

УДК 669.017

Е.А. Прохорчук¹, А.А. Леонов¹, К.А. Власова¹, А.В. Трапезников¹,
В.И. Никитин², К.В. Никитин²

ПЕРСПЕКТИВА ПРИМЕНЕНИЯ ПЕНОАЛЮМИНИЯ ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ АВИАКОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ (обзор)

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-12-21-30

Представлены способы получения пористого алюминия, его свойства, преимущества и недостатки. Рассмотрено применение алюминиевых вспененных материалов в авиационной и космической промышленности и машиностроении. Установлено, что механические свойства пеноалюминия зависят от размера и расположения пор, а также от способа его получения. Проведение процесса моделирования деформации образцов с различными диаметром пор и типом пористой структуры позволит управлять механическими свойствами пористого алюминиевого сплава.

Ключевые слова: пористая структура, пеноалюминий, энергопоглощающий материал, пористость, теплопроводность.

Е.А. Prokhorchuk¹, А.А. Leonov¹, К.А. Vlasova¹, А.В. Trapeznikov¹,
V.I. Nikitin², K.V. Nikitin²

PROSPECTS FOR THE USE OF HOT ISOSTATIC PRESSING IN CAST ALUMINUM ALLOYS (review)

Provides an overview of methods for producing porous aluminum, its properties, advantages and disadvantages, and considers the use of aluminum foamed materials in the aerospace and mechanical engineering industries. It has been established that the mechanical properties of foam aluminum depend on the size and location of the pores, as well as on the method of its production; carrying out the process of modeling the deformation of samples with different pore diameters and the type of porous structure will make it possible to control the mechanical properties of a porous aluminum alloy.

Keywords: porous structure, foam aluminum, energy-absorbing material, porosity, thermal conductivity.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute»]; e-mail: admin@viam.ru

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет» [Federal State-Funded Education Institution of Higher Education «Samara State Technical University»]; e-mail: upd@samgtu.ru

Введение

Развитие современных технологий производства конструкционных и функциональных материалов является крайне актуальной задачей. К таким материалам можно отнести и пенометаллы, позволяющие наряду с уменьшением массы конструкций разрабатывать новые виды изделий. В настоящее время пенометаллы недостаточно изучены, а процессы, используемые для их производства, не полностью контролируются [1–5].

Пеноалюминий – вид металла, пористость которого достигает 70 %, а поры имеют закрытый или открытый тип. Металлическая пена, в частности алюминиевая, обладает рядом важных свойств: малой плотностью (от 0,2 до 1 г/см³), низкой теплопроводностью ввиду небольшой толщины стенок между соседними порами, высокой эффективностью поглощения энергии при ударной нагрузке, низким пределом прочности при сжатии и растяжении. При открытых ячейках пеноматериал имеет непрерывно полую структуру, каркас которой образован соединенными друг с другом краями ячеек, в то время как при закрытых ячейках полая структура разделена стенками ячеек.

Ячеистая структура пеноалюминия требует особых мер предосторожности при проведении испытаний. Структуру исследуют методами оптической микроскопии, сканирующей электронной микроскопии и рентгеновской томографии. Прочность образцов зависит от отношения размера образца к размеру ячейки, а также от состояния поверхности, способа захвата и нагружения образца.

В настоящее время существуют различные способы получения пористого материала на основе алюминия. Однако, несмотря на все способы производства, главной проблемой является негативное влияние пор в структуре металла на механические свойства.

Процессы получения вспененного алюминия

Вызвать пенообразование чистых жидких металлов путем нагнетания в них газа нелегко. Существует несколько методов, один из которых представлен на рис. 1. В расплавленный алюминиевый сплав добавляют от 5 до 20 % (по массе) керамического упрочнителя, изготовленного из оксида алюминия, диоксида циркония, карбида кремния или диборида титана. Для пенообразования в жидком сплаве используют инертные газы. Пена, образуемая в результате данного процесса, всплывает на поверхность расплава, стекает и затем начинает затвердевать. Температурный градиент пены определяет, как долго она остается в жидком или полутвердом состоянии. Пеноалюминий с закрытыми порами и низкой относительной плотностью может быть получен путем тщательного контроля за процессом впрыска газа и скоростью охлаждения пены [6].

