прочность и коррозионную стойкость, магний улучшает пластичность и обрабатываемость, кремний повышает литейные свойства, цинк повышает коррозионную стойкость в морской атмосфере, а марганец улучшает свариваемость [2-4].

В работах Головина Ю. И. и его коллег были проведены исследования нанотвердости различных материалов, в том числе алюминии-

вых сплавов. Было выявлено значительное отличие нанотвердости от микротвердости, что свидетельствует о важности проведения исследований на наноуровне для получения более точной информации о свойствах материалов [5]. Алюминиевые сплавы представляют собой важный и перспективный класс материалов, широко используемых в различных отраслях промышленности, их развитие продолжает активно поддерживаться современными исследованиями [6-8].

В настоящее время, наноразмерные исследования становятся все более актуальными, так измерения нанотвердости и модуля Юнга позволяют получить представление о жесткости и стойкости материала к деформации, что

крайне важно для применений в легких конструкциях [9,10]. Нанотвердость материалов является одним из основных параметров, определяющих их свойства и поведение в различных условиях эксплуатации. В частности, изучение нанотвердости сплавов приобретает особую значимость, так как позволяет выявить степень влияния различных добавок и легирующих элементов на механические свойства материалов.

За последнее десятилетие увеличилось использование алюминиевых сплавов [11] и армированных алюминиево-матричных материалов [12]. Они используются в различных отраслях, таких как аэрокосмическая [13, 14], электроника [15], автомобилестроение [16], военная промышленность [17] и многие другие. Сплав Al7075 содержит алюминия (70%), меди (2,5%), магния (1%) и марганца (0,6%), что обеспечивает ему высокую прочность, жесткость и коррозионную стойкость. Однако он имеет недостаток — относительно низкую нанотвердость. Существуют различные методы получения алюминиевых сплавов, включая литье, ковку, штамповку и аддитивные технологии.

Аддитивные технологии, или технологии послойного наращивания, охватывают различные методы, включая селективное лазерное плавление (SLM), прямое лазерное спекание металла (DMLS) и электроника-лучевое плавление (EBM), среди прочих. Эти процессы позволяют производить сложные геометрические формы, которые сложно или невозможно со-

здать с помощью традиционных методов обработки металлов.

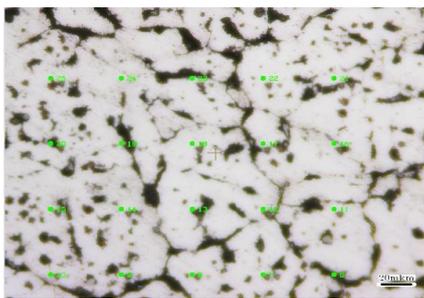
В настоящей работе проведено послойное исследование нанотвердости, модуля Юнга и размера зерен в структурных зонах алюминиевого сплава AA7075, полученного методом проволочно-дугового аддитивного производства (WAAM), наибольшее внимание уделено анализу центральной, периферийной и приграничной к подложке областям.

## Материалы и методы исследования

Образцы из сплава AA7075 (табл. 1) получены на 3D принтере Anycubic Chiron, работающем по технологии моделирования методом послойного наплавления (FDM), в качестве источника питания для наплавки использовался сварочный аппарат Сварог MIG TECH 250, со следующими параметрами: расход аргона  $\approx 10$  л/мин, сила тока 70-80 А, напряжение 13,8 В, скорость подачи проволоки 4,5 м/мин, скорость наплавки 100 мм/мин. Для проведения дальнейших исследований, образцы из полученного слитка были вырезаны на электроэрозионном станке струйного типа ДК7732 М11. Для измерения значений нанотвердости и модуля упругости в областях рядом с подложкой, средней и периферийной использовался метод инструментального-indentирования на приборе «Наноскан-4D», нагрузка на индентор составила 25 мН, расстояние между отпечатками 40 мкм (рис. 1).

