

Материаловедение и технологии материалов Materials science and materials technology

Научная статья
Статья в открытом доступе
УДК 66.669
doi: 10.30987/2782-5957-2026-6-87-94

ПОЛУЧЕНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ПЕНОМАТЕРИАЛОВ С КАРБОНАТНЫМ ПОРОФОРОМ

Илья Владимирович Лапин^{1✉}, Ильфар Маликович Гильмутдинов²

^{1,2} Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия

¹ ilya.lapin.69@mail.ru

² gilmutdinovim@corp.knrtu.ru

Аннотация

Данная работа посвящена исследованию процессов получения высококачественных пенометаллов на основе алюминиевых и медных матриц путем оптимизации параметров порошкового порообразователя. Актуальность исследования обусловлена необходимостью достижения равномерной ячеистой структуры и заданных физико-механических свойств металлических пен, что напрямую зависит от химической чистоты и концентрации газообразующего агента.

В ходе работы проводится комплексный химический анализ состава используемых порофоров (карбонатов кальция) с применением высокоточного волнодисперсионного рентгенофлуоресцентного спектрометра Rigaku ZSX. Данный метод позволяет выявить наличие микропримесей и оксидных фаз, влияющих на кинетику термического разложения

вещества. Экспериментальным путем решается задача подбора оптимального количественного содержания порообразователя в металлической шихте для достижения требуемого уровня пористости и структурной однородности.

В результате исследования будут установлены корреляционные зависимости между элементарным составом порофора, его массовой долей в матрице и итоговыми качественными характеристиками полученных образцов пенометаллов. Полученные данные позволят оптимизировать технологический регламент производства пористых материалов с открытыми и закрытыми ячейками для нужд авиастроения, энергетической отрасли и транспортного машиностроения.

Ключевые слова: порообразователь, карбонат кальция, химический анализ, пенометаллы.

Ссылка для цитирования:

Лапин И.В. Получение перспективных пеноматериалов с карбонатным порофором / И.В. Лапин, И.М. Гильмутдинов // Транспортное машиностроение. – 2026. – № 6. – С. 87-94. doi: 10.30987/2782-5957-2026-6-87-94.

Original article
Open Access Article

DEVELOPMENT OF PROMISING FOAMS WITH CARBONATE FOAMING AGENTS

Ilya Vladimirovich Lapin^{1✉}, Ilfar Malikovich Gilmutdinov²

^{1,2} Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

¹ ilya.lapin.69@mail.ru

² gilmutdinovim@corp.knrtu.ru

Abstract

This paper is devoted to the study of processes for the development of high-quality foamed metals based on aluminum and copper matrices by optimizing the parameters of a powder foaming agent. The relevance of the study is due to the need to achieve a uniform cellular structure and specified physico-

mechanical properties of metallic foams, which directly depends on the chemical purity and concentration of the gas-forming agent.

In the course of the work, a comprehensive chemical analysis of the composition of the used foaming agents (calcium carbonates) is carried out using a

high-precision wave-dispersive X-ray fluorescence spectrometer Rigaku ZSX. This method makes it possible to identify the presence of trace elements and oxide phases that affect the dynamics of thermal decomposition of the substance. The problem of selecting the optimal quantitative content of a foaming agent in the metal charge in order to achieve the required level of porosity and structural uniformity is solved experimentally.

The study results bring to finding correlations between the elemental composition of the foaming

Reference for citing:

Lapin IV, Gilmutdinov IM. Development of promising foams with carbonate foaming agents. Transport Engineering. 2026;6:87-94. doi: 10.30987/2782-5957-2026-6-87-94.

Введение

Металлическая пена представляет собой определенное для всех возможных дисперсий одной фазы во второй (где каждая фаза может находиться в одном из трех состояний вещества) и прежде всего это однородные дисперсии газообразной фазы в жидкости или твердом теле. Отдельные газовые включения отделены друг от друга по объему жидкости или твердого тела, соответственно. Таким образом, клетки полностью закрыты жидкостью или твердым телом и не связаны друг с другом, т.е. пена – это диспергирование пузырьков газа в жидкости [1].

