

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

MATERIALS SCIENCE AND HEAT TREATMENT OF METALS

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 549:54.055

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-4-110-118



ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОГО И ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СПЛАВА АА7075

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

Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Алюминиевые сплавы марки 7075 обладают высоким отношением прочности к массе, однако традиционные методы производства этих сплавов сопряжены с риском образования дефектов (микропоры, трещины) и неоднородности свойств материала, затрудняющих его внедрение в существующие технологические циклы metallургического производства. **Цель работы.** Установление влияния режимов ионно-плазменного воздействия на механические свойства (микротвердость) на поверхности образцов сплава AA7075. Основной целью работы является исследование влияния оптимальных параметров электронно-пучкового и ионно-плазменного воздействия на прочностные характеристики алюминиевого сплава 7075. **Используемые методы.** В качестве оборудования представлены современные объекты исследовательской инфраструктуры с использованием одноименного источника электронов в среде аргона. Для механических испытаний использовались установки на усталостную долговечность, одноосное растяжение, а также установка для измерения микротвердости. С помощью микротвердомера по Микро-Виккерсу ГОСТ 9450-76 проведены исследования распределения микротвердости для поиска оптимальных режимов азотирования 9-ти тестовых образцов сплава AA7075. **Новизна.** Получение новых результатов об эволюции механических свойств материалов, изготовленных проволочно-дуговыми аддитивными технологиями при энергетическом воздействии на их поверхность. **Результат.** Были определены значения микротвердости, прочностные свойства, на основе которых сделаны выводы об оптимальных режимах проведения азотирования, влияние электронно-пучковой, комбинированной обработки на прочность, усталостную долговечность сплава AA7075. **Практическая значимость.** Результаты исследования могут быть использованы для подбора оптимальных температурных и временных режимов проведения азотирования состава, а также для разработки новых материалов с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы 7075, предел прочности, усталость, микротвердость, азотирование, электронно-пучковая обработка

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

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

Для цитирования

Исследование влияния электронно-пучкового и ионно-плазменного воздействия на прочностные характеристики сплава AA7075 / Панченко И.А., Дробышев В.К., Лабунский Д.Н., Коновалов С.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №4. С. 110-118. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-110-118>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

STUDYING THE EFFECT OF ELECTRON BEAM AND ION PLASMA TREATMENT ON THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF AA7075 ALLOY

Panchenko I.A., Drobyshev V.K., Labunskiy D.N., Konovalov S.V.

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). Aluminum alloys of the 7075 grade have a high strength-to-weight ratio, however, traditional methods of production of these alloys are associated with the risk of defects (micropores, cracks) and heterogeneity of the material properties, which complicate its implementation in the existing technological cycles of metallurgical production. **Objectives.** The research is aimed at determining the influence of ion-plasma action modes on the mechanical properties (microhardness) on the surface of AA7075 alloy samples. The main objective of the work is to study the influence of optimal parameters of electron-beam and ion-plasma action on the strength characteristics of 7075 aluminum alloy. **Methods Applied.** Modern research infrastructure facilities are presented as equipment, using the similar electron source in an argon environment. Fatigue life, uniaxial tension, special purity units were used for mechanical tests. Using a Vickers microhardness tester (State standard GOST 9450-76), the microhardness distribution was studied to find the optimal nitriding modes for 9 test samples of AA7075 alloy. **Originality.** It lies in obtaining new results on the evolution of mechanical properties of materials manufactured by wire-arc additive technologies under energy impact on their surface. **Result.** The microhardness values and strength properties were determined, on the basis of which conclusions were made on the optimal nitriding modes, the effect of electron-beam and combined treatment on the strength and fatigue life of AA7075 alloy. **Practical Relevance.** The research results can be used to select the optimal temperature and time modes for the composition nitriding, as well as to develop new materials with improved performance characteristics.

Keywords: aluminum alloys 7075, tensile strength, fatigue, microhardness, nitriding, electron beam treatment

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., Labunskiy D.N., Konovalov S.V. Studying the Effect of Electron Beam and Ion Plasma Treatment on the Strength Characteristics of AA7075 Alloy. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 4, pp. 110-118. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-110-118>

Введение

Алюминиевые сплавы марки 7075 обладают высоким отношением прочности к массе и используются для изготовления несущих конструкций самолётов (лонжероны, панели фюзеляжа и крыла) [1], а также ответственных деталей в автомобильной промышленности, где требуется сочетание малой плотности с высокой прочностью [2]. Основные легирующие элементы (цинк, магний, медь) обеспечивают превосходные механические свойства, однако традиционные методы производства этих сплавов, такие как литье или сварка, сопряжены с риском дефектов (микропоры, трещины). Современные требования к сложным геометриям, локализованному производству и улучшенным эксплуатационным характеристикам стимулируют развитие технологий аддитивного производства (АП) [3] и инновационных методов комплексной модификации поверхности, таких как электронно-пучковая обработка (ЭПО) [4] и азотирование [5].

