



РАЗДЕЛ 2. ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ

Научная статья

2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)
УДК 621.791.1:669.715

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.04.023

EDN: NOIKJO

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 7075

Ирина Алексеевна Панченко¹, Сергей Валерьевич Коновалов²,
Владислав Константинович Дробышев³,
Дмитрий Николаевич Лабунский⁴

^{1, 2, 3, 4} ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк, Россия

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

² konovalov@sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4809-8660>

³ drobyshev_v.k@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1532-9226>

⁴ info@kana-t.ru

Аннотация. Исследованы механические характеристики алюминиевого сплава марки 7075 модифицированного электронно-пучковой обработкой. Образцы подвергали двум видам механических испытаний: одностороннее растяжение с постоянной скоростью и усталостное нагружение. Состояние элементного и фазового состава сплавов системы Al-Zn-Mg-Cu изучали методами сканирующей электронной микроскопии. В сплаве AA7075 после электронно-пучковой модификации основную роль играет α -Al матрица, в которой в твёрдом растворе находятся легирующие элементы Zn, Mg и Cu, а также Fe, Si и Mn. При локальном повышении концентраций Zn и Mg происходит формирование упрочняющей η -фазы $(Mg(Zn,Cu))_2$, а при присутствии Cu и Mg выделяются частицы S-фазы (Al_2CuMg) . В зонах с высоким содержанием меди (≥ 35 ат. % Cu) и присутствием Fe/Ni образуются интерметаллиды θ -фазы (Al_2Cu) и сложные Al-Fe-Ni-Cu соединения, тогда как отдельные участки с преобладанием Zn и Cu (28–46 ат. % Zn, 27–40 ат. % Cu) характеризуются наличием Cu-Zn интерметаллидов. Электронно-пучковая обработка (ЭПО) алюминиевого сплава 7075, полученного аддитивным методом, увеличивает предел прочности в 2 раза (с 100,9 до 199,3). Это достигнуто за счет устранения дефектов, микроструктурных изменений, снятия остаточных напряжений от послойного наплавления при аддитивном производстве. После усталостных испытаний образец, изготовленный аддитивным способом, демонстрирует $\approx 235\,000$ циклов до разрушения, а комбинация с ЭПО повышает выносливость до $260\,000$ циклов. Стандартное отклонение $\sigma \approx 5\text{--}8\%$ для прочности, $\sigma \approx 10\text{--}15\%$ для усталости, подтверждает, что метод электронно-пучковой обработки нивелирует недостатки аддитивного производства, обеспечивая одновременный рост прочности, пластичности и усталостной долговечности сплава 7075.

Ключевые слова: сплав 7075, растяжение, усталость, микроструктура, электронно-пучковая обработка.

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

Для цитирования: Панченко И. А., Коновалов С. В., Дробышев В. К., Лабунский Д. Н. Влияние электронно-пучковой обработки на механические свойства алюминиевого сплава 7075 // Ползуновский вестник. 2025. № 4, С. 142–146. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.04.023. EDN: <https://elibrary.ru/NOIKJO>.

Original article

EFFECT OF ELECTRON BEAM PROCESSING ON MECHANICAL PROPERTIES OF ALUMINUM ALLOY 7075

Irina A. Panchenko¹, Sergei V. Konovalov², Vladislav K. Drobyshev³,
Dmitry N. Labunsky⁴