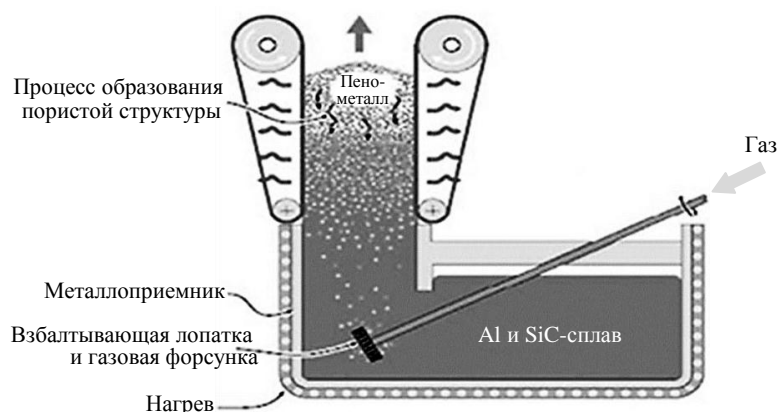


Рис. 1. Схематическое изображение производства алюминиевой пены методом продувки жидкого металла газом (процессы Sumat и Hydro)

Данный подход является наименее затратным в реализации и приводит к появлению пены с относительной плотностью в диапазоне от 0,2 до 0,9.

Алюминиевые сплавы также можно вспенить, добавив в них гидрид титана (TiH₂), выделяющий газ при нагревании (рис. 2). Гидрид титана разлагается на Ti и H₂ при нагревании >465 °С. При добавлении частиц гидрида титана к алюминиевому расплаву происходит быстрое образование больших объемов газообразного водорода –

пузырьков, которые могут привести к образованию пены с закрытыми порами при условии, что отвод пены происходит достаточно медленно и в свою очередь требует высоких показателей вязкости расплава. Повышение вязкости возможно благодаря добавлению 1–2 % (по массе) кальция, который быстро окисляется и образует мелкодисперсные частицы оксида кальция (CaO) и монокальциевого алюмината (CaAl_2O_4). По окончании вспенивания расплав охлаждают для затвердевания пены до тех пор, пока не уйдет водород и пузырьки слипнутся или схлопнутся [7].

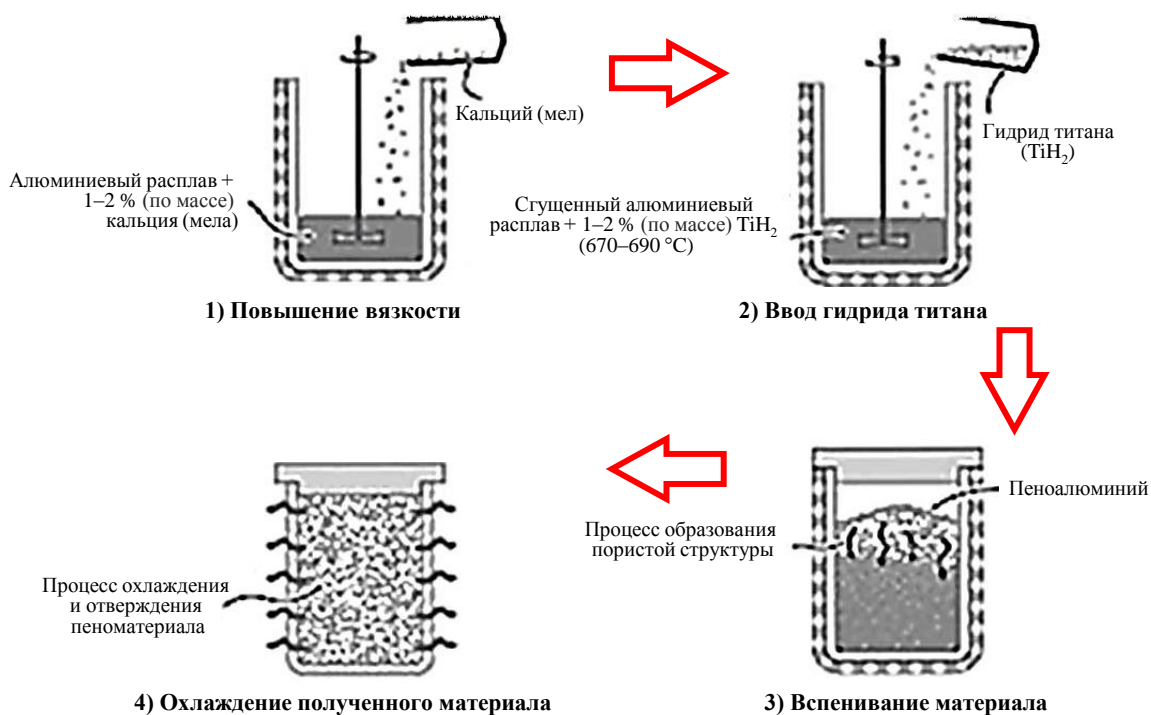


Рис. 2. Схематическое изображение этапов производства аллюминиевой пены путем разложения газообразных частиц в расплаве (процесс Alporas)

