



Научная статья
2.6.17 – Материаловедение (технические науки)
УДК 621.785.532
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.03.041

EDN: YTOCPS

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 7075 ПОСЛЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО АЗОТИРОВАНИЯ

Ирина Алексеевна Панченко¹, Владислав Константинович Дробышев²,
Сергей Валерьевич Коновалов³, Дмитрий Николаевич Лабунский⁴,
Алмаз Юниорович Назаров⁵,

^{1, 2, 3, 4} Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия

⁵ Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

¹ i.r.i.ss@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4863-0000>

² drobyshev_v.k@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1532-9226>

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

⁴ info@kana-t.ru

⁵ nazarov.ayu@ugatu.su, <https://orcid.org/0000-0002-4711-4721>

Аннотация. Исследовано изменение микроструктуры и фазового состояния алюминиевого сплава марки 7075 до и после азотирования. Сплав был изготовлен проволочно-дуговым аддитивным способом, в области подложки которого преобладали столбчатые зерна, в центральной части присутствовали столбчатые и дендритные структуры, периферийная зона изготовленного слитка демонстрировала равноосные структуры с размером зерна до 50 мкм. Рассматриваемая структурная неоднородность обусловлена скоростью охлаждения заготовки, термическим градиентом в процессе послойного изготовления материала. На основе микрорентгеноспектрального анализа были обнаружены η -фаза ($MgZn_2$) и S-фаза (Al_2CuMg), сконцентрированные у границ зерен. Сплав представлен обособленными металлическими включениями Al_2Cu (θ -фаза), образующихся из-за медленного охлаждения или переогрева металла.

После проведения азотирования в дуговом разряде с использованием плазменного источника (накаленный катод) в исследуемом сплаве наблюдалось формирование поликристаллической структуры, характеризующейся разнородными размерами ячеек в диапазоне 60–200 мкм. В сплаве после низкотемпературного азотирования присутствовали единичные интерметаллические соединения $MgZn_2$ (η) и Al_2Cu (θ). Обнаружено незначительное изменение элементного состава образца, обусловленное процессом плазменного азотирования, которое способствует перераспределению легирующих элементов с последующим формированием упрочненного поверхностного слоя. Полученные результаты подчеркивают влияние технологических параметров на изменение микроструктуры и фазового состава аддитивно изготовленных алюминиевых сплавов после азотирования.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, аддитивное производство, низкотемпературное азотирование, структурно-фазовое состояние, равноосные, столбчатые зерна.

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

Для цитирования: Изменение структурно-фазового состояния алюминиевого сплава 7075 после низкотемпературного азотирования / И. А. Панченко [и др.] // Ползуновский вестник. 2025. № 3, С. 234–239. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.03.041. EDN: <https://elibrary.ru/YTOCPS>.

Origin article

CHANGES IN STRUCTURAL-PHASE STATE OF ALUMINUM ALLOY 7075 AFTER LOW-TEMPERATURE NITRIDING

Irina A. Panchenko¹, Vladislav K. Drobyshev², Sergei V. Konovalov³,
Dmitry N. Labunsky⁴, Almaz Yu. Nazarov⁵

^{1, 2, 3, 4} Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

⁵ Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

¹ i.r.i.ss@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4863-0000>

² drobyshev_v.k@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1532-9226>

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

⁴ info@kana-t.ru

⁵ nazarov.ayu@ugatu.su, <https://orcid.org/0000-0002-4711-4721>

© Панченко И. А., Дробышев В. К., Коновалов С. В., Лабунский Д. Н., Назаров А. Ю., 2025

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 7075 ПОСЛЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО АЗОТИРОВАНИЯ

Abstract. The change in the microstructure and phase state of aluminum alloy grade 7075 before and after nitriding was studied. The alloy was produced by the wire-arc additive method, in the substrate area of which columnar grains prevailed, in the central part there were columnar and dendritic structures, the peripheral zone of the manufactured ingot demonstrated equiaxed structures with a grain size of up to 50 μm . The considered structural heterogeneity is caused by the cooling rate of the workpiece, the thermal gradient in the process of layer-by-layer production of the material. Based on the micro-X-ray spectral analysis, the η -phase (MgZn_2) and S-phase (Al_2CuMg) concentrated at the grain boundaries were detected. The alloy is represented by isolated metallic inclusions of Al_2Cu (θ -phase), formed due to slow cooling or overheating of the metal. After nitriding in an arc discharge using a plasma source (hot cathode), the formation of a polycrystalline structure characterized by cell sizes in the range of 60–200 μm was observed in the studied alloy. Single intermetallic compounds MgZn_2 (η) and Al_2Cu (θ) were present in the alloy after low-temperature nitriding. A slight change in the elemental composition of the sample was detected, caused by the plasma nitriding process, which promotes the redistribution of alloying elements with the subsequent formation of a hardened surface layer. The obtained results emphasize the influence of process parameters on the change in the microstructure and phase composition of additively manufactured aluminum alloys after nitriding.