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

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

² konovalov@sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4809-8660>

³ drobyshev_v.k@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1532-9226>

⁴ info@kana-t.ru

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

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 7075

Abstract. The mechanical properties of aluminum alloy grade 7075 modified by electron-beam processing were studied. The samples were subjected to two types of mechanical tests: uniaxial tension at a constant rate and fatigue loading. The state of the elemental and phase composition of the Al-Zn-Mg-Cu alloys was studied using scanning electron microscopy. In the AA7075 alloy after electron-beam modification, the main role is played by the α -Al matrix, in which the alloying elements Zn, Mg and Cu, as well as Fe, Si and Mn are in solid solution. With a local increase in the concentrations of Zn and Mg, the strengthening η -phase ($Mg(Zn,Cu)_2$) is formed, and in the presence of Cu and Mg, particles of the S-phase (Al_2CuMg) are released. In areas with high copper content (≥ 35 at. % Cu) and the presence of Fe/Ni, θ -phase intermetallic compounds (Al_2Cu) and complex Al-Fe-Ni-Cu compounds are formed, whereas individual areas with a predominance of Zn and Cu (28–46 at. % Zn, 27–40 at. % Cu) are characterized by the presence of Cu-Zn intermetallic compounds. Electron beam processing (EBP) of 7075 aluminum alloy obtained by the additive method increases the ultimate strength by 2 times (from 100.9 to 199.3). This is achieved by eliminating defects, microstructural changes, and relieving residual stresses from layer-by-layer deposition during additive manufacturing. After fatigue testing, the additively manufactured sample demonstrates $\approx 235,000$ cycles before failure (versus 130,000 for the traditional analogue), and the combination with EPO increases the endurance to 260,000 cycles. The standard deviation of $\sigma \approx 5$ –8 % for strength, $\sigma \approx 10$ –15 % for fatigue confirms that the electron beam processing method eliminates the disadvantages of additive manufacturing, providing a simultaneous increase in strength, ductility and fatigue life of the 7075 alloy.

Key words: Alloy 7075, tension, fatigue, microstructure, electron beam processing.

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

For citation: Panchenko, I. A., Konovalov, S. V., Drobyshev, V. K. & Labunsky, D. N. (2025). Effect of electron beam processing on mechanical properties of aluminum alloy 7075. *Polzunovskiy vestnik*, (4), 142-146. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.04.023. EDN: <https://elibrary.ru/NOIKJO>.

ВВЕДЕНИЕ

В ряде современных отраслей промышленности, прежде всего связанных с машиностроением, алюминиевый сплав марки 7075 системы Al-Zn-Mg-Cu привлекает внимание исследователей благодаря сочетанию высокой прочности по отношению к массе [1]. Вместе с тем, ограниченная коррозионная стойкость, сложность сварки и недостаточная пластичность при комнатной температуре ставят задачи оптимизации микроструктуры и технологии обработки сплава [2]. В литературе активно рассматриваются методы термической обработки, введениеnanoструктур и композитных усилителей, а также применение аддитивных и электронно-лучевых технологий для повышения эксплуатационных характеристик сплавов системы Al-Zn-Mg-Cu систем [3-4]. Сплав 7075, широко используется для изготовления фюзеляжей, конструктивных элементов двигателей и топливных баков, где критичны как прочность при растяжении более 200 МПа и относительной деформации порядка 10 %, так и усталостная долговечность [5]. В автомобильной промышленности 7075-й сплав используют в узлах подвески, шасси и гоночных компонентах благодаря хорошей виброустойчивости и износостойкости [6]. 7075-й сплав достигает одного из самых высоких показателей прочности среди алюминиевых сплавов благодаря наличию фазовых упрочняющих осадков $MgZn_2$ и Cu-обогащенных зон [1]. Это делает его незаменимым в тех областях, где на первое место выходят требования к минимизации массы при сохранении механической прочности. Работы по модификации режимов растворения и старения (T6, RRA, тройное старение) направлены на регулирование размера и распределения осадков η -фазы для баланса прочности, и пластичности [7]. Введение наночастиц (TiC, SiC, B_4C) позволяет дополнительно упрочнить сплав за счёт препятствования движению дислокаций и зернограничного укрепления [8]. Исследования аддитивного изготовления для ремонта изделий из AA7075-T651 показывают, что управляемое осаждение слоя металла сохраняет исходную микроструктуру и прочность материала [9]. Применение электронно-пучковой модификации и лазерных мето-

дов поверхностного упрочнения способствует образованию остаточных сжимающих напряжений и повышению коррозионной стойкости [10, 11]. Влияние электронно-лучевой обработки на алюминиевые сплавы приводит к улучшению микроструктурных и механических свойств. Этот метод обработки модифицирует поверхностные слои сплавов, что приводит к повышению твердости, износстойкости.

