



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Синергетический подход к разработке легкого пористого металлического пеноматериала на основе алюминия с использованием литейно-металлургического метода

Шам Шарма ^a, Рахул Хатри ^b, Анураг Йоши ^{c*}

Манипалский университет, Джайпур, Раджастан, 303007, Индия

^a <https://orcid.org/0000-0002-1510-5871>, shyamsunder.sharma@jaipur.manipal.edu;

^b <https://orcid.org/0000-0003-1589-533X>, rahul.khatr@jaipur.manipal.edu; ^c <https://orcid.org/0000-0002-8231-9423>, anuragjoshi355@gmail.com

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 671.22

История статьи:

Поступила: 04 сентября 2023

Рецензирование: 27 сентября 2023

Принята к печати: 12 ноября 2023

Доступно онлайн: 15 декабря 2023

Ключевые слова:

Металлическая пена

Литейно-металлургический метод

Пористая пена

Легкий материал

АННОТАЦИЯ

Введение. Представлен синергетический подход к разработке легкого алюминиевого металлического пенопласта литейно-металлургическим методом и протестированы различные механические свойства и микроструктура. **Цель данного исследования** обусловлена постоянным промышленным спросом на легкие материалы и возросшим исследовательским интересом к пористым подложкам главным образом из-за их уникальных свойств. **Материалы и методы.** Для создания металлической алюминиевой пены использовали литейно-металлургический метод, заключающийся во введении в расплав алюминия карбоната кальция в качестве вспенивающего агента с последующим вспениванием для достижения желаемой взаимосвязанной пористой микромасштабной среды в рамках подложки из металлической пены. **Результаты и обсуждение.** В качестве результатов заявлен комплекс физических свойств, таких как объемная плотность ($1,8 \text{ г/см}^3$), относительная плотность ($0,67 \text{ г/см}^3$) и пористость (30 %) разработанных металлопен на основе алюминия. Разработанная металлическая пена имеет соотношение прочности и веса на 67 % выше, чем у основного материала. Кроме того, результаты автоэмиссионной сканирующей электронной микроскопии разработанной металлической пены подтверждают наличие структуры порового пространства с размером пор от 0,075 до 1,43 мм. Энергодисперсионная спектроскопия подтвердила наличие желаемых элементов с минимальным загрязнением в разработанных подложках из алюминиевой пены. Металлопена демонстрирует более высокую прочность на сжатие (607 кН) по сравнению с основным металлом (497 кН). Механические характеристики разработанной подложки из металлопены (твердость, прочность на сжатие и энергия удара) имеют ожидаемые значения по сравнению с основным материалом. В целом разработанная подложка из алюминиевой пены открыла многообещающий путь к разработке высокоэффективной легкой металлической пены для изготовления демпфирующих элементов и использования в акустике.

Для цитирования: Шарма Ш.С., Хатри Р., Йоши А. Синергетический подход к разработке легкого пористого металлического пеноматериала на основе алюминия с использованием литейно-металлургического метода // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 4. – С. 255–267. – DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.4-255-267.

Введение

Природные материалы с ячеистой структурой, такие как дерево, кости, пенза и структура листьев, исторически находили применение благодаря своим уникальным свойствам. Полимерный вспененный материал, который еще называют искусственной пеной, имеет широкое применение и придает объекту уникальную структуру. Он также используется в качестве

защитного кожуха в различном оборудовании, таком как велосипедные шлемы, корпуса холодильников и др. [1]. Уникальные свойства природных ячеистых материалов побудили исследователей разработать металлическую пену. О первом металлическом вспененном материале сообщил де Меллер в 1925 году, но многие авторы ссылались на патент, датированный периодом с 1960 по 1970 год [2]. 2D-сотовая структура обладает многими механическими свойствами металлической пены. По сравнению с металлической пеной сотовые конструкции имеют простую структуру, хотя и весьма аналогичную; стоимость производства металлической пены

*Адрес для переписки

Йоши Анураг, к.т.н., доцент

Манипалский университет, Джайпур,
303007, Раджастан, Индия

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

высока, а ее производство весьма сложно. Среди методов получения металлической пены наиболее распространены литье и порошковая металлургия. Большое количество металлической пены изготавливается из различных материалов, таких как сталь, алюминий и титан. Методы электроосаждения, химического осаждения из паровой фазы и физического осаждения из паровой фазы также использовались для производства более экзотической пены [3].

Пену можно определить как равномерную диффузию газовой фазы в жидкости, при этом образующиеся в жидкости ячейки и поры отличаются очень малой толщиной разделяющих их стенок. Эта структура обеспечивает относительно высокую жесткость и прочность при низкой плотности и используется там, где необходимо существенно снизить вес конструкции. Форма и размер ячеек зависят от функции конструкции и определяют эффективность последней. Металлическая пена с открытой структурой лучше поглощает энергию деформации сжатия по сравнению с металлической пеной с закрытыми порами. Структура также хорошо сопротивляется внезапному разрушению. По способу изготовления металлические пены можно разделить на две категории: с закрытыми порами и с открытыми порами. Для изготовления пены первой категории используется метод плавления или метод порошковой металлургии. Как правило, метод плавления представляет собой метод литья, который используется для получения металлической пены с закрытыми порами, тогда как порошковая металлургия используется для производства металлического пенопласта с открытыми порами. Металлическую пену с закрытыми порами можно изготовить тремя методами: добавить вспенивающий агент, продуть расплавленный металл инертным газом или реализовать газар-процесс (газоэвтектическую реакцию) [4]. Эти процессы требуют высоких первоначальных капиталовложений. В порошковой металлургии в металлический порошок добавляют наполнитель для формирования пор (space holder) и пенообразователь. Целью разработки металлической пены является получение уникальных свойств, таких как высокая жесткость, малый удельный вес, высокая газопроницаемость, низкая теплопроводность, высокая ударопоглощающая способность и элект-

рическая изоляция. Различные металлические пены разрабатываются из металлов и сплавов, таких как Al, Al-Si, Al-Mg, Cu, Pb, Fe, стали, Ni_3Al , Zn, Mg, Ti, Al-Cu, MMC, металлических стекол и др. Среди них огромное развитие в промышленном производстве получила алюминиевая пена.

Алюминиевая металлическая пена была разработана с использованием карбоната кальция в качестве вспенивающего агента. Количество карбоната кальция, добавленного в состав для образования металлической пены, составило 2,5 % по массе [6]. Плотность полученного материала составила 848 кг/м^3 , относительная плотность – 0,342 [5].