**Табл. 1.** Химический состав алюминиевой проволоки и наплавленного образца, вес. %  
**Table 1.** Chemical composition of aluminum wire and deposited sample, weight. %

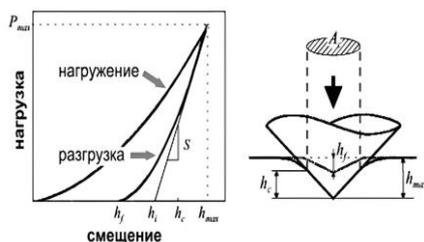
Материал исследования	Al	Si	Fe	Mn	Cu	Mg	Cr	Zn	Ti
Проволока AA7075	88,87	0,4	0,1	0,3	1,6	2,51	0,18	6,02	0,02
Наплавленный слой	91,3	-	0,1	0,6	0,8	2,8	0,2	4,1	0,1



**Рис.1.** Характерный участок отпечатков на образце AA7075 с сеткой 5x5

**Fig. 1.** Characteristic area of prints on sample AA7075 with 5x5 grid

Общий вид кривой нагружения в виде графика, состоящего из двух частей, соответствующих процессу нагружения и разгрузки зависимости нагрузки ( $P$ ) от глубины вдавливания ( $h$ ), представлен на рисунке 2.



**Рис.2.** Общий вид кривой нагружения, и схема контакта с обозначениями величин, используемых в методике расчета модуля упругости и твердости [18].

**Fig. 2.** General view of the loading curve and contact diagram with designations of quantities used in the methodology for calculating the elastic modulus and hardness.[18].

## Результаты и обсуждение

Исследование изменения нанотвердости и модуля Юнга в наплавленной заготовке из алюминиевого сплава AA7075 выявило зависимость механических свойств от локализации в следующих областях исследования: приграничной к подложке, центральной и периферийной (рис. 3). Максимальные значения нанотвердости ( $2,3 \pm 0,3$  ГПа) и модуля Юнга ( $100 \pm 6,5$  ГПа), получены в слое на границе центральной и периферийной области. Минимальные показатели нанотвердости ( $1,9 \pm 0,15$ ) ГПа и модуля Юнга ГПа ( $96,3 \pm 4,6$ ) ГПа наблюдались в приграничной к подложке области.

В работе [19] было отмечено, что снижение скорости охлаждения материала в ходе аддитивного производства оказывает влияние на механические свойства и структуру материала.

В приграничной к подложке области наблюдается снижение эффективности скорости охлаждения наплавленной заготовки, что приводит к уменьшению температурного градиента в процессе послойного формирования изделия. Полученные данные позволяют заключить, что сниженная скорость охлаждения в приподложечной области способствовала формированию смешанной морфологии микроструктуры, сочетающей столбчатые и равноосные кристаллиты (рис. 4).

