



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov





Систематический обзор технологий производства металлической пены

Шиама Шарма^{1, а}, Анураг Йоши^{1, б, *}, Йогендра Раджпут^{2, с}

¹ Манипалский университет, Джайпур, Раджастан, 303007, Индия

² Инженерный колледж Раджкия, Майнпури, Уттар-Прадеш, 205119, Индия

^а  <https://orcid.org/0000-0002-1510-5871>,  shyamsunder.sharma@jaipur.manipal.edu; ^б  <https://orcid.org/0000-0002-8231-9423>,  anuragjoshi355@gmail.com;

^с  <https://orcid.org/0000-0002-9662-0903>,  yogendrasingh.rajpoot@recmainpuri.in

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 671.22

История статьи:

Поступила: 06 августа 2023

Рецензирование: 11 августа 2023

Принята к печати: 23 августа 2023

Доступно онлайн: 15 декабря 2023

Ключевые слова:

Прямое вспенивание расплавов

Порошковая металлургия

Технология осаждения

Пенообразующее вещество

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье представлен всесторонний обзор методов производства, материалов, свойств и проблем, связанных с пенометаллами; особое внимание уделяется пенометаллам на основе алюминия и титана. Пористые пенометаллы вызывают интерес благодаря уникальному сочетанию низкой плотности, высокой жесткости и высокой способности поглощать энергию. Металлическая пена известна своим уникальным сочетанием физических и механических свойств, включая повышенную жесткость, удельную прочность при высоких температурах, легкий вес и эффективное поглощение энергии при относительно низкой площади текучести. Пенометалл широко используется в автомобильной, судостроительной и космической промышленности. Он имеет высокую пористость, низкую относительную плотность и высокую прочность, что повышает эксплуатационные характеристики изделия. В аэрокосмической и автомобильной промышленности требуется материал с высоким соотношением прочности и удельного веса. **Методы.** Для удовлетворения этой потребности было разработано множество методов производства металлической пены, таких как метод расплавления, метод осаждения и метод порошковой металлургии. Метод литья широко используется для производства металлической пены по сравнению с другими методами. **Результаты и обсуждение.** При производстве пенометаллов на основе алюминиевого сплава обычно используется метод прямого вспенивания расплавов. Гидрид титана (TiH₂) был популярным пенообразующим веществом, но высокая скорость его разложения и ограничения по стоимости привели к разработке альтернативных пенообразователей, таких как CaCO₃ (карбонат кальция). Титановую пену часто изготавливают, используя наполнитель для формирования пор. Этот метод включает смешивание титанового порошка с наполнителем, формирование заготовки, а затем спекание для удаления наполнителя и создания пористой структуры, поскольку метод, основанный на использовании наполнителя для формирования пор, позволяет точно контролировать свойства пены, такие как размер пор, пористость и относительную плотность. Результаты также показывают, что пористость пенометаллов может варьироваться от 50 до 95 %, что совпадает с данными из литературы. Пористые структуры могут включать в себя открытые и закрытые поры, а также их комбинацию, из-за чего различные участки материала обладают разными механическими и термическими свойствами. В различных литературных источниках также отмечается, что относительная плотность, которая представляет собой отношение плотности пенометалла к плотности порошкового материала, варьируется от 0,02 до 0,44 в зависимости от используемого метода производства.

Для цитирования: Шарма Ш.С., Йоши А., Раджпут Й.С. Систематический обзор технологий производства металлической пены // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 4. – С. 22–35. – DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.4-22-35.

Введение

Во многих исследовательских работах пористые материалы называют новыми материалами. Первоначально о них сообщил де Меллер в 1925 году. В его патенте было предложено вспенивание легких металлов путем впрыски-

вания инертного газа или с использованием газообразующего вещества, газо-эвтектическая реакция и др. Эти процессы требуют больших капиталовложений и использования средств защиты, поскольку в процессе вспенивания выделяется газ [1]. Металлическую пену можно охарактеризовать как легкий материал с высокой жесткостью. Когда в жидкий металл добавляется газообразующее вещество и выделяются газы, которые после затвердевания улавливаются, мы получаем металлическую пену, напри-

*Адрес для переписки

Йоши Анураг, к.т.н., доцент

Манипалский университет, Джайпур,

303007, Раджастан, Индия

Тел.: +91-9772844555, e-mail: anuragjoshi355@gmail.com

мер алюминиевую. Интерес исследователей к разработке металлической пены заключается в получении уникальных свойств, таких как малый удельный вес, высокая газопроницаемость, высокая жесткость, низкая теплопроводность, электроизоляционные свойства и высокая ударопоглощающая способность. Чтобы получить эти редкие свойства, исследователи попытались создать различные типы металлической пены из разных металлов и сплавов, таких как стали, Cu, Al, Al-Si, Al-Mg, Pb, Fe, Ni3Al, Mg, Zn, а также Ti, Al-Cu, композиты с металлической матрицей, металлические стекла и др. Среди них огромное развитие в промышленном производстве получила алюминиевая пена [2]. Пенометаллы нашли широкое распространение в различных отраслях промышленности, таких как автомобильная и космическая, благодаря хорошим механическим свойствам и небольшому удельному весу. Алюминиевая пена обладает способностью поглощать удары и вибрацию благодаря своей ячеистой структуре с закрытыми порами, она также имеет хорошие тепло- и звукоизоляционные свойства. Производить металлическую пену (в частности, алюминиевую пену) следует с помощью процессов, которые требуют меньше капиталовложений и являются наиболее безопасными.

Способ получения металлической пены

Существуют различные методы получения металлической пены: из расплавленного металла, метод осаждения, порошковая металлургия (рис. 1).

Получение металлической пены из расплавленного металла

Метод изготовления металлической пены из расплавленного металла обычно используется из-за его экономичности и простоты. Первым шагом является подготовка расплавленного металла. Для получения пористого материала с закрытыми порами из расплавленного металла требуется некоторое количество пенообразователя или впрыск в расплавленный материал газа со стабилизирующим материалом (SiC , Al_2O_3), необходимым для увеличения вязкости расплавленного металла [4].

Метод газо-эвтектической реакции (или газар-процесс), а также синтактное вспенивание с использованием наполнителя также используются исследователями для изготовления металлической пены из расплавленного металла.



Рис. 1. Способы получения металлической пены [3]

Fig. 1. Metal foam production methods [3]

Выбор метода зависит от требуемой пористости, относительной плотности и других факторов, поскольку эти показатели варьируются от метода к методу. Пористость от 80 до 97 % можно получить в металлической пене методом впрыска газа или с использованием пенообразующего агента. Пористость от 5 до 75 % – это не так уж и много, но ее можно достичь в металлической пене за счет газо-эвтектической реакции. Это было исследовано Банхартом (Banhart). Конечная пористость зависит от процессов и контролируемых параметров, таких как частота вращения мешалки, время перемешивания, пенообразователь, количество пенообразователя, выбор газов для метода впрыска, например, аргона или неона. Для получения наилучшего результата многие исследователи оптимизировали эти параметры.