Изучалось также содержание цинка в алюминиевой пене с закрытыми порами и влияние цинка на пеноалюминиевый материал. Результаты показали, что алюминиевая пена, которая содержит 4 % цинка по весу, имеет лучший предел текучести и более длинный участок плато, чем алюминиевая пена, не содержащая цинка. Алюминиевую пену изготавливают методом вспенивания расплава [7]. Два пеноалюминиевых материала были изготовлены методом порошковой металлургии с использованием карбоната кальция и TiH_2 . Карбонат кальция как пенообразователь демонстрирует большую стабильность по сравнению с TiH_2 , поэтому карбонат кальция является дорогостоящим и эффективным газогенерирующим агентом [8]. Пена из цинк-алюминиевого сплава была получена литейно-металлургическим методом, а в качестве пенообразователя использовался гидрид кальция (CaH_2). Плотность полученного материала варьируется от $0,25 \text{ г/см}^3$ до $0,45 \text{ г/см}^3$, а пористость 94 % достигается в пенометалле из алюминиевого сплава литейно-металлургическим методом [9]. Метод плавления превосходит другие методы с точки зрения требуемого объема капитала и различных требований к желаемой конечной форме [10].

Улучшение стабилизации алюминиевой пены и ее ячеистой структуры в процессе изготовления производится за счет использования карбоната кальция с покрытием в качестве пенообразователя. В расплавленный металл не требуется дополнительно вводить стабилизатор, поскольку при разложении образуется материал, повышающий вязкость [11]. Исхо-

для из термического разложения и клеточной структуры в материал добавляется пенообразователь [12]. Замечено, что температура и скорость смешивания являются доминирующими параметрами, определяющими способность поглощения энергии алюминиевой пеной [13]. Алюминиевая металлическая пена, изготовленная методом вспенивания расплава, проявляет свои механические свойства при многократной ударной нагрузке. Результаты испытания показали, что степень повреждения алюминиевой пены увеличивается с увеличением количества ударов [14].

Металлическая алюминиевая пена с открытыми порами была разработана с использованием конструкции из стальной сетки. В этом исследовании расположение ячеек считается важным параметром для управления механическими свойствами [15].

Для изготовления алюминиевых материалов с наполнителем из полых частиц (синтактических пеноматериалов) использовался метод литья под давлением в холодной камере. Плотность такого пеноматериала варьировалась от 1,17 до 1,5 г/см³, и было установлено, что пеноматериал, подвергнутый тепловой обработке, становится более хрупким [16].

Материал с открытыми порами изготовлен из биоразлагаемого магниевое сплава методом инфльтрации. Его пористая структура аналогична структуре гироида. Испытания показали, что модуль Юнга полученного материала с открытыми порами аналогичен модулю Юнга спонгиозного вещества кости человека [17].

Влияние размера ячеек, толщины перегородок и циркуляции через поры на прочность на сжатие алюминиевой пены было исследовано с помощью метода FEM. Алюминиевую пену получают литейно-металлургическим методом с добавлением гидроксида титана (пенообразователя) в расплавленный металл [18]. **Целью** этой исследовательской статьи является успешная разработка металлической пены из алюминия литейно-металлургическим методом и расчет пористости металлической пены с различными механическими свойствами, такими как твердость, прочность на сжатие и энергия удара, причем эти механические свойства должны быть соизмеримы с исходным алюминиевым материалом.

Методика экспериментальных исследований

Материалы

В настоящем исследовании в качестве основного материала используется алюминий, обладающий средней прочностью и устойчивостью к коррозии. Это широко используемый материал в автомобильной и аэрокосмической промышленности. Он также нашел механическое применение, например, в коллекторах с водяным охлаждением, в арматуре для дорожного транспорта и др. Химический состав технического чистого алюминия в весовых процентах: Si (0,096), Fe (0,356), Cu (0,009), Mn (0,002), Mg (0,001), Zn (0,003), Ti (0,008), V (0,006) и Al (99,52). Для создания металлической пены было взято 500 г алюминия плотностью 2,65 г/см³ с температурой плавления 800 °C.

В качестве пенообразователя использовали карбонат кальция, его плотность составляет 2,93 г/см³, температура плавления – 825 °C. Оптимальное количество пенообразователя составляет 2,5 % от массы алюминиевого материала [6]. Карбонат кальция представляет собой безводное и стабильное соединение (рис. 1). Его преимущества заключаются в том, что он медленно разлагается и поэтому придает лучшую пористую структуру затвердевшему металлу.

Карбонат кальция разлагается на оксид кальция и углекислый газ. Разложение происходит при добавлении этого пенообразователя в рас-



Рис. 1. Общий вид частиц карбоната кальция, используемых в качестве пенообразователя

Fig. 1. General view of calcium carbonate particles used as a foaming agent

плавленный алюминий. Полученный таким способом алюминий имеет пористую структуру из-за выделения углекислого газа. С использованием этих материалов был разработан металлический пеноматериал с закрытой пористостью.

Методы

Литейно-металлургический метод

В ходе реализации литейно-металлургического метода пенообразователь и основной металл равномерно перемешиваются, тем самым достигается лучшая смачиваемость. Более низкая частота вращения мешалки и непродолжительное время перемешивания могут привести к неравномерному перемешиванию карбоната кальция в расплавленном алюминии. Из-за этого может произойти скопление порошка в разных местах, и в результате в конечном материале сформируются большие пустоты. Время перемешивания является важным фактором для получения однородной пористости на внутренней поверхности литого металла. Поэтому необходимо выбрать оптимальные частоту вращения мешалки и время перемешивания. Графитовая мешалка, используемая в настоящем исследовании, оснащена электродвигателем и регулятором оборотов, как показано на рис. 2. Для заливки расплавленного металла использовался глиняный горшок, показанный на рис. 3.