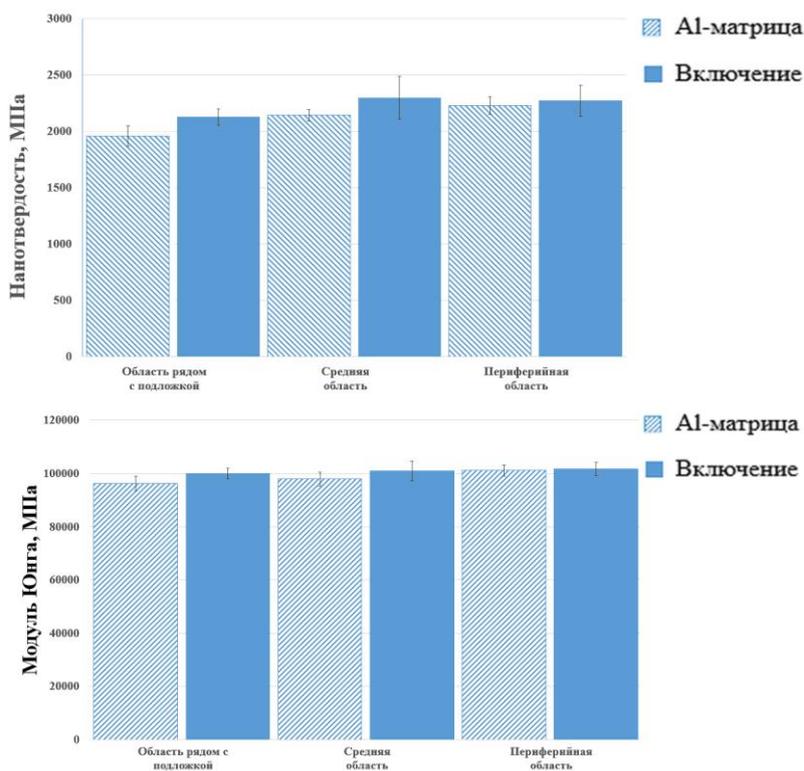


Рис.3. Нанотвердость и модуль Юнга AA7075 приграничной к подложке, центральной и периферийной области

Fig. 3. Nanohardness and Young's modulus of AA7075 near the substrate, central and peripheral regions

По мере послойного изготовления слитка от подложки к поверхности "снизу-вверх" при визуальном измерительном контроле следы затвердевших трещин не наблюдались (рис. 5). Методом оптической и электронной микроскопии отмечено изменение размера пор от 300 до 20 мкм (рис. 5 а,с). Снижение пористости материала связано с оптимальным режимом наплавки, обеспечивающим низкое разбрызгивание присадочного материала (проволоки) и минимизацию активных газов влияющих на термическое разложение присадочных материалов.

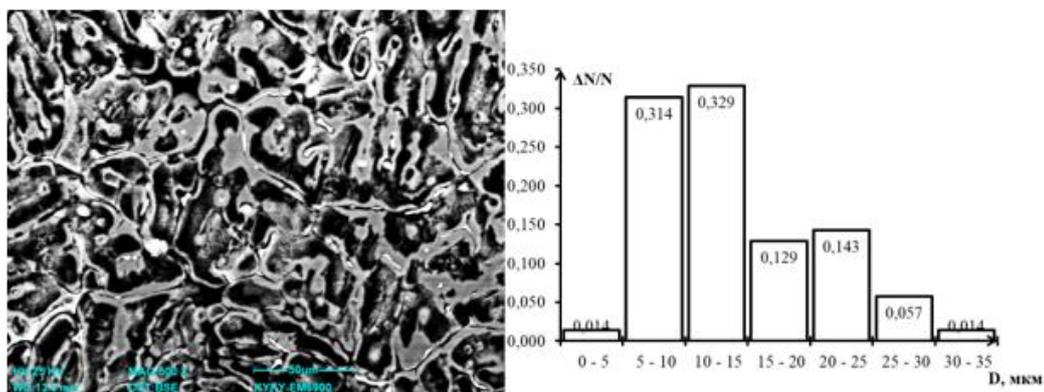
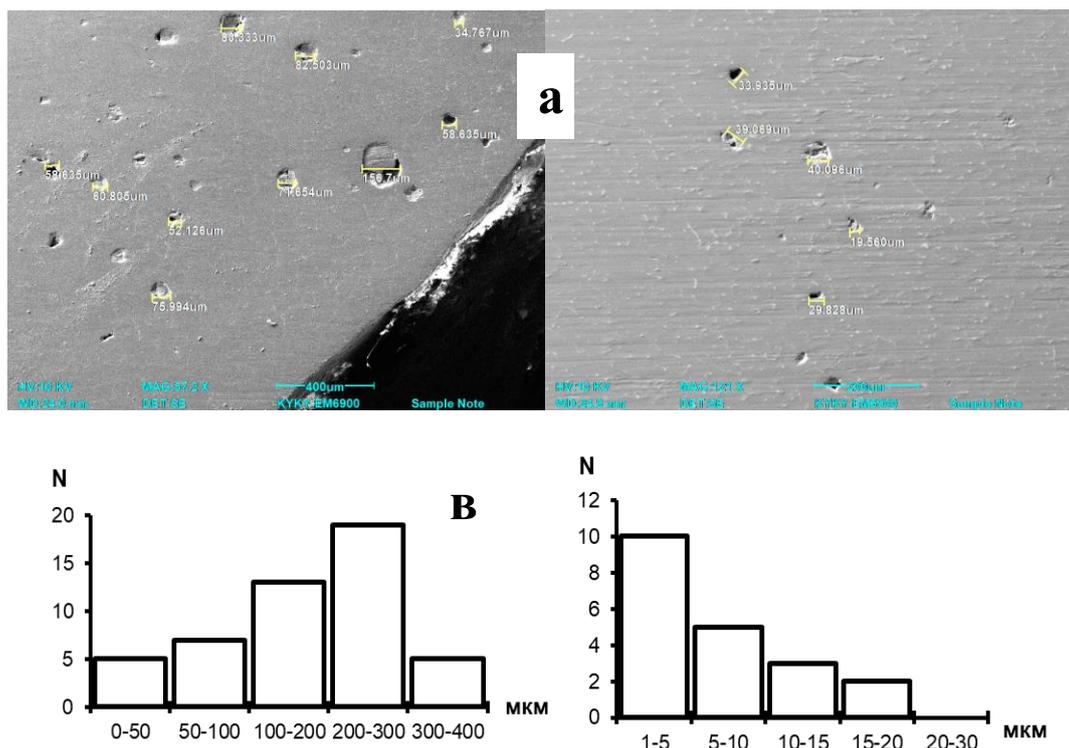