Пенометаллы обладают свойствами, которые делают их привлекательными в легкой конструкции, для устройств поглощения энергии и для акустического или термического контроля. Все эти области актуальны для автомобильной промышленности, которая чрезвычайно заинтересована в них. Потенциальные применения также существуют в судостроении, аэрокосмической промышленности и в строительстве.

Расплавы металлов можно вспенивать вдуванием газов или добавлением газовыделяющих вспенивающих агентов, которые разлагаются на месте, вызывая

Объекты и методы

Процесс получения пористого изделия (например, пеноалюминия или пеномеди) состоит из нескольких критических этапов:

1. Металлический порошок (матрица, например, алюминий или медь) смешивается с небольшим количеством 5...8 % масс. порофора — вспенивающего агента. В данном исследовании был использован

agent, its mass fraction in the matrix, and the final qualitative characteristics of the obtained foam metal samples. The data obtained will make it possible to optimize the technological regulations for the development of porous materials with open and closed cells for the needs of the aircraft industry, energy industry and transport machinery industry.

Keywords: pore forming agent, calcium carbonate, chemical analysis, foams.

образование пузырьков. Полученные пеноматериалы обладают такими уникальными свойствами, что в ближайшем будущем ожидается появление новых предложений по их использованию [2].

Использование карбоната кальция (CaCO_3) в качестве биологического (или минерального) порообразователя — это эффективный метод создания металлических пен с контролируемой пористостью. Этот процесс основан на термическом разложении добавки с выделением углекислого газа, который и формирует пористую структуру.

Порошковый метод является классическим подходом в порошковой металлургии для создания пенометаллов (или высокопористых ячеистых материалов) [2].

В научной литературе этот процесс чаще называют методом порошковой металлургии (PM-метод) или методом Баумгартнера/Ильиных, в зависимости от конкретной школы. Название «метод Фраунгофера» закрепилось за ним потому, что он был детально доработан и запатентован в Институте Фраунгофера (*Fraunhofer IFAM*) в Германии.

биологический порообразователь из скорлупы яиц в виде порошка (CaCO_3).

2. Смесь металлического порошка и порообразователя прессуется экструзией или горячим прессованием до состояния полуфабриката (прекурсора). На этом этапе плотность должна быть близка к теоретической при усилении давления в 400 МПа

и более, чтобы порофор был «заперт» внутри металла.

3. Полуфабрикат нагревают (вспенивают) до температуры солидуса, либо плавления матрицы (700...900 °С). В этот момент порофор термически разлагается с выделением углекислого газа CO_2 .

4. Пузырьки газа расширяют расплав, создавая пористую структуру, которая фиксируется при быстром охлаждении.

Этот метод считается одним из самых эффективных для создания деталей сложной формы (рис.).



Рис. Вспенивание консолидированных металлического порошка и CaCO_3 : а – смешивание порошков; б – получение компакта продавливанием через фильеру; в – укладка формованных изделий в контейнер; г – пенообразование в печи [1]

Fig. Foaming of consolidated metal powder and CaCO_3 : a – mixing of powders; b – obtaining a compact by pressing through a die; c – placing molded products in a container; d – foaming in a furnace [1]

Для успешного вспенивания крайне важно контролировать кинетику разложения порофора. Если газ выделится слишком рано (до размягчения металла) или слишком поздно, качественной поры не получится [3].

Физико-химическая механика (CaCO_3):

1. Температура разложения порофора: около 700...900 °С (зависит от давления и чистоты) [3].

2. Роль оксида кальция CaO : остаточный оксид может оставаться на стенках пор, что иногда повышает жесткость каркаса, но может влиять на коррозионную стойкость.

3. Равномерность пор зависит от однородного распределения порообразователя в металлической матрице.