Объемная доля гидридов кальция и титана, добавленных в расплав, определяет относительную плотность от 0,2 до 0,3 и в сочетании с условиями охлаждения – размер ячеек, которые могут варьироваться в диапазоне от 0,5 до 5 мм соответственно.

Пенообразователи можно вводить в металлы и в твердом состоянии – путем смешивания и уплотнения порошков. Гидрид титана, как показано ранее, начинает разлагаться при температуре ~ 465 °С, что значительно меньше температуры плавления чистого аллюминия (660 °С) и его сплавов. Такой процесс увеличивает возможность создания пены путем диспергирования гидрида титана в порошки аллюминиевого сплава. После того как компоненты тщательно перемешаны, порошок прессуют в холодном состоянии, а затем экструдируют в брусок с плотностью, близкой к теоретической. Этот «исходный» материал измельчают на мелкие кусочки, помещают в герметичную разъемную форму и нагревают до температуры, немного превышающей температуру солидус сплава. Затем гидрид титана разлагается, создавая пустоты с высоким внутренним давлением. Они расширяются благодаря полутвердому потоку, и аллюминий набухает, образуя пену, заполняющую форму [8]. В результате получают образец той же формы, что и контейнер, и с относительной плотностью всего 0,08. Пена имеет закрытые ячейки диаметром от 1 до 5 мм и плотность от 0,35 до 0,7 г/см³.

Принципиальная схема этапов производства аллюминиевой пены путем замешивания аллюминиевого порошка и гидрида титана показана на рис. 3.

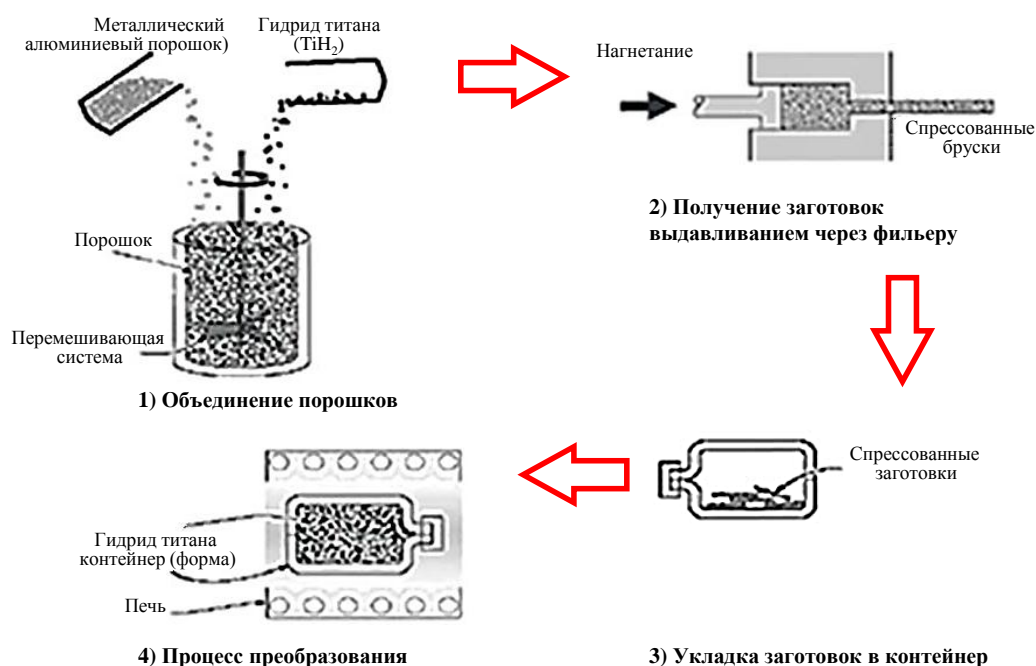


Рис. 3. Схематическое изображение этапов производства алюминиевой пены путем замешивания алюминиевого порошка и гидрида титана (процесс Fraunhofer Merupa)

