

*Оригинальная статья*

УДК 669.1

DOI: 10.57070/2304-4497-2023-2(44)-13-19

**ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ  
АДДИТИВНОГО СПЛАВА Al – Mg**

© 2023 г. Я. Гэн<sup>1</sup>, И. А. Панченко<sup>2</sup>, С. В. Коновалов<sup>2</sup>, Ю. Ф. Иванов<sup>3</sup>, С. Чен<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Школа машиностроения и электротехники, Университет Вэньчжоу (Китай, 325035, Вэньчжоу, Южный кампус, административное здание, 212 А)

<sup>2</sup>Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

<sup>3</sup>Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН (Россия, 634055, Томск, пр. Академический, 2/3)

**Аннотация.** Алюминиевый сплав серии 5xxx широко используется в автомобильной и судостроительной промышленности из-за его низкой плотности, высокой прочности на растяжение и хорошей коррозионной стойкости. В работе исследованы микроструктура и фазовый состав сплава Al – Mg, полученного методом проволоочно-дугового аддитивного производства с дальнейшей электронно-пучковой обработкой. Целью настоящего исследования являлось изучение влияния электронно-пучковой обработки на структуру Al – Mg сплава. Методами сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии проведены исследования структуры Al – Mg сплава, полученного методом проволоочно-дугового аддитивного производства. Рассмотрено влияние электронно-пучковой обработки при различных плотностях энергии на образцы из сплава Al – Mg, изготовленные проволоочно-дуговым аддитивным способом. Показано, что независимо от режимов электронно-пучковой обработки фазовый состав в поверхностном слое не изменяется, однако происходит увеличение средней плотности дислокаций. Проведены экспериментальные исследования фазового состава и структуры сплава Al – Mg. Определено и проанализировано влияние разных режимов электронно-пучковой обработки на изменение микроструктуры, фазовый состав и плотность дислокаций аддитивно-изготовленного Al – Mg сплава. Показано, что с увеличением плотности энергии пучка электронов размер зерен увеличивается, а содержание магния на поверхности Al – Mg сплава уменьшается. Показано, что независимо от режимов электронно-пучковой обработки фазовый состав поверхностного слоя не изменяется, однако происходит увеличение средней плотности дислокаций.

**Ключевые слова:** сплав Al – Mg, проволоочно-дуговое аддитивное производство, электронно-пучковая обработка, микроструктура, фазовый состав

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

**Для цитирования:** Гэн Я., Панченко И.А., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф., Чен С. Влияние электронно-пучковой обработки на структуру аддитивного сплава Al – Mg // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2023. № 2 (44). С. 13–19. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-2\(44\)-13-19](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-2(44)-13-19)

*Original article*

**EFFECT OF ELECTRON-BEAM PROCESSING ON THE STRUCTURE AND  
PROPERTIES OF THE Al – Mg ADDITIVE ALLOY**

© 2023 Ya. Geng<sup>1</sup>, I. A. Panchenko<sup>2</sup>, S. V. Konovalov<sup>2</sup>, Yu. F. Ivanov<sup>3</sup>, X. Chen<sup>5</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical and Electrical Engineering, Wenzhou University (China, 325035 Wenzhou, South Campus, 212 A)

<sup>2</sup>Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)

<sup>3</sup>Institute of High-Current Electronics SB RAS (2/3 Akademicheskoy Ave., Tomsk, 634055, Russian Federation)

**Abstract.** 5xxx series aluminum alloy is widely used in automotive and shipbuilding industries because of its low density, high tensile strength and good corrosion resistance. In this work, the microstructure and phase composition of the Al – Mg alloy, obtained by the method of wire-arc additive manufacturing with further electron-beam processing, were studied. The purpose of this study is to study the effect of electron beam processing on the structure of Al – Mg alloy. Scanning and transmission electron microscopy was used to study the structure of an Al – Mg alloy obtained by wire-arc additive manufacturing. The influence of electron-beam processing at different energy densities for Al – Mg alloy samples fabricated by the wire-arc additive method is considered. It is shown that, regardless of the modes of electron-beam processing, the phase composition in the surface layer does not change, but the average dislocation density increases. Experimental studies of the phase composition and structure of the Al – Mg alloy were carried out. The influence of different modes of electron-beam processing on the change in the microstructure, phase composition, and dislocation density of the additively fabricated Al – Mg alloy has been determined and analyzed. It is shown that with an increase in the energy density of the electron beam, the grain size increases, and the magnesium content on the surface of the Al – Mg alloy decreases. It is shown that, regardless of the modes of electron-beam processing, the phase composition of the surface layer does not change, but the average dislocation density increases.