4. Удельная прочность: Металлическая пена должна обладать высокой способностью к поглощению энергии при

Результаты и обсуждения

Яичная скорлупа на 94...95 % состоит из карбоната кальция (CaCO_3), который при нагревании ведет себя как классический вспенивающий агент:

1. Термическое разложение: При температурах выше 700...900 °С происходит реакция: $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2 \uparrow$

2. Газовыделение: Выделяющийся углекислый газ (CO_2) создает поры внутри расплавленного или спекаемого металла.

3. Стабилизация: Оставшийся оксид кальция (CaO) может действовать как твердая частица, повышающая вязкость расплава, что предотвращает «схлопывание» пузырьков газа.

Подготовка карбоната кальция включает удаление органического матрикса (1–2 %) путем отделения мембран и прокалки при 100–150 °С для исключения побочной газогенерации и неприятного специфического запаха. Тонкое измельчение полученного сырья обеспечивает высокую плотность центров нуклеации, что позволяет формировать однородную мелкоячеистую структуру материала. [4].

Часто требуется добавление загустителей SiC или Al_2O_3 , чтобы вязкость расплава позволяла удерживать пузырьки газа (для литьевого способа) [1].

Оптимальное количество порошкообразного порообразователя (CaCO_3) в диапазоне 5...8 % масс. было определено эмпирическим путем [5-6].

При получении качественного образца в этом диапазоне добились сохранения его геометрии, равномерной плотности по всему объему и отсутствия видимых дефектов на поверхности. В диапазоне 5...8 % масс. эти микрочастицы равномерно распределяются по границам ячеек, создавая эффект дисперсного упрочнения.

Если порофора вводится менее 5 %, то газа недостаточно для создания однородной ячеистой структуры. Поры полу-

сжатию (плато на графике напряжение-деформация).

5. Связь с матрицей: Наличие интерметаллидов или химического взаимодействия на границе «металл-порообразователь».

чаются разрозненными, а плотность материала снижается незначительно.

Если порофора вводится более 8 %, то газа слишком много. Пузырьки начинают сливаться (коалесценция), стенки между ними истончаются и лопаются. Это приводит к образованию крупных пустот (каверн) и резкому падению прочности, что сопровождается избыточным накоплением твердых частиц CaO , вызывающим хрупкость перегородок и неоднородность структуры.

Для получения качественных пенометаллов первоочередной задачей являлся качественный анализ представленных карбонатных порообразователей и выбор наиболее подходящего из них, так как именно от его физико-химических свойств зависят структура, пористость и, в конечном итоге, механические свойства готового материала.

Для исследования химического состава на рентгенофлуоресцентном волнодисперсионном спектрометре *Rigaku ZSX* проведен рентгенофлуоресцентный анализ различных порофоров, что критически важно для контроля качества и подбора подходящего порообразователя. В табл. приведен химический состав различных порофоров.

Железо является одной из самых вредных примесей для алюминия, образуя хрупкие интерметаллические соединения (например, Fe_3Al , FeAl_3), которые имеют игольчатую структуру. Эти включения создают концентраторы напряжений в тонких стенках пор пеноалюминия (допустимое содержание 0,5...0,7 %). Увеличение содержания железа (например, с 0,2 % до 2,0 %) приводит к резкому снижению относительного удлинения (пластичности). Примеси железа в целом ухудшают способность металла к деформации без разрушения [7].