Получить пеноалюминий также можно путем выжигания полимера из формовочного материала и заливки расплава под давлением (рис. 4). Сначала выбирают шаблон формы из полимерного материала с желаемыми размерами ячеек, засыпают песчано-глинистую смесь и полимерные компоненты. Далее смесь тщательно перемешивают. Затем обжигают форму как для затвердевания литейного материала, так и для выжигания полимерного шаблона и, используя умеренное давление, заполняют сплавом и дают ей остыть. После материал формы удаляют.

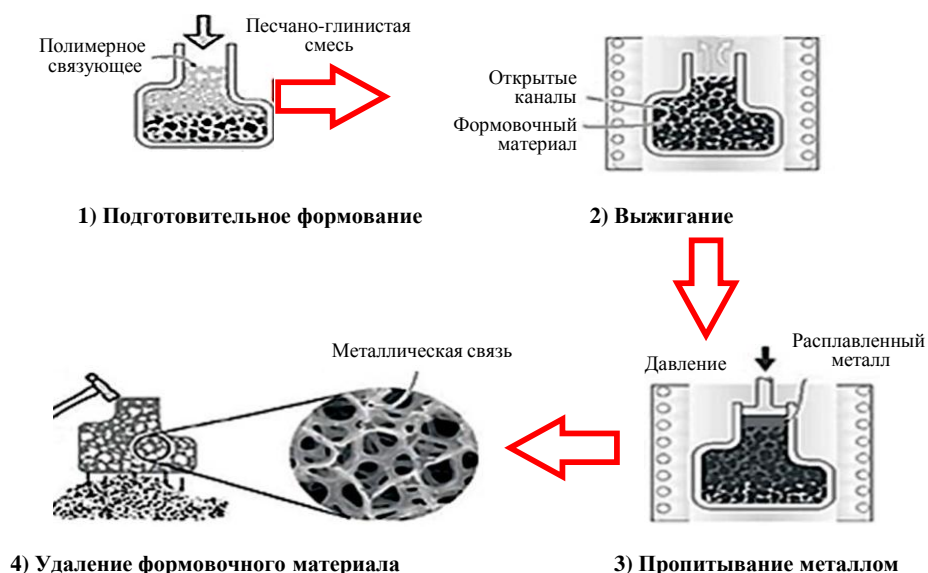


Рис. 4. Схематическое изображение получения пеноалюминия путем выжигания полимерного материала (процесс Duocel)

Размеры пор, полученных с помощью данного метода, составляют 1–5 мм, а относительная плотность алюминиевой пены – всего 0,05.

Свойства пеноалюминия

Рассматривая варианты способов получения пеноалюминия, необходимо учитывать химический состав и свойства. Вспененные материалы из алюминиевых сплавов имеют необычные свойства относительно сплавов с аналогичным химическим составом, но полученных традиционным методом. В статье [9] показана зависимость свойств вспененных материалов от их химического состава (табл. 1).

Таблица 1

Сравнение свойств литого алюминия и вспененных материалов

Свойства	Значения свойств			
	Al 99,5 (литой)	Al 99,5	AlCu ₄	AlSi ₁₂
Плотность, г/см ³	2,7	0,4	0,7	0,54
Средний диаметр пор, мм	–	4,0	3,0	–
Прочность при сжатии, МПа	–	3,0	21,0	7,0
Поглощение энергии при 30 % деформации, МДж/м ³		0,72	5,2	2,0
Модуль упругости, ГПа	67	2,4	7,0	5,0
Электропроводность, ×10 ⁶ См/м	37	2,1	3,5	–
Удельное электросопротивление, ×10 ⁻⁸ Ом·м	2,9	48,0	29,9	–
Теплопроводность, Вт/(м·К)	236,0	12,0	–	13,0
Температурный коэффициент линейного расширения: α·10 ⁶ , К ⁻¹	23,6	23,0	24,0	–

Однако какой бы способ получения вспененных материалов ни рассматривался, важнейшими параметрами являются свойства материалов и их стабильность.