Keywords: Aluminum alloys, additive manufacturing, low-temperature nitriding, structural-phase state, equiaxed, columnar grains.

Acknowledgment: 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: Panchenko, I.A., Drobyshev, V.K., Konovalov, S.V., Labunsky, D.N. & Nazarov, A.Yu. (2025). Changes in the structural-phase state of aluminum alloy 7075 after low-temperature nitriding. Polzunovskiy vestnik, (3), 234–239. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.03.041. EDN: <https://elibrary.ru/YTOCPs>.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы алюминиевые сплавы привлекли большое внимание исследователей из-за их механических свойств, таких как удельная прочность, плотность, износ, усталостная прочность и тепловое расширение. Предпочтительной группой алюминиевых сплавов являются сплавы 7xxx серии, обладающие высоким соотношением прочности к весу, пластичностью и коррозионной стойкостью [1, 2], хорошо подходящие для применения в автомобильной промышленности (кузовные панели, каркасы сидений, колесные диски) [3].

В алюминиевом сплаве 7075 цинк и магний являются главными легирующими элементами и их высокое содержание (более 6 %) обеспечивает повышенную прочность [4] и восприимчивость к термической обработке, но при этом наблюдается максимальная склонность к коррозионному растрескиванию под напряжением. Небольшие добавки меди, хрома, марганца вызывают незначительное упрочнение материала и необходимы для контроля роста зерна при рекристаллизации [5]. Примеси кремния в сплаве AA7075 могут снижать вязкость разрушения и усталостную прочность.

Повышение механических свойств при высоких нагрузках остается актуальной задачей для компонентов, работающих в условиях циклических нагрузок. Для повышения механических свойств сплава 7075, изготовленного проволочно-дуговым аддитивным способом, предлагается проведение низкотемпературного азотирования в дуговом разряде при помощи плазменного источника с накаленным катодом.

Низкотемпературное азотирование алюминиевых сплавов является важным процессом модификации механических свойств поверхности (износостойкость и коррозионные свойства) без ущерба для основных свойств материала. Этот процесс позволяет избежать фазовых переходов и нежелательных осаждений соединений, которые могут произойти при более высоких температурах, тем самым сохраняя химическую однородность [7]. Для повышения коррозионной стойкости алюминиевого сплава 7075-T6 в солевых средах плазменное азотирование продемонстрировало эффективность 64,2 % [8]. Низкотемпературное азотирование повышает твердость поверхности алюминиевых сплавов, что крайне важно при

применении в условиях, требующих высокой износостойкости. Одна из причин – образование на поверхности слоев нитрида алюминия AlN, который значительно повышает прочность сплава при механических нагрузках [9]. Хотя азотирование демонстрирует повышение микротвердости на 15–40 % [10], однако рассматриваемый процесс сопряжен с риском возникновения хрупкого разрушения и снижения пределов прочности при растяжении на 10–25 % [11]. Указанные эффекты обусловлены образованием хрупких нитридных соединений и трансформацией субмикронной структуры материала [12]. Поэтому выбор актуальных режимов проведения азотирования остается перспективным инструментом для целенаправленной коррекции функциональных свойств в соответствии с эксплуатационными требованиями, что подтверждает их ключевую роль в прикладном материаловедении и инженерных разработках. В настоящей работе оценено изменение микроструктуры и фазового состояния алюминиевого сплава марки 7075 до и после модифицирования поверхности низкотемпературным азотированием.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

В условиях НПЦ «Сварочные процессы и технологии» СибГИУ был изготовлен слиток из алюминиевого сплава марки 7075 с использованием 3D принтера, работающего по технологии моделирования методом послойного наплавления (FDM), в качестве источника питания для наплавки использовался сварочный аппарат. Наплавка исследуемого сплава осуществлялась на алюминиевую подложку толщиной не менее 10 мм, где в качестве защитного газа использовался Ar. Сплав был получен с использованием оптимального режима наплавки [13–15], обеспечивающего низкое разбрзгивание присадочного материала (проводки) и минимизацию активных газов, влияющих на термическое разложение присадочных материалов. Из полученного слитка на электроэрозионном станке струйного типа ДК7732 вырезалось несколько образцов с различных областей заготовки (рисунок 1) в форме кубиков (10 mm^3) для исследования микроструктуры, которые потом подвергались химико-термической обработке поверхности с одной стороны.