**Keywords:** Al – Mg alloy, wire-arc additive manufacturing, electron-beam processing, microstructure, phase composition

**Funding.** The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation grant no. 22-79-10245, <https://rscf.ru/project/22-79-10245/>.

**For citation:** Geng Ya., Panchenko I.A., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Chen X. Effect of electron beam processing on the structure and properties of the Al – Mg additive alloys. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2023, no. 2 (44), pp. 13–19. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-2\(44\)-13-19](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-2(44)-13-19)

## Введение

Алюминиевые сплавы серии 5xxx обладают высокой прочностью, отличной коррозионной стойкостью, низкой плотностью и хорошей формруемостью [1 – 4]. Благодаря этим преимуществам они являются наиболее подходящими для изготовления элементов конструкций транспортных средств [5, 6]. Проволочно-дуговое аддитивное производство в последнее время находит применение при изготовлении крупных металлических компонентов благодаря низкой стоимости сварочного комплекса и малым материальным затратам на проволоку по сравнению с порошком, используемым при изготовлении изделий методом селективного лазерного сплавления [7, 8]. Кроме того, технология проволочно-дугового аддитивного производства представляет собой экономичное решение для производства крупных компонентов и деталей сложной формы. При использовании технологии переноса холодного металла, в сравнении с другими методами, уменьшается разбрызгивание металла и теплопроводность создаваемой детали, что позволяет облегчить аддитивное производство крупных компонентов сложной формы из алюминиевых спла-

вов. Проволочно-дуговое аддитивное производство на основе холодного переноса металла является экономичным и быстрым методом создания прототипов высококачественных металлических деталей, однако при применении данной технологии существуют проблемы, связанные с особенностями зеренной структуры. Для решения применяется один из современных методов энергетического поверхностного модифицирования – электронно-пучковая обработка (ЭПО), которая позволяет существенно изменять механические свойства и микроструктуру поверхности [9 – 11]. Однако ее влияние на структуру, фазовый состав и механические свойства Al – Mg сплава, полученного проволочно-дуговым аддитивным способом, практически не изучены.

## Методы и принципы исследования

Образцы из сплава Al – Mg изготавливали проволочно-дуговым аддитивным способом, основанным на холодном переносе металла. Форма и размер заготовок, получаемых прово-

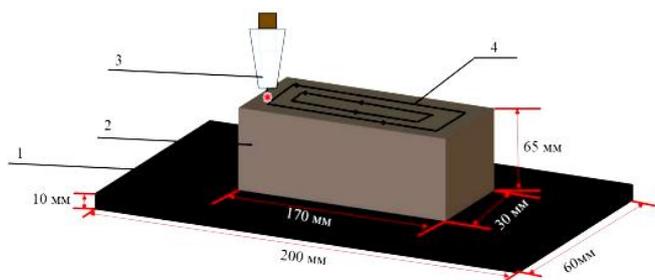


Рис. 1. Схема образца из сплава Al – Mg, изготовленного методом WAAM:

1 – подложка; 2 – образец Al – Mg; 3 – сварочный наконечник; 4 – направление передвижения наплавки

Fig. 1. Scheme of a sample from an Al – Mg alloy made by the WAAM method:

1 – the substrate; 2 – the Al – Mg sample; 3 – the welding tip; 4 – the direction of movement of the surfacing

лочно-дуговым аддитивным способом, а также траектория наплавки показаны на рис. 1.

Получение объемных образцов осуществлено в защитном газе (99,99 % аргона) с помощью комплекса, состоящего из 6-осевого робота FANUC и его контроллера, источника холодного переноса металла Fronius. В таблице представлен химический состав основы (подложки) и сварочной проволоки из Al – Mg сплава.