В настоящее время актуальной задачей является определение влияния конструктивного дизайна на механические свойства алюминиевой пены. В работе [10] образцы пеноалюминия с относительной плотностью в диапазоне 0,28–0,48 с однородной и изменяющейся частотой пор изготовлены методом порошковой металлургии с использованием карбамидов в качестве опоры. Для производства сырых брикетов применяли процесс прессования в штампе двойного действия. Опору удалили путем выщелачивания в воде при нагревании, далее образцы спекали при температуре 640 °С в течение 2 ч на воздухе. На рис. 5 показана типичная морфология используемого образца из пеноалюминия.

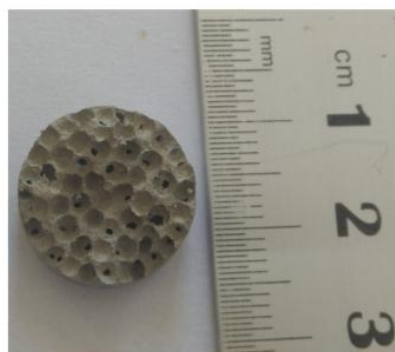


Рис. 5. Морфология образца из пеноалюминия

Механические свойства и способность поглощать энергию изготовленных образцов из пеноалюминия с разными относительной плотностью и распределением пор оценивали с помощью испытания на сжатие (табл. 2).

Результаты исследования показали, что правильная модификация распределения пор может значительно улучшить механические свойства изготовленной пены за счет компенсации нежелательного градиента плотности, создаваемого в ее структуре. Таким образом, для пен с относительной плотностью 0,28, введение желаемой градации частоты пор вызвало увеличение напряжения плато почти в 2 раза и улучшение способности полученного пенопласта к поглощению энергии более чем на 17 %.

Таблица 2

Результаты испытаний на сжатие образцов из пеноалюминия

Относительная плотность	Первая максимальная прочность при сжатии, МПа	Среднее напряжение плато, МПа	Наивысшая точка эффективности поглощения энергии	Уплотнение
0,28 (равномерная частота пор)	6,14	3,99	0,45	0,697
0,28 (расчетная частота пор)	3,176	7,85	0,37	0,66
0,38 (равномерная частота пор)	14,06	12,68	0,422	0,517
0,38 (расчетная частота пор)	8,59	17,57	0,298	0,516
0,48 (равномерная частота пор)	18,9	24,57	0,32	0,481
0,48 (расчетная частота пор)	16,64	28,06	0,27	0,483

В статье [11] показано, что создание градиентной структуры может влиять на механические свойства пеноалюминия. В работе [12] использовали метод литья по выплавляемым моделям для изготовления алюминиевой пены с градиентом плотности. Метод порошковой металлургии также принят некоторыми исследователями для производства металлических пен с градиентной структурой [13]. В работе [14] изготовлена алюминиевая пена с градацией плотности. Показаны более низкий уровень напряжения и более широкий диапазон напряжения плато по сравнению с пеной, имеющей однородную структуру, при испытании на сжатие. Кроме того, показано, что прогрессирующее разрушение алюминиевой пены с градацией плотности начинается в области с более низкой плотностью и распространяется на более плотную область. В работе [15] изготовлена функционально-градиентная пористая решетчатая структура на основе новой разработанной двойной шестиугольной пирамиды с использованием технологии аддитивного производства. Доказано, что разница в геометрических параметрах элементарной ячейки существенно влияет на модуль упругости и предел текучести в создаваемой структуре. В статье [16] приведена функционально синтаксическая пена, основанная на градиенте толщины стенок микрошарика. Доказано, что площадь под кривой «напряжение–деформация» будет на 350 % больше, чем у однородной синтаксической пены. В работе [17] показано, что простая кубическая структура имеет более высокую способность поглощать энергию (на 50 %), чем бодицентрированная. Создана также градиентная структура и указано, что градиентная пена имеет более высокую способность поглощения энергии по сравнению с такой же пеной с однородной структурой ячеек.

В работе [18] определены механические свойства образцов из пеноалюминия состава Al–1,5Ca с закрытыми порами путем проведения экспериментальных измерений и с помощью анализа методом конечных элементов. Для исследования изготовлены два образца с совершенно разными структурами. Далее на образцах проводят испытания на одноосное сжатие. Для моделирования используют различные механические свойства клеточной стенки, выбранные из свойств основного материала. Затем механические свойства определяют путем сравнения рассчитанных кривых «сила–перемещение» с измеренными и анализируют влияние каждого механического свойства на характеристики вспененного материала при сжатии.

