

СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ

© 2016 С.В. Воронин, П.С. Лобода

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

Статья поступила в редакцию 30.09.2016

В статье приведен обзор основных способов получения пористого алюминия. Сформированы группы способов, имеющие схожие технологии получения. Рассмотрены сферы применения пористого алюминия в промышленности. Отражены характеристики полученных пористых изделий. Обнаружена зависимость механических свойств готовых изделий от способа получения пористого алюминия. Установлено, что по мере роста упорядоченности пористой структуры наблюдается улучшение механических свойств. Выявлены способы получения алюминия с наиболее оптимальной пористой структурой для получения изделий с высокими удельными механическими свойствами и высокой весовой эффективностью. В результате проведенного обзора подтверждена необходимость разработки способа создания материала на основе алюминия с упорядоченной пористой структурой. *Ключевые слова:* Пористая структура, пеноалюминий, механические свойства, весовая эффективность, оксидная пленка.

Развитие способов получения материалов с высокой прочностью и малым весом является крайне актуальной задачей. Традиционно, для достижения высокой прочности сплава в основной металл вводятся легирующие элементы, которые в структуре материала образуют упрочняющие фазы. Как известно, образующиеся фазы имеют определенную плотность, которая увеличивает массу материала. Одним из способов снижения плотности металла при сохранении высоких удельных механических характеристик является введение в его объем дефектов структуры, таких как поры.

Пористые металлы имеют сложную макро и микроструктуру. Микроструктура и механические свойства материалов определяются способом получения пор. Макроскопические морфологические характеристики, такие как размер пор или кривизна стенок ячеек имеют явно выраженное влияние на механические свойства. Пористый алюминий может быть с открытой или закрытой (пеноалюминий) пористостью. Материалы с открытой пористостью образуют пространственную сетку, т.е. сеть соединенных друг с другом полостей. Материалы с закрытой пористостью в своей структуре имеют поры, которые представляют собой замкнутую ячейку, в которой заперт газ [1].

По данным автора С. Цукрова [2], пористость алюминия с открытыми порами, как правило, колеблется в диапазоне от 55 до 67%. Механическое поведение данного материала весьма близко к тому, какое имеют материалы с закрытой пористостью: он обладает высокой жесткостью.

Воронин Сергей Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии материалов и авиационного материаловедения. E-mail: hhg2000@mail.ru
Лобода Павел Сергеевич, аспирант.
E-mail: Stimulator90@mail.ru

Прочность на сжатие соответствует почти тем же значениям, что и у пеноалюминия. Пористый алюминий имеет высокую развитую внутреннюю поверхность, составляющую при плотности 1,1 г/см³ от 1 до 2 м²/г. Это свойство может быть использовано в компактных теплообменниках. Акустические характеристики несколько хуже, чем у специальных шумогасящих материалов, однако пористый алюминий имеет много других полезных свойств (негорючесть, высокая стойкость к температурным изменениям и др.), которые делают выгодным его применение для шумоглушения.

Пеноалюминий является материалом с закрытыми порами, размер которых зависимости от параметров технологии может изменяться от долей миллиметра до 20-30 мм и более. Вспененный алюминий обладает высокой удельной прочностью, эффективно поглощает энергию удара, имеет высокий коэффициент звукопоглощения, пониженную теплопроводность.

В настоящее время известны такие отрасли применения пеноалюминия, как автомобилестроение, бронетехника, аэрокосмическое производство, строительство. В автомобилестроении из пеноалюминия делают ударопоглощающие вставки в двери и кузов, бампер и облицовку капотов автомобилей; возможно производство разных крышек, поддонов картеров двигателей автомобилей. В бронетехнике пеноалюминий находит применение в форме многослойных кусков для защиты днища бронемашин или других ее частей от подрыва [3].

Существует множество способов получения пористого материала на основе алюминия [4-32]. Однако наличие пор в структуре металла, при существующих способах изготовления, негативно влияет на механические свойства.

ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ СПОСОБОВ ПОЛУЧЕНИЯ ПОРИСТОГО АЛЮМИНИЯ

В последние годы стало появляться все больше разработок в области вспененных металлов. Наибольший интерес для различных отраслей промышленности представляет вспененный алюминий. Этот материал обладает следующими свойствами:

- 1) Низкая плотность;
- 2) Высокий уровень энерго- и звуко- поглощения;
- 3) Негигроскопичность;
- 4) Хорошая теплоизоляция и устойчивость к огню;
- 5) Высокая удельная жесткость и возможность поглощения большого количества энергии.

