

Научная статья

УДК 691-405

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31408>



*С.В. Ганин, С.А. Блинов, А.М. Левитский* ✉

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия

✉ [levitskij\\_am@spbstu.ru](mailto:levitskij_am@spbstu.ru)

## **ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВСПЕНИВАНИЯ НА ХАРАКТЕР ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ ДЕФОРМИРОВАННЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ ПЕНОАЛЮМИНИЯ**

*Аннотация.* Изучено влияние технологии вспенивания на характер пористой структуры деформированных заготовок из пеноалюминия. Заготовки производили по порошковой технологии. Процесс изготовления включал в себя такие технологические операции, как смешивание шихты, холодная прессовка в закрытой матрице, горячая экструзия и горячая прокатка. В результате получали прутки с квадратным сечением 2,5×2,5 мм. Вспенивание полученных заготовок осуществляли тремя способами: в процессе наплавки методом TIG, прямым пропусканием тока и при помощи газовой горелки. После вспенивания была изучена структура образцов. Установлено, что наиболее однородная пористая структура заготовок формируется при нагреве прямым пропусканием тока, однако этот способ технологически наиболее сложный. Более практичным и простым является нагрев газовой горелкой.

*Ключевые слова:* алюминий, пенометалл, наплавка, процесс вспенивания, пенообразующий агент.

*Благодарности:* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда в рамках реализации проекта «Разработка методов компьютерного моделирования процессов вспенивания порошковых материалов системы алюминий-гидрид титана с использованием физического моделирования процесса вспенивания» (Соглашение №24-29-00795, <https://rscf.ru/project/24-29-00795/>).

*Для цитирования:*

Ганин С.В., Блинов С.А., Левитский А.М. Влияние технологии вспенивания на характер пористой структуры деформированных заготовок из пеноалюминия // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 4. С. 105–117. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31408>



S.V. Ganin, S.A. Blinov, A.M. Levitsky ✉

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

✉ levitskij\_am@spbstu.ru

## EFFECT OF FOAMING TECHNOLOGY ON THE POROUS STRUCTURE OF DEFORMED FOAM ALUMINUM BLANKS

**Abstract.** The effect of foaming technology on the porous structure of deformed aluminum foam blanks was studied. The blanks were produced using powder technology. The manufacturing process included batch mixing, cold pressing in a closed die, hot extrusion and hot rolling. The resulting rods had a square cross-section of 2.5×2.5 mm. Foaming of the resulting blanks was achieved using three methods: TIG welding, direct current flow and a gas torch. After foaming, the structure of the samples was studied. It was found that the most uniform porous structure of the blanks was formed by heating by direct current flow; however, this method is technologically more complex. Heating with a gas torch is more practical and simpler.

**Keywords:** aluminium, foam metal, fusion, foaming process, foam-forming agent.

**Acknowledgements:** The research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 24-29-00795 “Development of methods for computer modeling of foaming processes of powder materials of the aluminum-titanium hydride system using physical modeling of the foaming process”. Available online: <https://rscf.ru/project/24-29-00795/>.

**Citation:**

Ganin S.V., Blinov S.A., Levitsky A.M., Effect of foaming technology on the porous structure of deformed foam aluminum blanks, *Global Energy*, 31 (04) (2025) 105–117, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31408>

**Введение.** Металлические пены известны достаточно давно [1], однако до настоящего времени они не получили широкого промышленного применения. Пены были предложены в различных отраслях, включая автомобилестроение, судостроение, железнодорожный транспорт, авиацию, гражданское строительство и военное дело [2–7]. В настоящее время основное внимание уделяется структурам с закрытыми порами (губкам), поскольку они в основном используются в качестве функциональных материалов, например для изготовления фильтров, катализаторов, электродов, в медицине [3, 7] и реже – как конструкционные материалы. Преимущества металлической пены по сравнению с традиционными материалами заключаются в способности к относительно эффективной тепло- и звукоизоляции, а также в возможности эффективно поглощать энергию от ударной нагрузки при малой массе [8, 9].