Проволочно-дуговое аддитивное производство (WAAM) обеспечивает высокую скорость осаждения

и заданные размеры изделий, позволяя решить такие проблемы, как пористость и образование трещин при затвердевании, путем оптимизации технологического процесса [6-8]. Несмотря на выдающиеся механические характеристики в объёме, термическая обработка (T6/T651) не позволяет достичь необходимого уровня твёрдости и износостойкости поверхности, что ограничивает применение AA7075 в условиях интенсивного трения и абразивного износа [9, 10]. Современные исследования активно изучают возможность нитрирования алюминиевых сплавов как способа поверхностного упрочнения и модификации [11]. В процессе азотирования на поверхности образуются соединения Al-N (нитрид алюминия), которые обладают высокой твёрдостью и стойкостью к износу [12]. В сплаве AA7075 плазменное азотирование формирует тонкий (порядка 5–10 мкм) «белый слой» с последующим увеличением твердости с ~76 до ~118 Vickers и толщиной нитридного слоя около 6 мкм [13]. Аналогично в работе [14] сообщили, что плазменное азотирование улучшает износостойкость и усталостную выносливость сплава AA7075, а также

заметно снижает скорость электрохимической коррозии по сравнению с необработанным материалом [15].

Азотирование алюминиевых сплавов также может привести к ряду негативных последствий. Эти неблагоприятные воздействия в первую очередь связаны с изменениями микроструктуры и механических свойств, которые могут ухудшить общие характеристики сплава. В результате азотирования может образоваться толстая оксидная пленка, которая может повлиять на свойства поверхности сплава и привести к повышению шероховатости поверхности и потенциальной концентрации напряжений [16]. Механические характеристики азотированных алюминиевых сплавов могут ухудшаться из-за пористости и дефектов, образующихся в процессе азотирования [17]. Хотя азотирование обычно повышает коррозионную стойкость, оно также может привести к локальным проблемам коррозии, особенно в солевых средах, где азотированный слой может не обеспечивать равномерной защиты [18].

Для минимизации дефектов, связанных с образованием пор в поверхностном слое при использовании данной методики, необходима постобработка. Одним из эффективных решений для снятия концентрации напряжений является модификация структуры материала посредством электронно-пучкового воздействия, которое позволяет повысить плотность и однородность поверхностных слоёв [19]. Несмотря на эффективность, оба метода требуют оптимизации режимов обработки, чтобы минимизировать потерю легирующих элементов (Mg, Zn) и сохранить прочностное состояние сплава AA7075, что является актуальной задачей современной поверхностной инженерии алюминиевых сплавов.

Материалы и методы исследования

В качестве материала исследований использован алюминиевый сплав марки 7075. Образцы из AA7075 изготавливали с использованием 3D-принтера Anycubic Chiron, работающего по технологии моделирования методом послойного наплавления (FDM). В табл. 1 представлен химический состав наплавочной алюминиевой проволоки и полученного наплавленного слоя AA7075.

Образцы на растяжение имели форму пропорциональных лопаток и следующие размеры: толщина 3 мм; ширина 14 мм; рабочая длина 25 мм. Образцы для исследований усталостной долговечности имели форму параллелепипеда размерами 12×4×130 мм с двумя концентраторами напряжений в виде полукруга радиусом 20 мм. Для качественной оценки усталостных характеристик образцов, изготовленных по ГОСТ 25.502-79, их подвергали механическойшли-

фовке наждачной бумагой с уменьшением дисперсности абразивных частиц, поскольку качество подготовки поверхности изделий влияет на показатели сопротивления усталости.

Таблица 1. Химический состав алюминиевой проволоки и наплавленного слоя, вес. %

Table 1. Chemical composition of aluminum wire and deposited layer, wt.%

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

Электронно-пучковая обработка (ЭПО) образцов сплава AA7075 осуществлялась на установке «СОЛО» ИСЭ СО РАН, входящей в перечень объектов современной исследовательской инфраструктуры Российской Федерации, с использованием одноименного источника электронов в среде аргона особой чистоты (99,999%) при давлении 31 мПа.

Модифицирование поверхности методом азотирования осуществлялось в дуговом разряде при помощи плазменного источника с накаленным катодом при температуре 600°C в течение 1, 3, 5 ч (рис. 1) в газовой смеси 50% аргона и 50% азота.

