– гибкость применения – этот метод обычно используется для соединения, восстановления размеров, ремонта корпусов, валов и других узлов [3].

Немаловажным преимуществом является то, что результат проделанной работы обладает устойчивостью к окислению, превышающую устойчивость основного материала.

Таким образом, предложенный способ наплавки сверхпрочных сплавов позволяет формировать уникальную композитную структуру соединений, улучшает механические и эксплуатационные характеристики деталей, расширяет возможности ремонта и продления срока службы элементов двигателей, валов и других немаловажных узлов.

Литература

1. Патон, Б. Е. Сварка и родственные процессы / Б. Е. Патон. – М. : Машиностроение, 1974. – 560 с.
2. Лахтин, Ю. М. Материаловедение / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. – М. : Машиностроение, 1990. – 528 с.
3. Козырев, Н. А. Металлургия сварки плавлением : учеб. пособие / Н. А. Козырев, В. Е. Белов – Екатеринбург : УрФУ, 2015. – 412 с.
4. Мрочек, Ж. А. Прогрессивные технологии восстановления и упрочнения деталей машин : учеб. пособие / Ж. А. Мрочек, Л. М. Кожуро, И. П. Филонов. – Минск, 2000. – 286 с.

МЕТАЛЛИЧЕСКАЯ ПЕНА В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ МАШИНОСТРОЕНИЯ

И. П. Старовойтов

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

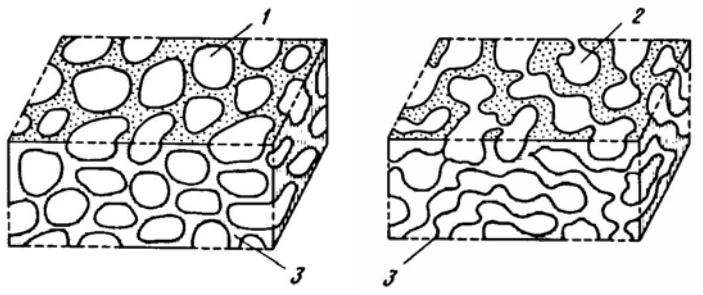
Научный руководитель А. Д. Левкина

Рассмотрены металлические пены (МП) – легкие композиты с ячеистой структурой (5–25 % металла), предназначенные для работы в экстремальных условиях. Описаны типы МП (закрытые, открытые, композитные), основные материалы (алюминий, никель, медь) и метод порошковой металлургии. Показаны преимущества МП в авиации и ракетостроении: термостойкость до 1500 °С, низкая теплопроводность, высокое энергопоглощение, снижение массы теплозащитных экранов на 40–60 %. Отмечены перспективы гибридных пен и градиентной пористости, а также то, что МП являются оптимальным решением для теплозащиты, ударопоглощения и фильтрации.

Ключевые слова: металлическая пена, классификация, применение, экстремальные условия.

Современное машиностроение сталкивается с задачами, требующими использования материалов, способных выдерживать экстремальные условия: высокие температуры, механические нагрузки, агрессивные среды и вибрации. Одним из перспективных решений являются металлические пены (МП) – это класс композиционных материалов, состоящих из двух компонентов: твердой части (ячеистая решетка из твердого металла) и газа, который создает в полости основного материала множество газонаполненных пор. При этом процентное содержание самого металла составляет всего 5–25 % от общей массы материала, из-за чего класс материалов получил название «металлическая губка».

По структуре пор выделяют три типа: с закрытыми порами (рис. 1, *а*) (поровая область изолирована, газ не циркулирует между ними, что обеспечивает повышенные плавучесть и жесткость материала), с открытыми порами (рис. 1, *б*) (ячейки сообщаются друг с другом, образуя тем самым единую сеть каналов) и с композитной структурой (ячейки в таком случае заполнены не газом, а другим материалом).