Существуют различные методы получения металлических пен. Метод порошковой металлургии – наиболее распространенный промышленный метод производства пенометаллов с закрытыми порами. Процесс включает смешивание металлического порошка с порообразователем, прессование смеси в компактные газонепроницаемые заготовки, нагрев заготовок до температуры плавления металла, разложение порообразователя и выделение газа, вызывающее вспенивание материала, охлаждение и стабилизацию полученной пенной структуры.

Литейные методы предполагают непосредственное вспенивание расплавленного металла за счет добавления вспенивателя в расплав или за счет продувки расплава инертным газом [10, 11].

Цель работы состоит в изучении пористой структуры металлических пен, полученных методом порошковой металлургии [11, 12].

#### Ход эксперимента

Для исследования использовали порошок силуминового сплава марки АК 12, фракцией 120–310 мкм. Химический состав порошка приведен в табл. 1.

Таблица 1

#### Химический состав порошка АК 12

Table 1

#### Chemical composition of AK 12 powder

Содержание элементов, масс. %				
Al	Si	Fe	Mn	Ti
87,9	11,5	0,3	0,2	0,1

Для создания пенометалла из алюминиевого порошка был использован гидрид титана ( $TiH_2$ ) – порошок серого цвета, молярная масса которого равна 49,915 г/моль, а плотность составляет 3,76 г/см<sup>3</sup>. При температуре 400–470°C происходят разложение и выделение водорода [12–15]. Выбор этого материала обоснован относительно небольшой стоимостью, а также наибольшим удельным содержанием газа среди других вариантов вспенивателей.

Методика получения пеноалюминия включала три этапа:

- 1) смешивание шихты;
- 2) горячая экструзия;
- 3) прокатка.

Для получения однородной смеси порошков АК 12 и гидрида титана использовалась планетарная мельница Pulverisette 7 Premium Line (рис. 1).

Общая продолжительность обработки смеси в планетарной мельнице равнялась трем часам при скорости вращения 500 об/мин. В качестве мелющих тел использовали шарики диаметром 10 мм. Процесс смешивания проходил в два этапа: сначала в течение одного часа в изопропиловом спирте, затем в течение двух часов с добавлением флюса в инертной атмосфере.



Рис. 1. Планетарная мельница Pulverisette 7 Premium Line

Fig. 1. Planetary mill Pulverisette 7 Premium Line

Для получения заготовки из порошковой смеси АК 12 + TiN<sub>2</sub> была применена горячая экструзия. Изготавливали вытянутые металлические заготовки с постоянным поперечным сечением. Экструзия проводилась на прессе (рис. 2) с использованием специальной оснастки (рис. 3).

Процесс экструзии проводили в два этапа:

- 1) подготовка цилиндрических образцов;
- 2) подготовка оснастки: капсула с образцом, фильеры, пресс-шайба, пуансон.

Для экструзии изготовили капсулы из прутка алюминиевого сплава АМг5 (ГОСТ 4784-97). Они имеют следующие размеры: диаметр – 28,5 мм, высота – 60 мм, толщина стенки – 2 мм, толщина дна – 3 мм (рис. 4а).

Эмпирическим способом определили, что плотность порошковой прессовки играет значительную роль при экструдировании. Низкие значения начальной плотности приводят к значительной остаточной пористости в прутке. Исходя из этого, была добавлена операция брикетирования методом холодного прессования в закрытой матрице. Фотография капсулы с брикетом представлена на рис. 4б. Для снижения трения применяли графит.