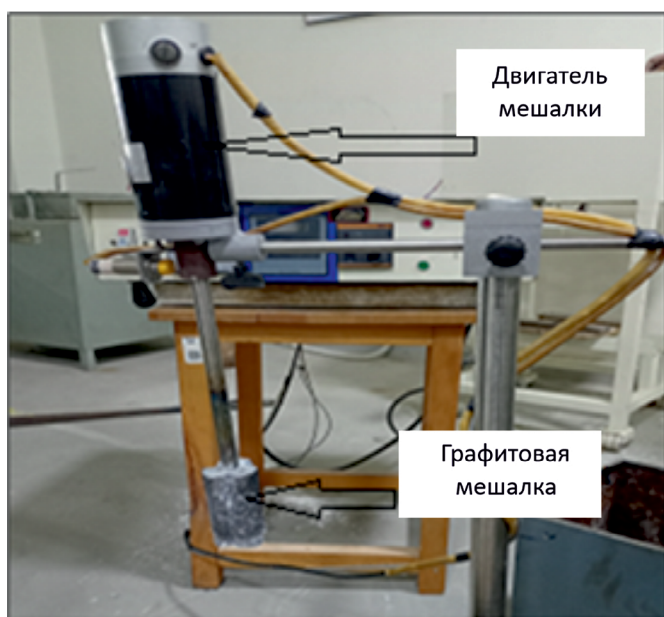


Рис. 2. Установка для реализации литейно-металлургического метода

Fig. 2. Stir casting setup



Рис. 3. Литейная форма (глиняный горшок)

Fig. 3. Clay pot mould

Подготовка алюминиевого расплава

Алюминий разрезали на мелкие кусочки и провели расчеты веса. Затем кусочки алюминия поместили в тигель индукционной печи для плавки. Процесс плавления завершился за 2,5 часа. Прежде чем залить расплавленный алюминий в форму, сначала удалили шлак из расплавленного металла, поскольку он не позволяет пенообразователю тщательно перемешаться.

Заливка

Перед заливкой форму предварительно нагревали примерно до 300 °С с целью предотвращения мгновенного затвердевания. После предварительного нагрева в форму заливали расплавленный алюминий. Для образования металлической пены использовалась механизированная мешалка, как показано на рис. 4. Порошок карбоната кальция добавляли в три этапа. На первом этапе в форму засыпали 40 % карбоната кальция.

После этого в форму из тигля залили расплавленный металл. После заливки в расплавленный металл при температуре 750 °С добавили еще 30 % карбоната кальция, затем приступили к перемешиванию. Через несколько минут к расплавленному металлу добавили третью часть, т. е. оставшиеся 30 % порошка карбоната кальция. Алюминиевый расплавленный металл перемешивали в течение 4–5 минут со скоростью 460 об/мин. В результате перемешивания порошок карбоната кальция равномерно распределился или был тщательно перемешан с расплавленным алюминием. После этого смесь оставили для разложения карбоната кальция внутри расплавленного металла. При разложении карбоната

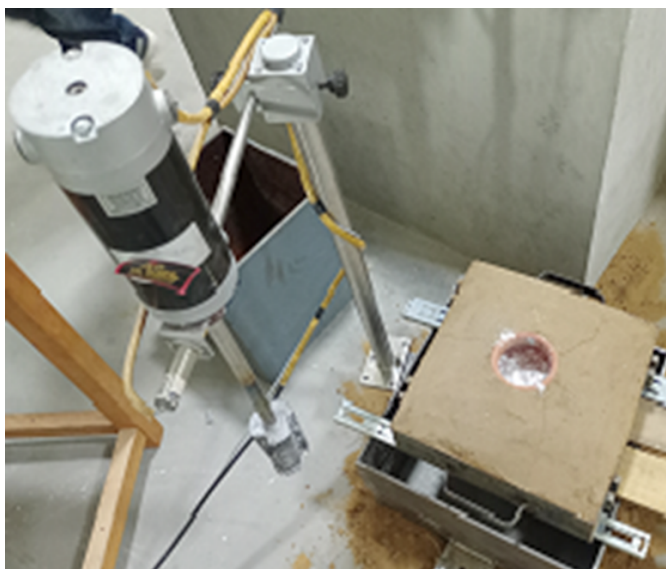
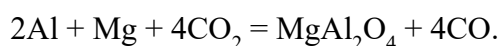
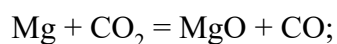
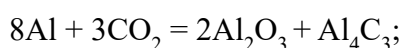
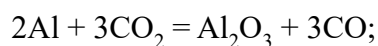


Рис. 4. Алюминиевый расплав, залитый в форму

Fig. 4. Aluminium melt poured into the mould

кальция выделяется углекислый газ, который должен задержаться внутри расплавленного металла. Металлическая пена, покрывающая горлышко горшка, образуется без использования агента, увеличивающего вязкость, поскольку она образуется во время разложения. Процесс разложения объясняется следующими реакциями:



Al_2O_3 , Al_4C_3 и MgO повышают вязкость расплавленного металла, что затрудняет подъем пузырьков газов, выделяющихся при разложении карбоната кальция. Эти пузырьки газа создают пористую структуру полужатвердевшего материала. Через час расплавленный металл полностью затвердевает. В результате получается алюминиевая пена, как показано на рис. 5 и 6. Для анализа внутренней поверхности полученной отливки ее разрезали на две части с помощью электроэрозионного станка.

Результаты и обсуждение

После получения алюминиевой пены были проанализированы ее свойства, такие как плотность, процент пористости и микроструктура.



Рис. 5. Затвердевшая алюминиевая пена

Fig. 5. Solidified aluminium foam

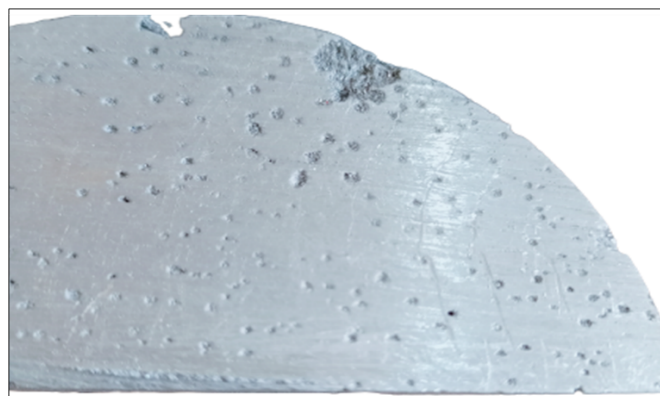


Рис. 6. Срез алюминиевого пеноматериала

Fig. 6. Aluminium foam cut

Плотность и пористость

Плотность и пористость являются решающими факторами качества пенометалла. Если плотность пены уменьшается, то пористость увеличивается. В этом исследовании плотность рассчитывали следующим образом:

- 1) массу образца измеряли с помощью электронных весов;
- 2) рассчитывали объем образца;
- 3) вычисляли относительную плотность.