6) Экологическая чистота

На сегодняшний день существует множество способов получения пористого алюминия. В процессе анализа нами были выделены группы способов, имеющие схожие технологии получения:

1. Вспенивание алюминиевого расплава. Сущность данной группы методов заключается в том, что расплав металла диспергируют в потоке разреженного газа с непрерывным сжатием получаемой газометаллической смеси до атмосферного давления с образованием пены [4].

Также может быть реализован способ непрерывного получения пеноалюминия: расплав алюминиевого сплава диспергируют в потоке газа, подают газометаллическую смесь под уровень расплава с давлением, превышающем сумму атмосферного и металлостатического давлений. Затем вытесняют область расплава, прилегающую к месту подачи диспергированной смеси, а часть этой смеси непрерывно отводят и охлаждают до затвердевания [5].

С целью повышения механических характеристик могут быть добавлены упрочняющие частицы как в расплав в виде порошка (керамические или интерметаллические частицы) [6], так и вместе с газом в виде аэрозоля SiO_2 (двуокись кремния в виде аэросила) [7].

С помощью данных методов получают пеноалюминий с закрытыми порами, пористостью до 90% и дисперсией пор порядка 1-3мм.

2. Смешивание порошков алюминиевого сплава и порообразователя. Данная группа способов предполагает следующие основные этапы: смешивание порошков алюминиевого сплава с порофорами и добавление порошка меди от 1 до 10%, засыпку в разборную емкость многоразового использования, нагрев смеси алюминиевого порошкового сплава в герметизированной разборной емкости в токе инертного газа (азот или аргон) до температуры образования равновесной Cu-Al эвтектики с последующим охлаждением до затвердевания эвтектики. После чего проводят прессование до получения плотной заготовки,

горячую деформацию заготовки, экструзию, охлаждение и термообработку для осуществления процесса порообразования. Перед термообработкой заготовку помещают в теплоизолированную изнутри форму [8].

Также смесь порошков алюминия и порообразователя засыпают в емкость, подвергают холодному прессованию, затем нагревают заготовку до температуры на 10-20°C ниже температуры образования самой легкоплавкой эвтектики материала заготовки. Далее подвергают горячей деформации с последующим размещением заготовки в форму, проводят высокотемпературную термообработку с последующим охлаждением до температуры 300-450°C и обработку поверхности полученного пористого полуфабриката [9]. С целью увеличения выхода годного осуществляют выдержку при данной температуре в течение 90-120 мин, придают заготовке форму готового изделия, а поверхность подвергают высокотемпературной термообработке [10]. Плотная заготовка, полученная после горячей деформации, может быть переработана на частицы различной формы и размеров и перед высокотемпературной термообработкой частицами заполняют частично или полностью объем формы [11]. При другом способе плотная заготовка, полученная после горячей деформации, может быть подвержена повторному нагреву и горячей деформации. Затем ее охлаждают и проводят последующую высокотемпературную обработку в форме, подвергая заготовку всестороннему равномерному нагреву до температуры на 40 - 70°C выше температуры фазового перехода твердое-жидкое, и повторно охлаждают [12].

Листы пеноалюминия могут быть получены из двух равномерно подаваемых рулонных полос из алюминиевого сплава. В этом случае из первой полосы осуществляют формирование нижней части оболочки, включающей основание и стенки с отбортовками. Затем производят засыпку смеси порошка алюминиевого сплава с порофором при обеспечении степени уплотнения 1,5-1,9 г/см³. Формирование верхней части оболочки происходит путем наложения на нижнюю часть оболочки второй рулонной полосы. Далее проводят завальцовку, нагревают заготовку в проходной печи до температуры не ниже 500°C, и подвергают горячему компактированию в закрытом калибре рабочих валков. Затем режут на листовые заготовки мерной длины и подвергают высокотемпературной термообработке [13].

Для получения слоистых плит пеноалюминия большой толщины смесь порошка алюминиевых сплавов с порообразователем подвергают горячей прокатке в листовые заготовки. Затем поверхности заготовок подвергаются зачистке и собираются в пакет. Между поверхностями листовых заготовок выполняется прослойка из смеси исходного для листовой заготовки порошка

с порофором. Собранный пакет с прослойкой помещается в высокотемпературную печь-форму, обеспечивающую требуемую задержку процесса вспенивания. На первом этапе - до толщины не более 50% от требуемой для готового изделия. На втором этапе подвижную верхнюю часть формы поднимают, обеспечивая вспенивание до толщины готового изделия [14].