Рис.4. СЭМ изображение и график изменения размера зерен AA7075 в области на границе с подложкой

Fig. 4. SEM image and graph of grain size change of AA7075 in the region near the substrate



**Рис.5.** Электронно-микроскопическое изображение пор в различных областях сплава AA7075 и диаграммы изменения пористости а) СЭМ изображение размера пор в приграничной к подложке области б) СЭМ изображения размера пор в периферийной области в) диаграмма распределения пористости в приграничной области г) диаграмма распределения пористости периферийной области

**Fig. 5.** Electron microscopic image of pores in different areas of the AA7075 alloy and diagrams of porosity changes а) SEM image of pore size in the area adjacent to the substrate б) SEM image of pore size in the peripheral area в) diagram of porosity distribution in the border area д) diagram of porosity distribution in the peripheral area

В периферийной области, характеризующейся повышенным температурным градиентом вследствие межслойного охлаждения, наблюдается образование вторичных фаз с не полной растворимостью в металлической матрице. Вторичные фазы затрудняют движение границ зерен и положительно сказываются на значениях твердости и модуле упругости полученного сплава. В слоях рядом с подложкой, где скорость охлаждения слитка из сплава

AA7075 становится меньше, средний размер зерна составляет от 10 до 15 мкм, в областях с более высоким температурным градиентом за счет межслойного охлаждения размер зерен уменьшается до 5 мкм, что подтверждает прямую связь между термомеханическими параметрами проволоочно-дуговой аддитивной наплавки (WAAM) и изменением механических свойств материала.