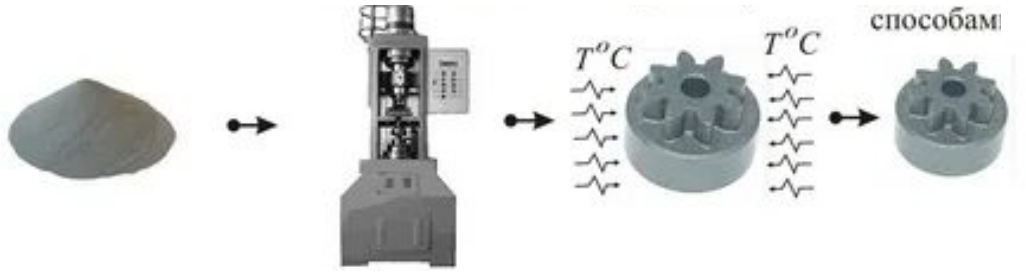
а) *б)*

Рис. 1. Металлическая пена:
а – с закрытыми порами; *б* – с открытыми порами:
1 и *2* – газ; *3* – твердый металл

Первый тип МП применяется для создания элементов плавучих конструкций в качестве амортизаторов и звукоизоляционных материалов. Тип с открытыми порами служит для создания фильтров для жидкостей и газов, деталей теплообменников, направленных на охлаждение электроники, электродами батарей или носителями для катализаторов. Третий тип МП имеет достаточно универсальное применение за счет свойств, обеспеченных использованием в структуре двух металлов (например, легкость металла-основы и прочность металла-наполнителя).

По типу используемого в основе металла также можно выделить три класса. К первому относятся МП на основе алюминия – самый распространенный вид. Сочетает небольшой вес с отличным шумопоглощением и демпфированием. Используется в автопромах и авиации для защиты от ударов. Никелевые пены – обладают значительной коррозионной стойкостью, большой удельной поверхностью. Применяются в фильтрах и батареях, каталитических нейтрализаторах. Медные пены отличаются высокими электро- и теплопроводностью. Используются для создания электродов батарей и теплоотводов.

Один из наиболее распространенных способов получения металлических пен – метод порошковой металлургии. Этот процесс начинается со смешивания металлического порошка (рис. 2, *а*), например, алюминиевого или титанового, с порофором – веществом, которое при нагревании выделяет газ. Полученная смесь прессуется в заготовку (рис. 2, *б*), после чего подвергается спеканию при температуре, близкой к температуре плавления металла (рис. 2, *в*). В процессе спекания порофор разлагается, выделяя газ, который формирует поры в металлической матрице. После охлаждения материал сохраняет пористую структуру, что придает ему уникальные свойства (рис. 2, *г*). Этот метод позволяет получать пены с закрытыми порами и контролируемой плотностью, что делает его особенно ценным для производства алюминиевых и титановых пен, используемых в авиационной и автомобильной промышленности.



а) *б*) *в*) *г*)

Рис. 2. Процесс производства металлической пены

На данный момент времени МП – это только зарождающееся направление в материаловедении, поэтому среди стран СНГ общепринятой системы маркировки как отдельного класса материалов пока не сложилось. Обычно их обозначают по основе (например, «Алюминиевая пена АСП»), а в технической документации на продукцию часто используют аббревиатуру CMF (Composite Metal Foam) для композитных типов. Для никелевых пен (в фильтрах/теплообменниках) иногда применяется маркировка типа «Ni Foam» с цифровым указанием процента пористости и размера пор.

Одним из новых, востребованных и интенсивно развивающихся направлений экстремальных условий в машиностроении является теплозащита в авиационных и ракетных двигателях. В таких системах материалы должны выдерживать не только экстремальные температуры (в камерах сгорания и соплах ракет температура может достигать 1500–1700 °C, а давление – 200–250 атм), но и механические нагрузки, а также воздействие агрессивных сред, таких как окислительные газы и топливные смеси. Традиционные материалы, такие как жаропрочные стали и сплавы, имеют плотность 7,8–8,5 г/см³ и склонны к окислению при температурах выше 1000°C, что требует дополнительной защиты и увеличивает массу конструкции. Керамические материалы, хотя и выдерживают температуры до 2000 °C, обладают хрупкостью и низкой ударной вязкостью – их прочность на изгиб составляет всего 300–500 МПа, что ограничивает их применение в условиях динамических нагрузок. Полимерные композиты и углепластики начинают деградировать уже при 300–400 °C, теряя до 50 % прочности.