Электронно-пучковая обработка (ЭПО) поверхности образцов осуществлена на установке «СОЛО» (Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск). Обработку проводили при следующих параметрах: плотность энергии пучка электронов ( $E_s$ ) 5, 10 и 15 Дж/см<sup>2</sup>; длительность импульса ( $\tau$ ) 200 мкс; количество импульсов ( $N$ ) 3; частота ( $f$ ) следования импульсов 0,3 Гц; энергия электронов 18 кэВ; рабочее давление 0,02 Па; рабочий газ аргон [12, 13].

Исследования структуры и фазового состава поверхности образцов из Al – Mg сплава до и после электронно-пучковой обработки выполнены с использованием рентгеноструктурного анализа, методов сканирующей и просвечивающей дифракционной электронной микроскопии.

### Основные результаты

Проанализировано влияние электронно-пучковой обработки на структуру и свойства аддитивного сплава Al – Mg. Структура поверх

ности образцов сплава Al – Mg, обработанных импульсным электронным пучком при различных режимах, проанализирована методами сканирующей электронной микроскопии.

Установлено, что с увеличением плотности энергии пучка электронов размер зерен увеличивается, а содержание магния на поверхности сплава Al – Mg уменьшается. На рис. 2 показана структура поперечного сечения образца сплава Al – Mg. Облучение электронным пучком поверхности образца сопровождается преобразованием структуры поверхностного слоя.

Как показано на рис. 2, а, микроструктура образца после обработки с  $E_s = 5$  Дж/см<sup>2</sup> состоит из столбчатых зерен и включений черного цвета. Как указано в предыдущих исследованиях, основная фаза включает  $\alpha$ - фазу (Al) и  $\beta$ -фазу (Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub>). При  $E_s < 10$  Дж/см<sup>2</sup> также нет изменений в необработанном металле, но поверхностный слой отличается от того, который был при 5 Дж/см<sup>2</sup>, что видно на рис. 2, б.

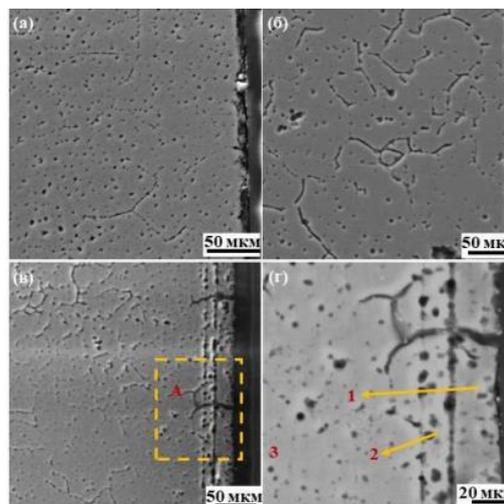


Рис. 2. СЭМ микрофотография поперечного сечения сплава Al – Mg, изготовленного с помощью WAAM, после ЭПО с плотностью энергии 5 Дж/см<sup>2</sup> (а), 10 Дж/см<sup>2</sup> (б), 15 Дж/см<sup>2</sup> (в) и увеличенная часть (А) из поз. (в) (г): 1 и 2 – зоны проплавления и термического влияния; 3 – основной металл

Fig. 2. SEM micrograph of a cross-section of an Al – Mg alloy fabricated using WAAM after EBP with different energy densities: penetration zones (1), heat-affected zones (2) and base metal (3):

$a - E_s = 5 \text{ J/cm}^2$ ;  $b - E_s = 10 \text{ J/cm}^2$

### Химический состав сварочной проволоки и подложки

#### Chemical composition of the welding wire and substrate

Марка сплава	Содержание элемента, % (по массе)						
	Mg	Mn	Fe	Cu	Si	Mg	Al
ER 5356	4,5 – 5,5	0,20 – 0,25	0,4	0,10	0,25	4,5 – 5,5	осн.
6061	0,8 – 1,2	0,15	0,7	0,15 – 0,40	0,40 – 0,80	0,8 – 1,2	осн.