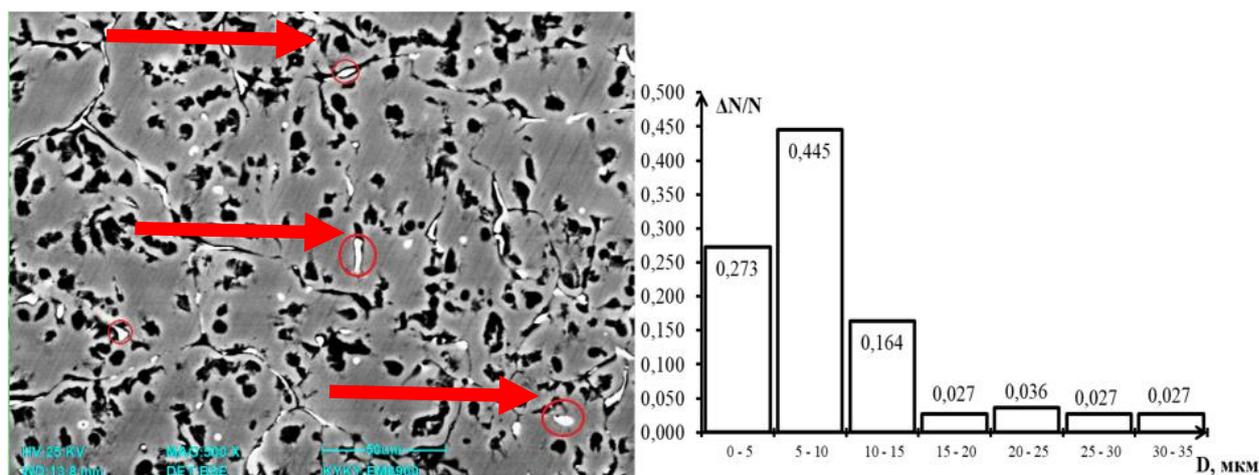


Рис. 6. СЭМ изображение и диаграмма размера зерен сплава AA7075 в периферийной области

Fig. 6. SEM image and grain size diagram of AA7075 alloy in the peripheral region

Анализ данных выявил повышенную концентрацию вторичных фаз, представленных на (рис. 6) и отмеченных стрелкой. В работах [20, 21] данные фазы идентифицируют, как интерметаллидные  $MgZn_2$ ,  $Al_2CuMg$  (S - фаза) и  $Al_2Zn_3Mg_3$  (T-фаза), которые способствуют увеличению механических и коррозионных свойств алюминиевого сплава AA7075. Для количественной оценки неоднородности распределения нанотвердости на поверхности образца проведено многократ-

ное инструментальное-indentирование с регистрацией глубины внедрения индентора по длине и ширине. Построен график распределения нанотвердости в центральной (средней), периферийной и приграничной к подложке области (рис. 7). Увеличение нанотвердости материала до 2,3 - 2,7 ГПа связано, с наличием в периферийной области интерметаллида  $Al_2CuMg$  (S - фаза), повышающего прочность сплава AA7075.

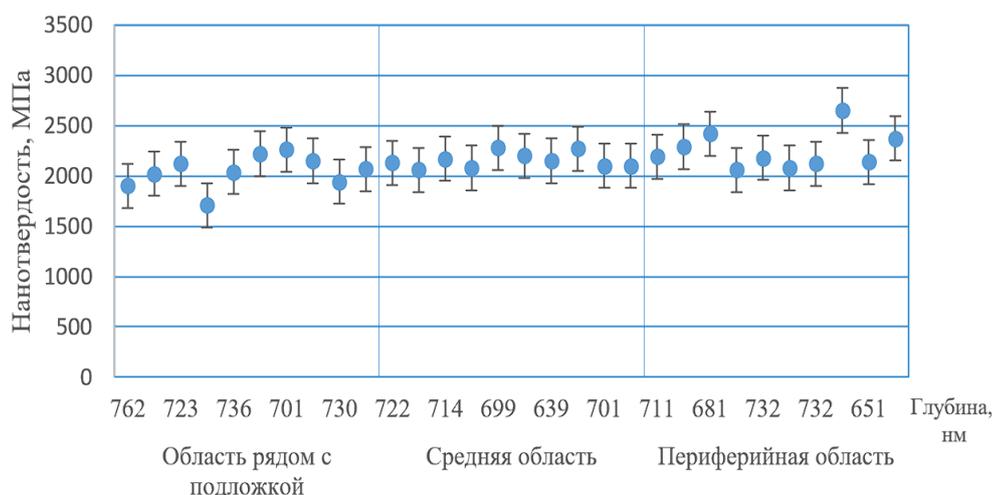


Рис. 7. График изменения нанотвердости от глубины погружения индентора при нагрузке 25 мН.