При обработке электронным пучком образуется модифицированный поверхностный слой, обычно глубиной до 200 мкм, характеризующийся перенасыщенным твердым раствором на основе алюминия, который заменяет интерметаллические фазы, присутствующие в исходном сплаве [12,13]. Образуются высокоскоростные ячеистые кристаллизационные структуры, способствующие улучшению размеров зерен и механических свойств. Микротвердость алюминиевых сплавов может увеличиться более чем на 30 % из-за механизмов упрочнения, активируемых электронно-лучевой обработкой. Заметно улучшена износстойкость; например, исследование сплавов Al-Si показало увеличение износстойкости после обработки на 29-32 % [14]. Электронно-лучевая обработка способствует лучшему анодированию сплавов Al-Si путем рафинирования частиц кремния, тем самым улучшая механические свойства поверхности и коррозионную стойкость [15]. Хотя электронно-лучевая обработка дает значительные преимущества, она также может создавать проблемы, такие как возможность образования микротрещин и дефектов поверхности, которые могут повлиять на долгосрочную производительность в некоторых областях применения.

Продолжающееся совершенствование технологий обработки и мультидисциплинарные исследования микроструктуры сплава 7075 остаются ключевыми для расширения областей его применения. Комбинация классических методов обработки и инновационных подходов (аддитивные технологии [16-19], электронно-пучковая обработка) открывает перспективы получения материалов с уникальным сочетанием прочности, пластичности и долговечности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве материала исследований использо-

ван алюминиевый сплав марки 7075, образцы на рас-tяжение имели форму пропорциональных лопаток и имели следующие размеры: толщина 3 мм; ширина 14 мм; расчетная длина 60 мм (рис. 1). Образцы для исследований усталостной долговечности имели форму параллелепипеда размерами 4x12x130 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 механической шлифовке наждачной бумагой с уменьшением дисперсности абразивных частиц, поскольку, качество подготовки поверхности изделий влияет на показатели сопротивления усталости. Модифицирование наплавленного слоя осуществляли, облучая поверхность высокointенсивным электронным пучком на установке "СОЛО" [20] в режиме плавления и высокоскоростной кристаллизации. Данная установка разработана институтом сильноточной электроники СО РАН в Томске.



Рисунок 1 – Внешний вид образца алюминиевого сплава 7075 для механических испытаний после электронно-пучковой обработки

Figure 1 – Appearance of the 7075-aluminum alloy specimen for mechanical testing after electron beam treatment

Механические испытания алюминиевого сплава марки 7075 поверхностью 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 K), а частота нагружений образцов изгибом составляла 2,3 Гц. Для достижения минимального порога в 10^5 циклов до появления трещин экспериментально подбирались пиковье значения напряжения и амплитуды циклических воздействий.

Исследования структуры излома и элементного состава осуществляли на сканирующем электронном микроскопе «KYKY EM-6900», с термоэмиссионным вольфрамовым катодом и приставкой (Oxford Xplore) для микрорентгеноспектрального анализа элементного состава. Напряжение, разгоняющее электроны в электронном пучке, составило 25 кэВ, ток накала составлял 2,14 А, ток эмиссии составил $150 \cdot 10^{-6}$ А. Регистрация сигнала осуществлялась детектором вторичных электронов типа Эверхарта-Торнли (SE) и обратно отраженных электронов (BSE), позволяющим получать фазовый контраст от элементов с различным атомным номером.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Образец после электронно-пучковой обработки (рис. 2) продемонстрировал почти вдвое более высокий предел прочности (199,3 МПа) и в четыре раза большую относительную деформацию (8,10 %) по сравнению с необлученным образцом (рисунок 2) (100,9 МПа и 2,10 % соответственно). Что указывает на одновременное улучшение прочности и пластичности. Возможными причинами улучшения служат: устранение дефектов аддитивного производства, а именно снятие остаточных напряжений при ЭПО, возникшие при послойном наплавлении, также ЭПО, как высокознергетический процесс, переплавляет поверхность, устранив микропоры и трещины, характерные для аддитивных материалов. Электронно-пучковая обработка, формирует более мелкие и однородные зерна с растворение хрупких интерметаллидов (например, MgZn₂ в сплаве 7075) и образование локальных фазовых превращений в поверхностном слое под действием высокознергетического электронного пучка.