Модифицирование поверхности методом низкотемпературного азотирования проводилось в условиях научно-исследовательской лаборатории «Металлы и сплавы при экстремальных воздействиях» на установке ННВ-6,6-И1. Данная установка позволяет проводить очистку, активацию и нагрев поверхности обрабатываемых деталей ионами рабочего газа, генерируемого сильноточным плазменным источником с накальным катодом. Азотирование осуществляли в дуговом разряде при помощи плазменного источника с накаленным катодом при температуре 350 °C в течение 2 ч в газовой смеси 50 % аргона и 50 % азота; давление 0,5 Па; напряжение 500 В. Такие параметры проведения исследований выбраны с целью изучения

влияния низкотемпературного азотирования на образование нитридов алюминия и изменения структурно-фазового состояния материала. Перед азотированием образцы были отполированы до зеркального блеска (этот поверхность подвергали азотированию).

Для изучения изменения структуры сплава AA7075 до и после азотирования использовали сканирующий электронный микроскоп (прибор «KYKY EM-6900») со следующими рабочими параметрами: ускоряющее напряжение – 26 кэВ, ток эмиссии – 150 мА, ток накала – 2,16 А. Проведение микрорентгеноспектрального анализа образцов осуществлялось с использованием энергодисперсионного спектрометра Oxford Xplore.



Рисунок 1 – Области исследования слитка из сплава AA7075, изготовленного проволочно-дуговым аддитивным способом:
1 – приграничная к подложке область; 2 – центральная область; 3 – периферийная область

Figure 1 – Study areas of the AA7075 alloy ingot manufactured by the wire-arc additive method:
1 – area adjacent to the substrate; 2 – central area; 3 – peripheral area

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для анализа микроструктуры наплавленных образцов до азотирования использовали сканирующую электронную микроскопию (СЭМ). На рисунке 1 продемонстрированы три ключевые зоны: периферийная, центральная и приграничная к подложке. Трешины при затвердевании материала не обнаружены, а средняя пористость не превышает 2 %. При наплавке периферийного слоя (рисунок 2, а) происходит переплав верхних слоев заготовки, формируя область с высокой скоростью охлаждения (обусловленную межслойным охлаждением), способствуя образованию равноосных зерен с размером до 50 мкм. В центральной области (рисунок 2, б) наблюдается смешанная структура из столбча-

тых и дендритных зерен. Это связано с уменьшением термического градиента из-за накопления тепла по мере послойного изготовления слитка. В приграничной к подложке области преобладают столбчатые зерна, что объясняется снижением рассеивания тепла. Наплавка сплава AA7075 аддитивным способом формирует сложную микроструктуру, зависящую от тепловых условий. Ключевые факторы – скорость охлаждения, термический градиент и многократный нагрев. Отсутствие трещин и низкая пористость (менее 2 %) подтверждают технологическую стабильность процесса, однако неоднородность зерен требует дальнейшую оптимизацию режимов для улучшения микроструктуры и дальнейших механических свойств сплава.

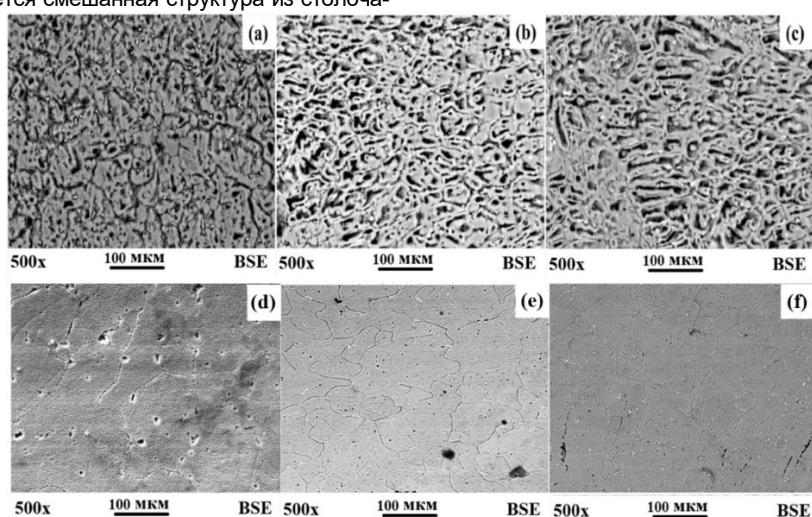


Рисунок 2 – Микроструктура алюминиевого сплава AA7075 в различных областях до и после азотирования:
а – периферийная область; б – центральная область; в – приграничная к подложке область; д – периферийная область после азотирования; е – центральная область после азотирования; ф – приграничная к подложке область после азотирования