Путем впрыска газа в расплавленный металл

В этом процессе металлическая пена получается за счет впрыскивания подходящего газа в подготовленный расплавленный металл. Метод впрыска газа не подходит для легко окисляющихся материалов (Mg, Ti). Однако алюминиевая пена широко изготавливается таким способом, при этом можно легко получать сложные формы [5]. Рассматриваемый метод был разработан компанией Alcan International. Согласно этому методу для увеличения вязкости расплавленного металла требуется небольшое количество добавок. Перед добавлением керамического порошка в расплавленный металл требуется предварительный нагрев для увеличения сма-

чиваемости между керамическими частицами и расплавленным металлом. Затем расплавленный металл в печи продувается инертным газом, углекислым газом, азотом, воздухом или любым другим газом. Пузырьки газа быстро поднимаются сквозь расплавленный металл из-за выталкивающей силы последнего. Для остановки течения пузырьков газа внутри расплавленного металла вводят некоторые добавки, повышающие вязкость расплавленного металла. Этими добавками являются оксид алюминия, оксид магния, карбид кремния. Кроме того, необходимо контролировать и другие параметры, такие как температура [6]. Необходимо непрерывно создавать мелкие сферические пузырьки газа с помощью вращающейся крыльчатки или диафрагмы. Юань (Yuan) и Ли (Li) изучали стадии образования пузырьков, используя отверстие: стадию зарождения (1), стадии роста (2), стадии отделения (3). Размер пузырьков зависит от угла конусности отверстия (при увеличении угла конусности отверстия размеры пузырьков уменьшаются); диаметр ячейки также зависит от диаметра отверстия и давления в камере. Скорость потока газа тоже влияет на размер пузырьков. По мнению авторов, размер пузырьков увеличивается по мере увеличения скорости потока газа [7]. Более мелкий размер пор делает их сферическими, стабильными и снижает вероятность дефектов стенок пор. С помощью метода статического впрыска газа невозможно эффективно контролировать размер пор металлической пены.

Другой метод контроля размера пор в металле разработал Нинчжэнь Ван (Ningzhen Wang). Этот метод показан на рис. 2; в нем использовался

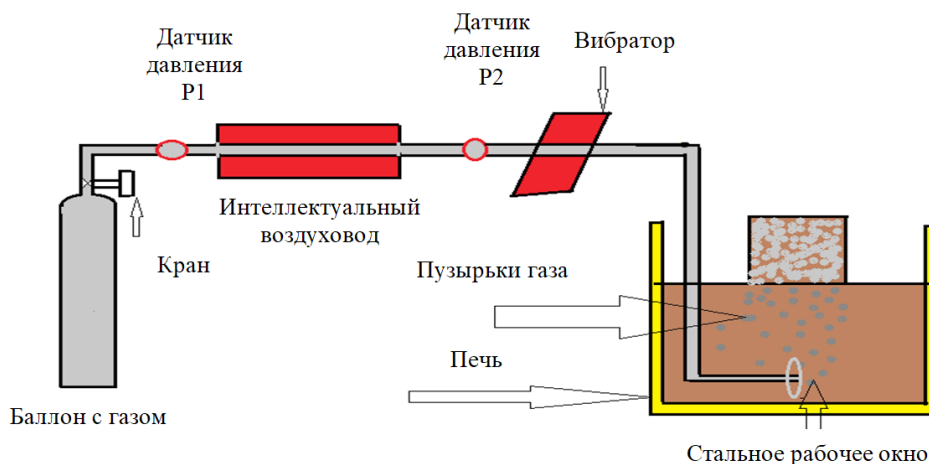


Рис. 2. Метод впрыска газа в расплавленный металл [8]

Fig. 2. Melt gas injection method [8]

способ динамического впрыска газа. Динамический впрыск газа реализуется за счет регулирования интенсивности вибратора в диапазоне от (0 до 100 %). При 100 % интенсивности получаются поры диаметром 4 мм, что меньше, чем при статическом впрыске газа [8]. В этом методе пористость металлической пены может варьироваться от 50 до 90 % [9]. Пену, имеющую в своем составе керамический порошок, трудно разрезать из-за ее твердости. Поэтому для получения из пенометалла изделия сложной формы нужно изначально использовать специальную форму. Расплавленную металлопену собирают из печи, чтобы придать ей форму. Для производства металлической пены методом впрыскивания газа требуются различные этапы.

Путем добавления пенообразующего агента в расплавленный металл

Согласно этому методу для производства металлопены в расплавленный металл необходимо добавлять специальные пенообразователи, такие как гидроксид титана (TiH_2), карбонат кальция (CaCO_3), гидрид циркония (ZrH_2), оксид марганца (MnO_2), доломит ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), карбонат магния (MgCO_3). Чаще всего для производства металлической пены используются карбонат кальция и гидроксид титана. Скорость разложения гидроксида титана выше, чем у карбоната кальция, и, следовательно, он легко выделяет газ. Для стабилизации расплавленного металла необходимы добавки – Al_2O_3 , SiC . Сле-

довательно, затраты на производство увеличиваются. Чтобы сделать этот процесс более экономичным, М. Хиедари Галех (M. Hiedari Galeh) использовал CaCO_3 в качестве пенообразователя без использования порошка-стабилизатора. Для изготовления металлической пены используется алюминиевый сплав Al356. Алюминиевый сплав нагревается выше температуры плавления. После того как алюминий расплавится ($\sim 700^\circ\text{C}$), в него добавляют CaCO_3 , и начинается разложение пены. В результате разложения выделяется газ (CO_2). CaCO_3 необходимо равномерно перемешать с помощью мешалки. На этом этапе контролируемыми параметрами являются частота вращения мешалки, количество пенообразователей, время работы мешалки, температура, скорость подъема пузырьков газа и вязкость расплава. Схема установки для перемешивания показана на рис. 3. Эти параметры влияют на размер пор, относительную плотность, пористость пенометалла. Размер пор и их распределение влияют на прочность, звукоизоляцию, тепловые свойства и др. Необходимо оптимально контролировать этот параметр. Контролируя размер пузырьков, образующихся при выделении газа внутри расплава, исследователь контролирует размер пор и их распределение [10]. Путем введения в расплавленный металл добавок, которые повышают вязкость и стабилизируют стенки пор, предотвращают лопание пузырьков и создают правильную структуру пены [11]. Пористость и размер пор контролируются за счет времени

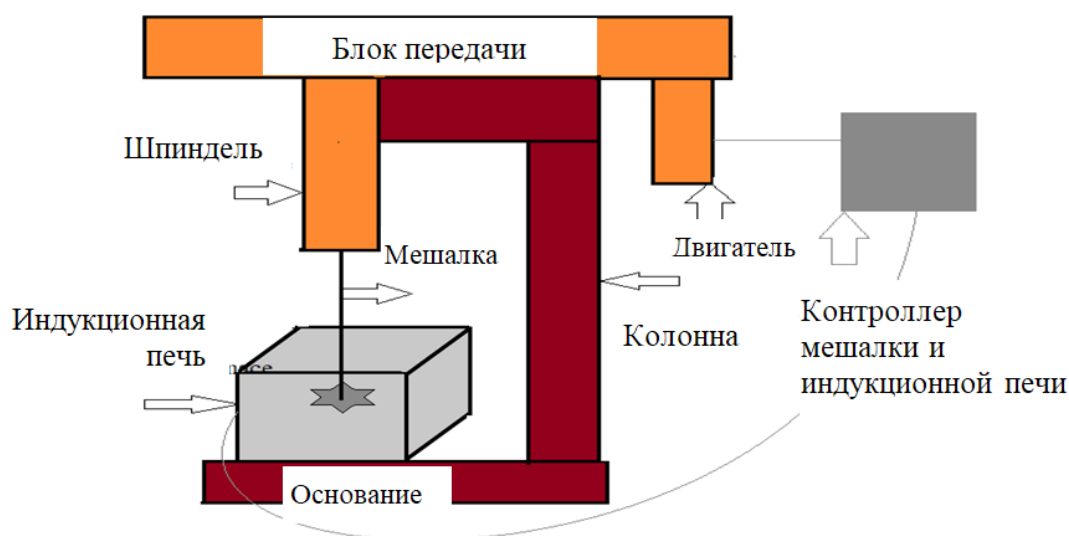


Рис. 3. Установка для литья с механическим замешиванием частиц в расплав [12]