Плотность алюминиевой пены ($\rho_{\text{Al п}}$)

Плотность рассчитывается по формуле

$$\rho_{\text{Al п}} = \frac{\text{Масса алюминиевой пены}}{\text{Объем алюминиевой пены}}.$$

Масса алюминиевой пены: $m_{\text{Al п}} = 130$ г.

Размер образца (алюминиевой пены): $50 \times 40 \times 35$ мм.

Объем образца алюминиевой пены: $V_{Alп} = 70 \text{ см}^3$.

Плотность алюминиевой пены: $\rho_{Alп} = 130/70 = 1,8 \text{ г/см}^3$.

Плотность исходного алюминия, из которого сформировали алюминиевую пену ρ_{Al} , рассчитывается следующим образом.

Масса исходного алюминия (образца): 143,59 г.

Размер образца (исходный алюминий): $60 \times 41 \times 22 \text{ мм}$.

Объем исходного образца алюминия: $54,12 \text{ см}^3$.

Плотность исходного алюминия:

$$\rho_{Al} = 143,59/54,12 = 2,65 \text{ г/см}^3.$$

Процент пористости ($P\%$)

Процент пористости рассчитывается следующим образом:

$$P\% = \frac{(\text{Плотность исходного алюминия}) \times (\text{Плотность алюминиевой пены})}{\text{Плотность исходного алюминия}};$$

$$P\% = \frac{2,651,8}{2,65};$$

$$P\% = 32 \text{ \%}.$$

Относительная плотность ($\rho_{отн}$)

Расчет:

$$\rho_{отн} = \frac{\text{Плотность пеноалюминия}}{\text{Плотность исходного алюминия}};$$

$$\rho_{отн} = 1,8/2,65 = 0,67.$$

Относительная плотность является важным параметром, характеризующим вспененный материал из исходного твердого алюминиевого материала. Это параметр сравнения, который показывает, насколько вещество тяжелее стандартного вещества. Расчетная относительная плотность составляет 0,67. Это означает, что вес алюминиевой пены на 32 % меньше, чем у твердого исходного алюминия. Если вместо цельной алюминиевой детали конструкции автомобиля

использовать алюминиевую пену, то вес этой детали снижается на 32 %. Этот вид материала необходим в автомобильной и аэрокосмической промышленности. В табл. 1 представлены различные свойства, рассчитанные для разработанной алюминиевой пены.

Исследование микроструктуры

Сканирующий электронный микроскоп с полевой эмиссией (FE-SEM) был использован для изучения микроструктуры пеноалюминия, полученного с использованием CaCO_3 . Для микроструктурного анализа был подготовлен образец стандартного размера ($8 \times 8 \times 4$), изображение его микроструктуры представлено на рис. 7.

FE-SEM-исследование позволяет оценить значение размера пор и толщины стенок. В полученной алюминиевой пене были сформированы поры разного размера, как показано на рис. 8, а, б. Самый большой размер пор составляет 1,43 мм, а самый маленький – 0,075 мм. Одной из причин получения неравномерного размера пор является неравномерное распределение пенообразователя в расплавленном алюминии. Неравномерная пористость алюминиевой пены привела к высокой внутренней прочности. Расстояние между порами варьируется от 0,40 до 1,97 мм. На рис. 8, а, б полученная толщина стенки варьируется от 0,182 до 0,40 мм.

Энергодисперсионная спектроскопия (EDS) алюминиевой пены

Для исследования элементного состава разработанной металлической пены была проведена энергодисперсионная спектроскопия. На рис. 9, а показана область фокуса, рассматриваемая для получения пиков внутри образца, в то время как на рис. 9, б показан весовой

Таблица 1

Table 1

Свойства полученной металлической пены
Properties of Developed Metallic Foam

№	Объем алюминиевой пены, см^3	Масса алюминиевой пены, г	Плотность, г/см^3	Процент пористости, %	Относительная плотность
1	70	130	1,8	32	0,67

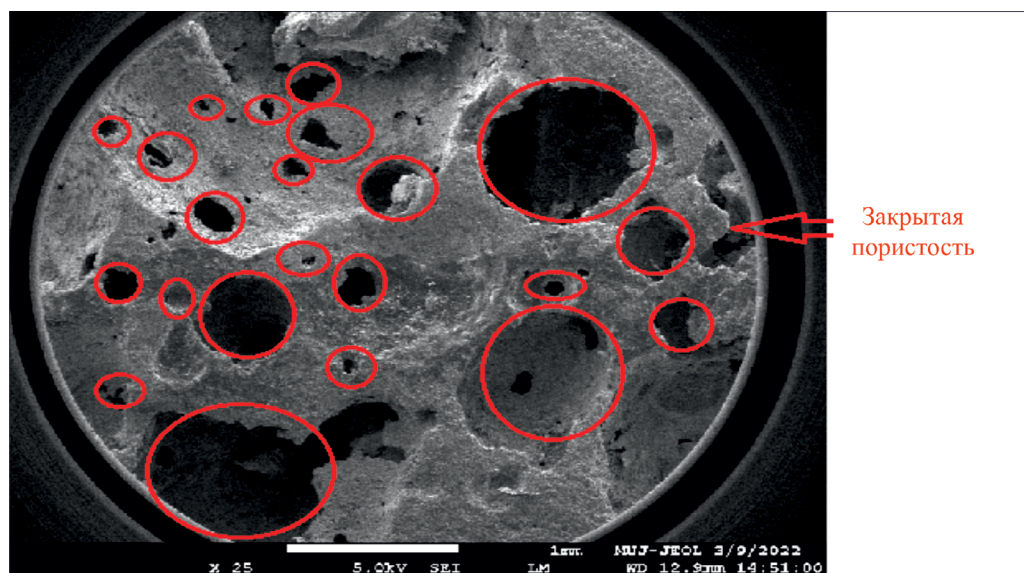
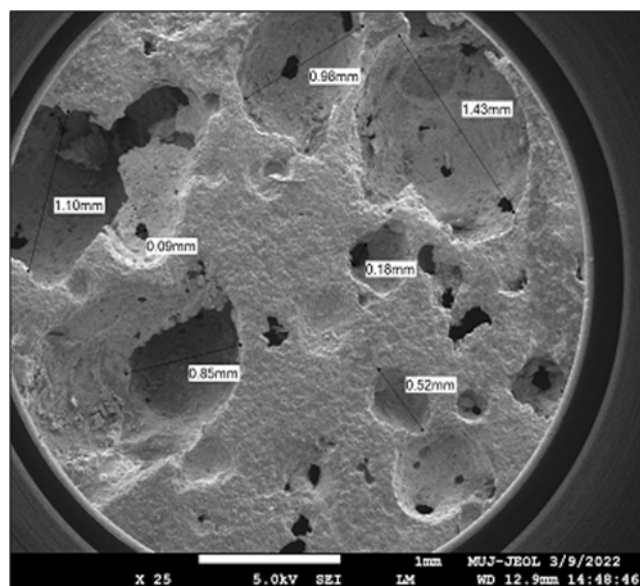
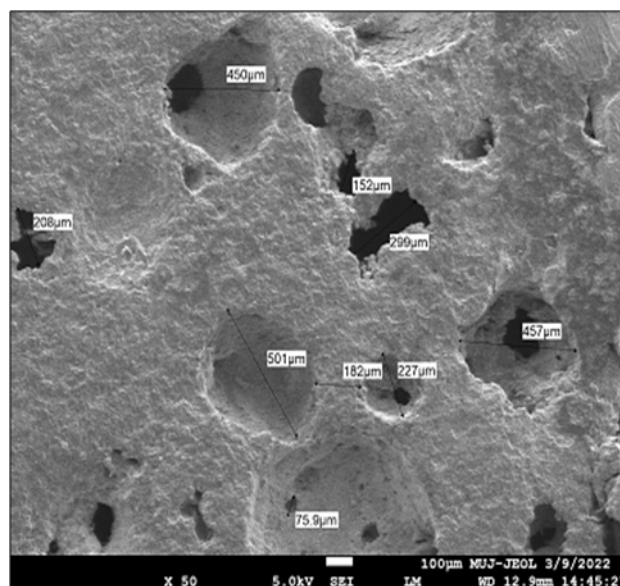