Химический состав порофоров CaCO_3 порошка птичьих яиц фракции 56...71 мкм (№ 1), доломитовой муки (№ 2), известняка (№ 3), мела (№ 4)

Chemical composition of CaCO_3 powder of bird eggs of fraction 56...71 μm (No. 1), dolomite flour (No. 2), limestone (No. 3), chalk (No. 4)

| № п/п | Наименование пробы | Химический состав, % масс | | | | | | | | | | | |
|-------|--------------------|---------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | Cl | K | Ca | Fe | Cu | Mn | Na | Mg | Al | Si | P | S |
| 1 | Скорлупа яиц | 0,02 | 0,08 | 96,9 | 0,02 | 0,37 | - | 0,23 | 0,65 | 0,01 | 0,05 | 0,36 | 0,8 |
| 2 | Доломит | 0,09 | 0,41 | 76,5 | 3,05 | 0,02 | 0,17 | 0,2 | 13,9 | 1,2 | 3,83 | 0,03 | 0,29 |
| 3 | Известняк | 0,01 | 0,05 | 91,1 | 0,11 | 0,01 | 0,01 | 0,04 | 5,62 | 0,09 | 2,77 | 0,01 | 0,07 |
| 4 | Мел | 0,01 | 0,18 | 96,4 | 0,55 | 0,02 | 0,04 | 0,04 | 0,37 | 0,57 | 1,65 | 0,09 | 0,04 |

Снижение коррозионной стойкости: железо значительно ускоряет процесс разрушения материала. Оно образует с алюминием микрогальванические пары, в которых алюминий выступает анодом и активно разрушается.

Даже небольшое превышение нормы содержания железа ухудшает стойкость к коррозии, так как нарушается целостность защитной оксидной пленки.

Исходя из полученных данных (по табл.1) можно сделать вывод, что порообразователь в виде доломитовой муки содержит завышенный показатель содержания железа и составляет 3,05 %.

Кремний, особенно в избытке (более ~10...12 %), формирует с алюминием хрупкие интерметаллиды (Al-Si фазы), которые снижают общую пластичность и ударную вязкость сплава, делая его более склонным к хрупкому разрушению.

Для пеноалюминия, где важны лёгкость и некоторая формоустойчивость, важен баланс: кремний повышает прочность и коррозионную стойкость (что хорошо), но чрезмерный его избыток приведёт к хрупкости и снижению пластичности, что может вызвать проблемы при обработке и эксплуатации [7].

Медь в твердом растворе или в виде интерметаллидов (например, CuAl_2 создает значительную разность потенциалов с алюминиевой матрицей, провоцируя электрохимическую коррозию. При увеличении содержания меди с 1 % до 6 % скорость коррозии в кислых средах возрастает

более чем в 30 раз (с 0,00081 до 0,02585 МРУ). Повышенное содержание меди резко увеличивает склонность пеноалюминия к питтинговой и межкристаллитной коррозии, особенно в хлоридсодержащих средах (например, морской воде). В пористых структурах (пеноалюминии) добавление меди (например, 3% вес.) повышает предел прочности при сжатии, но одновременно снижает пористость и пластические характеристики перегородок ячеек [8-9].

Повышенное содержание меди (свыше 3...4 %) превращает пеноалюминий в конструкционный материал с высокой прочностью, но низкой коррозионной стойкостью (скорость разрушения может вырасти в десятки раз) и пониженной способностью к деформации без разрушения.

У представленных для исследования порообразователей (из таблицы) кремний и медь имеют показатели содержания в норме.

Натрий в медных сплавах в малых количествах (до 0,1 % масс.) может повышать относительное удлинение на 168,81 %, однако при дальнейшем росте концентрации пластичность снижается из-за образования интерметаллических фаз (например, $\text{Na}_{1,44}\text{Si}_{136}$), которые повышают твердость и прочность, но делают материал более хрупким. В случае пеномеди остаточный натрий на стенках пор может приводить к неравномерности структуры и охрупчиванию. Наличие натрия (особенно

в форме солей, таких как NaCl существенно снижает коррозионную стойкость [10].

Калий в количестве более 0,06...0,09 % начинает негативно влиять на целостность структуры, повышая вероятность разрушения и снижая коррозионную устойчивость из-за дефектов кристаллической решетки и защитного оксидного слоя.