Замеры микротвердости исследуемых образцов проводились с использованием микротвердометра HVS-1000 по Микро-Виккерсу ГОСТ 9450-76 путём вдавливания алмазной пирамидки. Испытательная нагрузка – 20 г, длительность нагрузки – 10 с.

Механические испытания алюминиевого сплава марки 7075, поверхностно модифицированного электронным пучком, осуществляли путем одноосного растяжения образцов на испытательной машине «SUBRAMAX PMBC-50» с постоянной скоростью 0,5 мм/мин.

Исследования на усталостную долговечность выполнялись на специализированном оборудовании, работающем по схеме асимметричного консольного изгиба. В ходе экспериментов регистрировалось количество циклов, предшествующих разрушению материала. Все испытания осуществлялись при комнатной температуре (~293 К), а частота нагружений образцов изгибом составляла 2,3 Гц. Для достижения минимального порога в 10^5 циклов до появления трещин экспериментально подбирались пиковые значения напряжения и амплитуды циклических воздействий.



Рис. 1. Фотография внешнего вида образцов после электронно-пучкового и ионно-плазменного воздействия при температуре 600°C и времени азотирования 1, 3 и 5 ч:

а, б, в – образцы для испытаний на усталость (1-я партия); г, д, е – образцы для механических испытаний (2-я партия)

Fig. 1. An image of the samples after electron beam treatment and ion plasma exposure at a temperature of 600°C and a nitriding time of 1, 3 and 5 hours: a, b, в are fatigue test samples (1st batch); г, д, е are samples for mechanical tests (2nd batch)

Полученные результаты и их обсуждение

Для поиска оптимальных режимов азотирования 9 тестовых образцов сплава AA7075 без концентраторов напряжений с размерами $15 \times 15 \times 5$ мм³ были подвергнуты ионно-плазменной обработке (азотированию). Обработка производилась методом ионно-пучкового азотирования с помощью уникальной системы для бессеточного формирования низкоэнергетического ионного пучка. Принцип работы системы заключается в том, что в ней инициируется разряд с внешней инжецией электронов, плазма которого является источником ионов для пучка, инжектируемого в рабочую вакуумную камеру, заполненную плазмой генератора «ПИНК», где располагаются обрабатываемые образцы. Такой принцип работы обеспечивает компенсацию заряда ионов на обрабатываемой поверхности и, соответственно, позволяет облучать образцы, в том числе диэлектрические либо с диэлектрическим покрытием, находящиеся под «плавающим» потенциалом без риска образования на их поверхности микродуг.

В табл. 2 представлены результаты измерения микротвердости (при нагрузке на индентор 20 г) на

поверхности образцов сплава AA7075 без концентраторов напряжений с размерами $15 \times 15 \times 5$ мм³, подвергнутых азотированию при следующих параметрах: температура 450, 520, 600°C; времени азотирования – 1, 3, 5 ч.

Таблица 2. Результаты измерения микротвердости на поверхности образцов сплава AA7075

Table 2. Results of measuring microhardness on the surface of samples of AA7075 alloy

Режим азотирования, температура, °C, и длительность, ч	Микротвердость, ГПа
450_1	0,59
450_3	0,69
450_5	0,59
520_1	0,60
520_3	0,58
520_5	0,57
600_1	0,62
600_3	1,0
600_5	0,53
Исходное состояние	0,96

Изменение микротвердости алюминиевого сплава 7075 после азотирования обусловлено сложным взаимодействием процессов упрочнения за счёт образования нитридов и разупрочнения из-за структурных изменений в сплаве. При азотировании на поверхности формируются нитриды алюминия (AlN) и, возможно, других элементов сплава ($\text{Zn}, \text{Mg}, \text{Cu}$). Эти соединения повышают твёрдость, особенно при оптимальных режимах ($600^\circ\text{C}, 3$ ч), где достигается максимальное значение 1,0 ГПа. 450°C является умеренной температурой проведения азотирования, замедляющей диффузию азота. Снижение микротвердости в образцах, обработанных в течение 5 ч, может быть вызвано началом роста зёрен или неоднородностью слоя. При температуре азотирования 520°C возникает постепенное снижение твёрдости с увеличением времени от 0,60 до 0,57 ГПа, что указывает на возможное растворение фаз или перестаривание сплава, что снижает его базовую твёрдость. Температура обработки 600°C являлась наиболее оптимальной, судя по микротвердости образцов, подвергнутых азотированию в течение 3 ч (1,0 ГПа), что объясняется интенсивным формированием нитридов. Однако при времени выдержки азотирования до 5 ч наблюдалось резкое падение микротвердо-

сти до 0,53 ГПа, что связано с деградацией структуры: ростом зёрен или растрескиванием нитридного слоя или перестариванием сплава.