Рис. 7. Морфология поверхности алюминиевой пены (2,5 % карбоната кальция) с закрытыми порами, наблюдаемая с помощью FE-SEM; характеризуется взаимосвязанными порами

Fig. 7. Surface morphology of closed-cell aluminium foam (2.5 % calcium carbonate), observed using FE-SEM, is characterized by interconnected pores



а



б

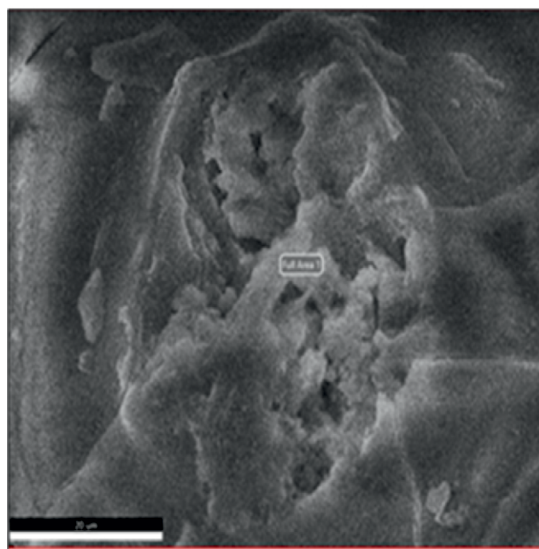
Рис. 8. Распределение пор алюминиевой пены по размерам: 25× (а) и 50× (б)

Fig. 8. Pore size distribution of aluminium foam (а) 25× and (б) 50×

процент составляющих элементов с погрешностью 3 сигма %. Дополнительно на рис. 9, в показаны EDS-спектры составляющих элементов с соответствующими значениями интенсивности.

Кальций, кремний, молибден и магний можно увидеть на энергодисперсионном спектре образца. Количество алюминия, кислорода, кремния и магния составляет 16,1, 56,8, 1,7

и 1,1 соответственно. Кремний, магний и молибден являются легирующими элементами алюминия, но кислород не является легирующим элементом. Этот энергодисперсионный спектр указывает на то, что алюминиевая пена имеет высокий весовой процент кислорода. Важно, что алюминиевая пена имеет высокий уровень пористости, поскольку внутри пор задерживается больше газов.


a

Элемент	Вес. %	Ат. %	Погрешность, %
C K	20,4	27,9	10
O K	56,8	58,4	8,7
Na K	1,7	1,2	12,9
Mg K	1,1	0,7	9,9
Al K	16,1	9,8	5,5
Si K	1,7	1	8,7
Mo K	0,2	0	37,5
S K	0,2	0,1	24,5
Cl K	0,6	0,3	12
K K	0,5	0,2	12,6
Ca K	0,8	0,3	8,2

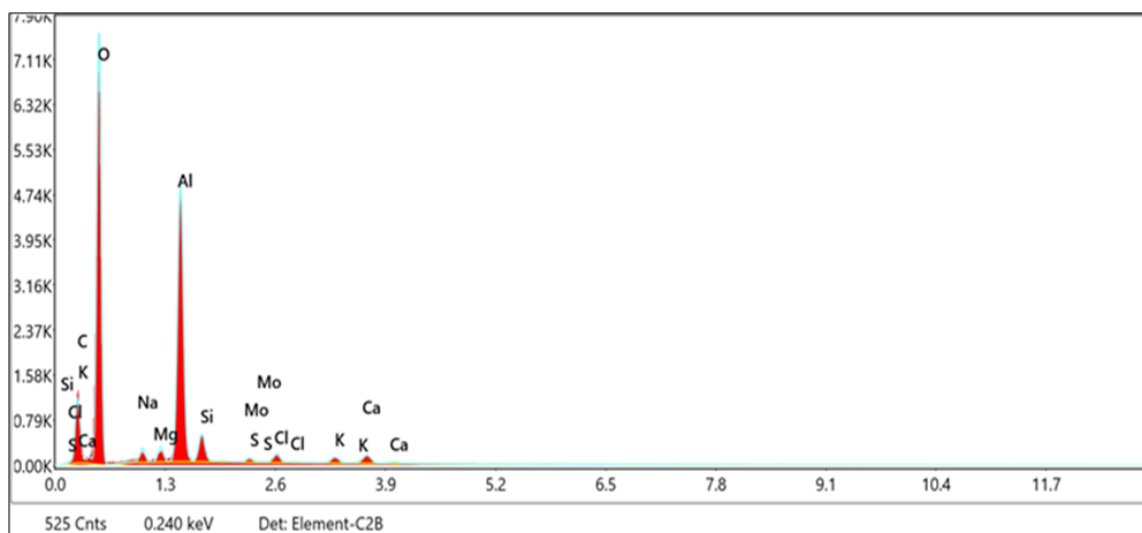
б

в

Рис. 9. Элементный анализ пеноалюминия:

a – площадь картирования; *б* – вес.%; *в* – элементные спектры

Fig. 9. Elemental analysis of aluminium foam (*a*) mapping area, (*б*) weight %, (*в*) elemental spectra