Fig. 7. Graph of change in nanohardness from the depth of indenter immersion under a load of 25 mN.

### Закключение.

Проведён анализ изменения нанотвердости, модуля Юнга и микроструктуры алюми-

евого сплава AA7075, изготовленного проволоочно-дуговым аддитивным производством с использованием оптимальных технологических параметров. Выбранный режим наплавки обеспечил формирование материала с низкой пористостью (менее 20 мкм в периферийных слоях) и полным отсутствием трещин. Установлено, что повышенный температурный градиент в периферийной области, вызванный межслоевым охлаждением, инициирует выделение вторичных интерметаллидных фаз  $MgZn_2$ ,  $Al_2CuMg$  (S - фаза),  $Al_2Zn_3Mg_3$  (T-фаза) с неполной растворимостью в алюминиевой матрице и размером зерна до 5 мкм. Данные фазы, увеличивают механические свойства материала, а именно повышают нанотвердость до  $2,7 \pm 0,3$  ГПа и модуль упругости до  $100,1 \pm 0,6$  ГПа, что подтверждает их роль в упрочнении сплава AA7075. Приграничные к подложке слои демонстрируют минимальные значения нанотвердости ( $2,1 \pm 0,2$  ГПа), что обусловлено низкой скоростью охлаждения слитка в ходе проволоочно-дуговой аддитивной наплавки (WAAM), способствующей формированию крупнозернистой структуры размером до 20 мкм. Указанная зависимость между температурой охлаждения, морфологией зерен и механическими свойствами подтверждает необходимость управления параметрами WAAM для получения оптимальных свойств материала.

#### Список литературы:

1. Klimova A. et al. The effect of magnesium on the microstructure and mechanical properties of Al–Mg–Si–Cu alloys // *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 48, pp. 3199–3205.
2. Sahoo S. et al. Effect of Si on microstructure and properties of Al-based alloys: a review // *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 2009, vol.64, no.2, pp.35–76.
3. Bhardwaj R. et al. Corrosion resistance of Al-Zn-Mg-Cu alloys in seawater: a review // *Journal of Marine Science and Application*, 2017, vol.16, no.3, pp.271–282.
4. Rajendran R. et al. Recent advances in aluminum alloys for automotive applications // *JOM*, 2015, vol.67, no.6, pp.1234–1245.
5. Горицкий В.М., Головин Ю.И. Нанотвердость и ее влияние на механические свойства материалов // *Перспективные материалы и технологии*. 2015. № 4. С. 5–14.
6. Panchenko I. A. Study of influence of additive wire-arc manufacturing modes on microstructure of AA7075 alloy / I. A. Panchenko, D. A. Bessonov, S. V. Konovalov, D. N. Labunsky. – *Non-Ferrous Metals*. – 2024. – № 2. – P. 84–89. – DOI 10.17580/nfm.2024.02.13
7. Дробышев, В. К. Механические свойства и микроструктура сплавов системы CoCrFeMnNi / В. К. Дробышев, И. А. Панченко, С. В. Коновалов // *Ползуновский вестник*. – 2024. – № 2. – С. 249–254.
8. Д. Н. Лабунский, И. А. Панченко, С. В. Коновалов [и др.] Исследование структуры и свойств алюминиевого сплава 7075, полученного проволоочно-дуговым аддитивным способом // *Ползуновский вестник*. 2023. № 2. С. 147–154.
9. Yu, Z., Tan, Z., Fan, G., Lin, R., Xiong, D.-B., Guo, Q., Su, Y., Li, Z., & Zhang, D. (2018). Young's Modulus Enhancement and Measurement in CNT/Al Nanocomposites. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 31(11), 1121–1129. <https://doi.org/10.1007/S40195-018-0730-8>
10. Cooke, K. O., & Chudasama, P. (2022). Aluminium surface impregnated with nano constituents for enhanced mechanical performance. *Results in Physics*, 40, 105826. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2022.105826>
11. Khomutov M.G., Pozdniakov A.V., Churyumov A.Y., Barkov R.Y., Solonin A.N., Glavatskikh M.V. Flow stress modelling and 3D processing maps of Al4.5Zn4.5Mg1Cu0.12Zr alloy with different scandium contents. // *Applied Sciences*. 2021. 11. P. 4587
12. Zulfia A., Raga K., Narottama W., Yunus S. Al6061 reinforced Al2O3 metal matrix composite produced by double blade stir casting // *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*. 2019. 9. P. 1544–1549.
13. 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.
14. 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. // *Materials Science and Engineering A*. 2020. 793 P. 139746.