В исходном состоянии (без обработки) предел прочности составил всего ~100,9 МПа (рис. 2), а усталостная выносливость – ~234 748 циклов. Причинами стали высокая пористость и наличие внутренних дефектов, которые служат концентраторами напряжений, ускоряющими зарождение трещин. После ЭПО предел прочности вырос на 97,5% (до 199,3 МПа), а усталостная выносливость увеличилась на 11% (~260 890 циклов). Это связано с локальным переплавлением поверхностного слоя, устранением микропор и релаксацией остаточных напряжений.

Комбинированная обработка (КО), включающая в себя ЭПО и ионно-плазменное воздействие в течение 1 ч, привела к ухудшению свойств: предел прочности упал до 69 МПа (-65% от ЭПО), а усталостная выносливость – до ~141 668 циклов (-45%). Короткое время обработки вызвало перегрев материала, нестабильное окисление поверхности (рис. 3) и образование микротрещин (рис. 3, а). Эти дефекты превратили поверхность в хрупкую зону, ускоряющую разрушение.

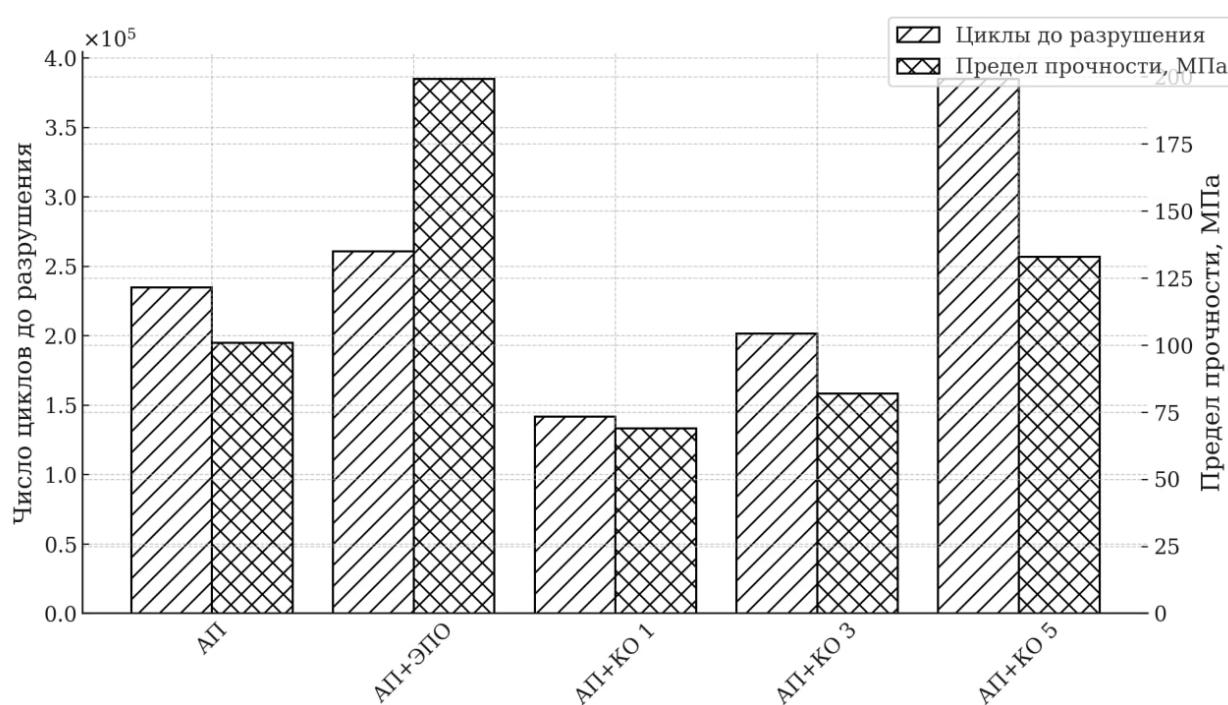


Рис. 2. Количество циклов до усталостного разрушения и предел прочности алюминиевого сплава 7075, изготовленного аддитивным производством, облученного электронно-пучковой обработкой, комбинированной обработкой на протяжении 1, 3, 5 ч

Fig. 2. Number of cycles to fatigue failure and ultimate strength of 7075 aluminum alloy produced by additive manufacturing, irradiated by electron beam treatment, combined processing for 1, 3, 5 hours