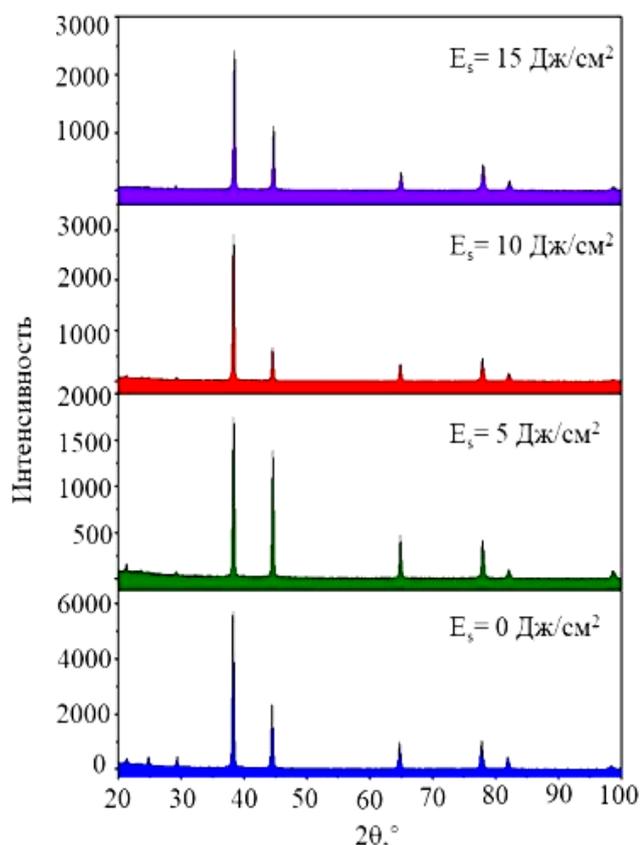


Рис. 3. Рентгеновские дифрактограммы аддитивно изготовленного сплава Al – Mg после различных режимов ЭПО  
Fig. 3. X-ray diffraction patterns of additively fabricated Al – Mg alloy after various EPO modes

Явление переплавки также трудно обнаружить в этом состоянии. При увеличении плотности энергии пучка электронов до  $15 \text{ Дж/см}^2$  в области поверхности появляются две пограничные линии, что показано на рис. 2, в. Они разделяют зоны плавления (модифицированного слоя), зоны термического влияния и необработанный металл, что видно на рис. 2, з [14 – 16].

Рентгеновские дифрактограммы образцов сплава Al – Mg, изготовленного по технологии проволоочно-дугового аддитивного производства, после электронно-пучковой обработки по различными режимами, показаны на рис. 3. Основные характеристики дифракционных картин после различных режимов электронно-пучковой обработки схожи, но наблюдается значительный разброс интенсивности пиков. Анализ рентгеновских дифрактограмм подтвердил, что фазовый состав ( $\alpha$  (Al) и  $\beta$  ( $\text{Al}_{13}\text{Mg}_2$ )) не изменился после различных режимов ЭПО, однако интенсивности пиков рентгеновской дифракции изменяются в зависимости от плотности энергии пучка электронов.

Анализ состояния дефектной субструктуры поверхностного слоя Al – Mg сплава, облученного импульсным электронным пучком, выявил