На графике (рис. 2) представлено несколько вариантов исследования алюминиевого сплава 7075: аддитивным способом и с применением электронно-пучковой обработки (ЭПО). Применение аддитивных технологий и электронно-пучковой обработки увеличивает количество циклов до разрушения. После усталостных испытаний образец, изготовленный аддитивным способом, демонстрирует $\approx 235\,000$ циклов до разрушения, а комбинация с ЭПО повышает выносимость до $260\,000$ циклов. Стандартное отклонение $\sigma \approx 5-8\%$ для прочности, $\sigma \approx 10-15\%$ для усталости, подтверждает, что метод электронно-пучковой обработки нивелирует недостатки аддитивного производства, обеспечивая одновременный рост прочности, пластичности и усталостной долговечности сплава 7075.

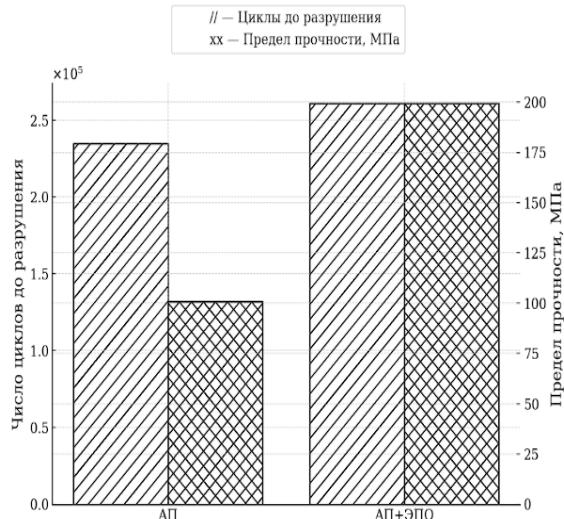


Рисунок 2 – Количество циклов до усталостного разрушения и предел прочности алюминиевого сплава 7075, изготовленного аддитивным производством (АП) и дополнительно облученного электронно-пучковой обработкой (ЭПО)

Figure 2 – Number of cycles to fatigue failure and tensile strength of the 7075-aluminum alloy produced by additive manufacturing (AM) and additionally treated with electron beam processing (EBP)

Микроструктура излома после испытания на усталостную долговечность аддитивно изготовленного сплава 7075 (рисунок 3) характеризуется сложным распределением интерметаллидов (MgZn₂, Al₂Cu, Al₂CuMg, CuZn) и перенасыщенного твердого раство-

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 7075

ра α -Al. В результате энергодисперсионного анализа (EDS) алюминиевого сплава AA7075 после электронно-пучковой обработки выявлены различные фазы и зоны распределения легирующих элементов.