Fig. 3. Stirrer casting setup [12]

выдержки и количества CaCO_3 . При повышении содержания карбоната кальция увеличивается размер пор, что негативно отражается на размере пор, пористости и относительной плотности [12]. Свойства пенометалла под сжимающей нагрузкой также зависят от пористости, размера пор и относительной плотности. Относительная плотность и однородность пор являются факторами, влияющими на прочность металлической пены. Прочность на сжатие и способность поглощать энергию возрастают с увеличением размера пор. Оба эти свойства ухудшаются по мере увеличения количества CaCO_3 в расплавленном металле. Пористость пенометалла зависит от температуры вспенивания, так как она оказывает влияние на плотность; прочность пенометалла на сжатие зависит от нее в меньшей степени, однако сильно зависит от времени перемешивания [13].

Два металлических сплава, изготовленные разными способами – методом механического замешивания частиц в расплав и методом инфильтрации, – оба имеют одинаковую прочность на сжатие, но при использовании метода механического замешивания частиц в расплав достигается меньшая пористость по сравнению с методом инфильтрации. Для большей скорости деформации используется металлическая пена, изготовленная методом инфильтрации. Скорость деформации будет высокой в случае высокой пористости; высокая пористость достигается при добавлении в металл большого количества пенообразующего агента – 10 или 15 % [14]. Чтобы добиться наилучших механических свойств и структуры поверхности, размера пор, относительной плотности и других показателей, исследователи пытаются оптимизировать различные параметры. Си Си Ян (C.C. Yang) утверждал, что нет необходимости контролировать скорость распада, поскольку важно контролировать растворение вспенивающего газа в расплавленном металле, а они должны быть прямо пропорциональны друг другу. Если этого не произошло, структура пены будет нестабильной. Эффективность вспенивания расплавленного металла газообразным водородом составляет 17 %. Поэтому необходимо использовать пенообразователь в соответствующем количестве, так как излишки газа могут выйти из расплавленного металла [15]. По сравнению с методом GI получается меньшая закрытая пористость и больше микро-

пор в стенках пор. При этом пеноалюминий изготавливается как методом вспенивания, так и методом газового нагнетания [16].

Газо-эвтектическая реакция

Этот метод также известен как газар-процесс. Он был разработан украинским ученым Шаповаловым в 1993 году. Его преимущества по сравнению с методами порошковой металлургии и вспенивания: отсутствие потерь сырья, отсутствие химической обработки, легкость контроля размера и ориентации пор, кроме того, по сравнению с другими процессами он экономически выгоден [17]. Металл расплавляют в автоклаве под высоким давлением, что позволяет внедрить в него большое количество водорода. После снижения температуры и давления сплав представляет собой «жидкость + газ», при последующем охлаждении ниже эвтектической температуры жидкость кристаллизуется и получается «твердое вещество + газ». Образование пузырьков происходит из-за выделения водорода при затвердевании металла ввиду снижения растворимости газообразного водорода, когда затвердевание жидкого металла начинается при контролируемом давлении газа.

В этом методе осевой или радиальной ориентации пор можно достичь путем контроля направления отвода тепла. Пористость, размер пор, морфологию и ориентацию пор легко контролируют во время затвердевания. Эти параметры контролируют с помощью давления газа, скорости затвердевания, температуры заливки, общего давления газа при затвердевании, скорости охлаждения при затвердевании и направления охлаждения при затвердевании. Среди перечисленных контролируемых параметров давление газа играет важную роль в задании размера пор металлической пены. Исследователь реализовал несколько условий: 1) использовался только чистый газообразный водород – в этом случае снижение пористости происходило при увеличении парциального давления газа ($P_{\text{возд.}}$); 2) общее давление газа ($P_{\text{общ}}$) оставалось постоянным, при этом пористость увеличивалась с ростом парциального давления газообразного водорода (P_H) [18]. Увеличение давления затвердевания оказывает негативное влияние на размер пор – их диаметр уменьшается. Диаметр пор варьируется от 10 мкм до 10 мм, а пористость –

от 5 до 75 %. Поскольку в материале присутствуют малые и большие поры, их распределение неравномерное [19].

Получение металлической пены путем литья по выжигаемым моделям

Для производства пенометаллов используется литье по выжигаемым моделям. При этом пенообразующих агентов не требуется, вместо них используется полимерная пена с открытой пористостью. Материалом для модели служит полиуретан. Полиуретан является линейным полимером с относительно длинными, гибкими и мягкими сегментами цепи, соединенными между собой концами. Полиуретан – это полимер с ковалентной связью. Открытые поры заполняются термостойким материалом, например гипсовым раствором, смесью муллита и карбоната кальция, которые растворяются в воде после того, как модель из полимерной пены заполняется гипсовым раствором и оставляется сушиться. Гипсовый раствор действует как фиксатор пространства в модели из полимерной пены. В процессе последующего нагрева полимерная пена выгорает, а в форме остается пористая полость [20, 21]. Затем в полость формы под давлением заливается расплавленный металл, который должен заполнить все участки формы. Для этого форма дополнительно вакуумируется. После кристаллизации расплава форма орошается водой, гипс размокает и смывается. Пористость в полученном таким способом пенометалле колеблется от 80 до 97 %, а размер пор варьируется от 4 до 0,5 мм [22, 23]. Механические свойства металлической пены, изготовленной модифицированным методом литья по выплавляемым моделям, выше, чем у ретикулированной; допустимая сжимающая нагрузка значительно выше, чем у ретикулированного пенометалла [24]. Возможен различный химический состав, высокая прочность на сжатие при высокой деформационной закалке. Механические свойства улучшаются благодаря перегородкам [25]. Альфредо (Alfredo) предположил, что размер внешних пор превышает 0,05 мм, поэтому полученная пена должна быть менее дефектной. Авторы [26] использовали логистическую регрессию для оптимизации параметров процесса и получения наилучшей алюминиевой пены.

Технология осаждения твердых фаз

Технология осаждения твердых фаз похожа на технологию литья по выжигаемым моделям. В обоих случаях не требуется ни пенообразующих агентов, ни впрыска газа в расплавленный металл. Полимерная пена покрывается ионами растворенного металла гальваническим способом, а затем полимерная пена заменяется расплавленным металлом. Полимерная пена должна быть электропроводной для того, чтобы участвовать в процессе гальванического осаждения металла. Чтобы сделать полимерную пену электропроводной, на ее поверхность методом электролитического осаждения наносится тонкий токопроводящий слой. Этот процесс подходит для ограниченного количества материалов. Низкая скорость и неравномерность осаждения являются причиной низких механических свойств полученного материала. По этой причине для изготовления металлической пены в другом методе используется химическое осаждение из паровой фазы [23].