Моделирование процесса деформирования образцов с различными диаметром пор и типом пористой структуры позволяет управлять механическими свойствами пористого алюминиевого сплава. Например, в статье [19] проведено моделирование, показывающее преимущества применения пеноалюминия для отливок ответственного назначения. Результаты представленного математического моделирования (рис. 6) показывают, что при одинаковом размере балок и равной нагрузке более устойчивым к изгибу является образец из пеноалюминия на основе сплава АК7ч., при этом он имеет на 38 % меньшую массу, чем образец аналогичного размера из сплава АК7ч. Расчетная масса балки из сплава АК7ч. – 13,3 кг, балки из сплава МЛ5 – 9,05 кг, а балки из пеноалюминия на основе сплава АК7ч. – 8,25 кг. По мнению авторов работы [19], замена деталей и узлов из магниевых сплавов на детали из пеноалюминия приведет к уменьшению массы и повышению прочностных характеристик облегченных конструкций, работающих в условиях статических нагрузок, низких и повышенных температур.

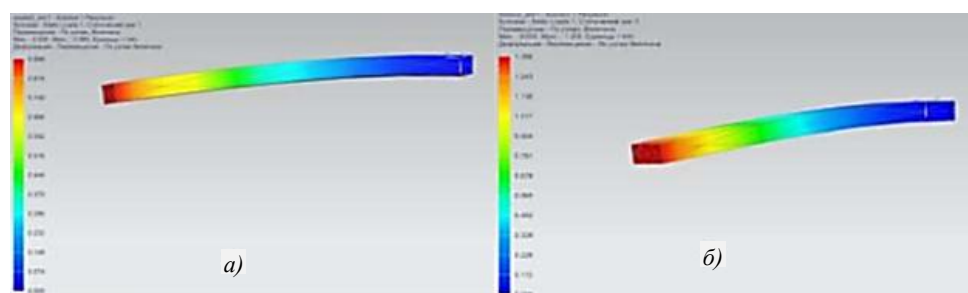


Рис. 6. Нагруженные балки из сплавов АК7ч. (а) и МЛ5 (б)

В статье [20] продемонстрирована модель, позволяющая определять механические свойства численным решением с помощью метода конечных элементов, а также представлено сравнение результатов, полученных численным моделированием с теоретическими значениями (рис. 7). Моделирование в данной работе проводили с использованием программного комплекса SolidWorks и пакета конечно-элементного анализа AnsysWorkbench. При расчетах для задания свойств пористого образца использовали модель из алюминиевого сплава Д16. Анализ результатов проведенных расчетов показал, что с повышением пористости материала среднее значение модуля упругости уменьшается, тангенциальный модуль упругости не изменяется, а деформация практически не зависит от пористости.

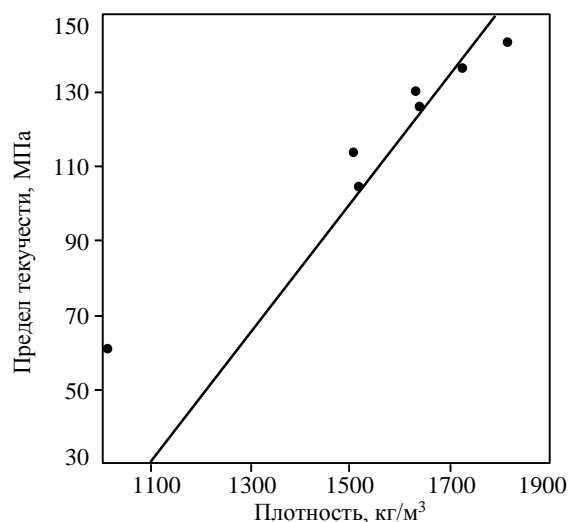


Рис. 7. Зависимость предела текучести пористого алюминия от его плотности

Области применения алюминиевой пены

Алюминиевую пену можно использовать для изготовления различных элементов и конструкций: конструктивных элементов; легких конструкций; энергопоглощающих элементов; механических, вибрационных и звукоизоляционных элементов; фильтров, элементов дизайна, армирующих элементов и элементов теплообменников [21–23].