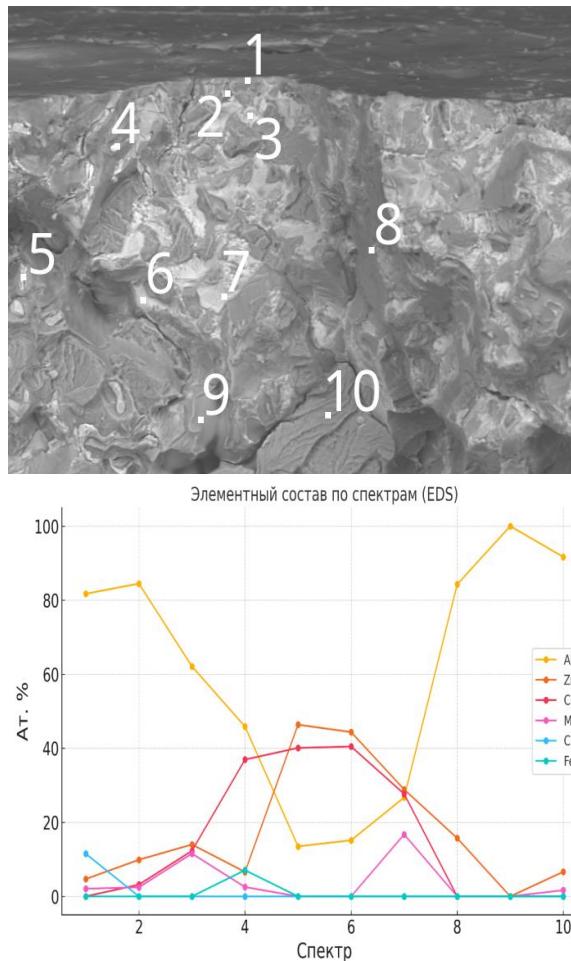


Рисунок 3 – Микроструктура излома после усталостного разрушения и элементный состав по спектрам алюминиевого сплава 7075 модифицированного электронно-пучковой обработкой

Figure 3 – Fracture microstructure after fatigue failure and elemental composition from spectra of the 7075-aluminum alloy modified by electron beam processing

Основная матрица (α -Al) представляет собой твёрдый раствор алюминия с растворёнными Zn, Mg, Cu, Fe, Si и Mn. В спектрах 1, 2, 8 и 10 ($Al > 80$ ат. %, Zn 4–16 ат. %, Mg 1–2 ат. %, Cu до 3 ат. %) фиксируются однородные области матрицы с преобладанием алюминия и разбросом легирующих элементов ниже 10 ат. %. В спектре 3 ($Al \approx 62$ ат. %, Zn ≈ 14 ат. %, Cu ≈ 12 ат. %, Mg ≈ 12 ат. %) наблюдается смесь упрочняющих интерметаллидов ($MgZn_2$ с частичным замещением Zn на Cu) и S-фазы (Al_2CuMg), причём совокупная доля вторичных фаз достигает ≈ 38 ат. %. Такая комбинация фаз характерна для старения сплава в режиме T6 и обеспечивает оптимальную прочность и пластичность материала. Точка 4 характеризуется высоким содержанием меди (≈ 37 ат. %) и наличием Fe (~1 ат. %) и Ni (~7 ат. %), что указывает на образование θ -фаз (Al_2Cu) и сложных интерметаллидов Al – Fe – Ni – Cu , вероятно Al_7Cu_2Fe или Al_3Ni_2 .

Эти включения формируются при выплавке и могут служить центрами зарождения трещин при циклических нагрузках. Интерметаллидные зоны в спектрах 5, 6 и 7 (Zn 28–46 ат. %, Cu 27–40 ат. %) представляют собой Cu-Zn соединения с частичным растворением Mg в спектре 7. Такие фазы обеспечивают дополнительное упрочнение, но могут снижать ударную вязкость. Спектр 9 (100 ат. % Al) демонстрирует практически чистую матрицу, где содержание легирующих элементов ниже уровня детектирования энергодисперсионной спектрометрии.

ВЫВОДЫ

В заключении можно отметить, что всесторонне изучение характеристик упрочненного алюминиевого сплава AA7075 методами современного физического материаловедения выявило значительные преобразования, как качественные, так и количественные.