15. Lotfy A., Pozdniakov A.V., Zolotorevskiy V.S., Mohamed E., el-Khair M.T.A., Daoud A., Fairouz F. Microstructure, compression and creep properties of Al-5%Cu-0.8Mn/5%B4C composites. // Mater Res Express 2019. P. 6.
16. Chawla N., Chawla K.K. Metal matrix composites // Springer New York, New York, NY. 2022. P. 409.
17. Ding W., Cheng Y., Chen T., Zhao X., Liu X. Research status and application prospect of aluminum matrix composites // Res Appl Mater Sci. 2020. 2.
18. Головин, Ю. И. Наноидентифицирование и его возможности. Учебное пособие / Ю. И. Головин. – Москва: Машиностроение, 2009. – 312 с. – ISBN 978-5-94275-476-1. – EDN RAYDMX.
19. Panchenko, I., Gudala, S., Labunskii, D. et al. Micro-structural 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>.
20. Mahant, D., & Rao, V. (2023). Intermediate phase analysis of cast Al7075 after the addition of high-temperature oxides. Materials Today: Proceedings. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.330>
21. Vlach, M., Kodetová, V., Cizek, J., Leibner, M., Kekule, T., Lukáč, F., Cieslar, M., Bajtošová, L., Kudrnová, H., Šíma, V., Zikmund, S., Černošková, E., Kutálek, P., Neubert, V., & Neubert, V. (2020). Role of Small Addition of Sc and Zr in Clustering and Precipitation Phenomena Induced in AA7075. 11(1), 8. <https://doi.org/10.3390/MET11010008>

#### Информация об авторах

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

*В.К. Дробышев – научный сотрудник лаборатории 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*

*М.М. Баженова – обучающийся 2 курса бакалавриата по направлению Физика Сибирского государственного индустриального университета;*

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

#### References

1. Klimova A. et al. The effect of magnesium on the microstructure and mechanical properties of Al–Mg–Si–Cu alloys // Materials Today: Proceedings, 2021, vol. 48, pp. 3199-3205.
2. Sahoo S. et al. Effect of Si on microstructure and properties of Al-based alloys: a review // Materials Science and Engineering: R: Reports, 2009, vol.64, no.2, pp.35-76.
3. Bhardwaj R. et al. Corrosion resistance of Al-Zn-Mg-Cu alloys in seawater: a review // Journal of Marine Science and Application, 2017, vol.16, no.3, pp.271-282.
4. Rajendran R. et al. Recent advances in aluminum alloys for automotive applications // JOM, 2015, vol.67, no.6, pp.1234-1245.
5. Goritsky V.M., Golovin Yu.I. Nanohardness and its influence on the mechanical properties of materials // Advanced Materials and Technologies. 2015. No. 4. P. 5-14.
6. Panchenko I. A. Study of influence of additive wire-arc manufacturing modes on microstructure of AA7075 alloy / I. A. Panchenko, D. A. Bessonov, S. V. Konovalov, D. N. Labunsky. – Non-Ferrous Metals. – 2024. – № 2. – P. 84–89. – DOI 10.17580/nfm.2024.02.13
7. Drobyshev, V. K. Mechanical properties and microstructure of alloys of the CoCrFeMnNi system / V. K. Drobyshev, I. A. Panchenko, S. V. Konovalov // Polzunovsky Vestnik. - 2024. - No. 2. - P. 249-254.
8. D. N. Labunsky, I. A. Panchenko, S. V. Konovalov [et al.] Study of the structure and properties of aluminum alloy 7075 obtained by wire-arc additive method // Polzunovsky Vestnik. 2023. No. 2. P. 147-154.
9. Yu, Z., Tan, Z., Fan, G., Lin, R., Xiong, D.-B., Guo, Q., Su, Y., Li, Z., & Zhang, D. (2018). Young's Modulus Enhancement and Measurement in CNT/Al Nanocomposites. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 31(11), 1121–1129. <https://doi.org/10.1007/S40195-018-0730-8>
10. Cooke, K. O., & Chudasama, P. (2022). Aluminium surface impregnated with nano