Полости алюминиевой пены с закрытыми ячейками разделены стенками ячеек, что делает их более стабильными по сравнению с полостями алюминиевых пен с открытыми ячейками. Благодаря своей структуре пены с закрытыми ячейками лучше поддаются механической обработке и обладают хорошими механическими свойствами. Таким образом, их можно использовать в качестве усиливающих элементов для компонентов машин и элементов конструкций.

Наиболее эффективными областями применения алюминиевой пены с закрытыми ячейками являются автомобильная, аэрокосмическая, космическая промышленность и машиностроение. В машиностроении ее используют как усиливающий элемент, а также применяют для механического демпфирования и контроля вибрации.

В космической промышленности алюминиевую пену с закрытыми ячейками используют при изготовлении легких конструкций для управления температурой. Управление энергопотреблением, защита систем изоляции от внешней деформации и механическое демпфирование имеют важное значение в автомобильной и авиакосмической промышленности. Использование таких пен для пассивных систем безопасности автомобилей – одно из основных направлений развития данной отрасли [24–27].

Алюминиевая пена с открытыми ячейками не имеет закрытых полостей, ограниченных стенками ячеек, у них есть только их края. Пены такого типа обладают отличной теплопроводностью и хорошей электропроводностью благодаря своей ячеистой структуре и воздуху в системе. Кроме того, поскольку могут быть получены пены очень высокой плотности и, следовательно, пены с минимальным размером пузырьков, сетчатая структура открытых ячеек хорошо подходит для фильтрования примесей в жидкостях и, возможно, в газах.

Таким образом, алюминиевые пены с открытыми ячейками используют в элементах звукопоглощения, элементах теплообменника, фильтрах и элементах дизайна. Применение такой пены в звукоизоляции имеет очень высокий потенциал, данные элементы уже используют в транспортном секторе [28].

Заключения

Алюминиевые вспененные материалы являются концептуальными для автомобилестроения, авиационной и космической промышленности, а также для различных областей машиностроения и строительства.

Основные возможности алюминиевых вспененных материалов активно применяют в авиастроении. Использование таких пен в конструкциях приводит к уменьшению их массы, а также помогает поглощению разрушающих энергетических воздействий для защиты узлов и агрегатов (применение в картерах коробок передач и редукторов).

Однако, несмотря на наличие доступных подходов к производству сверхлегких пен из алюминиевого сплава, спрос на них на рынке ограничен. Существующие в настоящее время способы получения пористого алюминия неизбежно приводят к снижению уровня его механических свойств, что, по-видимому, является основной причиной низкого спроса на его использование. Но по мере упорядочения пористой структуры механические свойства готовых изделий улучшаются. Поэтому при доведении упорядоченности структуры до идеального состояния возможно получить пористый алюминий, механические свойства которого будут сопоставимы со свойствами компактных материалов.

В последние годы моделирование процесса деформирования образцов с различными диаметром пор и типом пористой структуры позволяет выявить закономерность – зависимость механических свойств от размера и расположения пор, что позволит управлять механическими свойствами пористого алюминиевого сплава.