Технология порошковой металлургии

Для производства металлической пены также используются процессы порошковой металлургии. В этом случае вместо расплавленного металла используется порошок металла и задействованы иные процессы. К ним относятся процесс Фраунгофера (Fraunhofer), газоулавливание, вспенивание суспензий.

Процесс Фраунгофера

Этот метод не настолько популярен, как метод плавления. Преимущества метода Фраунгофера перед методом/процессами плавления: возможность изготовления продукта сложной формы и размера, а также лучший контроль пористой структуры. Производство металлопены начинается со смешивания металлического порошка с подходящим пенообразователем. Подготовка металлического порошка делает метод Фраунгофера дорогостоящим, а для хранения материала требуется соблюдать определенные условия. При смешивании металлического порошка и пенообразующего агента необходимо достичь однородности их распределения. Полученную смесь

уплотняют прессованием. Процесс уплотнения может быть реализован горячим изостатическим прессованием, горячим компактированием, экструзией и прокаткой порошковой смеси. Выбор способа уплотнения зависит от требуемой конечной формы. Уплотнять материал следует до начала пластической деформации частиц порошка. Уплотненный металлический порошок содержит мелкие поры и трещины, которые могут затруднить процессы вспенивания [27]. Термическая обработка проводится при температуре ниже температуры плавления металлического порошка. При выборе пенообразователя важно следить за тем, чтобы температура его плавления была ниже температуры плавления металлического порошка. Во время термической обработки пенообразователь, который равномерно распределяется в объеме расплава, разлагается. Выделяющийся газ вынуждает исходный материал расширяться, формируя высокопористую структуру. В полутвердом металле расширение происходит быстро, но пузырьки схлопываются, поэтому для фиксации структуры пены требуется быстрое охлаждение. Таким способом изготавливается весь объем материала из металлической пены.

Стабильность пены из алюминиевого сплава можно повысить, добавив в порошковую смесь Mg. После добавления Mg частицы Al_2O_3 на границе раздела более полно встраиваются в стенки пор [28].

Контролируемыми параметрами процесса являются содержание пенообразователя, температура и скорость нагрева. Они являются общими при производстве металлической пены. Какой процент пористости и какая относительная плотность потребуются, зависит от параметра процесса. TiH_2 является наиболее популярным пенообразующим агентом, поскольку его температура плавления близка к температуре плавления алюминиевого сплава. Гидрид титана дорог и опасен при обращении с ним ввиду риска возгорания из-за выделения газообразного водорода при распаде TiH_2 , поэтому был предложен еще один пенообразователь – карбонат кальция [29].

При определении характеристик $CaCO_3$ и TiH_2 как пенообразователей было обнаружено, что металлическая пена при использовании $CaCO_3$ имеет более тонкую и однородную

пористую структуру [30]. $CaCO_3$ используется в качестве пенообразователя при получении пен из магниевых сплавов. Однако только лишь из Mg и $CaCO_3$ невозможно получить пенометалл с адекватной структурой, потому что $CaCO_3$ может разложиться с выделением CO_2 до того, как расплавится Mg, что приведет к двум последствиям: исходный материал может растрескаться и может произойти реакция между выделившимся CO_2 и Mg. Поэтому необходимо понизить температуру плавления исходного материала, добавив Al и Zn, чтобы $CaCO_3$ прореагировал с расплавленным Mg и не произошло растрескивания материала [31].

Металлическую пену в форме цилиндра получают методом горячей экструзии порошков (пресс-машина) и вспенивания, при которых пытаются определить относительную плотность и энергию деформации пены. Порошок алюминиевого сплава с пенообразователем нагревают выше температуры его плавления в форме для вспенивания и получают относительную плотность 0,22. Плотность металлической пены снижается по мере увеличения скорости формования [32]. Алюминиевая пена, изготовленная этим методом, имеет равномерно пористую структуру и относительную плотность на 20 % меньше по сравнению с твердым алюминием, а относительная плотность стальной пены на 40 % меньше, чем у твердой стали. Эта пористость помогает во время деформации, т. е. поглощает механическую энергию, сжимая поры [33].

Расширение изолированного газа

Эту концепцию разработал Мартин (Martine). Процесс используется редко из-за сложной обработки. Смесь основного материала заключают в оболочку, замещают воздухом-стабилизирующим газом, например аргоном, и герметизируют ее. Затем наполненную оболочку помещают в газостат и подвергают горячему изостатическому сжатию, тем самым достигая плотности 95 %. На следующем этапе полуфабрикат прокатывают и на заключительном этапе подвергают нагреву в печи. Поскольку оболочка герметична, то заключенный в пространстве между частицами порошка аргон начинает расширяться и изнутри еще больше консолидировать частицы основного металла, образуя перегородки будущей пены. Пористость полученного таким способом по-

пошка достигает 50 %, а диаметр пор варьируется от 6 до 100 мкм, и это существенные недостатки данного способа [34].

Опрессовывание наполнителя

В порошковой металлургии метод опрессовывания наполнителя дает максимальный контроль параметров формы, размеров пор, пористости и ее распределения. Согласно этому методу металлический порошок смешивается с наполнителем и добавляется связующее, которое придает прочность неспеченному порошку в процессе уплотнения. Время смешивания может составлять от одного до четырех часов и зависит от того, сколько времени потребуется для смешивания до однородного состояния. Необходимо следить за тем, чтобы металлический порошок смешивался до однородного состояния, иначе размер пор и процент пористости будут меньше. Нужно подобрать такой наполнитель, который бы мог легко испаряться во время спекания (1), не вступать в реакцию с металлом (2), легко обрабатываться (3), а после обработки не должно оставаться его остатков. Для производства пеноалюминия использовалось спекание в электропечи, плазменно-искровое спекание, а для производства пеномеди – спекание без карбоната [35]. В биомедицинских имплантатах остатки наполнителя в металлической пене представляют собой серьезную проблему. Поэтому в качестве наполнителя при изготовлении титановых биомедицинских имплантатов широко используется хлорид натрия: он легко удаляется при растворении в воде. По данным литературы, максимальная пористость в стальной пене составила 60 %. Д.П. Мондаль (D.P. Mondal) пытался увеличить пористость в пене из нержавеющей стали до 80 %, используя гидрокарбонат аммония в качестве наполнителя. Размер пор, пористость и относительная плотность существенно зависят от температуры спекания. При 1100 °C размер пор такой же, как и размер частиц наполнителя; если спекание происходит при более высокой температуре, чем указанная, то стенки пор будут проницаемыми, следовательно, пористость может быть уменьшена. Другие наполнители (карбид, хлорид натрия, крахмал тапиоки, магний) использовались для изготовления титановой пены с открытыми порами [36]. Нидхи Джа (Nidhi Jha) использовал