Повышенные показатели калия приводят к высокой вероятности обрушения пены в процессе остывания. Пеноалюминий теряет свое главное свойство - энергопоглощение. Вместо пластической деформации он будет демонстрировать хрупкий излом.

Содержание калия по данным исследования (в табл.) на уровне 0,18 % в меле и 0,41 % в доломите – это критическое превышение норм для технологии производства пеноалюминия. Такие показатели делают эти компоненты практически непригодными для получения качественного конструкционного материала.

Хлор критически снижает долговечность пеноалюминия за счет ускорения внутренней коррозии и делает его более хрупким, лишая материал его главного преимущества – высокой способности к поглощению энергии удара. При концентрации хлора выше 0,5...1,0 мг/л в водной среде скорость коррозии металлов начинает расти экспоненциально. В случае пеноалюминия это может привести к потере целостности структуры (разрыву перемычек пены)

При производстве пенометаллов (чаще всего на основе алюминия) использование порофоров, содержащих хлориды, приводит к ряду негативных последствий.

Хлор является мощнейшим активатором коррозии алюминия и его сплавов. Даже микроскопические остатки хлоридов внутри пор металла могут привести к разрушению структуры изделия со временем. Наличие хлористых соединений может изменять поверхностное натяжение расплава, что мешает формированию равномерной ячеистой структуры. Хлориды разрушают защитную оксидную пленку алюминия, что ведет к ускоренной коррозии готового пенометалла. Хлор может вступать в реакцию с расплавом, образуя летучие хлориды ме-

таллов, что нарушает стабильность процесса вспенивания и структуру пор. Избыток хлора может привести к образованию «выцветов» или соляного налета на стенках пор [11].

В высококачественных порофорах на основе CaCO₃, предназначенных для металлургии, содержание хлоридов Cl⁻ обычно жестко регламентируется. Оптимальный уровень содержания хлора составляет менее 0,01 %, а максимально допустимый предел до 0,05 % (в зависимости от конкретной технологии и требований к коррозионной стойкости изделия).

Завышенный показатель (из табл.1) содержания хлора только у доломитовой муки и составляет 0,09 %.

Добавление 5 % магния по весу в алюминиевый сплав может снизить относительное удлинение примерно на 34,87 %, а ударную вязкость – на 29,19 % по сравнению с чистым алюминием. При высоких концентрациях магния (обычно выше 5...7 %) в структуре образуются хрупкие интерметаллические соединения, такие как Al₃Mg₂. Эти частицы действуют как концентраторы напряжений и препятствуют движению дислокаций, что приводит к охрупчиванию стенок пор пеноалюминия [12].

В умеренных количествах (до 3...5 %) магний может способствовать образованию защитных слоев (например, MgAl₂O₄, которые повышают общую коррозионную стойкость в солевых средах NaCl [13].

Самый высокий показатель (из табл.) содержания магния у порообразователя в виде доломитовой муки составляет 13,9 %, что увеличивает хрупкость и снижает ударную вязкость пенометаллов.

Содержание марганца (Mn) в пеноматериалах (пеноалюминии и пеномеди) жестко не регламентировано и чаще всего является легирующим элементом для повышения твердости. Увеличение марганца в пеноалюминии делает стенки пор более жесткими, но хрупкими. При избытке Mn процесс получения равномерных пор может усложниться. В алюминиевых пенах марганец полезен, так как он связывает железо, предотвращая точечную коррозию [14].

Заключение

Исследование химического состава порофоров предопределило выбор нового вида вспенивающего агента в виде скорлупы птичьих яиц (CaCO_3). Порошок скорлупы выступает не только как вспениватель, но и как стабилизатор для получения пенометаллических материалов.

Использование CaCO_3 в качестве порообразователя позволяет получать пеноматериалы с закрытыми порами, которые отличаются стабильной структурой и экономичностью по сравнению с традиционными гидридами (например, TiH_2).