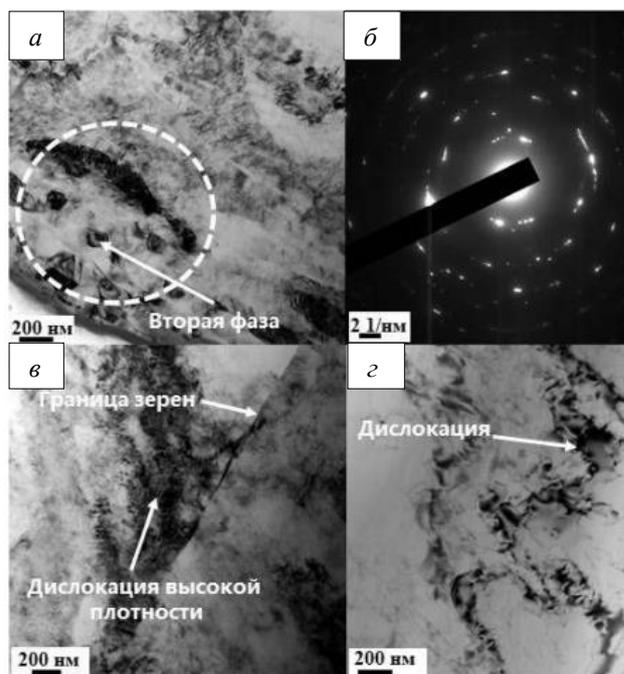


Рис. 4. Структура аддитивно изготовленного сплава Al – Mg после облучения при  $E_s = 5 \text{ Дж/см}^2$ :  
*a* – светлое поле; *б* – микроэлектронная дифракционная картина (стрелкой указан рефлекс круговой области на поз. *a*);  
*в* – дислокации высокой плотности вдоль границ зерен;  
*з* – дислокации в зернах  
Fig. 4. Structure of additively fabricated Al – Mg alloy after irradiation at  $E_s = 5 \text{ Дж/см}^2$ :  
*a* – bright field; *б* – microelectron diffraction pattern (the arrow indicates the reflex of the circular area in pos. *a*);  
*в* – high-density dislocations along grain boundaries;  
*з* – dislocations in grains

формирование в поверхностном слое субмикроструктуры, характерное изображение которой приведено на рис. 4. После обработки электронным пучком при плотности энергии  $5 \text{ Дж/см}^2$  вблизи модифицированного слоя видны субзерна размером около 120 нм. Изображение дифракции электронов в выбранной области указывает на поликристаллическую природу этого материала, а микроструктура состоит из зерен с высокоугловыми границами.

Толщина модифицированного слоя и средние размеры субзерен увеличиваются по мере увеличения плотности энергии пучка электронов. Размеры субзерен увеличиваются от 120 до 200 нм при увеличении плотности энергии пучка электронов от 5 до  $10 \text{ Дж/см}^2$  (рис. 5). Можно предположить, что образование подобной субзеренной структуры в поверхностном слое материала обусловлено термомеханическими напряжениями, формирующимися при высокоскоростной термической обработке в процессе ЭПО.

При увеличении  $E_s$  до  $15 \text{ Дж/см}^2$  плавление привело к образованию микротрещин вдоль границ, в поверхностном слое было обнаружено

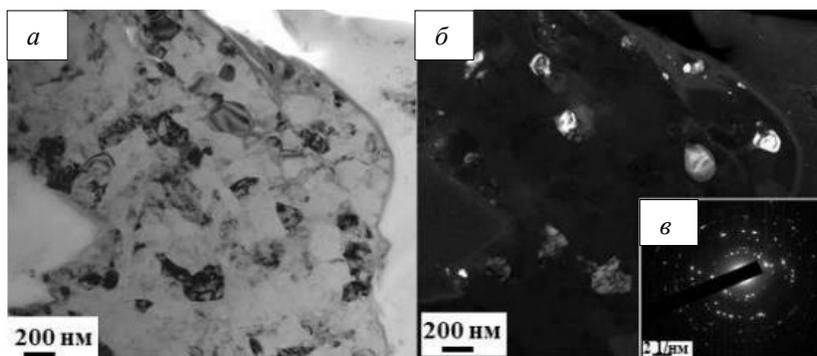


Рис. 5. Электронно-микроскопическое изображение структуры сплава Al – Mg после облучения при  $E_S = 10$  Дж/см<sup>2</sup>: *a* – светлое поле; *б* – темное поле, полученное в рефлексе [200] Al; *в* – микроэлектроннограмма (стрелкой указан рефлекс, в котором получено темное поле)

Fig. 5. Electron microscopic image of the Al – Mg alloy structure after irradiation at  $E_S = 10$  J/cm<sup>2</sup>: *a* – bright field; *б* – dark field obtained in the [200] Al; *в* – reflection, microelectron diffraction pattern, the arrow indicates the reflection in which the dark field was obtained

больше интерметаллических включений. В зернах образуются дислокационные клубки из-за волн напряжения, вызванных явлением плавления во время высокотемпературной обработки.

Индексирование микроэлектроннограммы показало наличие включений, распределенных на фазе алюминия, с размерами 10 – 13 нм. Элементный состав  $Mn_{4,6}Fe_{0,4}Si_3$  данных частиц позволяет предположить, что они образовались в результате высокоскоростного растворения включений субмикронных размеров, находившихся в материале в исходном состоянии.