в качестве наполнителя порошок NaCl с размером частиц в семь раз больше размера частиц титанового порошка – это было гарантией того, что титановый порошок полностью диспергируется вокруг порошка NaCl, благодаря чему стало возможным получить однородную пористость во всем объеме титановой пены. Толщина стенки пор увеличивалась по мере увеличения количества титана в порошковой смеси. Размер пор и пористость варьировались в зависимости от размера NaCl и соотношения смеси [37]. Исследователь выявил некоторые параметры, которые влияют на размер пор ячейки, пористость, прочность, и др. Такими параметрами являлись состав смеси, температура спекания и давление прессования. Небольшой размер пор, равномерное их распределение и сферическая форма придают металлической пене лучшие механические свойства. Однако контролировать эти параметры во время обработки сложно [38]. Алюминиевые фракции влияют на относительную плотность и прочность на сжатие. Механические свойства можно улучшить, увеличив соотношение толщины стенки пор и длины стенки пор за счет уменьшения размера пор. Плотность пены можно контролировать и количеством NaCl. Сазегаран (Sazegaran) изучил влияние количества хрома на плотность неспеченных и спеченных изделий. При добавлении хрома в исходный порошок первоначально плотность уменьшалась, но после добавления дополнительного количества плотность неспеченного и спеченного материала увеличивалась [39, 40].

Различные методы и получаемые при их реализации относительная плотность и пористость

Для производства металлической пены были разработаны различные методы, при их использовании достигается разная пористость и разная пористая структура, например открытая и закрытая. В таблице ниже представлены различные методы с указанием пористости и структуры пор, а также проблем.

Заключение

Благодаря своим механическим и термическим свойствам металлические пены могут широко применяться в аэрокосмической и автомо-

Пористость, пористая структура и проблемы различной металлической пены

Porosity, pore structure and challenges of different metallic foam

№ п/п	Метод	Материал	Пеннообразующий агент / газ / наполнитель	Проблемы	Пористая структура	Пористость, %	Относительная плотность	Номер источника
1	Продувка газом	A356	Сжатый воздух, CO ₂ , N ₂ , H ₂ , Ar	Образуются и равномерно распределяются пузырьки малого размера. Метод не подходит для окисляющего материала	Закрытая	50–80	0,02–0,2	[5–8]
2	Вспенивание	Все марки алюминия	TiH ₂ , CaCO ₃ , MgCO ₃ , Mg(OH) ₂ , CaMg(CO ₃) ₂ , (4MgCO ₃ × Mg(OH) ₂ × 5H ₂ O)	Пузырьки изолируются. Для увеличения вязкости расплава нужны добавки	Закрытая	60–86	0,12–0,44	[10–16]
3	Газо-эвтектическая реакция	Ag, Cu, Al, Ni, Cr	H ₂ под давлением 50 атм	Ограничен газобразным водородом	Закрытая и открытая	5–75	0,12	[17, 18]
4	Процессы Фраунгофера	Al (сферический порошок), Ti, латунь или бронза	TiH ₂ , CaCO ₃	Материал должен иметь высокое сродство к другому материалу	Закрытая и открытая	75–95	0,22	[27–34]
5	Расширение изолированного газа	Порошок Ti	Ar	Требуется сложная настройка	Закрытая и открытая	50	0,16–0,22	[34]
6	Опрессовывание наполнителя	Нержавеющая сталь, но чаще Ti	NaCl, (CO(NH ₂) ₂), тапиоковый крахмал	Нужно подбирать такой наполнитель, который потом легко удалить	Закрытая и открытая	80	0,22–0,3	[35–38]

бильной промышленности. Для производства металлической пены было разработано множество методов, но наиболее популярным является способ плавления.

- Для производства металлической пены методом плавления в основном используется алюминиевый сплав. Для вспенивания обычно используется TiH₂, но из-за его более высокой скорости разложения и высокой стоимости был предложен другой пенообразующий агент – CaCO₃. Этот пенообразователь наиболее подходит для алюминиевых сплавов, поскольку при его использовании не требуется стабилизатор. Возможна разработка еще одного нового пенообразующего агента, для которого не требуется стабилизатор.

- Метод плавления не нашел широкого распространения при производстве пены из нержавеющей стали, поскольку температура плавления нержавеющей стали достаточно высока.

- В порошковой металлургии метод опрессовывания наполнителя применяется для изготовления биомедицинских имплантатов и ин-

женерного оборудования. Обычно титановую пену изготавливают методом опрессовывания наполнителя. Преимуществом данного метода является то, что размер пор, пористость и относительную плотность можно контролировать с помощью размера, формы и объемной доли наполнителя. Другие пеноматериалы также изготавливаются этим методом, метод не ограничивается только металлическим титаном.

Список литературы

1. Banhart J. Light-metal foams – History of innovation and technological challenges // Advanced Engineering Materials. – 2013. – Vol. 15 (3). – P. 82–111. – DOI: 10.1002/adem.201200217.
2. Sinha N., Srivastava V.C., Sahoo K.L. Processing and application of aluminium foams // Special Metal Casting and Forming Processes (CAFP-2008). – Jamshedpur, 2008. – P. 54–63.
3. Banhart J., Baumeister J. Production methods for metallic foams // Materials Research Society Symposium – Proceedings. – 1998. – Vol. 521. – P. 121–132. – DOI: 10.1557/proc-521-121.