Figure 3 – Microstructure of aluminum alloy AA7075 in different areas before and after nitriding:
а – peripheral area; б – central area; в – area bordering the substrate; д – peripheral area after nitriding;
е – central area after nitriding; ф – area bordering the substrate after nitriding

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 7075 ПОСЛЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО АЗОТИРОВАНИЯ

В алюминиевом сплаве марки 7075, содержащем цинк, магний и медь в качестве легирующих элементов, может образовываться несколько интерметаллических соединений, способствующих механическим свойствам сплава и его коррозионной стойкости. Присутствие этих интерметаллидов имеет решающее значение для эксплуатационных характеристик

сплава. Поэтому для дальнейшего исследования структурно-фазового состояния до и после азотирования была выбрана периферийная область сплава AA7075 с равномерным распределением равноосных зерен. Идентификацию интерметаллидных включений осуществляли с использованием микрорентгеноспектрального анализа (рисунок 3).

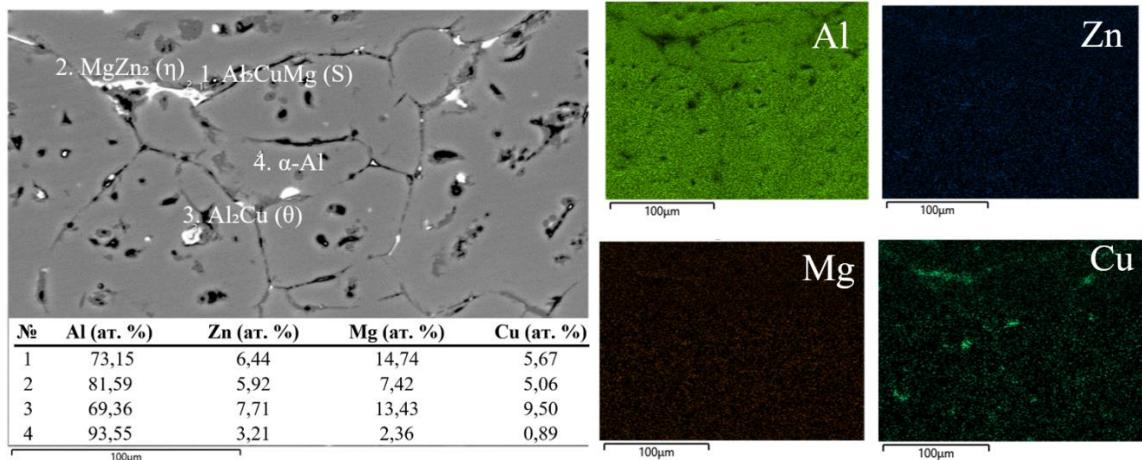


Рисунок 3 – СЭМ изображение алюминиевого сплава AA7075 с точечным микрорентгеноспектральным анализом

Figure 3 – SEM image of aluminum alloy AA7075 with spot micro-X-ray spectral analysis