Плотные заготовки, полученные из смеси порошков, размещают в форме для вспенивания из диэлектрического материала, сохраняющей геометрию и размеры при термообработке, нагревают, вспенивают в воздушной атмосфере с получением изделия и охлаждают форму со вспененным изделием. Нагрев заготовки при вспенивании производят индукционным способом с полезной удельной мощностью электрического нагрева 20-40 кВт на 1 кг веса заготовки. Охлаждение вспененного изделия до температуры солидуса проводят со скоростью 100-250°C в минуту [15].

С целью улучшения механических характеристик готовых изделий порошок алюминиевого сплава может быть окислен до образования в нем 4-10% окисных фаз и смешан с порошком порообразователя, температура разложения которого превышает температуру солидуса-ликвидуса алюминиевого сплава. Готовую смесь уплотняют и компактируют до получения плотной заготовки. Заготовку прессуют со скоростью истечения 0,5-1,5 м/мин и коэффициентом вытяжки не менее 15 и прокатывают в направлении, перпендикулярном оси прессования заготовки, со степенью деформации 50-90% при температурах ниже температуры солидуса алюминиевого сплава. Затем проводят высокотемпературную обработку заготовки в форме и охлаждение [16].

Полученный материал имеет закрытые поры, пористость порядка 70-80%, размер пор - от 200 мкм. В основном с помощью данной группы методов получают плиты пеноалюминия, полуфабрикаты, реже - изделия готовой формы.

3. Введение порообразователя в расплав алюминиевого сплава. Расплав алюминиевого сплава разливают в кристаллизатор скольжения с одновременным введением порообразователя, формируют слиток со скоростью, обеспечивающей затвердевание расплава до начала активного разложения порообразователя, охлаждают его, подвергают горячей деформации с получением формы готового изделия, помещают в форму и подвергают высокотемпературной обработке. Расплав готовят из алюминиевых сплавов с широким интервалом кристаллизации и из алюминиевых сплавов, армированных частицами тугоплавких соединений дисперсностью не более 20 мкм, с содержанием в объеме расплава 5-15% [17].

С целью улучшения качества слитка может быть использован специальный сплав, содержащий следующие компоненты: магний - 5-6%, цинк - 20-40%, медь - 4-6%, алюминий - осталь-

ное. В расплав алюминиевого сплава вводится магний в количестве 2-3% требуемого содержания в готовом сплаве, полученный расплав интенсивно перемешивается в течение 8-10 минут при температуре не выше температуры ликвидуса полученного сплава. Затем вводятся остальные компоненты, в том числе оставшееся количество магния. Далее проводят непрерывное литье расплава алюминиевого сплава с одновременным введением в него порообразователя, деформируют слиток и подвергают термообработке. Применение данного сплава позволяет предотвратить вспенивание до затвердевания, т.к. он обладает более низкой температурой плавления [18].

Полученный материал имеет закрытые поры, величиной 20-30 мкм. Используется для получения пенометаллов.

4. Введение порообразователя в расплав алюминиевого сплава с дальнейшим распылением смеси. В расплав алюминиевого сплава вводят тугоплавкие частицы керамического материала и сливают в распылитель с одновременным введением в расплав порообразователя. Полученную смесь распыляют с последующим охлаждением. Смешивание, распыление и охлаждение частиц ведётся в течение времени, исключающего термическое разложение порообразователя. Полученные частицы компактируют, обеспечивая требуемую плотность и форму изделия. После распыления частицы засыпают в форму послойно. Каждый последующий слой засыпается на предыдущий после его высокотемпературной обработки и охлаждения. В качестве порообразователя может быть использован порошок гидрида титана (TiH_2) [19] или гидрида редкоземельного металла, имеющего дисперсность от 20 до 300 мкм и степень насыщения, соответствующую атомному отношению водорода к металлу 0,4-1,7 [20].

Полученный металл имеет закрытые поры, пористость - 60%, размер пор 20-300 мкм.