4. *Kulshreshtha A., Dhakad S.K.* Preparation of metal foam by different methods: A review // *Materials Today: Proceedings*. – 2020. – Vol. 26, pt. 2. – P. 1784–1790. – DOI: 10.1016/j.matpr.2020.02.375.
5. *Singh S., Bhatnagar N.* A survey of fabrication and application of metallic foams (1925–2017) // *Journal of Porous Materials*. – 2018. – Vol. 25 (2). – P. 537–554. – DOI: 10.1007/s10934-017-0467-1.
6. *Karuppasamy R., Barik D.* Production methods of aluminium foam: A brief review // *Materials Today: Proceedings*. – 2021. – Vol. 37, pt. 2. – P. 1584–1587. – DOI: 10.1016/j.matpr.2020.07.161.
7. *Yuan J.Y., Li Y.X.* Effect of orifice geometry on bubble formation in melt gas injection to prepare aluminum foams // *Science China Technological Sciences*. – 2015. – Vol. 58 (1). – P. 64–74. – DOI: 10.1007/s11431-014-5669-z.
8. The cell size reduction of aluminum foam with dynamic gas injection based on the improved foamable melt / *N. Wang, X. Chen, Y. Li, Z. Liu, Z. Zhao, Y. Cheng, Y. Liu, H. Zhang* // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2017. – Vol. 527. – P. 123–131. – DOI: 10.1016/j.colsurfa.2017.05.023.
9. *Goyal B., Pandey A.* Critical review on porous material manufacturing techniques, properties & their applications // *Materials Today: Proceedings*. – 2021. – Vol. 46, pt. 17. – P. 8196–8203. – DOI: 10.1016/j.matpr.2021.03.163.
10. Porosity control in aluminium foams using different additives / *G. Avinash, V. Harika, C. Sandeepika, R. Kumar, N. Gupta* // *Materials Today: Proceedings*. – 2019. – Vol. 18. – P. 1054–1057. – DOI: 10.1016/j.matpr.2019.06.563.
11. *Jaafar A.H., Al-Ethari H., Farhan K.* Modelling and optimization of manufacturing calcium carbonate-based aluminum foam // *Materials Research Express*. – 2019. – Vol. 6 (8). – DOI: 10.1088/2053-1591/ab2602.
12. *Ghaleh M.H., Ehsani N., Baharvandi H.R.* High-porosity closed-cell aluminum foams produced by melting method without stabilizer particles // *International Journal of Metalcasting*. – 2021. – Vol. 15 (3). – P. 899–905. – DOI: 10.1007/s40962-020-00528-w.
13. *Heidari Ghaleh M., Ehsani N., Baharvandi H.R.* Compressive properties of A356 closed-cell aluminum foamed with a CaCO₃ foaming agent without stabilizer particles // *Metals and Materials International*. – 2020. – Vol. 27 (10). – P. 3856–3861. – DOI: 10.1007/s12540-020-00807-5.
14. Investigation on the effect of aluminium foam made of A413 aluminium alloy through stir casting and infiltration techniques / *R. Karuppasamy, D. Barik, N.M. Sivaram, M.S. Dennison* // *International Journal of Materials Engineering Innovation*. – 2020. – Vol. 11 (1). – P. 34–50. – DOI: 10.1504/IJMATEI.2020.104790.
15. *Yang C.C., Nakae H.* Foaming characteristics control during production of aluminum alloy foam // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2000. – Vol. 313 (1–2). – P. 188–191. – DOI: 10.1016/S0925-8388(00)01136-1.
16. Comparison of aluminium foams prepared by different methods using X-ray tomography / *N. Wang, E. Maire, Y. Cheng, Y. Amani, Y. Li, J. Adrien, X. Chen* // *Materials Characterization*. – 2018. – Vol. 138. – P. 296–307. – DOI: 10.1016/j.matchar.2018.02.015.
17. *Shapovalov V.* Prospective applications of gas-eutectic porous materials (gasars) in USA // *Materials Science Forum*. – 2007. – Vol. 539–543. – P. 1183–1187. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.539-543.1183.
18. *Liu Y., Li Y., Wan J.* Directional solidification of metal-gas eutectic and fabrication of regular porous metals // *Frontiers of Mechanical Engineering in China*. – 2007. – Vol. 2 (2). – P. 180–183. – DOI: 10.1007/s11465-007-0030-x.
19. *Banhart J.* Manufacturing routes for very low specific // *JOM*. – 2000. – Vol. 52 (12). – P. 22–27.
20. *Güner A., Arıkan M.M., Nebioglu M.* New approaches to aluminum integral foam production with casting methods // *Metals*. – 2015. – Vol. 5 (3). – P. 1553–1565. – DOI: 10.3390/met5031553.
21. *Gama N., Ferreira A., Barros-Timmons A.* 3D printed thermoplastic polyurethane filled with polyurethane foams residues // *Journal of Polymers and the Environment*. – 2020. – Vol. 28 (5). – P. 1560–1570. – DOI: 10.1007/s10924-020-01705-y.
22. Sound absorption of open celled aluminium foam fabricated by investment casting method / *X.F. Wang, X.F. Wang, X. Wei, F.S. Han, X.L. Wang* // *Materials Science and Technology*. – 2011. – Vol. 27 (4). – P. 800–804. – DOI: 10.1179/026708309X12506934374047.
23. *Lichy P., Bednarova V., Elbel T.* Casting routes for porous metals production // *Archives of Foundry Engineering*. – 2012. – Vol. 12 (1). – P. 71–74. – DOI: 10.2478/v10266-012-0014-0.
24. Investigation of a template-based process chain for investment casting of open-cell metal foams / *P. Kubelka, F. Körte, J. Heimann, X. Xiong, N. Jost* // *Advanced Engineering Materials*. – 2022. – Vol. 24 (1). – DOI: 10.1002/adem.202100608.
25. Investment casting and mechanical properties of open-cell steel foams / *J. Fromert, T.G. Lott, A.M. Matz, N. Jost* // *Advanced Engineering Materials*. – 2019. – Vol. 21 (6). – P. 1–7. – DOI: 10.1002/adem.201900396.
26. *Anglani A., Pacella M.* Logistic regression and response surface design for statistical modeling of investment casting process in metal foam production // *Procedia CIRP*. – 2018. – Vol. 67. – P. 504–509. – DOI: 10.1016/j.procir.2017.12.252.

27. Kitazono K., Sato E., Kuribayashi K. Novel manufacturing process of closed-cell aluminum foam by accumulative roll-bonding // Scripta Materialia. – 2004. – Vol. 50 (4). – P. 495–498. – DOI: 10.1016/j.scriptamat.2003.10.035.
28. Asavavisithchai S., Kennedy A.R. The effect of Mg addition on the stability of Al-Al₂O₃ foams made by a powder metallurgy route // Scripta Materialia. – 2006. – Vol. 54 (7). – P. 1331–1334. – DOI: 10.1016/j.scriptamat.2005.12.015.
29. Manufacturing of Al-Mg-Si alloy foam using calcium carbonate as foaming agent / L.E.G. Cambronero, J.M. Ruiz-Roman, F.A. Corpas, J.M. Ruiz Prieto // Journal of Materials Processing Technology. – 2009. – Vol. 209 (4). – P. 1803–1809. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2008.04.032.
30. Foaming agents for powder metallurgy production of aluminum foam / T. Koizumi, K. Kido, K. Kita, K. Mikado, S. Gnyloskurenko, T. Nakamura // Materials Transactions. – 2011. – Vol. 52 (4). – P. 728–733. – DOI: 10.2320/matertrans.M2010401.
31. Preparation principle and compression properties of cellular Mg–Al–Zn alloy foams fabricated by the gas release reaction powder metallurgy approach / D. Yang, S. Guo, J. Chen, C. Qiu, S.-O. Agbedor, A. Ma, J. Jiang, L. Wang // Journal of Alloys and Compounds. – 2021. – Vol. 857. – P. 158112. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.158112.
32. Fabrication of aluminium foams from powder by hot extrusion and foaming / M. Shiomi, S. Imagama, K. Osakada, R. Matsumoto // Journal of Materials Processing Technology. – 2010. – Vol. 210 (9). – P. 1203–1208. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2010.03.006.
33. Yu C.J. Metal foaming by a powder metallurgy method: Production, properties and applications // Materials Research Innovations. – 1998. – Vol. 2 (3). – P. 181–188. – DOI: 10.1007/s100190050082.
34. Kennedy A. Porous metals and metal foams made from powders // Powder Metallurgy / ed. by K. Kondoh. – InTech, 2012. – DOI: 10.5772/33060.
35. Influence of processing parameters on aluminium foam produced by space holder technique / R. Surace, L.A.C. de Filippis, A.D. Ludovico, G. Boghetich // Materials and Design. – 2009. – Vol. 30 (6). – P. 1878–1885. – DOI: 10.1016/j.matdes.2008.09.027.
36. Powder metallurgy with space holder for porous titanium implants: A review / A. Rodriguez-Contreras, M. Punset, J.A. Calero, F.J. Gil, E. Ruperez, J.M. Manero // Journal of Materials Science and Technology. – 2021. – Vol. 76. – P. 129–149. – DOI: 10.1016/j.jmst.2020.11.005.
37. Highly porous open cell Ti-foam using NaCl as temporary space holder through powder metallurgy route / N. Jha, D.P. Mondal, J. Dutta Majumdar, A. Badkul, A.K. Jha, A.K. Khare // Materials and Design. – 2013. – Vol. 47. – P. 810–819. – DOI: 10.1016/j.matdes.2013.01.005.
38. Sazegaran H., Feizi A., Hojati M. Effect of Cr contents on the porosity percentage, microstructure, and mechanical properties of steel foams manufactured by powder metallurgy // Transactions of the Indian Institute of Metals. – 2019. – Vol. 72 (10). – P. 2819–2826. – DOI: 10.1007/s12666-019-01758-1.
39. Microstructure and mechanical properties of metal foams fabricated via melt foaming and powder metallurgy technique: A review / B. Parveez, N.A. Jamal, H. Anuar, Y. Ahmad, A. Aabid, M. Baig // Materials. – 2022. – Vol. 15. – DOI: 10.3390/ma15155302.
40. Preliminary development of porous aluminum via powder metallurgy technique / N.A. Jamal, O. Maizatul, H. Anuar, F. Yusof, Y. Ahmad Nor, K. Khalid, M.N. Zakaria // Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. – 2018. – Vol. 49 (4). – P. 460–466. – DOI: 10.1002/mawe.201700269.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2023 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