В таких экстремальных условиях оптимальным решением становятся металлические пены, в частности, алюминиевые пены (Al-foam) [2] с закрытой ячеистой структурой и пористостью 85–95 %. Эти материалы способны выдерживать температуры до 1000 °C, а при нанесении керамических или никелевых покрытий их рабочая температура повышается до 1400–1500 °C. Коэффициент теплопроводности алюминиевых пен составляет 0,5–2,0 Вт/(м · К), что в 10–20 раз ниже, чем у сплошного алюминия, обеспечивая эффективную теплоизоляцию. Например, в проектах Европейского космического агентства (ESA) алюминиевые пены толщиной 10–15 мм используются в качестве тепловых экранов, снижая температуру на защищаемой поверхности с 1500 до 200–300 °C.

Преимущества алюминиевых пен также включают высокую энергопоглощающую способность — до 50–70 МДж/м^3, что позволяет им выдерживать ударные нагрузки с ускорением до 1000 g без разрушения. Это свойство делает их незаменимыми для создания ударозащитных панелей в бронетехнике и авиационных конструкциях. Кроме того, металлические пены устойчивы к коррозии: скорость окисления алюминиевых пен при 800 °C составляет менее 0,1 мм/год благодаря пассивирующим оксидным покрытиям, что в 5–10 раз ниже, чем у обычных алюминиевых сплавов.

В будущем ожидается развитие гибридных металлических пен, например, на основе никелевых или титановых сплавов с нанопокрытиями, что позволит расширить их применение в условиях еще более высоких температур – до 1600–1800 °С. Уже сегодня ведутся исследования по созданию пен с градиентной пористостью, где внешний слой имеет пористость 90–95 % для теплоизоляции, а внутренний – 70–80 % для обеспечения механической прочности. Это открывает новые возможности для использования металлических пен в гиперзвуковых летательных аппаратах, ядерных реакторах и других высокотехнологичных областях.

Таким образом, металлические пены, особенно алюминиевые, представляют собой оптимальное решение для применения в экстремальных условиях машиностроения. Их уникальные свойства – низкая плотность (0,2–0,6 г/см³), высокая прочность при сжатии (до 50–100 МПа), термостойкость (до 1500 °С с покрытиями) и способность поглощать энергию – позволяют значительно улучшить характеристики конструкций. Например, замена стальных теплозащитных экранов на алюминиевые пены в ракетных двигателях позволяет снизить массу на 40–60 % при сохранении или даже улучшении теплозащитных свойств.

Литература

1. Шарма, Ш. Систематический обзор технологий производства металлической пены / Ш. Шарма, А. Йоши, Й. Раджпут // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. – 2023. – Т. 25, № 4. – С. 22–35. – DOI 10.17212/1994-6309-2023-25-4-22-35
2. Калиниченко, В. А. Вспененные пористые теплоизоляционные материалы на основе алюминия / В. А. Калиниченко, А. А. Андрушевич // Литье и металлургия. – 2012. – № 3 (66). – Спецвыпуск: пористые металлы и их применение. – С. 31–34.

ПРОБЛЕМА ПЕРЕРАБОТКИ ВУЛКАНИЗИРОВАННЫХ ЭЛАСТОМЕРОВ И КОНЦЕПЦИЯ ПОЛНОСТЬЮ РЕЦИКЛИРУЕМЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ШИН

М. А. Горбачев

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Научный руководитель А. Д. Левкина

Рассмотрена проблема переработки вулканизированных эластомеров на примере автомобильных шин. Необратимость химического сшивания делает традиционные методы утилизации (механический рециклинг, девулканизацию, сжигание) неэффективными: первый – снижает прочность, второй – дорог и сложен, третий – неэкологичен. Решение предлагается в изменении химической архитектуры материала. Внедрение динамических ковалентных адаптивных сетей (CANs) и обратимых сшивок (обмен дисульфидными связями, реакции Дильса–Альдера) позволит резине сохранять эксплуатационные свойства, но становиться пластичной при нагреве для повторной переработки. Также перспективна унификация полимерной основы, использование растворимых разделительных слоев и химическая деполимеризация. Сделан вывод, что создание полностью рециклируемой шины на основе термопластичных эластомеров переходит из области футурологии в инженерную плоскость.

Ключевые слова: вулканизация, шины, связи, материалы.

Вулканизированные эластомеры [1] – это полимерные материалы, в данном случае резина, подвергшиеся химическому сшиванию для улучшения прочности, эластичности и термостойкости. Основная проблема их переработки заключается в необратимости