Механические свойства алюминиевой пены

Испытания на удар по Шарпи

Испытание на удар по Шарпи используется для проверки прочности материала. Измеряется энергия, поглощенная образцом с V-образным надрезом до момента разрушения под ударной нагрузкой. Стандартный размер образца 55×10×10 мм, и он имеет надрез под углом 45° по одному из размеров [20, 21]. Результаты испытаний представлены в табл. 2. Поглощенная

вспененным алюминием энергия удара очень близка по значению к аналогичной характеристике исходного алюминия.

Таблица 2

Table 2

Результаты ударных испытаний Impact Test Results

№	Образец	Дж
1	Алюминиевая пена	4
2	Плотный алюминий	6

Определение твердости по Роквеллу

Для испытания на твердость по Роквеллу из пеноалюминия вырезали прямоугольный образец. Для испытаний выбрали шариковый индентор из высокоуглеродистой стали (1/16"). Первоначально к поверхности материала прикладывали незначительную нагрузку 10 кгс, эта незначительная нагрузка не зависит от материала. После этого к поверхности материала прикладывали основную нагрузку в 100 кгс в течение 30 секунд. Значение твердости измеряли в трех испытаниях, соответствующие значения твердости представлены в табл. 3. Было замечено, что полученная алюминиевая пена имеет высокую твердость по сравнению с исходным алюминиевым материалом. (Образец 1 – полученная в работе алюминиевая пена; образец 2 – исходный плотный алюминий.)

Испытание на сжатие

Прочность на сжатие пеноалюминиевого материала определяли на машине для испытаний на сжатие (СТМ). Для этого из пеноалюминие-

вого материала и плотного алюминия вырезали образцы прямоугольной формы, после чего образцы помещали на стол СТМ и прикладывали к ним нагрузку.

После приложения сжимающей нагрузки оба образца деформировались, а их размер изменялся как показано на рис. 10, а, б. Полученная прочность на сжатие для пеноалюминия и исходного алюминиевого материала составляла 607 и 493 кН соответственно.

На рис. 11 показана деформация пеноалюминия. Абсолютное укорочение образца прямо пропорционально приложенной сжимающей силе до 700 кН. При приложении нагрузки он может расколоться на куски, пористая структура при этом повреждается. Максимальная наблюдаемая сжимающая нагрузка – сила 760 кН, максимальное укорочение – 17 мм, процент смещения – 51 %.

Выводы

Был разработан пеноалюминиевый материал с использованием карбоната кальция в качестве пенообразователя. В расплавленный металл до-

Таблица 3

Table 3

Результаты измерения твердости по Роквеллу (HRB)
Rockwell Hardness test results (HRB)

Образец	Отпечаток 1	Отпечаток 2	Отпечаток 3	Среднее значение
Образец 1	77	76	80	77,6
Образец 2	24	28	25	25,6



а



б

Рис. 10. Деформированная алюминиевая пена (а), исходный материал (б)

Fig. 10. Deformed aluminium foam (a), parent material (b)

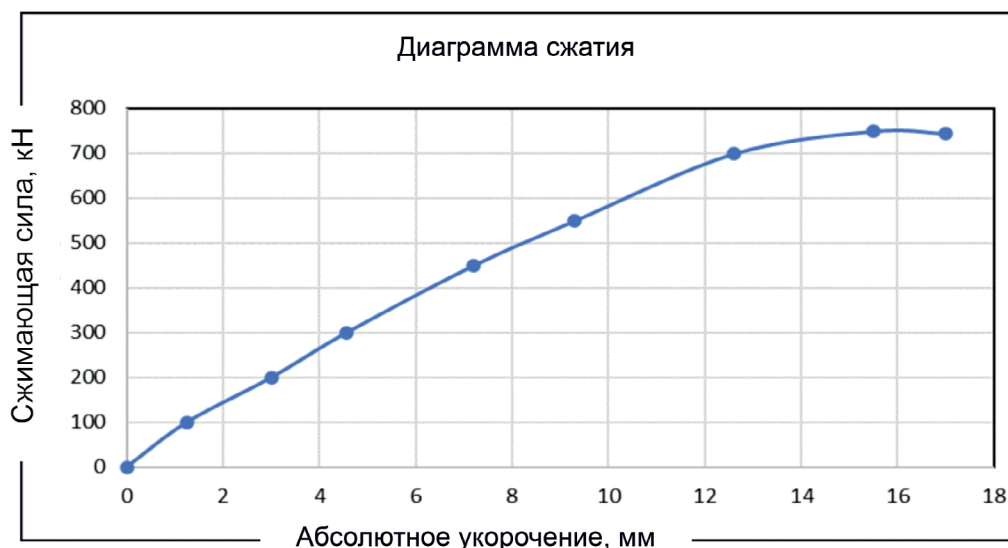


Рис. 11. График зависимости абсолютного укорочения образца пеноалюминиевого материала (мм) от сжимающей силы (кН)

Fig. 11. Graph for dependency of displacement (mm) on load (kN) of the foam aluminium material specimen

полнительно вводить стабилизатор не пришлось, так как при разложении образуется материал, повышающий вязкость. Для образования металлической пены использовалась механизированная мешалка. Разработанный пеноматериал имеет более высокую прочность на сжатие и ударную прочность по сравнению с исходным плотным материалом. По разработанному пеноматериалу можно отметить следующее.

- Разработанная металлическая пена имеет соотношение прочности и веса на 67 % выше, чем у основного материала.
- Размер пор варьируется в диапазоне от 0,075 до 1,43 мм, что позволяет металлической пене лучше поглощать энергию удара.
- Твердость пеноматериала на 52 HRB выше, чем у исходного плотного материала.
- Пеноматериал демонстрирует более высокую прочность на сжатие (607 кН) по сравнению с основным металлом (497 кН).
- Благодаря низкой плотности и высокой прочности на сжатие разработанный пеноматериал будет полезен в автомобильной промышленности, где требуется легкий материал с высокой прочностью.