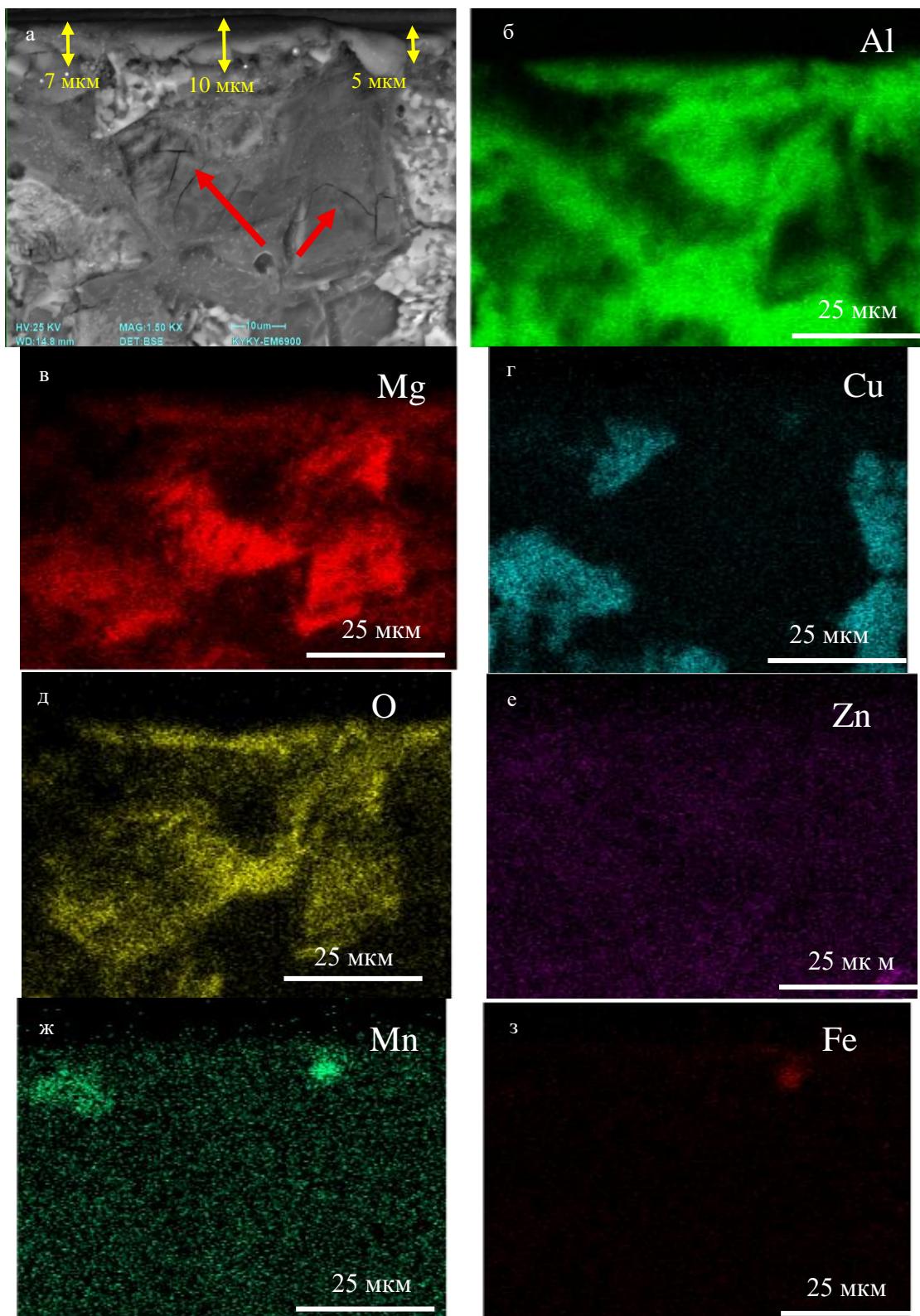


Рис. 3. Распределение химических элементов сплава AA7075 после комбинированной обработки на протяжении 5 ч, где красными стрелками указаны микротрешины: а – электронно-микроскопическое изображение зоны излома; б – Al; в – Mg; г – Cu; д – O; е – Zn; ж – Mn; з – Fe

Fig. 3. Distribution of chemical elements of the AA7075 alloy after combined processing for 5 hours, where red arrows indicate microcracks: а is an electron microscopic image of the fracture zone, б is Al, в is Mg, г is Cu, д is O, е is Zn, ж is Mn, з is Fe