### Выводы

В исследовании была решена важная научно-практическая задача, направленная на разработку и исследование Al – Mg сплава, полученного проволочно-дуговым аддитивным способом, и установление влияния режимов электронно-пучковой обработки на его структуру. Установлено, что электронно-пучковая обработка Al – Mg сплава в зависимости от плотности пучка электронов приводит к модифицированию состояния поверхности. Так, воздействие электронного пучка с плотностью энергии 15 Дж/см<sup>2</sup> приводит к формированию расплавленного слоя толщиной 30 – 35 мкм и зоны термического влияния толщиной 15 мкм. Показано, что электронно-пучковая обработка изменяет зеренную структуру материала. При плотности энергии электронного пучка 5 Дж/см<sup>2</sup> размер распределенных внутри зерен субзерен составляет около 120 нм. При увеличении  $E_S$  до 10 Дж/см<sup>2</sup> размер субзерен увеличивается до 200 нм, а при  $E_S = 15$  Дж/см<sup>2</sup> размер субзерен увеличивается до 350 – 500 нм. В последнем режиме наблюдаются включения размером 10 – 13 нм, распределенные на фазе алюминия.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Santos M.C., Machado A.R., Sales W.F., Barrozo M.A.S., Ezugwu E.O. Machining of aluminum alloys: a review // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. Vol. 86 (9). P. 3067–3080. <http://doi.org/10.1007/s00170-016-8431-9>
2. Mahmoud T.S. Effect of friction stir processing on electrical conductivity and corrosion resistance of AA6063–T6 Al alloy. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C // Journal of Mechanical Engineering Science*. 2008. Vol. 222 (7). P. 1117–1123. <http://doi.org/10.1243/09544062JMES847>
3. Song J.M., Lui T.S., Horng J.H., Chen L.H., Chen T.F. Vibration behavior of a precipitation-hardening aluminum alloy under resonance // *Scripta Materialia*. 2004. Vol. 51 (12). P. 1153–1157. <http://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2004.08.013>
4. Золоторевский В.С., Белов Н.А. *Металловедение литейных алюминиевых сплавов*. Москва: МИСиС, 2005.
5. Гэн Я., Панченко И.А., Чэнь С., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф. Модификация импульсным электронным пучком поверхности образцов Al – Mg-сплава, полученного методами аддитивных технологий: структура и свойства // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2021. № 5. С. 42–46. <http://doi.org/10.31857/S1028096021050083>
6. Гэн Я., Панченко И.А., Чэнь С., Иванов Ю.Ф., Розенштейн Е.О., Коновалов С.В. Анализ механических свойств Al – Mg сплава после обработки поверхности электронным пучком. В кн.: *Физика конденсированных состояний: Тезисы II Международной конференции ФКС-2021, посвящен-*

- ной 90-летию со дня рождения академика Ю.А. Осипьяна (1931 – 2008), Черногловка, 31 мая – 04 июня 2021 года. Черногловка: Институт физики твердого тела РАН, 2021. С. 373. <http://doi.org/10.26201/ISSP.2020/FKS-2.218>
7. Derekar K.S. A review of wire arc additive manufacturing and advances in wire arc additive manufacturing of aluminium // *Materials Science and Technology*. 2018. Vol. 34 (8). P. 895–916. <http://doi.org/10.1080/02670836.2018.1455012>
  8. LaMonica M. Additive manufacturing // *Technology Review*. 2013. Vol. 116 (3). P. 58–59. <http://doi.org/10.2514/1.B35455>
  9. Hao Y., Gao B., Tu G.F., Cao H., Hao S.Z., Dong C. Surface modification of Al-12.6Si alloy by high current pulsed electron beam // *Applied Surface Science*. 2012. Vol. 258 (6). P. 2052–2056. <http://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2016-0317>
  10. Fu Y. Hu J., Shen X., Wang Y., Zhao W. Surface hardening of 30CrMnSiA steel using continuous electron beam // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2017. Vol. 410. P. 207–214. <http://doi.org/10.1016/j.nimb.2017.08.014>
  11. Petrov P. Optimization of carbon steel electron-beam hardening // *Journal of Physics: Conference Series*. 2010. Vol. 223 (1). Article 012029. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/223/1/012029>
  12. Эволюция структуры и свойств легких сплавов при энергетических воздействиях / В.Е. Громов, С.В. Коновалов, К.В. Аксенова. Новосибирск: Изд-во Сибирского отделения РАН, 2016. 240 с.
  13. Коновалов С.В., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф. Влияние внешних энергетических воздействий на структуру и фазовый состав титана при многоцелевой усталости. Москва: Изд-во СО РАН, 2020. 183 с.
  14. Su C., Chen X., Gao C., Wang Y. Effect of heat input on microstructure and mechanical properties of AlMg alloys fabricated by WAAM // *Applied Surface Science*. 2019. Vol. 486. P. 431–440.
  15. Yang S., Guo Z., Zhao L., Zhao L., Guan Q., Liu Y. Surface microstructures and high-temperature high-pressure corrosion behavior of N18 zirconium alloy induced by high current pulsed electron beam irradiation // *Applied Surface Science*. 2019. Vol. 484. P. 453–460.
  16. Geng Y., Panchenko I., Kononov S., Chen X., Ivanov Y. Effect of electron beam energy densities on the surface morphology and tensile property of additively manufactured Al-Mg alloy // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2021. Vol. 498. P. 15–22. <http://doi.org/10.1016/j.nimb.2021.04.008>