Рис. 2. Гидравлический пресс ПСУ-125 с оснасткой для горячей экструзии  
Fig. 2. PSU-125 hydraulic press with hot extrusion tooling

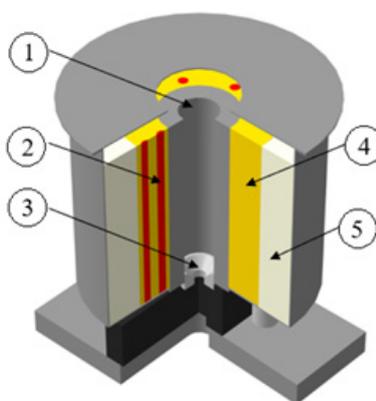


Рис. 3. 3D-модель оснастки для горячей экструзии: 1) рабочее отверстие; 2) нагревательный элемент; 3) фильера; 4) тепловая изоляция; 5) футеровка

Fig. 3. 3D model of hot extrusion tooling: 1) working opening; 2) heating element; 3) die; 4) thermal insulation; 5) lining



Рис. 4. Внешний вид капсулы (а) и капсулы с порошковой прессовкой для горячей экструзии (б)

Fig. 4. The appearance of the capsule (a) and powder-pressed capsule for hot extrusion (b)



Рис. 5. Внешний вид экструдированных прутков

Fig. 5. Appearance of the extruded rods

Оснастка с заготовкой выдерживались на протяжении 20 минут при температуре 400–430°C. Скорость перемещения пуансона задавалась в интервале от 0,35 до 0,5 мм/с.

В результате получили прутки диаметром 10 мм и длиной 340–380 мм. Визуальный анализ показал отсутствие дефектов на оболочке. Ввиду особенностей напряженно-деформированного состояния материала в процессе экструзии на краях прутков наблюдается большое количество дефектов. В связи с этим после правки эти части отрезались (рис. 5).

Финальным этапом при подготовке пенометалла была горячая пластическая деформация, заключающаяся в прокатке экструдированных заготовок. Проведение данной операции способствовало повышению комплекса механических свойств за счет разбивания конгломерации частиц упрочнителя и снижения уровня остаточной пористости. Кроме того, прокатка позволила получить требуемые геометрические параметры прутков для последующих исследований. Перед прокаткой прутки были подвергнуты предварительному нагреву до температуры 400–450°C. В результате прокатки на стане 100 (рис. 6) получали квадратные прутки со стороной 2,5 мм. Общий вид заготовок представлен на рис. 7.

Полученные прутки АК 12 + TiH<sub>2</sub> требуемого размера подвергали нагреву, используя три различных метода для образования пор внутри материала.

Первым вариантом нагрева была выбрана сварка неплавящимся электродом в среде инертного газа (TIG) с использованием полученного прутка в качестве присадочного материала для наплавки. Нагрев проводили с использованием установки ручной TIG-сварки (рис. 8). Аргон



Рис. 6. Стан 100 для горячей прокатки в калибрах  
Fig. 6. Mill 100 for hot rolling in calibers

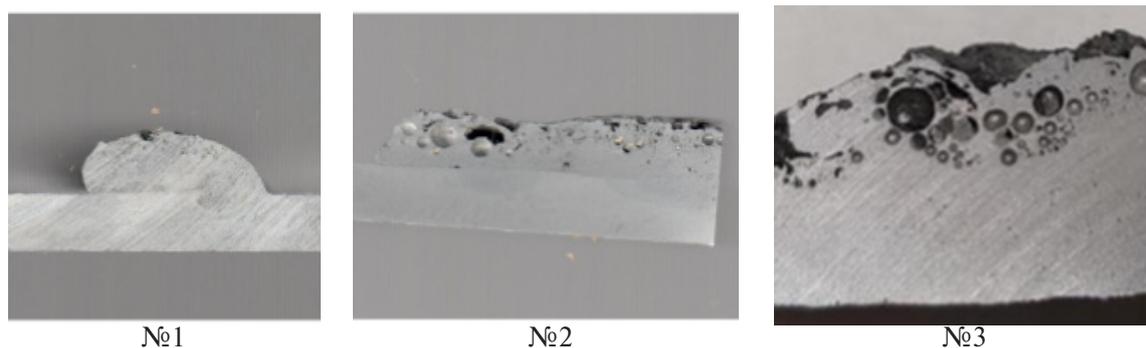


Рис. 7. Прутки после горячей прокатки в калибрах с различной вытяжкой  
Fig. 7. Bars after hot rolling in calibers with different extrusion