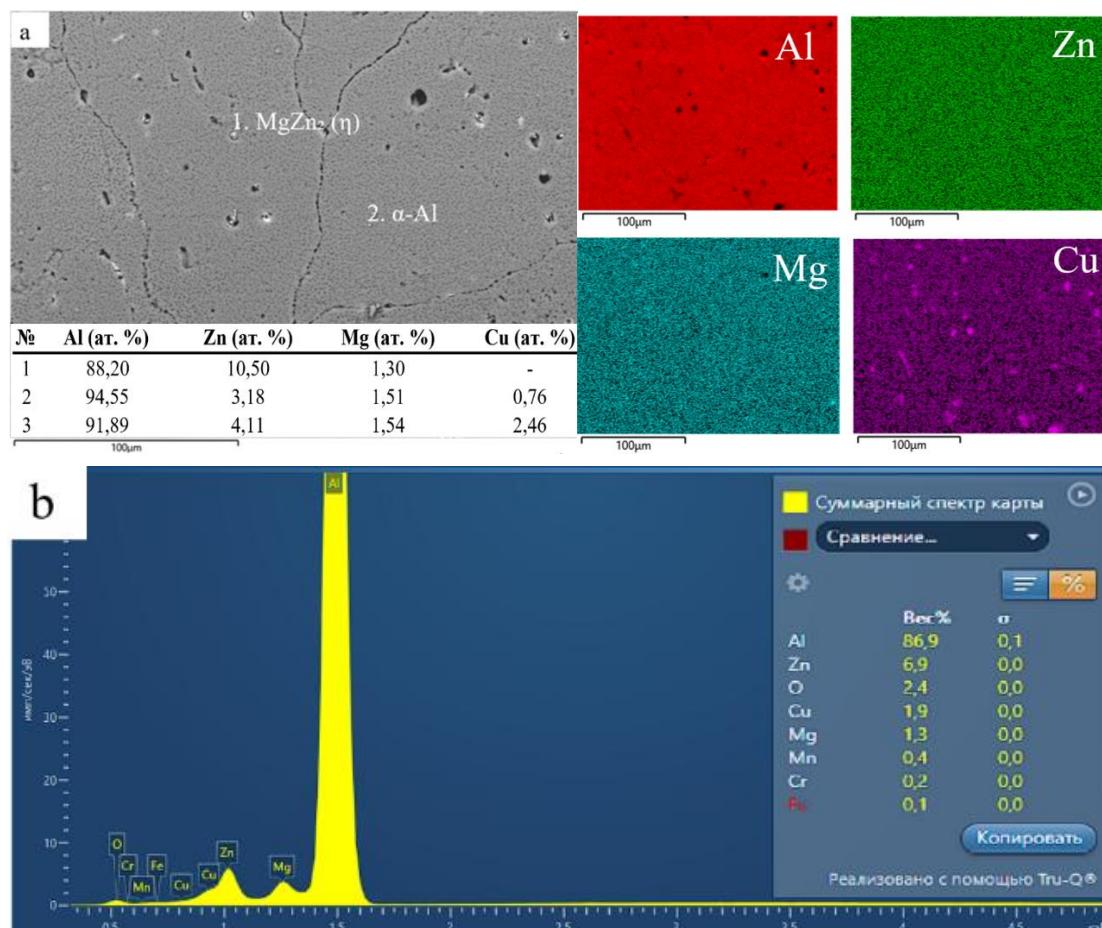


Рисунок 4 – Микрорентгеноспектральный анализ модифицированной поверхности сплава AA7075: а – СЭМ изображение исследуемой поверхности; б – микрорентгеноспектральный анализ исследуемой области с суммарным элементным содержанием

Figure 4 – Micro X-ray spectral analysis of the modified surface of the AA7075 alloy:
a – SEM image of the studied surface; b – micro-X-ray spectral analysis of the studied area with the total elemental content

В периферийной области сплава микроструктура демонстрирует четкие границы зерен, что указывает на выделение вторичных фаз. Ключевыми фазами, влияющими на прочность сплава системы Al – Zn – Mg, являются η -фаза ($MgZn_2$) и S-фаза (Al_2CuMg), сконцентрированные у границ зерен [16–18]. Сплав представлен обособленными металлическими включениями Al_2Cu (θ -фаза), образующихся из-за медленного охлаждения или перегрева металла. Основная фаза представлена твердым раствором α -Al, в котором растворены 6,9 ат. % Zn; 2,0 ат. % Mg%; 1,9 ат. % Cu; 1,7 ат. % O; 0,4 ат. % Mn; 0,2 ат. % Cr; 0,1 ат. % Fe. Для модификации поверхности свойств сплава AA7075 было проведено низкотемпературное азотирование в дуговом разряде при помощи плазменного источника с накаленным катодом. СЭМ изображение азотированной поверхности представлено на рисунке 4.