Список литературы

1. Comparative study of stir casting and infiltration casting of expanded glass-aluminium syntactic foams / S. Broxtermann, M.M. Su, H. Hao, T. Fiedler // Journal

of Alloys and Compounds. – 2020. – Vol. 845. – P. 155415. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.155415.

2. 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.

3. Banhart J., Seeliger H.-W. Aluminium foam sandwich panels: manufacture, metallurgy and applications // Advanced Engineering Materials. – 2008. – Vol. 10 (9). – P. 793–802. – DOI: 10.1002/adem.200800091.

4. 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.

5. Sharma S.S., Rajpoot Y.S. Development of aluminum metal foam using blowing agent // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 377 (1). – P. 012150. – DOI: 10.1088/1757-899X/377/1/012150.

6. 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. – P. 899–905. – DOI: 10.1007/s40962-020-00528-w.

7. Farahani M.R., Rezaei Ashtiani H.R., Elahi S.H. Effect of zinc content on the mechanical properties of closed-cell aluminum foams // International Journal of Metalcasting. – 2022. – Vol. 16 (2). – P. 713–722. – DOI: 10.1007/s40962-021-00635-2.

8. Byakova A.V., Gnyloskurenko S.V., Nakamura T. Effect of CaCO₃ foaming agent at formation and stabilization of Al-based foams fabricated by powder compact technique // *Materials Transactions*. – 2017. – Vol. 58 (2). – P. 249–258. – DOI: 10.2320/matertrans.M2016314.

9. Closed cell ZA27–SiC foam made through stir-casting technique / D.P. Mondal, M.D. Goel, N. Bagde, N. Jha, S. Sahu, A.K. Barnwal // *Materials & Design*. – 2014. – Vol. 57. – P. 315–324. – DOI: 10.1016/j.matdes.2013.12.026.

10. Fabrication, properties, and applications of open-cell aluminum foams: A review / W. Tan, Y. Liu, C. Zhou, X. Chen, Y. Li // *Journal of Materials Science & Technology*. – 2021. – Vol. 62. – P. 11–24. – DOI: 10.1016/j.jmst.2020.05.039.

11. Improvements in stabilisation and cellular structure of Al based foams with novel carbonate foaming agent / A. Byakova, A. Sirko, K. Mykhalenkov, Yu. Milman, S. Gnyloskurenko, T. Nakamura // *High Temperature Materials and Processes*. – 2007. – Vol. 26 (4). – P. 239–246. – DOI: 10.1515/HTMP.2007.26.4.239.

12. Singh Sh., Bhatnagar N. A survey of fabrication and application of metallic foams (1925–2017) // *Journal of Porous Materials*. – 2018. – Vol. 25. – P. 537–554. – DOI: 10.1007/s10934-017-0467-1.

13. Naeem M.A., Gábor A., Mankovits T. Influence of the manufacturing parameters on the compressive properties of closed cell aluminum foams // *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*. – 2020. – Vol. 64 (2). – P. 172–178. – DOI: 10.3311/PPme.16195.

14. Research on dynamic accumulation effect and constitutive model of aluminum foams under dynamic impact / H. Gao, C. Xiong, J. Yin, H. Deng // *International Journal of Metalcasting*. – 2019. – Vol. 13 (1). – P. 146–157. – DOI: 10.1007/s40962-018-0245-0.

15. Binesh F., Zamani J., Ghiasvand M. Ordered structure composite metal foams produced by casting //

International Journal of Metalcasting. – 2018. – Vol. 12. – P. 89–96. – DOI: 10.1007/s40962-017-0143-x.

16. Bolat Ç., Akgün İ.C., Gökşenli A. Effect of aging heat treatment on compressive characteristics of bimodal aluminum syntactic foams produced by cold chamber die casting // *International Journal of Metalcasting*. – 2022. – Vol. 16 (2). – P. 646–662. – DOI: 10.1007/s40962-021-00629-0.

17. Temiz A., Yaşar M., Koç E. Fabrication of open-pore biodegradable magnesium alloy scaffold via infiltration technique // *International Journal of Metalcasting*. – 2022. – Vol. 16. – P. 317–328. – DOI: 10.1007/s40962-021-00604-9.

18. Influences of cell size, cell wall thickness and cell circularity on the compressive responses of closed-cell aluminum foam and its FEA analysis / K.S. Verma, D. Muchhala, S.K. Panthi, D.P. Mondal // *International Journal of Metalcasting*. – 2022. – Vol. 16 (2). – P. 798–813. – DOI: 10.1007/s40962-021-00627-2.

19. Chen K., Guo L., Wang H. A review on thermal application of metal foam // *Science China Technological Sciences*. – 2020. – Vol. 63 (12). – P. 2469–2490. – DOI: 10.1007/s11431-020-1637-3.

20. Tan P.J., Reid S.R., Harrigan J.J. On the dynamic mechanical properties of open-cell metal foams A re-assessment of the ‘simple-shock theory’ // *International Journal of Solids and Structures*. – 2012. – Vol. 49 (19–20). – P. 2744–2753. – DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2012.03.026.

21. An experimental investigation into the quasi-static compression behavior of open-cell aluminum foams focusing on controlling the space holder particle size / M. Hajizadeh, M. Yazdani, S. Vesali, H. Khodarahmi, T.M. Mostofi // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2021. – Vol. 70. – P. 193–204. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.08.043.

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 synergistic approach to the development of lightweight aluminium-based porous metallic foam using stir casting method

Shyam Sharma ^a, Rahul Khatri ^b, Anurag Joshi ^{c, *}

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

^a <https://orcid.org/0000-0002-1510-5871>, shyamsunder.sharma@jaipur.manipal.edu;

^b <https://orcid.org/0000-0003-1589-533X>, rahul.khatri@jaipur.manipal.edu; ^c <https://orcid.org/0000-0002-8231-9423>, anuragjoshi355@gmail.com

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 04 September 2023

Revised: 27 September 2023

Accepted: 12 November 2023

Available online: 15 December 2023

Keywords:

Metallic foam

Stir casting

Porous foam

Light weight material

ABSTRACT

Introduction. A synergetic approach to the development of lightweight aluminium metal foam by stir casting process is presented and various mechanical properties and microstructure are tested. **The purpose of this study** is due to the constant industrial demand for lightweight materials and increased research interest in porous substrates, mainly due to its unique properties. **Materials and method.** The method used for developing metallic aluminium foam was stir casting with calcium carbonate as a foaming agent to achieve a target interconnected porous microenvironment on a metal foam substrate. **Results and Discussion.** A set of physical properties, such as apparent density (1.8 g/cm^3), relative density (0.67 g/cm^3) and porosity (30 %) of the developed aluminium-based metal foams, is stated as the result. The developed metal foam has a strength-to-weight ratio 67 % higher than that of the base material. In addition, the results of field emission scanning electron microscopy of the developed metal foam confirm the presence of a porous network with a pore size from 0.075 mm to 1.43 mm. Energy dispersive spectroscopy confirmed the presence of the desired elements with minimal contamination in the developed aluminium foam substrates. Metal foam demonstrates a higher compressive strength (607 kN) compared to the base metal (497 kN). The mechanical characteristics of the developed metal foam substrate (hardness, compressive strength and impact energy) show the expected results compared to the base material. In general, the developed aluminium foam substrate established a promising route to the development of highly performance lightweight metal foam for shock absorber and acoustic applications.

For citation: Sharma S.S., Khatri R., Joshi A. A synergistic approach to the development of lightweight aluminium-based porous metallic foam using stir casting method. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 4, pp. 255–267. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.4-255-267. (In Russian).

References

1. Broxtermann S., Su M.M., Hao H., Fiedler T. Comparative study of stir casting and infiltration casting of expanded glass-aluminium syntactic foams. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, vol. 845, p. 155415. DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.155415.
2. 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.
3. Banhart J., Seeliger H.-W. Aluminium foam sandwich panels: manufacture, metallurgy and applications. *Advanced Engineering Materials*, 2008, vol. 10 (9), pp. 793–802. DOI: 10.1002/adem.200800091.
4. 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.
5. Sharma S.S., Rajpoot Y.S. Development of aluminum metal foam using blowing agent. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 377 (1), p. 012150. DOI: 10.1088/1757-899X/377/1/012150.

* Corresponding author

Joshi Anurag, Ph.D. (Engineering), Assistant Professor

Manipal University Jaipur,

303007, Rajasthan, India

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

6. 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, pp. 899–905. DOI: 10.1007/s40962-020-00528-w.
7. Farahani M.R., Rezaei Ashtiani H.R., Elahi S.H. Effect of zinc content on the mechanical properties of closed-cell aluminum foams. *International Journal of Metalcasting*, 2022, vol. 16 (2), pp. 713–722. DOI: 10.1007/s40962-021-00635-2.
8. Byakova A.V., Gnyloskurenko S.V., Nakamura T. Effect of CaCO₃ foaming agent at formation and stabilization of Al-based foams fabricated by powder compact technique. *Materials Transactions*, 2017, vol. 58 (2), pp. 249–258. DOI: 10.2320/matertrans.M2016314.
9. Mondal D.P., Goel M.D., Bagde N., Jha N., Sahu S., Barnwal A.K. Closed cell ZA27–SiC foam made through stir-casting technique. *Materials & Design*, 2014, vol. 57, pp. 315–324. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.12.026.
10. Tan W., Liu Y., Zhou C., Chen X., Li Y. Fabrication, properties, and applications of open-cell aluminum foams: A review. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, vol. 62, pp. 11–24. DOI: 10.1016/j.jmst.2020.05.039.
11. Byakova A., Sirko A., Mykhalenkov K., Milman Yu., Gnyloskurenko S., Nakamura T. Improvements in stabilisation and cellular structure of Al based foams with novel carbonate foaming agent. *High Temperature Materials and Processes*, 2007, vol. 26 (4), pp. 239–246. DOI: 10.1515/HTMP.2007.26.4.239.
12. Singh Sh., Bhatnagar N. A survey of fabrication and application of metallic foams (1925–2017). *Journal of Porous Materials*, 2018, vol. 25, pp. 537–554. DOI: 10.1007/s10934-017-0467-1.
13. Naeem M.A., Gábora A., Mankovits T. Influence of the manufacturing parameters on the compressive properties of closed cell aluminum foams. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 2020, vol. 64 (2), pp. 172–178. DOI: 10.3311/PPme.16195.
14. Gao H., Xiong C., Yin J., Deng H. Research on dynamic accumulation effect and constitutive model of aluminum foams under dynamic impact. *International Journal of Metalcasting*, 2019, vol. 13 (1), pp. 146–157. DOI: 10.1007/s40962-018-0245-0.
15. Binesh F., Zamani J., Ghiasvand M. Ordered structure composite metal foams produced by casting. *International Journal of Metalcasting*, 2018, vol. 12, pp. 89–96. DOI: 10.1007/s40962-017-0143-x.
16. Bolat Ç., Akgün İ.C., Gökşenli A. Effect of aging heat treatment on compressive characteristics of bimodal aluminum syntactic foams produced by cold chamber die casting. *International Journal of Metalcasting*, 2022, vol. 16 (2), pp. 646–662. DOI: 10.1007/s40962-021-00629-0.
17. Temiz A., Yaşar M., Koç E. Fabrication of open-pore biodegradable magnesium alloy scaffold via infiltration technique. *International Journal of Metalcasting*, 2022, vol. 16, pp. 317–328. DOI: 10.1007/s40962-021-00604-9.
18. Verma K.S., Muchhala D., Panthi S.K., Mondal D.P. Influences of cell size, cell wall thickness and cell circularity on the compressive responses of closed-cell aluminum foam and its FEA analysis. *International Journal of Metalcasting*, 2022, vol. 16 (2), pp. 798–813. DOI: 10.1007/s40962-021-00627-2.
19. Chen K., Guo L., Wang H. A review on thermal application of metal foam. *Science China Technological Sciences*, 2020, vol. 63 (12), pp. 2469–2490. DOI: 10.1007/s11431-020-1637-3.
20. Tan P.J., Reid S.R., Harrigan J.J. On the dynamic mechanical properties of open-cell metal foams A reassessment of the ‘simple-shock theory’. *International Journal of Solids and Structures*, 2012, vol. 49 (19–20), pp. 2744–2753. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2012.03.026.
21. Hajizadeh M., Yazdani M., Vesali S., Khodarahmi H., Mostofi T.M. An experimental investigation into the quasi-static compression behavior of open-cell aluminum foams focusing on controlling the space holder particle size. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, vol. 70, pp. 193–204. DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.08.043.

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>).