5. Литье алюминиевого сплава в форму с водорастворимыми веществами. Водорастворимый порообразователь помещают в форму, нагревают его выше температуры ликвидуса алюминиевого сплава. Расплав заливают в нагретую до той же температуры форму, заполненную гранулами из водорастворимых солей (хлорид кальция, бария, фторид калия), охлаждают, извлекают из формы и помещают в воду для удаления порообразователя [21]. С целью улучшения пористой структуры изделий в качестве порообразователя могут быть использованы бромид или йодид кальция или бария [22]. Также в качестве порообразователя можно применять водорастворимые гранулы из смеси соды и желатина в соотношении: сода 95-99,5%, желатин 0,5-5% [23]. Пористое изделие с цельнометаллической частью получают путем загрузки в литейную форму нагретого порообразователя. Затем производят заливку расплавленного цветного металла в условиях градиента дав-

ления величиной от 0,2 атм. Количество металла обеспечивает пропитку слоя порообразователя и формирование цельнометаллической части изделия. В качестве порообразователя используют наполнитель из неорганической водорастворимой соли с размером частиц 0,01-5,0 мм. После затвердевания отливки порообразователь вымывается водой, а металлическая часть механически обрабатывается для формирования узла крепления [24].

Данная группа способов применяется для получения материалов, предназначенных для разделения сред фильтрованием, снижения шума и т.п.

Полученный материал имеет открытые поры, величиной 0,01-5мм (в качестве порообразователя – водорастворимая соль) и 0,5-5мм (в качестве порообразователя – смесь соды и желатина).

6. Смешивание порошков алюминиевого сплава и порообразователя в планетарной мельнице. Порошок отходов алюминиевых сплавов и порошок порообразователя смешиваются и подвергаются высокоэнергетической обработке в планетарной мельнице в инертной атмосфере (аргон, азот). Из полученных частиц получают плотную заготовку прессованием (при температуре ниже температуры солидуса алюминиевого сплава). Затем заготовку размещают в форме, которая позволит сохранить геометрию детали при термообработке. Материал формы выбирают таким образом, чтобы избежать химического взаимодействия с материалом заготовки. Далее форму с заготовкой нагревают до температуры интенсивного разложения порообразователя со скоростью 200-2500°C/мин [25]. С целью повышения механических характеристик высокоэнергетическая обработка может происходить в кислород-содержащей атмосфере при энергонапряженности 2-8 кВт на 1 дм³ объема измельчающего устройства до получения от 5 до 20% оксидных фаз [26].

Полученный материал обладает закрытыми порами и имеет плотность 0,6-1,0 г/см³. Представленными методами получают пористые изделия на основе пеноалюминия.

7. Анодное окисление. Для формирования пористых структурированных материалов на микро- или наноуровнях применяют как современные нанотехнологии (например, золь-гель-синтез), так и традиционные методы (электрохимическое травление). Эти технологии обладают рядом важных достоинств: низкой себестоимостью, низкой время- и энергозатратностью, совместимостью с кремниевой технологией интегральных микросхем [27].

Пористый оксид алюминия, представляющий собой массив гексагональных оксидных ячеек с вписанной в центр порой, характеризуется рядом свойств, которые делают его наиболее перспективным из других пористых материалов, используемых в микроэлектронике:

- регулярная, близкая к идеально упорядоченной структура;
- относительная простота управления размерами пор в широком диапазоне;
- высокая однородность пористой структуры, получаемой на больших площадях;
- хорошая воспроизводимость процесса изготовления;
- совместимость процесса получения пористого оксида алюминия со стандартными операциями микроэлектроники [27].

Пористый оксид алюминия является одним из наиболее изученных структурированных пористых материалов, полученных электрохимическим анодированием. Уникальность заключается в том, что в процессе электрохимического травления при определенных технологических условиях возможно получить слой Al₂O₃ с самоупорядоченной структурой пор типа «пчелиные соты». Интеграция наноэлементов в современные интегральные схемы возможна только при использовании ансамблей идентичных наноэлементов [28].

Пористый анодный оксид алюминия с высокой степенью упорядоченности получают методом двойного анодирования. Вначале предварительно выращивают слой «жертвенного» пористого оксида толщиной в несколько десятков микрометров. По мере увеличения толщины растущего оксида, случайное расположение пор преобразуется в упорядоченную структуру. После селективного удаления «жертвенного» слоя оксида, поверхность алюминия наследует упорядоченный рельеф оксида алюминия. Последующее длительное анодирование алюминия приводит к формированию оксида с высокой степенью упорядоченности. Формирование «жертвенного» и основного слоев проводят в потенциостатическом режиме, т.е. в режиме стабилизации напряжения. При этом непрерывно по линейному закону проводят изменение температуры зоны реакции. Это делается для учета изменения плотности электрического тока в ходе анодного окисления [29].