Изменение размера зерен в образовавшемся слое после бомбардировки и травления ионами составило до 200 мкм. Стоит отметить, что присутствуют единичные интерметаллические соединения $MgZn_2$ (η) и Al_2Cu (θ), остальные соединения, представленные фазы Al_2CuMg (S), не были обнаружены микрорентгеноспектральным анализом, что можно связать с их частичным растворением в твердом растворе. На основе микрорентгеноспектрального анализа в модифицированной поверхности алюминиевого сплава AA7075 можно отметить следующее содержание элементов: 6,9 ат. % Zn; 2,4 ат. % O; 1,9 ат. % Cu; 1,3 ат. % Mg; 0,4 ат. % Mn; 0,2 ат. % Cr; 0,1 ат. % Fe. После азотирования возросло содержание атомов кислорода до 2,4 ат. %, что можно связать с дополнительным образованием поверхностного слоя Al_2O_3 . На основе результатов микрорентгеноспектрального анализа отмечено снижение Mg до 1,3 ат. %, указанное изменение элементного состава может быть обусловлено процессом плазменного азотирования, которое способствует образованию $MgZn_2$ и Al_2Cu с последующим формированием упрочненного поверхностного слоя [19, 20].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Морфология сплава AA7075, изготовленного проволочно-дуговым аддитивным способом, изменяется в зависимости от расстояния до подложки. Так, в приграничной к подложке области преобладают столбчатые зерна, в центральной области наблюдается смешанная структура из столбчатых и дендритных зерен, периферийная область состоит из равнососных зерен до 100 мкм. Такое отличие в микроструктуре связано со следующими параметрами: скоростью охлаждения заготовки, температурным градиентом и многократным нагревом. Морфология сплава AA7075 после обработки в дуговом разряде имела зеренную (поликристаллическую) структуру. Размер ячеек образовавшегося слоя после бомбардировки и травления ионами составил от 60 до 200 мкм. Обнаружено незначительно изменение элементного состава образца, обусловленное процессом плазменного азотирования, которое способствует перераспределению легирующих элементов с последующим формированием упрочненного поверхностного слоя. Полученные результаты подчеркивают влияние технологических параметров на изменение микроструктуры и фазового состава аддитивно изготовленных алюминиевых сплавов после азотирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. U. Sen, K. Sharma. Friction Stir Processing of Aluminum Alloys: a Literature Survey, vol. 2, (2016), pp. 771–774.
2. Murugesan R., Venkataramana S.H., Marimuthu S., Anand P., Nagaraja S., Isaac J.S., Sudharsan R.R., Khan T.M.Y., Almakayee N., Islam S. & Razak A. (2023). Influence of Alloying Materials Al, Cu, and Ca on Microstructures, Mechanical Properties, And Corrosion Resistance of Mg Alloys for Industrial Applications: A Review. *ACS Omega*. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c03417>.
3. Abdollahi A. [et al.]. An adapted approach for solidification crack elimination in Al7075 TIG welding // Materials Research Express. 2024. Vol. 11. No. 4. p. 46509.
4. A. Huang Y., Sun P., Sun L., Li Y., Zheng X., Li X., Yan H., Li B., Liu Y. & Du Y. (2023). Effect of Zn/Mg ratio on aging precipitates and mechanical property of high Mg content Al-Mg-Zn alloys with Sc and Zr additions. *Journal of Alloys and Compounds*. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.173368>.
5. Wang X., Liu S. & Lin Y. (2022). Effect of Zn and Cu Addition on Microstructure and Mechanical Properties of Al-10wt% Mg Alloy. *Superalloys*, 12(6), 1037. <https://doi.org/10.3390/met12061037>.
6. Zhou H., Wen K., Yin H., Yu M. & Shi G. (2023). Study on the effect of enhanced magnesium and copper contents on microstructure and property of Al-Zn-Mg-Cu alloys with high zinc element content during fabrication processes. 2566. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2566/1/012018>.
7. Kiriti-Nganga T. (2023). Low Temperature Nitriding of Metal Alloys for Surface Mechanical Performance. *Materials*, 16(13), 4704. <https://doi.org/10.3390/ma16134704>.
8. Choi J., Yoo J., Kang K. & Lee H.M. (2024). To elucidate the effect of alloying elements for enhanced nitriding of aluminum: A multiscale computational study. *Materials Chemistry and Physics*. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.128727>.
9. B.M. Girish, B.M. Satish, H.R. Vitala. (2022). Study on the Effect of Nitriding on Wear Behavior of Graphite Reinforced Aluminum Alloy Composites. 23–34. doi: 10.9734/bpi/nper/v6/15230d.
10. Paweł Widomski, Marcin Kaszuba, Paweł Sokolowski, Artur Lange, Mariusz Walczak, Marcin Długożima, Mateusz Gierek, Dariusz Chocik, Grzegorz Gladyszewski, Bożena Boryczko. (2023). Nitriding of hardfaced layers as a method of improving wear resistance of hot forging tools. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 23. doi: 10.1007/s43452-023-00778-5.
11. N.K. Krioni, A.A. Mingazheva, A.D. Mingazhev. (2022). Increasing of wear resistance of machine parts by nitriding while suppressing of nitride mesh formation process. *Strengthening Technologies and Coatings*, 571–574. doi: 10.36652/1813-1336-2022-18-12-571-574.
12. Yoshida Masashi & Tao Zhou & Utsumi Noah. (2014). Formation of Aluminum Nitride Films by Gas Nitriding. *Key Engineering Materials*. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.625.651.
13. Study of mechanical properties of AA7075 alloy obtained by additive method / V.K. Drobyshev [et al.] // Polzunovsky Vestnik. 2024. No. 4. P. 156–160. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.04.023.
14. 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. No. 2. P. 84–89. DOI: 10.17580/nfm.2024.02.13. EDN IQZUOR.
15. Дробышев В.К., Панченко И.А. & Коновалов С.В. (2024). Механические свойства и микроструктура сплавов системы CoCrFeMnNi: Ползуновский вестник, (2), 249–254. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2024.02.033>.
16. Vlach M., Kodetová V., Cizek J., Leibner M., Kekule T., Lukáč F., Cieslar M., Bajtová L., Kudrnová H., Šíma V., Zikmund S., Černosková 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>.
17. Su R. (2022). The Corrosive Improvement with High Temperature Laser Surface Treatment of AA7075. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 32(10), 4352–4360. <https://doi.org/10.1007/s11665-022-07422-y>.
18. Kairy S.K., Gharbi O., Nicklaus J., Jiang D., Hutchinson C. & Birbilis N. (2019). On the Characterization of a Hitherto Unreported Icosahedral Quasicrystal Phase in Additively Manufactured Aluminum Alloy AA7075. *Metallurgical and Material*