Рис. 8. Установка ручной TIG-сварки  
Fig. 8. Manual TIG welding setup

подавался непосредственно в зону дуги, которая находилась между неплавящимся вольфрамовым электродом и алюминиевой подложкой. Газ необходим для защиты материала от окисления во время нагрева. Для подготовки прутка к наплавке его обезжировали с помощью растворителя. После этого на три пластины по различным режимам были наплавлены валики (рис. 9).



№1

№2

№3

Рис. 9. Фотографии образцов после нагрева методом TIG

Fig. 9. Photos of samples after TIG heating



Рис. 10. Испытательный комплекс Gleeble-3800

Fig. 10. Gleeble-3800 testing complex

По результатам этого эксперимента установлено следующее:

1) Высокая температура внутри дуги привела к изменениям в структуре образцов, а именно – большая часть пор образовалась на поверхности образца. Это вызвано перегревом расплава, что повысило жидкотекучесть и позволило пузырькам водорода с большей скоростью и за меньшее время подняться на поверхность. Кроме того, температура дуги позволила расплавить не только алюминий, но и его оксиды, что также упростило выход пузырьков на поверхность.

2) Образец № 1 имеет неравномерную пористую структуру, поры небольшого размера, находящиеся на разном расстоянии друг от друга (рис. 9). Валик сформировался однородным, а из этого следует, что использованный режим не позволяет достигнуть необходимого результата.

3) В образце № 2 (рис. 9) структура пористая. Основное количество пор образовалось в верхних и средних частях образца, а в нижней части наплавки поры практически отсутствуют. Пory имеют различные диаметры, большие сосредоточены в верхней части шва, остальное пространство металла заполнено маленькими порами. Таким образом, однородной пористой структуры материала также не получено.

4) В структуре образца № 3 (рис. 9) наблюдается более упорядоченное расположение пор. Они в равной степени распределены по объему наплавки, однако размер их существенно различается.

Для второго варианта нагрева использовали испытательный комплекс Gleeble-3800 (рис. 10). Нагрев в этом случае осуществляли за счет прямого пропускания тока. Подобный метод нагрева позволяет варьировать скорость нагрева в большом диапазоне.

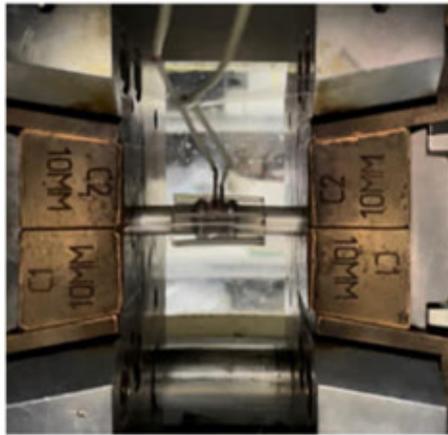


Рис. 11. Вид образца в комплексе Gleeble-3800  
Fig. 11. View of sample in the Gleeble-3800 complex

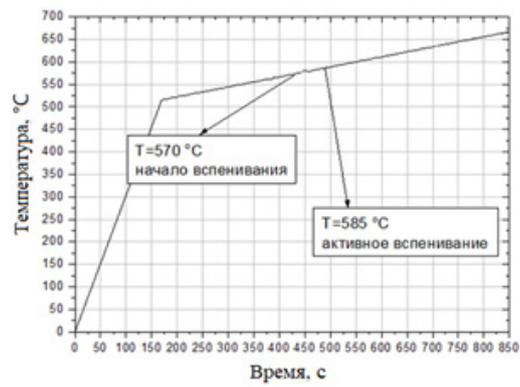


Рис. 12. Зависимость температуры от времени с указанием стадий вспенивания  
Fig. 12. Temperature versus time dependence with indication of foaming stages