Также известен способ получения пористых мембран на основе алюминия, обеспечивающий равномерное вскрытие пор без разрушения основы обрабатываемых структур. Он включает полировку алюминиевых фольг, анодное окисление, вскрытие дна пор при температуре 40-50°C в смеси концентрированных кислот при следующем соотношении объемных процентов компонентов – фтористоводородная кислота: азотная кислота: уксусная кислота как (2,5-3,5):(1,5-2,5):(4,5-5,5) и очистку каналов пор [30]. Внешний вид полученных мембран показан на рис. 1.

8. Метод плавающей зоны. Пористое металлическое тело (рис. 2) получают продвижением обрабатываемого материала через нагревательное устройство (рис. 3) с применением плавки

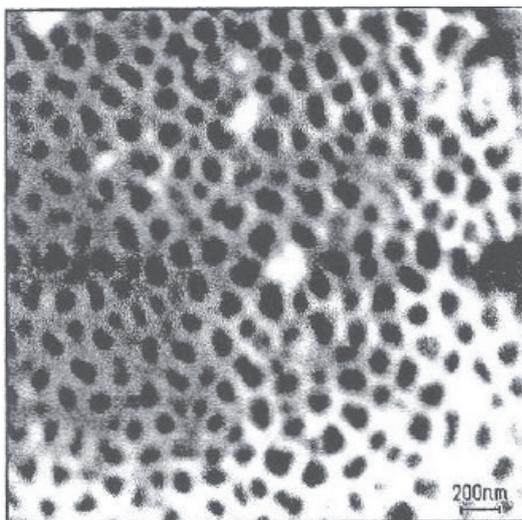


Рис. 1. Структура мембраны на основе алюминия

методом плавающей зоны. Плавку осуществляют в газовой атмосфере с целью растворения газа в получаемой зоне расплавленного металла и постепенным отверждением зоны расплавленного металла при контролируемых температуре и давлении. Следует отметить, что металлический материал должен обладать высокой степенью растворимости газа в жидкой фазе и низкой степенью растворимости газа в твердой фазе.

Данный способ используется для получения пористых изделий в виде стержней.

Полученный материал имеет равномерные микроскопические закрытые поры с диаметром

от 10 нм до 10 мкм и менее, расположенные только в продольном направлении. Пористость получаемого материала может достигать 80%. Материал обладает облегченным весом и высокой удельной прочностью, высокой механической обрабатываемостью, свариваемостью и т.д. [31].

9. Вытяжка алюминиевых трубок. Исходная трубка из чистого алюминия или деформируемых сплавов алюминия повышенной пластичности нагревается до температуры, близкой к температуре плавления. Затем трубка вытягивается в вытяжной машине с получением трубки меньшего диаметра. Полученная трубка разрезается на определенное количество отрезков, которые в свою очередь вкладываются в отрезок исходной трубки. Получившееся изделие также нагревается до температуры размягчения и подвергается вытяжке. Данная операция повторяется 3-5 раз до получения многоканальной структуры. Затем торцы поликапиллярных трубок закрываются инертным материалом. Внешние стенки трубок обрабатываются парами, либо раствором соляной кислоты. В дальнейшем происходит спекание поликапиллярных столбиков для получения готового изделия (рис. 4, 5).

Данный метод технологически сложен и имеет ряд особенностей: для нагрева используется трубчатая вертикальная печь. Вытяжка происходит в инертной атмосфере. На последнем переходе вытяжки поликапиллярные столбики продувают горячим воздухом, при температуре более 200 °С, содержащим кислород.

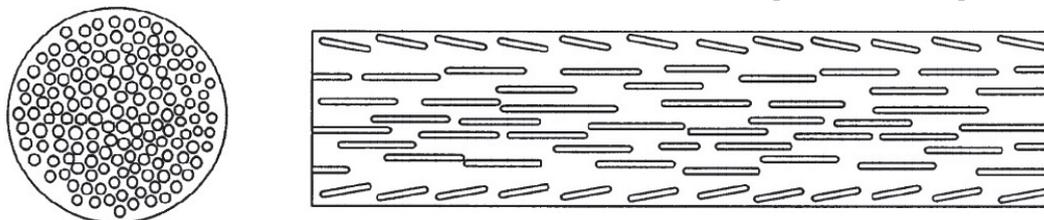


Рис. 2. Пористое металлическое тело: поперечный разрез – слева; продольный разрез – справа