Obrabotka metallov -

Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov




A systematic review of processing techniques for cellular metallic foam production

Shyam Sharma^{1, a}, Anurag Joshi^{1, b, *}, Yogendra Rajpoot^{2, c}

¹ Department of Mechanical Engineering, Manipal University Jaipur, Rajasthan, 303007, India

² Department of Mechanical Engineering, Rajkiya Engineering College Mainpuri, Uttar Pradesh, 205119, India

^a  <https://orcid.org/0000-0002-1510-5871>,  shyamsunder.sharma@jaipur.manipal.edu; ^b  <https://orcid.org/0000-0002-8231-9423>,  anuragjoshi355@gmail.com;

^c  <https://orcid.org/0000-0002-9662-0903>,  yogendrasingh.rajpoot@recmainpuri.in

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 06 August 2023

Revised: 11 August 2023

Accepted: 23 August 2023

Available online: 15 December 2023

Keywords:

Melt route method

Powder metallurgy

Deposition technique

Foaming agent

ABSTRACT

Introduction. The paper presents a comprehensive overview of the manufacturing methods, materials, properties, and challenges associated with cellular metallic foams, primarily focusing on aluminum and titanium-based foams. Cellular metallic foams are gaining interest due to its unique combination of low density, high stiffness, and enhanced energy absorption capabilities. Cellular metallic foam is renowned for its special combinations of physical and mechanical characteristics, containing their increased stiffness, specific strength at high temperatures, light weight, and good energy absorption at relatively low plateau stress. It has extensive uses in the automotive, shipbuilding and space industries. It has high porosity, low relative density and high strength, which increases performance of the product. The aerospace and automotive industries require a material with a high strength-to-weight ratio. **Methods.** To meet this need, many metal foam production methods have been developed, such as melt route method, deposition method and powder metallurgy method. Melt route method is widely used to manufacture metallic foam as compared to other methods. **Results and Discussion.** In the production of aluminum foams, the melt route method is usually used. Titanium hydride (TiH_2) has been a popular foaming agent, but its high decomposition rate and cost limitations have led to the development of alternative foaming agents, such as $CaCO_3$ (calcium carbonate). Titanium foam is often manufactured using the space holder method. This method involves mixing titanium powder with a space holder material, forming a preform, and then sintering to remove the space holder and produce a porous structure as the space holder method allows for precise control over the properties of the foam, including pore size, porosity, and relative density. Results also indicate that porosity in cellular metallic foams can range from 50 % to 95 %, as reported in various journals. Pore structures can include mixed types, open cells, and closed cells, each offering different mechanical and thermal properties. It is also observed from various literature sources that relative density, which is the ratio of the foam's density to the bulk material's density, varies from 0.02 to 0.44 based on the production method used.

For citation: Sharma S.S., Joshi A., Rajpoot Y.S. A systematic review of processing techniques for cellular metallic foam production. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 4, pp. 22–35. DOI:10.17212/1994-6309-2023-25.4-22-35. (In Russian).

References

1. Banhart J. Light-metal foams – History of innovation and technological challenges. *Advanced Engineering Materials*, 2013, vol. 15 (3), pp. 82–111. DOI: 10.1002/adem.201200217.
2. Sinha N., Srivastava V.C., Sahoo K.L. Processing and application of aluminium foams. *Special Metal Casting and Forming Processes (CAFP-2008)*, Jamshedpur, 2008, pp. 54–63.
3. Banhart J., Baumeister J. Production methods for metallic foams. *Materials Research Society Symposium – Proceedings*, 1998, vol. 521, pp. 121–132. DOI: 10.1557/proc-521-121.
4. Kulshreshtha A., Dhakad S.K. Preparation of metal foam by different methods: A review. *Materials Today: Proceedings*, 2020, vol. 26, pt. 2, pp. 1784–1790. DOI: 0.1016/j.matpr.2020.02.375.

* Corresponding author

Joshi Anurag, Ph.D. (Engineering), Assistant Professor
 Manipal University Jaipur,
 303007, Rajasthan, India
 Tel.: +91-9772844555, e-mail: anuragjoshi355@gmail.com