Библиографический список

1. Каблов Е.Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // Крылья Родины. 2019. № 7–8. С. 54–58.
2. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Гирш Р.И., Серебренникова Н.Ю., Коновалов А.Н. Конструируемые слоистые материалы на основе листов из алюминий-литиевых сплавов и стеклопластиков в конструкциях летательных аппаратов нового поколения // Вестник машиностроения. 2020. № 12. С. 46–52.
3. Антипов В.В. Перспективы развития алюминиевых, магниевых и титановых сплавов для изделий авиационно-космической техники // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 186–194. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-186-194.
4. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
5. Антипов В.В., Клочкова Ю.Ю., Романенко В.А. Современные алюминиевые и алюминий-литиевые сплавы // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 195–211. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-195-211.
6. Способ получения вспененного металла: пат. 2016113 Рос. Федерация; заявл. 20.05.92; опубл. 15.07.94.
7. Sugimura Y., Meyer J., He Y. et al. On the mechanical performance of closed cell Al alloys foams // Acta Materialia. 1997. Vol. 45. P. 5245–5259.
8. Способ производства пористых полуфабрикатов из порошковых алюминиевых сплавов: пат. 2121904 Рос. Федерация; заявл. 17.07.01; опубл. 20.11.98.
9. Калининченко В.А., Калининченко А.С. Способы получения вспененного алюминия, области его применения и ряд особенностей механической обработки // Литье и металлургия. 2005. № 2-1 (34). С. 164–169.
10. Hassanli F., Paydar M.H. Improvement in energy absorption properties of aluminum foams by designing pore-density distribution // Journal of Materials Research and Technology. 2021. Vol. 14. P. 609–619.
11. Hangai Y., Saito K., Utsunomiya T., Kuwazuru O. Fabrication and compression properties of functionally graded foam with uniform pore structures consisting of dissimilar A1050 and A6061 aluminum alloys // Materials Science and Engineering: A. 2014. Vol. 613. P. 163–170.
12. Brothers A.H., Dunand D.C. Density-graded cellular aluminum // Advanced Engineering Materials. 2006. Vol. 8 (9). P. 805–809.
13. Mirzaei M., Paydar M.H. Fabrication and characterization of core-shell density-graded 316L stainless steel porous structure // Journal of Materials Engineering and Performance. 2019. No. 28 (1). P. 221–230.
14. He S.Y., Lv Y.N., Chen S.T. et al. Gradient regulation and compressive properties of density-graded aluminum foam // Materials Science and Engineering: A. 2020. Vol. 772. P. 501–511.
15. Mahbod M., Asgari M. Elastic and plastic characterization of a new developed additively manufactured functionally graded porous lattice structure: analytical and numerical models // International Journal of Mechanical Sciences. 2019. Vol. 155. P. 248–266.
16. Gupta N. A functionally graded syntactic foam material for high energy absorption under compression // Materials Letters. 2007. Vol. 61. P. 979–982.
17. Singh G., Pandey P.M. Uniform and graded copper open cell ordered foams fabricated by rapid manufacturing: surface morphology, mechanical properties and energy absorption capacity // Materials Science and Engineering: A. 2019. Vol. 761. P. 192–205.

18. Jeon I., Katou K., Sonoda T. et al. Cell wall mechanical properties of closed-cell Al foam // *Mechanics of Materials*. 2009. Vol. 41. P. 60–73.
19. Леушин И.О., Грачев А.Н., Назаров В.Н., Горохов П.А. Пеноалюминий – перспективный материал для производства литых изделий ответственного назначения // *Теория и технология металлургического производства*. 2020. № 4 (35). С. 35–38.
20. Бутарович Д.О., Смирнов А.А., Рябов Д.М. Пеноалюминий как энергопоглощающий материал и его механические свойства // *Машиностроение*. 2011. № 7. С. 53–58.
21. Краев И.Д., Сорокин А.Е., Нырцов А.В., Шипин Н.О., Краева А.А., Титкова Ю.М. Пенопласты, предназначенные для обеспечения поглощения акустических волн в широком диапазоне частот // *Труды ВИАМ*. 2018. № 1 (61). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 09.08.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-1-10-10.
22. Железина Г.Ф., Колобков А.С., Кулагина Г.С., Кан А.Ч. Демпфирующие свойства гибридных слоистых металлополимерных материалов на основе алюминиевых, титановых сплавов и слоев органопластика // *Труды ВИАМ*. 2021. № 2 (96). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 08.08.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-10-19.
23. Стоякина Е.А., Курбаткина Е.И., Симонов В.Н., Косолапов Д.В., Гололобов А.В. Механические свойства алюмоматричных композиционных материалов, упрочненных частицами SiC, в зависимости от матричного сплава (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2018. № 2 (62). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 08.08.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-2-8-8.
24. Weber A. Light weighting Is Top Priority for Automotive Industry. URL: <https://www.assemblymag.com/articles/94341-lightweighting-is-top-priorityfor-automotive-industry> (дата обращения: 16.08.2021).
25. Claar T.D., Vu C.J., Hall L. et al. Ultra-lightweight Aluminum Foam Materials for Automotive Applications // *SAE Technical Papers*. 2000. Vol. 36 (6). P. 11–18.
26. Banhart J. Manufacturing Routes for Metallic Foams // *Journal of the Minerals, Metals*. 2000. Vol. 52 (12). P. 22–27.
27. Fuganti A., Lorenzi L., Hanssen A.G., Langseth M. Aluminium foam for automotive applications // *Advanced Engineering Materials*. 2000. Vol. 2 (4). P. 200–204.
28. Mohammed R.H., Mesalhy O., Elsayed M.L. et al. Performance of desiccant heat exchangers with aluminum foam coated or packed with silica gel. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431119339286> (дата обращения: 16.08.2021).