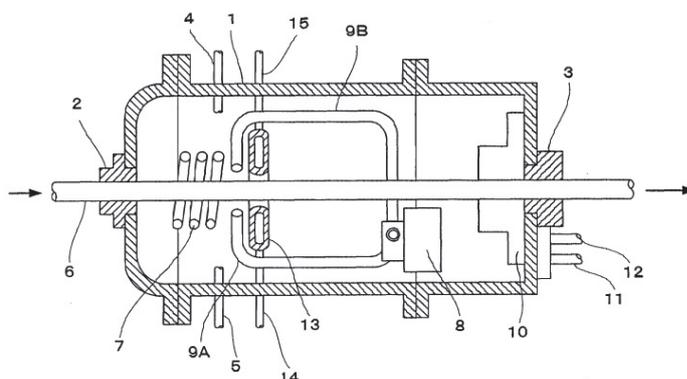


Рис. 3. Устройство для получения пористого металлического тела:

- 1 – воздухонепроницаемый контейнер; 2,3 – уплотнители; 4 – вытяжная труба; 5 – труба для подачи газа;
- 6 – исходный материал; 7 – катушка высокочастотного нагрева; 8 – установка для дутья; 9А,9В – трубы для дутья;
- 10 – охлаждающий блок; 11,12 – трубы для циркуляции охлаждающей воды; 13 – охлаждающая рубашка в форме кольца; 14,15 – трубы для циркуляции охлаждающей воды

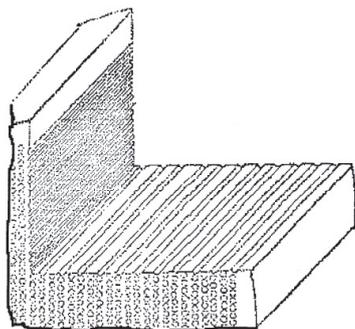


Рис. 4. Фрагмент объемной заготовки предлагаемого конструкционного материала в продольном и поперечном разрезе

Полученный материал имеет упорядоченную структуру прямолинейных непрерывающихся микроканалов с диаметром от 0,1 до 200 мкм, и прочность, соизмеримую с прочностью сплошных материалов [32].

Из рассмотренного способа остается непонятной возможность получения равномерной структуры непрерывающихся каналов, которые и определяют высокий уровень механических характеристик материала с широким диапазоном диаметра пор.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие способов получения пористых металлов, обладающих высокой весовой эффективностью, является крайне актуальной задачей. Из-за своих свойств особое место в промышленности занимает пористый алюминий. Как стало видно из проведенного обзора, механические свойства пористого алюминия зависят от способа его получения. Существующие на данный момент способы получения пористого алюминия неизбежно ведут к снижению уровня его механических свойств. Однако, по мере упорядочения пористой структуры, механические свойства готовых изделий улучшаются. Доводя упорядоченность структуры до идеальной, возможно получить пористый алюминий, механические свойства которого будут превосходить свойства компактного материала [33].

Одной из задач, предшествующей получению алюминия с упорядоченной пористой структурой, является проведение моделирования деформирования образцов с различным диаметром пор и типом пористой структуры. В статье [34] также затронута проблема прогнозирования упругих свойств пористых материалов.

Выявление закономерностей зависимости механических свойств от размера и расположения пор позволит управлять механическими свойствами материалов из алюминиевых сплавов, что значительно расширит области возможного применения пористого алюминия в машино-, авиа-, и судостроении.

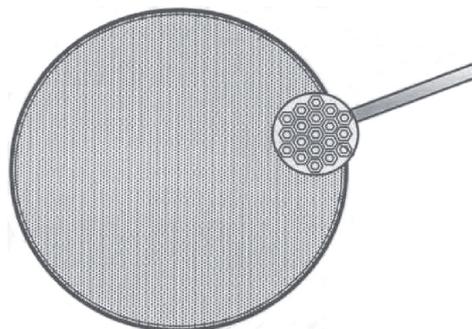


Рис. 5. Структура предлагаемого конструкционного материала в фильтрующих элементах