## REFERENCES

1. Santos M.C., Machado A.R., Sales W.F., Barrozo M.A.S., Ezugwu E.O. Machining of aluminum alloys: a review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016, vol. 86 (9), pp. 3067–3080. <http://doi.org/10.1007/s00170-016-8431-9>
2. Mahmoud T.S. Effect of friction stir processing on electrical conductivity and corrosion resistance of AA6063–T6 Al alloy. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2008, vol. 222 (7), pp. 1117–1123. <http://doi.org/10.1243/09544062JMES847>
3. Song J.M., Lui T.S., Horng J.H., Chen L.H., Chen T.F. Vibration behavior of a precipitation-hardening aluminum alloy under resonance. *Scripta Materialia*. 2004, vol. 51 (12), pp. 1153–1157. <http://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2004.08.013>
4. Zolotarevsky V.S., Belov N.A. *Metal science of cast aluminum alloys*. Moscow: MISiS. 2005. (In Russ.).
5. Geng Ya., Panchenko I.A., Chen S., Kononov S.V., Ivanov Yu.F. Modification by a pulsed electron beam of the surface of Al–Mg alloy samples obtained by additive technologies: structure and properties. *Surface. X-ray, synchrotron and neutron studies*. 2021, no. 5, pp. 42–46. (In Russ.). <http://doi.org/10.31857/S1028096021050083>
6. Geng Ya., Panchenko I.A., Chen S., Ivanov Yu.F., Rosenstein E.O., Kononov S.V. Analysis of the mechanical properties of the Al – Mg alloy after surface treatment with an electron beam. In: *Physics of condensed states: Abstracts of the II International Conference FCC-2021, dedicated to the 90th anniversary of the birth of Academician Yu. A. Osipyan (1931 – 2008)*, Chernoglovka, May 31 – 04 July, 2021. Chernoglovka: Institute of Solid State Physics RAS. 2021, pp. 373. (In Russ.). <http://doi.org/10.26201/ISSP.2020/FKS-2.218>
7. Derekar K.S. A review of wire arc additive manufacturing and advances in wire arc additive manufacturing of aluminium. *Materials Science and Technology*. 2018, vol. 34 (8), pp. 895–916. <http://doi.org/10.1080/02670836.2018.1455012>