Увеличение времени ионно-плазменной обработки до 3 ч (ЭПО + КО 3 ч) частично компенсировало негативные эффекты: прочность выросла до 82 МПа (+19%), а усталостная выносливость — до ~201 717 циклов (+42%). Более длительное воздействие позволило стабилизировать структуру, снизить концентрацию дефектов и сформировать упрочненный слой. Однако свойства оставались ниже, чем после ЭПО, из-за недостаточной глубины модифицированной поверхности. После 5-часовой ионно-плазменной обработки (ЭПО + КО 5 ч) предел прочности достиг 133 МПа (+62% от КО 1 ч), а усталостная выносливость ~384 941 циклов (+172%), превысив даже показатели после ЭПО. Тем самым комбинированная обработка, включающая ЭПО (устранение внутренних дефектов) и азотирование (оптимизация поверхностных свойств), позволила преодолеть ограничения аддитивного производства.

Заключение

Микротвердость и прочность коррелируют с плотностью материала: электронно-пучковая обработка и длительная комбинированная обработка уменьшают пористость, повышая оба параметра. Малая продолжительность электронно-пучковой и ионно-плазменной обработки ухудшает микротвердость из-за термических дефектов. Усталостная выносливость зависит от поверхностных свойств: внутренние напряжения (после КО 5 ч) и отсутствие дефектов увеличивают сопротивление зарождению трещин. Хрупкие оксиды (после КО 1 ч) ускоряют разрушение.

Оптимальными параметрами обработки являются ЭПО + КО 5 ч, где сочетается устранение внутренних дефектов после ЭПО и улучшение поверхностных свойств после ионно-плазменной обработки. Таким образом, комбинированная постобработка аддитивно полученного сплава 7075 позволяет не только компенсировать технологические недостатки изготовления сплавов, но и целенаправленно модифицировать структуру материала для достижения требуемых механических свойств.

Список источников

- Khalid M.Y., Umer R., Khan K.A. Review of recent trends and developments in aluminium 7075 alloy and its metal matrix composites (MMCs) for aircraft applications // Results in Engineering. 2023, vol. 20.
- Development and applications of aluminum alloys for aerospace industry / Li S.S., Yue X., Li Q., Peng H.-L. // Journal of Materials Research and Technology. 2023, vol. 27, pp. 944–983.
- A Review of Wire Arc Additive Manufacturing of High Strength 7xxx Series Aluminium Alloys / Ekpemogu A.I., Abioye T.E., Cunningham C., Obolo R., Seman A.A., Ogedengbe // Advances in Science and Technology. 2024. T. I.
- Electron-Ion-Plasma Equipment for Modification of the Surface of Materials and Products / Koval N. et al. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2023, vol. 87, no. S2, pp. S294-S300.
- Effect of Nitriding on the Microstructure and Mechanical Properties of AA7075 Alloy / Panchenko I.A., Konovalov S.V., Drobyshev V.K. et al. // Russ. J. Non-ferrous Metals. 2024. 65, 162–169. <https://doi.org/10.1134/S1067821225600048>
- Microstructural evolution and the effect of electron beam melting on the fatigue characteristics of 7075 Al alloy deposited by MIG arc additively manufacturing / Panchenko I.A., Gudala S., Labunskii D., Konovalov S. // International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM). 2024, vol. 19, no. 1, pp. 301–310.
- Исследование структуры и свойств алюминиевого сплава 7075, полученного проволочно-дуговым аддитивным способом / Д.Н. Лабунский, И.А. Панченко, С.В. Коновалов [и др.] // Ползуновский вестник. 2023. № 2. С. 147-154.
- Panchenko I.A., Drobyshev V.K., Bazhenova M.M. Layered instrumental indentation of alloy AA7075 obtained by the method of additive technologies // Fundamental'Nye problemy sovremennoego materialovedeniia (Basic Problems of Material Science (BPMS)). 2025. 22(1), 67-76 (In Russ.). DOI: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.01.006
- Domack M.J., Shapiro A.A., Messimer S.L. Effect of RRA thermal treatment and plasma processing on 7075-T6 alloy // Surf. Coat. Technol. 2019. T. 357. C. 123–131.
- Laser powder bed fusion of AA7075 alloy: Influence of process parameters on porosity and hot cracking / Stoprya W., Gruber K., Smolina I., Kuźnicka B. // Additive Manufacturing. 2020. vol. 35, art. 101345.
- Plasma nitriding of aluminium in a pulsed dc glow discharge of nitrogen / S. Naseer, F.U. Khan, N.U. Rehman, A. Qayyum, F. Rahman, M. Zakaullah // EPJ Appl. Phys. 2010, vol. 49, no. 2, pp. 21001.
- Meneses, W., Tuominen, J., Ylä-Autio, A., Wiikinkoski, O., Sabr, A., & Peura, P. Coaxial Wire Laser-based Additive Manufacturing of AA7075 with TiC Nanoparticles. 2023, 1296, 012033. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1296/1/012033>
- Study of Microstructural and Corrosion Properties of Aluminium Alloy 7075 after Plasma Nitriding / Ahmadi, Hae-rul & Aziz, Rizky & Suprapto, Suprapto & Sujitno, Tjipto & Hapsari, Sophie // Jurnal Sains Materi Indonesia. 2020. 21. 1. 10.17146/jsmi.2019.21.1.5649.
- Corrosion and tribocorrosion behavior of plasma nitrided AA7075 - T651 / Rocha, Letícia & Camarinha, Gabriela & Martins, Gislene & Çaha, İhsan & Alves, Alexandra & Takahashi, Renata & Toptan, Fatih & Reis // Danieli Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração. 2023. 20. e2866. 10.4322/2176-1523.20232866.
- Shahnawaz, M., Bashir, S., Shafique, M. A., & Hussain, T. Study the effects of nitrogen ion implantation on structural and mechanical properties of AA7075. 2018. 5(7), 076507. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/AACEB6>
- In situ and ex situ examination of plasma-assisted nitriding of aluminium alloys / Quast, M., Mayr, P., Stock, H.-R., Podlesak, H., & Wielage, B. // Surface & Coatings Technology. 2001. 135(2), 238–249. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(00\)00992-0](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(00)00992-0)
- Shin, D.-H., & Kim, S.-J. Effects of Hard Anodizing and Plasma Ion-Nitriding on Al Alloy for Hydrogen