Частицы биологического происхождения часто имеют пористую структуру, что может изменить кинетику выделения газа CO_2 . Остаточный оксид кальция (CaO) после реакции разложения карбоната кальция остается в стенках пор и упрочняет границы зерен алюминия. В алюминиевых пенах он может выступать как упрочняющая фаза, но в медных — может влиять на чистоту материала и его проводимость.

Использование яичной скорлупы (CaCO_3) в качестве биологического порообразователя для алюминиевых и медных пен — это перспективное направление «зеленой» металлургии. Это позволяет не только снизить стоимость производства получения пенометаллов, но и эффективно утилизировать пищевые отходы.

Именно диапазон 5...8 % масс. считается «золотой серединой» между максимальным облегчением веса и сохранением конструкционной целостности. Важно помнить, что «золотая середина» работает только при строгом контроле температуры (обычно 700...900 °C) и времени выдержки. Если передержать расплав даже с 6 % масс. порофора, пена начнет «оседать» под собственным весом.

Благодаря своим исключительным характеристикам, эти материалы станут основой для целого ряда инновационных продуктов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Banhart, J. Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams / J. Banhart // *Progress in Materials Science*. 2001. Vol. 46, no. 6. P. 559–632.
2. Ashby, M. F. *Metal Foams: A Design Guide* / M. F. Ashby, A. G. Evans, N. A. Fleck [et al.]. Boston: Butterworth-Heinemann, 2000. 251 p.
3. Ладьянов, В. И. Влияние температурной обработки расплава на структуру и свойства кристаллизующихся сплавов и композитов / В. И. Ладьянов, А. Л. Бельтюков, С. В. Королев // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2024. № 1. С. 15–22.
4. Лапин, И. В. Механизмы стабилизации металлических пен и формирование пористой металлической структуры / И. В. Лапин, В. В. Жиляков // *Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева*. 2020. Т. 76, № 3. С. 80–84. EDN AEYRUM.
5. Лапин, И. В. Получение пористой меди разложением порообразующих частиц / И. В. Лапин, И. М. Гильмутдинов, Р. Н. Аскарора // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2024. № 2(285). С. 47–51. DOI 10.35211/1990-5297-2024-2-285-47-51. EDN NIXJUM.
6. Лапин, И. В. Получение пеноалюминия с применением альтернативного порофора / И. В. Лапин, И. М. Гильмутдинов // *Вестник Югорского государственного университета*. 2024. Т. 20, № 1. С. 46–50. DOI 10.18822/byusu20240146-50. EDN CJTGZJ.
7. Banhart, J. *Cellular Metals and Metal Foaming Technology* / J. Banhart, M.F. Ashby, N.A. Fleck // MIT-Verlag, Bremen. 2001. 50 p.
8. Banhart, J. *Production, Characterization and Applications of Aluminium Foams* / J. Banhart // *Handbook of Cellular Metals: Production, Processing, Applications* / edited by H.-P. Degischer, B. Kriszt. Weinheim: Wiley-VCH, 2002. P. 15–54.
9. Banhart, J. Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams / J. Banhart // *Progress in Materials Science*. 2001. Vol. 46, no. 6. P. 559–632.
10. Bobev, S. Clathrates of Group 14 with Alkali Metals / S. Bobev, S. C. Sevov // *Journal of Solid State Chemistry*. 2001. Vol. 159, no. 2. P. 423–433.
11. Белов, В. Д. Особенности технологии получения отливок из пеноалюминия / В. Д. Белов, К. Ю. Метёлкин, А. В. Колтыгин // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2011. № 4. С. 58–61.
12. Метёлкин, К. Ю. Влияние технологических параметров на структуру и свойства пеноалюминия / К. Ю. Метёлкин, В. Д. Белов, П. А. Павлихин // *Литейщик России*. 2013. № 11. С. 3134.
13. *Литейные деформируемые и спеченные алюминиевые сплавы: учебник* / В. Д. Белов, Ю. П.