1. Электронно-пучковая обработка (ЭПО) алюминиевого сплава 7075 почти удваивает предел прочности (с 100,9 до 199,3 Н/мм²) и увеличивает пластичность в четыре раза (с 2,10 % до 8,10 %). Одновременное повышение прочности и пластичности достигается за счёт снятия остаточных напряжений, образованных после аддитивного изготовления изделия, микропор и трещин в поверхностном слое, и растворения хрупких интерметаллидов под действием высокоэнергетического электронного пучка.

2. Испытания на усталостную долговечность демонстрируют, что применение аддитивной технологии и электронно-пучковой обработки увеличивает число циклов до разрушения ($\approx 260\,000$ циклов). Несмотря на статистический разброс значений, различия между аддитивным и ЭПО-модифицированным материалом подтверждают эффективность комбинированных технологий для повышения прочностных и усталостных свойств алюминиевого сплава 7075.

3. Микрорентгеноспектральный анализ выявил, что, основная матрица (α -Al) представляет собой твёрдый раствор алюминия с растворёнными элементами Zn, Mg, Cu, Fe, Si и Mn. Также наблюдается смесь упрочняющих интерметаллидов ($MgZn_2$) и S-фазы (Al_2CuMg). В локальных областях сплава обнаружено высокое содержание меди (~37 ат. %) и наличием Fe (~1 ат. %) и Ni (~7 ат. %), что указывает на образование θ -фаз (Al_2Cu) и сложных интерметаллидов Al – Fe – Ni – Cu , вероятно Al_7Cu_2Fe или Al_3Ni_2 . Эти включения формируются при выплавке и могут служить центрами зарождения трещин при циклических нагрузках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Khalid, M. Y., Umer, R., & Khan, K. A. (2023). Review of recent trends and developments in aluminium 7075 alloys and metal matrix composites (MMCs) for aircraft applications. *Results in Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101372>.
2. Wang, Jue & Li, Faguo. (2023). Research Status and Prospective Properties of the Al-Zn-Mg-Cu Series Aluminum Alloys. *Metals*. 13. 1329. 10.3390/met13081329.
3. Li, Sen & Zhang, Linjie & Ning, Jie & Xiang, Wang & Zhang, Gui-Feng & Zhang, Jianxun & Na, Suck-Joo. (2020). Microstructures and mechanical properties of Al-Zn-Mg aluminium alloy samples produced by wire + arc additive manufacturing. *Journal of Materials Research and Technology*. 9. 13770-13780. 10.1016/j.jmrt.2020.09.114.