Рис. 13. Структура образца № 4 после нагрева в установке Gleeble-3800  
Fig. 13. Structure of sample No. 4 after heating in the Gleeble-3800 complex



Рис. 14. Газовый набор

Fig. 14. Gas kit



Рис. 15. Процесс вспенивания с помощью газовой горелки

Fig. 15. Foaming with a gas burner

Выполнение эксперимента на комплексе Gleeble-3800 требует определенной формы образца, поэтому образцы после экструзии не подвергали прокатке в квадратных калибрах. Для контроля температуры к образцу приваривали термопары (рис. 11). Скорость нагрева образцов составляла  $3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{сек}$  до достижения  $525^{\circ}\text{C}$  и  $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{сек}$  до достижения  $660^{\circ}\text{C}$ . Благодаря низкой скорости нагрева при визуальном контроле образца во время эксперимента можно было выделить стадии вспенивания (рис. 12).

Анализ структуры полученного образца № 4 (рис. 13) свидетельствует, что он имеет практически однородную пористую структуру. Поры маленького размера расположены по всему объему образца. Ближе к центру размер пор незначительно увеличивается.

Для третьего способа нагрева использовали газовый набор, состоящий из горелки Armero и баллона A710/115 (рис. 14). Процесс вспенивания показан на рис. 15.

Структура полученного материала – образец № 5 (рис. 16) – наиболее пористая из всех исследованных. При этом размер пор в разных частях образца значительно различается. В верхней части прутка присутствуют поры большего диаметра.

### Заключение

Результаты исследования влияния способа нагрева при вспенивании пеноалюминия марки АК 12 позволяют заключить следующее:

1) Вспенивание при помощи горелки TIG не позволяет получить равномерную пористую структуру материала. Ввиду того, что температура дуги достигает нескольких тысяч градусов,



Рис. 16. Структура образца № 5

Fig. 16. Structure of sample No. 5

происходит полное расплавление металла, и пузыри водорода всплывают на его поверхность. Как следствие, в верхней части образца образуются поры большого размера, а оставшаяся часть материала заполнена очень маленькими порами.

2) Нагрев прямым пропусканием тока позволил получить равномерное распределение пор по всему объему образца, однако поры в центре имеют более крупный размер, чем в остальной части заготовки. Следует также отметить, что реализация этого метода вспенивания достаточно сложная, что является его недостатком.

3) Использование газовой горелки для вспенивания заготовки обеспечивает ее равномерный нагрев и позволяет контролировать место локального нагрева. После вспенивания материал имеет выраженную пористую структуру. Однако диаметр пор в верхней части заготовки несколько больше, чем в средней и нижней.

Таким образом, наиболее однородная и равномерная пористая структура алюминиевого пенометалла формируется при нагреве заготовки прямым пропусканием тока, однако этот метод технологически наиболее сложный. По этой причине для промышленного использования можно рекомендовать нагрев газовой горелкой как наиболее технологичный и простой, а также обеспечивающий получение достаточно однородной структуры материала.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Banhart J.** Light-metal foams – history of innovation and technological challenges, *Advanced Engineering Materials*, 15 (3) (2013) 82–111. DOI: 10.1002/adem.201200217
- [2] **Salins S.S., Kumar S., Shetty S., Sachidananda H.K., Khan M.S.A.** Characterization of the aluminum-based metal foam properties for automotive applications, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 50 (2025) 9247–9260. DOI: 10.1007/s13369-024-09399-3
- [3] **Pratomo A.N., Santosa S.P., Gunawan L., Widagdo D., Putra I.S.** Design optimization and structural integrity simulation of aluminum foam sandwich construction for armored vehicle protection, *Composite Structures*, 276 (2021) 114461. DOI: 10.1016/j.compstruct.2021.114461
- [4] **Lefebvre L.-P., Banhart J., Dunand D.C.** Porous metals and metallic foams: Current status and recent developments, *Advanced Engineering Materials*, 10 (9) (2008) 775–787. DOI: 10.1002/adem.200800241
- [5] **Qin Junhua, Chen Qing, Yang Chunyan, Huang Yong.** Research process on property and application of metal porous, *Journal of Alloys and Compounds*, 654 (2016) 39–44. DOI: 10.1016/j.jallcom.2015.09.148
- [6] **Baumeister J., Weise J., Hirtz E., Höhne K., Hohe J.** Applications of aluminum hybrid foam sandwiches in battery housings for electric vehicles, *Materials Science & Engineering Technology*, 45 (12) (2014) 1099–1107. DOI: 10.1002/mawe.201400358