8. LaMonica M. Additive manufacturing. *Technology Review*. 2013, vol. 116 (3), pp. 58–59. <http://doi.org/10.2514/1.B35455>
9. Hao Y., Gao B., Tu G.F., Cao H., Hao S.Z., Dong C. Surface modification of Al-12.6Si alloy by high current pulsed electron beam. *Applied Surface Science*. 2012, vol. 258 (6), pp. 2052–2056. <http://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2016-0317>
10. Fu Y., Hu J., Shen X., Wang Y., Zhao W. Surface hardening of 30CrMnSiA steel using continuous electron beam. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2017, vol. 410, pp. 207–214. <http://doi.org/10.1016/j.nimb.2017.08.014>
11. Petrov P. Optimization of carbon steel electron-beam hardening. *Journal of Physics: Conference Series*. 2010, vol. 223 (1), article 012029. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/223/1/012029>
12. *Evolution of the structure and properties of light alloys under energy impacts* / V.E. Gromov, S.V. Konovalov, K.V. Aksenova. Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2016, 240 p. (In Russ.).
13. Konovalov S.V., Gromov V.E., Ivanov Yu.F. *Influence of external energy impacts on the structure and phase composition of titanium under multi-purpose fatigue*. Moscow, 2020, 183 p. (In Russ.).
14. Su C., Chen X., Gao C., Wang Y. Effect of heat input on microstructure and mechanical properties of AlMg alloys fabricated by WAAM. *Applied Surface Science*. 2019, vol. 486, pp. 431–440.
15. Yang S., Guo Z., Zhao L., Zhao L., Guan Q., Liu Y. Surface microstructures and high-temperature high-pressure corrosion behavior of N18 zirconium alloy induced by high current pulsed electron beam irradiation. *Applied Surface Science*. 2019, vol. 484, pp. 453–460.
16. Geng Y., Panchenko I., Konovalov S., Chen X., Ivanov Y. Effect of electron beam energy densities on the surface morphology and tensile property of additively manufactured Al-Mg alloy. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2021, vol. 498, pp. 15–22. <http://doi.org/10.1016/j.nimb.2021.04.008>

#### Сведения об авторах

**Яньфэй Гэн**, к.т.н., научный сотрудник, Школа машиностроения и электротехники, Университет Вэньчжоу  
*E-mail*: 960083831@qq.com  
*ORCID*: 0000-0003-4194-289X

**Ирина Алексеевна Панченко**, к.т.н., заведующий научной лабораторией, Сибирский государственный индустриальный университет  
*E-mail*: i.r.i.ss@yandex.ru  
*ORCID*: 0000-0002-1631-9644

**Сергей Валерьевич Коновалов**, д.т.н., профессор, проректор по научной и инновационной деятельности, Сибирский государственный индустриальный университет  
*E-mail*: konovalov@sibsiu.ru  
*ORCID*: 0000-0003-4809-8660

**Юрий Федорович Иванов**, д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник, Институт сильноточной электроники СО РАН  
*E-mail*: yufi55@mail.ru  
*ORCID*: 0000-0001-8022-7958

**Сичжан Чен**, к.т.н., профессор, Колледж механики и электротехники, Университет Вэньчжоу  
*E-mail*: chenxizhang@wzu.edu.cn  
*ORCID*: 0000-0003-1649-1820

#### Information about the authors

**Ya. Geng**, *Cand. Sci. (Eng.)*, Research Fellow, College of Mechanics and Electrical Engineering, Wenzhou University  
*E-mail*: 960083831@qq.com  
*ORCID*: 0000-0003-4194-289X

**Irina A. Panchenko**, *Cand. Sci. (Eng.)*, Head of the Scientific Laboratory, Siberian State Industrial University  
*E-mail*: chenxizhang@wzu.edu.cn  
*ORCID*: 0000-0003-1649-1820

**Sergey V. Konovalov**, *Dr. Sci. (Eng.)*, Professor, Vice-Rector for Scientific and Innovative Activities, Siberian State Industrial University  
*E-mail*: konovalov@sibsiu.ru  
*ORCID*: 0000-0003-4809-8660

**Yurii F. Ivanov**, *Dr. Sci. (Phys.-Math.)*, Prof., Chief Researcher, Institute of High Current Electronics SB RAS  
*E-mail*: yufi55@mail.ru  
*ORCID*: 0000-0001-8022-7958

**Xizhang Chen**, *PhD.*, Professor, College of Mechanics and Electrical Engineering, Wenzhou University  
*E-mail*: chenxizhang@wzu.edu.cn  
*ORCID*: 0000-0003-1649-1820

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

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

Поступила в редакцию 01.06.2023  
 После доработки 15.06.2023  
 Принята к публикации 19.06.2023

Received 01.06.2023  
 Revised 15.06.2023  
 Accepted 19.06.2023