5. Singh S., Bhatnagar N. A survey of fabrication and application of metallic foams (1925–2017). *Journal of Porous Materials*, 2018, vol. 25 (2), pp. 537–554. DOI: 10.1007/s10934-017-0467-1.
6. Karuppasamy R., Barik D. Production methods of aluminium foam: A brief review. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 37, pt. 2, pp. 1584–1587. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.07.161.
7. Yuan J.Y., Li Y.X. Effect of orifice geometry on bubble formation in melt gas injection to prepare aluminum foams. *Science China Technological Sciences*, 2015, vol. 58 (1), pp. 64–74. DOI: 10.1007/s11431-014-5669-z.
8. Wang N., Chen X., Li Y., Liu Z., Zhao Z., Cheng Y., Liu Y., Zhang H. The cell size reduction of aluminum foam with dynamic gas injection based on the improved foamable melt. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2017, vol. 527, pp. 123–131. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2017.05.023.
9. Goyal B., Pandey A. Critical review on porous material manufacturing techniques, properties & their applications. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 46, pt. 17, pp. 8196–8203. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.03.163.
10. Avinash G., Harika V., Sandeepika C., Kumar R., Gupta N. Porosity control in aluminium foams using different additives. *Materials Today: Proceedings*, 2019, vol. 18, pp. 1054–1057. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.06.563.
11. Jaafar A.H., Al-Ethari H., Farhan K. Modelling and optimization of manufacturing calcium carbonate-based aluminum foam. *Materials Research Express*, 2019, vol. 6 (8). DOI: 10.1088/2053-1591/ab2602.
12. Ghaleh M.H., Ehsani N., Baharvandi H.R. High-porosity closed-cell aluminum foams produced by melting method without stabilizer particles. *International Journal of Metalcasting*, 2021, vol. 15 (3), pp. 899–905. DOI: 10.1007/s40962-020-00528-w.
13. Heidari Ghaleh M., Ehsani N., Baharvandi H.R. Compressive properties of A356 closed-cell aluminum foamed with a CaCO_3 foaming agent without stabilizer particles. *Metals and Materials International*, 2020, vol. 27 (10), pp. 3856–3861. DOI: 10.1007/s12540-020-00807-5.
14. Karuppasamy R., Barik D., Sivaram N.M., Dennison M.S. Investigation on the effect of aluminium foam made of A413 aluminium alloy through stir casting and infiltration techniques. *International Journal of Materials Engineering Innovation*, 2020, vol. 11 (1), pp. 34–50. DOI: 10.1504/IJMATEI.2020.104790.
15. Yang C.C., Nakae H. Foaming characteristics control during production of aluminum alloy foam. *Journal of Alloys and Compounds*, 2000, vol. 313 (1–2), pp. 188–191. DOI: 10.1016/S0925-8388(00)01136-1.
16. Wang N., Maire E., Cheng Y., Amani Y., Li Y., Adrien J., Chen X. Comparison of aluminium foams prepared by different methods using X-ray tomography. *Materials Characterization*, 2018, vol. 138, pp. 296–307. DOI: 10.1016/j.matchar.2018.02.015.
17. Shapovalov V. Prospective applications of gas-eutectic porous materials (gasars) in USA. *Materials Science Forum*, 2007, vol. 539–543, pp. 1183–1187. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.539-543.1183.
18. Liu Y., Li Y., Wan J. Directional solidification of metal-gas eutectic and fabrication of regular porous metals. *Frontiers of Mechanical Engineering in China*, 2007, vol. 2 (2), pp. 180–183. DOI: 10.1007/s11465-007-0030-x.
19. Banhart J. Manufacturing routes for very low specific. *JOM*, 2000, vol. 52 (12), pp. 22–27.
20. Güner A., Arıkan M.M., Nebioglu M. New approaches to aluminum integral foam production with casting methods. *Metals*, 2015, vol. 5 (3), pp. 1553–1565. DOI: 10.3390/met5031553.
21. Gama N., Ferreira A., Barros-Timmons A. 3D printed thermoplastic polyurethane filled with polyurethane foams residues. *Journal of Polymers and the Environment*, 2020, vol. 28 (5), pp. 1560–1570. DOI: 10.1007/s10924-020-01705-y.
22. Wang X.F., Wang X.F., Wei X., Han F.S., Wang X.L. Sound absorption of open celled aluminium foam fabricated by investment casting method. *Materials Science and Technology*, 2011, vol. 27 (4), pp. 800–804. DOI: 10.1179/026708309X12506934374047.
23. Lichy P., Bednarova V., Elbel T. Casting routes for porous metals production. *Archives of Foundry Engineering*, 2012, vol. 12 (1), pp. 71–74. DOI: 10.2478/v10266-012-0014-0.
24. Kubelka P., Körte F., Heimann J., Xiong X., Jost N. Investigation of a template-based process chain for investment casting of open-cell metal foams. *Advanced Engineering Materials*, 2022, vol. 24 (1). DOI: 10.1002/adem.202100608.
25. Fromert J., Lott T.G., Matz A.M., Jost N. Investment casting and mechanical properties of open-cell steel foams. *Advanced Engineering Materials*, 2019, vol. 21 (6), pp. 1–7. DOI: 10.1002/adem.201900396.
26. Anglani A., Pacella M. Logistic regression and response surface design for statistical modeling of investment casting process in metal foam production. *Procedia CIRP*, 2018, vol. 67, pp. 504–509. DOI: 10.1016/j.procir.2017.12.252.
27. Kitazono K., Sato E., Kuribayashi K. Novel manufacturing process of closed-cell aluminum foam by accumulative roll-bonding. *Scripta Materialia*, 2004, vol. 50 (4), pp. 495–498. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2003.10.035.

28. Asavavisithchai S., Kennedy A.R. The effect of Mg addition on the stability of Al-Al₂O₃ foams made by a powder metallurgy route. *Scripta Materialia*, 2006, vol. 54 (7), pp. 1331–1334. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2005.12.015.
29. Cambronero L.E.G., Ruiz-Roman J.M., Corpas F.A., Ruiz Prieto J.M. Manufacturing of Al-Mg-Si alloy foam using calcium carbonate as foaming agent. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, vol. 209 (4), pp. 1803–1809. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2008.04.032.
30. Koizumi T., Kido K., Kita K., Mikado K., Gnyloskurenko S., Nakamura T. Foaming agents for powder metallurgy production of aluminum foam. *Materials Transactions*, 2011, vol. 52 (4), pp. 728–733. DOI: 10.2320/matertrans.M2010401.
31. Yang D., Guo S., Chen J., Qiu C., Agbedor S.-O., Ma A., Jiang J., Wang L. Preparation principle and compression properties of cellular Mg–Al–Zn alloy foams fabricated by the gas release reaction powder metallurgy approach. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, vol. 857, p. 158112. DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.158112.
32. Shiomi M., Imagama S., Osakada K., Matsumoto R. Fabrication of aluminium foams from powder by hot extrusion and foaming. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, vol. 210 (9), pp. 1203–1208. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2010.03.006.
33. Yu C.J. Metal foaming by a powder metallurgy method: Production, properties and applications. *Materials Research Innovations*, 1998, vol. 2 (3), pp. 181–188. DOI: 10.1007/s100190050082.
34. Kennedy A. Porous metals and metal foams made from powders. *Powder Metallurgy*. Ed. by K. Kondoh. InTech, 2012. DOI: 10.5772/33060.
35. Surace R., Filippis L.A.C. de, Ludovico A.D., Boghetich G. Influence of processing parameters on aluminium foam produced by space holder technique. *Materials and Design*, 2009, vol. 30 (6), pp. 1878–1885. DOI: 10.1016/j.matdes.2008.09.027.
36. Rodriguez-Contreras A., Punset M., Calero J.A., Gil F.J., Ruperez E., Manero J.M. Powder metallurgy with space holder for porous titanium implants: A review. *Journal of Materials Science and Technology*, 2021, vol. 76, pp. 129–149. DOI: 10.1016/j.jmst.2020.11.005.
37. Jha N., Mondal D.P., Dutta Majumdar J., Badkul A., Jha A.K., Khare A.K. Highly porous open cell Ti-foam using NaCl as temporary space holder through powder metallurgy route. *Materials and Design*, 2013, vol. 47, pp. 810–819. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.01.005.
38. Sazegaran H., Feizi A., Hojati M. Effect of Cr contents on the porosity percentage, microstructure, and mechanical properties of steel foams manufactured by powder metallurgy. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2019, vol. 72 (10), pp. 2819–2826. DOI: 10.1007/s12666-019-01758-1.
39. Parveez B., Jamal N.A., Anuar H., Ahmad Y., Aabid A., Baig M. Microstructure and mechanical properties of metal foams fabricated via melt foaming and powder metallurgy technique: A review. *Materials*, 2022, vol. 15. DOI: 10.3390/ma15155302.
40. Jamal N.A., Maizatul O., Anuar H., Yusof F., Ahmad Nor Y., Khalid K., Zakaria M.N. Preliminary development of porous aluminum via powder metallurgy technique. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 2018, vol. 49 (4), pp. 460–466. DOI: 10.1002/mawe.201700269.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2023 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).