- [7] **Kim S., Lee C.-W.** A review on manufacturing and application of open-cell metal foam, *Procedia Materials Science*, 4 (2014) 305–309. DOI: 10.1016/j.mspro.2014.07.562
- [8] **Banhart J., García-Moreno F., Heim K., Seeliger H.-W.** Light-weighting in transportation and defence using aluminium foam sandwich structures, in: *Light Weighting for Defense, Aerospace, and Transportation* (eds. A. Gokhale, A. Prasad, N. Basu), (2019) 61–72. DOI: 10.1007/978-981-15-1263-6\_5
- [9] **Yuan Jian, Liu Kun, Gao Cheng-Qiang, You Zhi-Yue, Kang Shao-Bo.** Experimental and numerical studies on corrosion-resistant aluminium foam sandwich panel subject to low-velocity impact, *Scientific Reports*, 14 (2024) 26611. DOI: 10.1038/s41598-024-78178-9
- [10] **Fu Wensheng, Li Yanxiang.** Air blowing assisted fabrication of Al–Si–Mg foams by melt-foaming route, *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, 56 (2025) 3886–3897. DOI: 10.1007/s11663-025-03612-w
- [11] **Fu Wensheng, Li Yanxiang.** Fabrication, processing, properties, and applications of closed-cell aluminium foams: A review, *Materials*, 17 (3) (2024) 560. DOI: 10.3390/ma17030560
- [12] **Banhart J.** Metal foams: Production and stability, *Advanced Engineering Materials*, 8 (9) (2006) 781–794. DOI: 10.1002/adem.200600071
- [13] **Liu Ru-Shi, Zhang Lei, Sun Xueliang, Liu Hansan, Zhang JiuJun.** Electrochemical technologies for energy storage and conversion, Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2012. DOI: 10.1002/9783527639496
- [14] **Alizadeh E., Mashtizadeh A.R., Azizieh M.** Influence of titanium hydride heat treatment time on pore morphology of friction stir welded aluminum nanocomposite foams. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 78 (2025) 254. DOI: 10.1007/s12666-025-03654-3
- [15] **Korosteleva N.D., Ganin S.V., Kondrat'ev S.Yu.** Study of the effect of process parameters on the foaming temperature of foam aluminum, *Metal Science and Heat Treatment*, 66 (2025) 797–802. DOI: 10.1007/s11041-025-01119-4

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ГАНИН Сергей Владимирович** – директор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: ganin\_sv@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2307-9319>

**БЛИНОВ Святослав Алексеевич** – инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: blinov\_sa@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2017-8249>

**ЛЕВИТСКИЙ Алексей Максимович** – инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: levitskij\_am@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7900-4007>

## REFERENCES

- [1] **J. Banhart**, Light-metal foams – history of innovation and technological challenges, *Advanced Engineering Materials*, 15 (3) (2013) 82–111. DOI: 10.1002/adem.201200217