- Embrittlement Portection. 2023.
<https://doi.org/10.14773/cst.2023.22.4.221>
18. Study of the influence of the RRA thermal treatment and plasma nitriding on corrosion behavior of 7075-T6 aluminum alloy / Savonov, G. da S., Camarinha, M. G. G., Rocha, L. O., Barboza, M. J. R., Martins, G. V., & Reis, D. A. P. // Surface & Coatings Technology. 2019. 374, 736–744. <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2019.04.095>
 19. Equipment and processes of vacuum electron-ion plasma surface engineering / Devyatkov, V. & Ivanov, Yu & Krynsina, Olga & Koval, Nikolay & Petrikova, Elizaveta & Shugurov, Vladimir // Vacuum. 2017. 143. 10.1016/j.vacuum.2017.04.016.

References

1. Khalid M.Y., Umer R., Khan K.A. Review of recent trends and developments in aluminium 7075 alloy and its metal matrix composites (MMCs) for aircraft applications. Results in Engineering. 2023;20.
2. Li S.S., Yue X., Li Q., Peng H.-L. Development and applications of aluminum alloys for aerospace industry. Journal of Materials Research and Technology. 2023;27:944-983.
3. Ekpemogu A.I., Abioye T.E., Cunningham C., Obolo R., Seman A.A., Ogedengbe T.I. A Review of Wire Arc Additive Manufacturing of High Strength 7xxx Series Aluminium Alloys. Advances in Science and Technology. 2024;1.
4. Koval N. et al. Electron-Ion-Plasma Equipment for Modification of the Surface of Materials and Products. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2023;87(82):S294-S300.
5. Panchenko I.A., Konovalov S.V., Drobyshev V.K. et al. Effect of Nitriding on the Microstructure and Mechanical Properties of AA7075 Alloy. Russ. J. Non-ferrous Metals. 2024;65:162-169.
<https://doi.org/10.1134/S1067821225600048>
6. Panchenko I.A., Gudala S., Labunskii D., Konovalov S. Microstructural evolution and the effect of electron beam melting on the fatigue characteristics of 7075 Al alloy deposited by MIG arc additively manufacturing. International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM). 2024;19(1):301-310.
7. Labunsky D.N., Panchenko I.A., Konovalov S.V. et al. Study of the structure and properties of aluminum alloy 7075 obtained by wire-arc additive method. Polzunovskiy vestnik [Polzunovskiy vestnik]. 2023;(2):147-154. (In Russ.)
8. Panchenko I.A. Drobyshev V.K., Bazhenova M.M. Layered instrumental indentation of alloy AA7075 obtained by the method of additive technologies. Fundamentalnye problemy sovremennoj materialovedeniya [Basic Problems of Material Science (BPMS)]. 2025;22(1):67-76 (InRuss.). doi:10.25712/ASTU.1811-1416.2025.01.006
9. Domack M.J., Shapiro A.A., Messimer S.L. Effect of RRA thermal treatment and plasma processing on 7075-T6 alloy. Surf. Coat. Technol. 2019;357:123-131
10. Stopyra W., Gruber K., Smolina I., Kužnicka B. Laser powder bed fusion of AA7075 alloy: Influence of process parameters on porosity and hot cracking. Additive Manufacturing. 2020;35:101345.
11. Naseer S., Khan F.U., Rehman N.U., Qayyum A., Rahman F., Zakaullah M. Plasma nitriding of aluminium in a pulsed dc glow discharge of nitrogen. EPJ Appl. Phys. 2010;49(2):21001.
12. Meneses W., Tuominen J., Ylä-Autio A., Wiikinkoski O., Sabr A., Peura P. Coaxial Wire Laser-based Additive Manufacturing of AA7075 with TiC Nanoparticles. 2023;1296:012033. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1296/1/012033>
13. Ahmadi Haerul, Aziz Rizky, Suprapto, Sujitno Tjipto, Hapsari Sophie. Study of Microstructural and Corrosion Properties of Aluminium Alloy 7075 after Plasma Nitriding. Jurnal Sains Materi Indonesia. 2020;21:1. 10.17146/jsmi.2019.21.1.5649.