Материал с высокими удельными характеристиками будет обладать малой плотностью, что позволит создавать конструкции малого веса, увеличивая при этом их весовую эффективность. Также наличие упорядоченной пористой структуры, по сравнению с обычной неупорядоченной, позволит создавать более эффективные демпфирующие материалы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Еришов М.Ю., Лепешкин И.А.* Технологии получения автомобильных деталей из вспененного алюминия // *Дизайн. Теория и практика.* 2010. №4. С.77-88
2. *Цукров С.* Вспененный алюминий // *Уральский Рынок Металлов.* 2009. № 11. С.15-18
3. *Бутарович Д.О., Смирнов А.А.* Расчетное исследование механических свойств пеноалюминия. URL: www.niism-kb.narod.ru (дата обращения 12.04.2016).
4. *Буньков В.Н., Решетников Е.Ю., Глызин В.В., Ливанцов С.В.* Способ получения вспененного металла: патент РФ № 2016113; опубл. 15.07.1994; бюл. № 20.
5. *Буньков В.Н., Решетников Е.Ю., Бугаков В.П.* Способ получения вспененного алюминия: патент РФ № 2026394; опубл. 09.01.1995; бюл. № 1.
6. *Вольфганг В.Р., Бьерн К.* Способ получения пенометалла: патент РФ № 2046151; опубл. 20.10.1995; бюл. № 29.
7. *Буньков В.Н.; Решетников Е.Ю.; Ливанцов С.В.; Глызин В.В.* Способ получения пеноалюминия: патент РФ № 2068455; опубл. 27.10.1996; бюл. № 30.
8. *Литвинцев А.И., Литвинцев С.А.* Способ производства пористых полуфабрикатов из порошковых алюминиевых сплавов: патент РФ № 2121904; опубл. 20.11.1998; бюл. № 32.
9. *Арбузова Л.А., Старовойтенко Е.И., Трубкина Е.М., Польшкин И.С., Талалаев В.Д., Бондарев Б.И., Щелбакин В.В.* Способ получения пористых полуфабрикатов из порошков алюминиевых сплавов: патент РФ № 2138367; опубл. 27.09.1999; бюл. № 27.
10. *Арбузова Л.А., Старовойтенко Е.И., Польшкин И.С., Андреев Д.А., Талалаев В.Д., Гинжол А.В.* Способ получения пористых изделий из порошков алюминиевых сплавов: патент РФ № 2139774; опубл. 20.10.1999; бюл. № 29.
11. *Арбузова Л.А., Талалаев В.Д., Трубкина Е.М., Польшкин И.С., Старовойтенко Е.И.* Способ получения пористых полуфабрикатов из порошков алюминиевых сплавов: патент РФ № 2153957; опубл. 10.08.2000; бюл. № 22.
12. *Арбузова Л.А., Старовойтенко Е.И., Польшкин И.С.,*