4. Bouzekova-Penkova, Anna & Miteva, Adelina. (2022). Some Aerospace Applications of 7075 (B95) Aluminium Alloy. *Aerospace Research in Bulgaria*. 34. 165-179. 10.3897/arb.v34.e15.
- 5 Shen, Guwei & Chen, Xiaolin & Yan, Jie & Fan, Longyi & Yang, Zhou & Zhang, Jin & Guan, Ren-guo. (2023). A Review of Progress in the Study of Al-Mg-Zn(-Cu) Wrought Alloys. *Metals*. 13. 345. 10.3390/met13020345.
6. Reda, Y. & Yehia, Hossam & El-Shamy, A.. (2022). Microstructural and mechanical properties of Al-Zn alloy 7075 during RRA and triple aging. *Egyptian Journal of Petroleum*. 31. 9-13. 10.1016/j.ejpe.2021.12.001.
7. Zuo, Min & Sokoluk, Maximilian & Cao, Chezheng & Yuan, Jie & Zheng, Shiqi & Li, Xiaochun. (2019). Microstructure Control and Performance Evolution of Aluminum Alloy 7075 by Nano-Treating. *Scientific Reports*. 9. 10.1038/s41598-019-47182-9.
8. Imran, Mohammed & Khan, A.R.. (2019). Characterization of Al-7075 metal matrix composites: A review. *Journal of Materials Research and Technology*. 8.10.1016/j.jmrt.2017.10.012.
9. S. Akula, K.P. Karunakaran, Hybrid adaptive layer manufacturing: an intelligent art of direct metal rapid tooling process, *Robot. Comput. Integrated Manuf.* 22 (2006) 113e123.
10. J. Xiong, G.J. Zhang, Adaptive control of deposited height in GMAW-based layer additive manufacturing, *J. Mater. Process. Technol.* 214 (2014) 962e968.
11. Jaeger, Pedro & Schwedersky, Mateus & Maciel, Pedro & Galeazzi, Daniel & Silva, Régis. (2021). Welding Beads Overlapping Algorithm dedicated to WAAM. 10.26678/ABCM.COSEM2021.CO2021-1752.
12. Myla, D. E., Bryukhovetsky, V. V., Lytvynenko, V. V., Petrushenko, S. I., Nevgasimov, O. O., Lonin, Yu. F., Ponomarev, A. G., & Uvarov, V. T. (2022). Microstructure and property modifications in surface layers of a aa6111 aluminum alloy induced by high-current pulsed relativistic electron beam. *Problems of Atomic Science and Technology*, 25–31. <https://doi.org/10.46813/2022-138-025>.
13. Bestetti, M., Huspek, A. L., Agdokan, B., Akhmadeev, Y. H., Petrikova, E., Ivanov, Y. F., Moskvin, P. V., & Koval, N. N. (2023). Investigation on the properties of anodic oxides grown on aluminium-silicon alloys irradiated by pulsed electron beam. *Materials. Technologies. Design.* https://doi.org/10.54708/26587572_2023_5313109.
14. Zagulyaev, D. V., Shlyarov, V., Leonov, A. A., Abaturova, A., & Semin, A. (2020). Wear resistance evolution of Al-Si aluminium alloy after electron beam processing. 2310, 020358. <https://doi.org/10.1063/5.0034057>.
15. Bryukhovetsky, V. V., Klepikov, V. F., Lytvynenko, V. V., Myla, D. E., Lonin, Yu. F., & Ponomarev, A. G. (2022). The structural phase state and strength properties of the surface layer of AA6111-T4 aluminum alloy irradiated by the high-current electron beam. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section B-Beam Interactions with Materials and Atoms*, 519, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2022.03.008>.
16. D.Q. Yang, C.J. He, G.J. Zhang, forming characteristics of thin-wall steel parts by double electrode GMAW based additive manufacturing, *J. Mater. Process. Tech-nol.* 227 (2016) 153e160.
17. A. Thangarasu, N. Murugan, I. Dinaharan, S.J. Vijay, Synthesis and characterization of titanium carbide particulate reinforced AA6082 aluminium alloy composites via friction stir processing, *Arch. Civ. Mech. Eng* 15 (2015) 324–334.
18. 1. Z. Liu, D. Zhao, P. Wang, M. Yan, C. Yang, Z. Chen, J. Lu, and Z. Lu, Additive Manufacturing of Metals: Microstructure Evolution and Multistage Control, *J. Mater. Sci. Technol.*, Elsevier Ltd, 2022, 100, p 224–236, doi:10.1016/j.jmst.2021.06.011.
19. Z. Zhang, C. Sun, X. Xu, and L. Liu, Surface Quality and Forming Characteristics of Thin-Wall Aluminium Alloy Parts Manufactured by Laser Assisted MIG Arc Additive Manufacturing, *Int. J. Light. Mater. Manuf.*, Elsevier.
20. Koval N., Akhmadeev Y. H., Denisov V. V., Shugurov V. V., Ostroverkhov E. V. Electron-Ion-Plasma Equipment for Modification of the Surface of Materials and Products // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2023. Vol. 87. No. S2. p. S294-S300.

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.

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.

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

Статья поступила в редакцию 07 июня 2025; одобрена после рецензирования 24 ноября 2025; принятая к публикации 28 ноября 2025.

The article was received by the editorial board on 07 June 2025; approved after editing on 24 Nov 2025; accepted for publication on 28 Nov 2025.