Адлер, А. В. Колтыгин [и др.]; под ред. В. Д. Белова. Москва: Изд. Дом МИСиС, 2015. 519 с.

14. Mahmood, S. H. The effect of adding different percentages of Copper on corrosion of pure Aluminum

/ S. H. Mahmood, K. S. Al-Sarray, A. A. Al-Amiery // Tikrit Journal of Pure Science. 2023. Vol. 28, no. 1. P. 115-122. DOI: 10.25130/tjps.v28i1.1215.

REFERENCES

1. Banhart J. Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. *Progress in Materials Science*. 2001;46(6):559–632.
2. Ashby MF, Evans AG, Fleck NA. *Metal Foams: Design Guide*. Boston: Butterworth-Heinemann; 2000.
3. Ladyanov VI, Beltyukov AL, Korolev SV. The influence of temperature treatment of a melt on the structure and properties of crystallizing alloys and composites. *Metal Science and Heat Treatment*. 2024;1:15-22.
4. Lapin IV, Zhilyakov VV. Mechanisms of stabilization of metallic foams and the formation of a porous metal structure. *Vestnik of Kazan State Technical University*. 2020;76(3):80-84.
5. Lapin IV, Gilmutdinov IM, Askarova RN. Obtaining porous copper by the deposition of pore-forming particles. *Izvestia VSTU*. 2024;2(285):47-51. DOI 10.35211/1990-5297-2024-2-285-47-51.
6. Lapin IV, Gilmutdinov IM. Obtaining aluminum foam using an alternative pore forming agent. *Vestnik of Yugra University*. 2024;20(1):46-50. DOI 10.18822/byusu20240146-50.
7. Banhart J, Ashby MF, Fleck NA. *Cellular Metals and Metal Foaming Technology*. Bremen: MIT-Verlag; 2001.
8. Banhart J. Production, Characterization and Applications of Aluminium Foams. *Handbook of Cellular Metals: Production, Processing, Applications*. Weinheim: Wiley-VCH; 2002.
9. Banhart J. Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. *Progress in Materials Science*. 2001;46(6):559-632.
10. Bobev S, Sevov SC. Clathrates of Group 14 with Alkali Metals. *Journal of Solid State Chemistry*. 2001;159(2):423-433.
11. Belov VD, Metelkin KYu, Koltygin AV. Features of technology to obtain aluminum foam castings. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2011;4:58-61.
12. Metelkin KYu, Belov VD, Pavlikhin PA. The influence of engineering parameters on the structure and properties of aluminum. *Foundrymen of Russia*. 2013;11:3134.
13. Belov VD, Adler YuP, Koltygin AV. *Foundry deformable and sintered aluminum alloys: textbook*. Moscow: MISSIS Publishing House; 2015.
14. Mahmood SH, Al-Sarray KS, Al-Amiery AA. The effect of adding different percentages of Copper on corrosion of pure Aluminum. *Tikrit Journal of Pure Science*. 2023;28(1):115-122. DOI: 10.25130/tjps.v28i1.1215.

Информация об авторах:

Лapин Илья Владимирович – старший преподаватель кафедры Технологии конструкционных материалов, тел.: 8-900-322-21-41.

Lapin Ilya Vladimirovich – Senior Lecturer of the Department of Structural Materials Technology, phone: 8-900-322-21-41.

Гильмутдинов Ильфар Маликович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедры Технологии конструкционных материалов, тел.: 8-905-020-55-68.

Gilmutdinov Ifar Malikovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Structural Materials Technology, phone: 8-905-020-55-68.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.

Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 25.02.2026; одобрена после рецензирования 06.05.2026; принята к публикации 27.05.2026. Рецензент – Петраков О.В., кандидат технических наук, доцент Брянского государственного технического университета.

The article was submitted to the editorial office on 25.02.2026; approved after review on 06.05.2026; accepted for publication on 27.05.2026. The reviewer is Petrakov O.V., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Bryansk State Technical University.