- Вачьянц С.Г. Способ получения пористых полуфабрикатов и готовых изделий из порошков алюминиевых сплавов (варианты): патент РФ № 2154548; опубл. 20.08.2000; бюл. № 23.
13. Родинков С. В., Орлов В. К., Развальяева Г. Н., Клячко Л. А., Вакаренко В. В., Сарафанов М. А., Алёхин А. Г. Способ и линия получения листов пеноалюминия: патент РФ № 2430811; опубл. 10.10.2011; бюл. № 28.
 14. Пасечник Н.В., Тонконогов В.Я., Родинков С.В., Павленко В.В., Орлов В.К., Сарафанов М.А. Способ получения слоистых плит из пеноалюминия: патент РФ № 2393061; опубл. 27.06.2010; бюл. № 18.
 15. Колеров В.С., Манцевич Н.М. Способ получения изделий из композиционного материала на основе пеноалюминия: патент РФ № 2444417; опубл. 10.03.2012; бюл. № 7.
 16. Пономарев А.В. Способ получения пористых полуфабрикатов из порошков алюминиевых сплавов: патент РФ № 2458762; опубл. 20.08.2012; бюл. № 23.
 17. Романова В.С., Польшкин И.С., Пономаренко А.М., Яковенко В.В., Новикова М.Б., Вачьянц С.Г., Король В.К. Способ получения изделий из пеноалюминия: патент РФ № 2180361; опубл. 10.03.2002; бюл. № 7.
 18. Пономаренко А.М., Польшкин И.С., Романова В.С., Новикова М.Б., Трубкина Е.М., Бисьев А.М. Алюминиевый сплав для получения пеноалюминия и способ получения пеноалюминия из него: патент РФ № 2233346; опубл. 27.07.2004; бюл. № 21.
 19. Старовойтенко Е.И.; Арбузова Л.А.; Польшкин И.С.; Вачьянц С.Г.; Комов В.И. Способ получения пористого металла и изделий из него: патент РФ № 2193948; опубл. 10.12.2002; бюл. № 34.
 20. Стеньгач А.В., Голубева В.Н., Кузнецов А.А. Способ получения полуфабриката для изготовления изделий из пенометалла: патент РФ № 2360020; опубл. 27.06.2009; бюл. № 18.
 21. Ковтунов А.И., Чермашенцева Т.В., Семистенов Д. А., Сидоров В. П. Способ получения пеноалюминия: патент РФ № 2400552; опубл. 27.09.2010; бюл. № 27.
 22. Ковтунов А.И., Хохлов Ю.Ю. Способ формирования пеноалюминия: патент РФ № 2492257; опубл. 10.09.2013; бюл. № 25.
 23. Хохлов Ю. Ю., Ковтунов А. И., Семистенов Д. А. Способ получения пеноалюминия: патент РФ № 2455378; опубл. 10.07.2012; бюл. № 19.
 24. Черный Л.Е., Черный М.Л., Черный Н.Л. Пористое изделие с цельнометаллической частью и способ его получения: патент РФ № 2200074; опубл. 10.03.2003; бюл. № 7.
 25. Иванов Д.О., Портной В.К., Солонин А.И., Аксенов А.А. Способ получения пористых материалов из алюминиевых сплавов: патент РФ № 2335379; опубл. 10.10.2008; бюл. № 28.
 26. Колеров В.С., Манцевич Н.М. Способ получения пористых материалов на основе пеноалюминия (изделий) из алюминиевых сплавов: патент РФ № 2450892; опубл. 20.05.2012; бюл. № 14.
 27. Мошников В.А., Соколова Е.Н., Спивак Ю.М. Формирование и анализ структур на основе пористого оксида алюминия // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2011. №2. С.13-19.
 28. Tipton K., Lu G. Method of porogen removal from porous low-k films using UV radiation [Способ удаления порообразователя из пористых низкокалорийных фольг с использованием УФ-излучения]. Patent US, no. 7208389, 2007. (Publ. 24.04.2007).
 29. Белов А.Н., Гаврилов С.А., Железнякова А.В., Тихомиров А.А., Тузовский В.К., Шевяков В.И. Способ получения пористого анодного оксида алюминия: патент РФ № 2324015; опубл. 10.05.2008; бюл. №13.
 30. Клименко Г.Л., Старков В.В., Фирсов А.А. Способ получения пористых мембран на основе алюминия: патент РФ № 2350380; опубл. 27.03.2009; бюл. № 9.
 31. Накадзима Хидео. Способ получения пористого металлического тела: патент РФ № 2281980; опубл. 20.08.2006; бюл. № 23.
 32. Конов М.А., Хамизов Р.Х. Микроструктурный конструкционный материал на основе алюминия или его сплавов: патент РФ № 2371498; опубл. 27.10.2009; бюл. № 30.
 33. Влияние расположения и размера пор на напряженно-деформированное состояние модели образца из сплава АД1 при растяжении / С.В. Воронин, В.Д. Юшин, Г.З. Бунова, Д.Ю. Лысевич, А.В. Михайлов // Материалы II Всероссийской молодежной научной конференции «Современные проблемы математики и механики». Томск: Изд-во Томского ун-та, 2011. С. 232-237.
 34. Fedotov A.F. Modeling of elastic properties of discretely reinforced composites with an implementation of R. Hill method and porous materials' deformation model // Life Science Journal. 2014. V. 11. P. 473-479.

METHODS OF OBTAINING POROUS MATERIALS BASED ON ALUMINUM

© 2016 S.V. Voronin, P.S. Loboda

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov

The article presents an overview of the main methods for producing porous aluminum. Formed groups of methods with similar production technology. Considered the scope of application of porous aluminum in the industry. Reflects the characteristics of the obtained porous products. The dependence of mechanical properties of finished products from the method of obtaining porous aluminum. It is established that with the growth of the ordered porous structure is observed improvement of the mechanical properties. Identified methods for the production of aluminum with the most optimal porous structure for obtaining products with high specific mechanical properties and high weight efficiency. As a result of the review confirmed the need to develop ways to create material based on aluminium with an ordered porous structure.

Keywords: Porous structure, aluminum foam, mechanical properties, weight effectiveness, oxide film.

Sergey Voronin, Candidate of Technics, Associate Professor at the Technology of Metals and Aircraft Material Department.
E-mail: hhg2000@mail.ru.

Pavel Loboda, Graduate Student.
E-mail: Stimulator90@mail.ru