- [2] **S.S. Salins, S. Kumar, S. Shetty, H.K. Sachidananda, M.S.A.Khan**, Characterization of the aluminum-based metal foam properties for automotive applications, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 50 (2025) 9247–9260. DOI: 10.1007/s13369-024-09399-3
- [3] **A.N. Pratomo, S.P. Santosa, L. Gunawan, D. Widagdo, I.S. Putra**, Design optimization and structural integrity simulation of aluminum foam sandwich construction for armored vehicle protection, *Composite Structures*, 276 (2021) 114461. DOI: 10.1016/j.compstruct.2021.114461
- [4] **L.-P. Lefebvre, J. Banhart, D. C. Dunand**, Porous metals and metallic foams: Current status and recent developments, *Advanced Engineering Materials*, 10 (9) (2008) 775–787. DOI: 10.1002/adem.200800241
- [5] **Qin Junhua, Chen Qing, Yang Chunyan, Huang Yong**, Research process on property and application of metal porous, *Journal of Alloys and Compounds*, 654 (2016) 39–44. DOI: 10.1016/j.jallcom.2015.09.148
- [6] **J. Baumeister, J. Weise, E. Hirtz, K. Höhne, J. Hohe**, Applications of aluminum hybrid foam sandwiches in battery housings for electric vehicles, *Materials Science & Engineering Technology*, 45 (12) (2014) 1099–1107. DOI: 10.1002/mawe.201400358
- [7] **S. Kim, C.-W. Lee**, A review on manufacturing and application of open-cell metal foam, *Procedia Materials Science*, 4 (2014) 305–309. DOI: 10.1016/j.mspro.2014.07.562
- [8] **J. Banhart, F. García-Moreno, K. Heim, H.-W. Seeliger**, Light-weighting in transportation and defence using aluminium foam sandwich structures, in: *Light Weighting for Defense, Aerospace, and Transportation* (eds. A. Gokhale, A. Prasad, N. Basu), (2019) 61–72. DOI: 10.1007/978-981-15-1263-6\_5
- [9] **Yuan Jian, Liu Kun, Gao Cheng-Qiang, You Zhi-Yue, Kang Shao-Bo**, Experimental and numerical studies on corrosion-resistant aluminium foam sandwich panel subject to low-velocity impact, *Scientific Reports*, 14 (2024) 26611. DOI: 10.1038/s41598-024-78178-9
- [10] **Fu Wensheng, Li Yanxiang**, Air blowing assisted fabrication of Al–Si–Mg foams by melt-foaming route, *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, 56 (2025) 3886–3897. DOI: 10.1007/s11663-025-03612-w
- [11] **Fu Wensheng, Li Yanxiang**, Fabrication, processing, properties, and applications of closed-cell aluminum foams: A review, *Materials*, 17 (3) (2024) 560. DOI: 10.3390/ma17030560
- [12] **J. Banhart**, Metal foams: Production and stability, *Advanced Engineering Materials*, 8 (9) (2006) 781–794. DOI: 10.1002/adem.200600071
- [13] **Liu Ru-Shi, Zhang Lei, Sun Xueliang, Liu Hansan, Zhang JiuJun**, *Electrochemical technologies for energy storage and conversion*, Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2012. DOI: 10.1002/9783527639496
- [14] **E. Alizadeh, A.R. Mashtizadeh, M. Azizieh**, Influence of titanium hydride heat treatment time on pore morphology of friction stir welded aluminum nanocomposite foams. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 78 (2025) 254. DOI: 10.1007/s12666-025-03654-3
- [15] **N.D. Korosteleva, S.V. Ganin, S.Yu. Kondrat'ev**, Study of the effect of process parameters on the foaming temperature of foam aluminum, *Metal Science and Heat Treatment*, 66 (2025) 797–802. DOI: 10.1007/s11041-025-01119-4

## INFORMATION ABOUT AUTHORS

**Sergei V. GANIN** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: ganin\_sv@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2307-9319>

**Sviatoslav A. BLINOV** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: blinov\_sa@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2017-8249>

**Alexey M. LEVITSKY** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: levitskij\_am@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7900-4007>

**Поступила: 06.11.2025; Одобрена: 05.12.2025; Принята: 05.12.2025.**

**Submitted: 06.11.2025; Approved: 05.12.2025; Accepted: 05.12.2025.**