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 7075 ПОСЛЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО АЗОТИРОВАНИЯ

- als Transactions A-Physical Metallurgy and Materials Science, 50(2), 529–533. <https://doi.org/10.1007/S11661-018-5025-1>.
19. Zdeněk Pokorný, Jaromír Kadlec, Zdenek Joska, Zbynek Studeny, Miroslav Pospichal, David Dobrocky. (2016). Increasing of Durability of Surfaces by Plasma Nitriding Process. Solid State Phenomena, 258:583-586. doi: 10.4028/www.scientific.net/ssp.258.583.
20. Rogers S., Dargusch M.S. & Kent, D. (2023). Impacts of Temperature and Time on Direct Nitridation of Aluminium Powders for Preparation of AlN Reinforcement. Materials, 16(4), 1583. <https://doi.org/10.3390/ma16041583>.
- Информация об авторах**
- И. А. Панченко – кандидат технических наук, 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.
- Д. Н. Лабунский – соискатель ученой степени кандидата наук, Сибирского государственного индустриального университета.
- А. Ю. Назаров – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Уфимского университета науки и технологий.

REFERENCES

1. U. Sen, K. Sharma. Friction Stir Processing of Aluminum Alloys: a Literature Survey, vol. 2, (2016), pp. 771-774.
2. Murugesan, R., Venkataramana, S.H., Marimuthu, S., Anand, P., Nagaraja, S., Isaac, J.S., Sudharsan, R.R., Khan, T.M.Y., Almakayee, N., Islam, S. & Razak, A. (2023). Influence of Alloying Materials Al, Cu, and Ca on Microstructures, Mechanical Properties, And Corrosion Resistance of Mg Alloys for Industrial Applications: A Review. ACS Omega. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c03417>.
3. Abdollahi, A. [et al.]. An adapted approach for solidification crack elimination in Al7075 TiG welding // Materials Research Express. 2024. Vol. 11. No. 4. p. 46509.
4. A Huang, Y., Sun, P., Sun, L., Li, Y., Zheng, X., Li, X., Yan, H., Li, B., Liu, Y. & Du, Y. (2023). Effect of Zn/Mg ratio on aging precipitates and mechanical property of high Mg content Al-Mg-Zn alloys with Sc and Zr additions. Journal of Alloys and Compounds. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.173368>.
5. Wang, X., Liu, S. & Lin, Y. (2022). Effect of Zn and Cu Addition on Microstructure and Mechanical Properties of Al-10wt%Mg Alloy. Superalloys, 12(6), 1037. <https://doi.org/10.3390/met12061037>.
6. Zhou, H., Wen, K., Yin, H., Yu, M. & Shi, G. (2023). Study on the effect of enhanced magnesium and copper contents on microstructure and property of Al-Zn-Mg-Cu alloys with high zinc element content during fabrication processes. 2566. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1/012018>.
7. Kiriti-Nganga, T. (2023). Low Temperature Nitriding of Metal Alloys for Surface Mechanical Performance. Materials, 16(13), 4704. <https://doi.org/10.3390/ma16134704>.
8. Choi, J., Yoo, J., Kang, K. & Lee, H.M. (2024). To elucidate the effect of alloying elements for enhanced nitridation of aluminum: A multiscale computational study. Materials Chemistry and Physics. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.128727>.
9. B.M. Girish, B.M. Satish, H.R. Vitala. (2022). Study on the Effect of Nitriding on Wear Behavior of Graphite Reinforced Aluminum Alloy Composites. 23-34. doi: 10.9734/bpi/nper/v6/15230d.