14. Rocha Letícia, Camarinha Gabriela, Martins Gislene, Çaha İhsan, Alves Alexandra, Takahashi Renata, Toptan, Fatih Reis Danieli. Corrosion and tribocorrosion behavior of plasma nitrided AA7075 - T651. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração. 2023;20:e2866. 10.4322/2176-1523.20232866.
15. Shah Nawaz M., Bashir S., Shafique M. A., Hussain T. Study the effects of nitrogen ion implantation on structural and mechanical properties of AA7075. 2018;5(7):076507. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/AACEB6>
16. Quast M., Mayr P., Stock H.-R., Podlesak H., Wielage B. In situ and ex situ examination of plasma-assisted nitriding of aluminium alloys. Surface & Coatings Technology. 2001;135(2):238-249. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(00\)00992-0](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(00)00992-0)
17. Shin D.-H., Kim S.-J. Effects of Hard Anodizing and Plasma Ion-Nitriding on Al Alloy for Hydrogen Embrittlement Portection. 2023.
<https://doi.org/10.14773/cst.2023.22.4.221>
18. Savonov G.da S., Camarinha M.G.G., Rocha L.O., Barboza M.J.R., Martins G.V., Reis D.A.P. Study of the influence of the RRA thermal treatment and plasma nitriding on corrosion behavior of 7075-T6 aluminum alloy. Surface & Coatings Technology. 2019;374:736-744. <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2019.04.095>
19. Devyatkov V., Ivanov Yu., Krynsina Olga, Koval Nikolay, Petrikova Elizaveta, Shugurov Vladimir. Equipment and processes of vacuum electron-ion plasma surface engineering. Vacuum. 2017;143. 10.1016/j.vacuum.2017.04.016.

Поступила 08.05.2025; принятa к публикации 27.05.2025; опубликована 25.12.2025
 Submitted 08/05/2025; revised 27/05/2025; published 25/12/2025

Панченко Ирина Алексеевна – кандидат технических наук, заведующий научной лабораторией электронной микроскопии и обработки изображений,
 Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия.
 Email: i.r.i.ss@yandex.ru. ORCID 0000-0002-1631-9644

Дробышев Владислав Константинович – научный сотрудник лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений,
Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия.
Email: drobyshev_v.k@mail.ru. ORCID 0000-0002-1532-9226

Лабунский Дмитрий Николаевич – аспирант,
Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия.
Email: dabess@yandex.ru

Коновалов Сергей Валерьевич – доктор технических наук, профессор,
проректор по научной и инновационной деятельности,
Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия.
Email: konovalov@sibsiu.ru. ORCID 0000-0003-4809-8660

Irina A. Panchenko – PhD (Eng.), Head of the Scientific Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing,
Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.
Email: i.r.i.ss@yandex.ru. ORCID 0000-0002-1631-9644

Vladislav K. Drobyshev – Researcher at the Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing,
Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.
Email: drobyshev_v.k@mail.ru. ORCID 0000-0002-1532-9226

Dmitry N. Labunskiy – Postgraduate Student,
Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.
Email: dabess@yandex.ru.

Sergey V. Konovalov – DrSc (Eng.), Professor, Vice-Rector for Scientific and Innovative Activities,
Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.
Email: konovalov@sibsiu.ru. ORCID 0000-0003-4809-8660