- constituents for enhanced mechanical performance. *Results in Physics*, 40, 105826. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2022.105826>
11. Khomutov M.G., Pozdniakov A.V., Churyumov A.Y., Barkov R.Y., Solonin A.N., Glavatskikh M.V. Flow stress modelling and 3D processing maps of Al<sub>4.5</sub>Zn<sub>4.5</sub>Mg<sub>1</sub>Cu<sub>0.12</sub>Zr alloy with different scandium contents. // *Applied Sciences*. 2021. 11. P. 4587
  12. Zulfia A., Raga K., Narottama W., Yunus S. Al<sub>6061</sub> reinforced Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> metal matrix composite produced by double blade stir casting // *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*. 2019. 9. P. 1544-1549.
  13. 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.
  14. Alekseev A.V., Yesikov M.A., Strelakov 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. // *Materials Science and Engineering A*. 2020. 793 P. 139746.
  15. Lotfy A., Pozdniakov A.V., Zolotarevskiy V.S., Mohamed E., el-Khair M.T.A., Daoud A., Fairouz F. Microstructure, compression and creep properties of Al-5%Cu-0.8Mn/5%B<sub>4</sub>C composites. // *Mater Res Express* 2019. P. 6.
  16. Chawla N., Chawla K.K. *Metal matrix composites* // Springer New York, New York, NY. 2022. P. 409.
  17. Ding W., Cheng Y., Chen T., Zhao X., Liu X. Research status and application prospect of aluminum matrix composites // *Res Appl Mater Sci*. 2020. 2.
  18. Golovin, Yu. I. Nanoindentation and its Possibilities. *Study Guide / Yu. I. Golovin.* – Moscow: Mashinostroenie, 2009. – 312 p. – ISBN 978-5-94275-476-1. – EDN RAYDMX.
  19. Panchenko, I., Gudala, S., Labunskii, D. et al. Micro-structural 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>.
  20. Mahant, D., & Rao, V. (2023). Intermediate phase analysis of cast Al7075 after the addition of high-temperature oxides. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.330>
  21. Vlach, M., Kodetová, V., Cizek, J., Leibner, M., Kekule, T., Lukáč, F., Cieslar, M., Bajtošová, L., Kudrnová, H., Šíma, V., Zikmund, S., Černošková, E., Kutálek, P., Neubert, V., & Neubert, V. (2020). Role of Small Addition of Sc and Zr in Clustering and Precipitation Phenomena Induced in AA7075. 11(1), 8. <https://doi.org/10.3390/MET11010008>

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

*I.A. Panchenko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing, Siberian State Industrial University*

*V.K. Drobyshev – Researcher, Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing, Siberian State Industrial University;*

*S.V. Kononov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector for Research and Innovation, Siberian State Industrial University*

*M.M. Bazhenova – 3rd year Bachelor's student in Physics, Siberian State Industrial University;*

*D.N. Labunsky – Candidate of Science degree candidate, Siberian State Industrial University*

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 13.10.2024; одобрена после рецензирования 17.01.2025; принята к публикации 03.02.2025.

The article was received by the editorial board on 13 Oct. 2024; approved after reviewing 17 Jan. 2025; accepted for publication 03 Feb. 2025.