10. Paweł, Widomski, Marcin, Kaszuba, Paweł, Sokolowski, Artur, Lange, Mariusz, Walczak, Marcin, Dlugozima, Mateusz, Gerek, Dariusz, Chocik, Grzegorz, Gladyszewski, Bożena, Boryczko. (2023). Nitriding of hardfaced layers as a method of improving wear resistance of hot forging tools. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 23. doi: 10.1007/s43452-023-00778-5.
11. N.K., Krioni, A.A., Mingazheva, A.D., Mingazhev. (2022). Increasing of wear resistance of machine parts by nitriding while suppressing of nitride mesh formation process. Strengthening Technologies and Coatings, 571-574. doi: 10.36652/1813-1336-2022-18-12-571-574.
12. Yoshida, Masashi & Tao, Zhou & Utsumi, Noah. (2014). Formation of Aluminum Nitride Films by Gas Nitriding. Key Engineering Materials. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.625.651.
13. Study of mechanical properties of AA7075 alloy obtained by additive method. / V.K. Drobyshev [et al.] // Polzunovsky Vestnik. 2024. No. 4. P. 156-160. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.04.023.
14. Panchenko, A., Bessonov, D.A., Konovalov, S.V., Labunsky, D.N. (2024). Study of influence of additive wire-arc manufacturing modes on microstructure of AA7075 alloy. Non-Ferrous Metals. (2). 84-89. DOI: 10.17580/nfm.2024.02.13. EDN IQZUOR.
15. Drobyshev, V.K., Panchenko, I.A. & Konovalov, S.V. (2024). MECHANICAL PROPERTIES AND MICROSTRUCTURE OF ALLOYS OF THE CoCrFeMnNi: Polzunovsky Vestnik, (2), 249-254. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2024.02.033>.
16. Vlach, M., Kodetová, V., Cizek, J., Leibner, M., Kekule, T., Lukáč, F., Cieslar, M., Bajtová, L., Kudrnová, H., Šima, V., Zikmund, S., Černášková, 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>.
17. Su, R. (2022). The Corrosive Improvement with High Temperature Laser Surface Treatment of AA7075. Journal of Materials Engineering and Performance, 32(10), 4352-4360. <https://doi.org/10.1007/s11665-022-07422-y>.
18. Kairy, S.K., Gharbi, O., Nicklaus, J., Jiang, D., Hutchinson, C. & Birbilis, N. (2019). On the Characterization of a Hitherto Unreported Icosahedral Quasicrystal Phase in Additively Manufactured Aluminum Alloy AA7075. Metallurgical and Materials Transactions A-Physical Metallurgy and Materials Science, 50(2), 529-533. <https://doi.org/10.1007/S11661-018-5025-1>.
19. Zdeněk, Pokorný, Jaromír, Kadlec, Zdenek, Joska, Zbynek, Studeny, Miroslav, Pospichal, David, Dobrocky. (2016). Increasing of Durability of Surfaces by Plasma Nitriding Process. Solid State Phenomena, 258:583-586. doi: 10.4028/www.scientific.net/ssp.258.583.
20. Rogers, S., Dargusch, M.S. & Kent, D. (2023). Impacts of Temperature and Time on Direct Nitridation of Aluminium Powders for Preparation of AlN Reinforcement. Materials, 16(4), 1583. <https://doi.org/10.3390/ma16041583>.

Information about the authors

I.A. Panchenko - Candidate of Technical Sciences, 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. Konovalov - Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector for Research and Innovation, Siberian State Industrial University.

D.N. Labunsky - Candidate of Science, Siberian State Industrial University.

A.Yu. Nazarov - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher, Ufa University of Science and Technology.

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

Статья поступила в редакцию 19 ноября 2024; одобрена после рецензирования 24 июня 2025; принята к публикации 10 июля 2025.

The article was received by the editorial board on 19 Nov 2024; approved after editing on 24 June 2025; accepted for publication on 10 July 2025.