

РФЯЦ – ВНИИЭФ

Перевод с английского языка статьи

**MANUFACTURE, CHARACTERISATION AND
APPLICATION OF CELLULAR METALS AND
METAL FOAMS**

J. BANHART

Progress in Materials Science. 2001. Vol. 46, 559-632

**ПОЛУЧЕНИЕ, АТТЕСТАЦИЯ И
ПРИМЕНЕНИЕ ЯЧЕЙСТЫХ МЕТАЛЛОВ И
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЕН**

г.Саров

2004

J. BANHART

**Получение, аттестация и применение ячеистых металлов и
металлических пен**

Реферат

Рассмотрены методы получения металлических пен и других пористых металлических структур. Процессы их получения классифицированы в соответствии с агрегатным состоянием, в котором обрабатывались металлы — твердом, жидком, газообразном или ионизированном. Вспенивание жидкого металла возможно непосредственным вдуванием газа или с использованием газогенерирующих агентов, а также образованием перенасыщенных растворов газа в металле. Непрямые методы включают литьевое покрытие наполнителей, использование материалов-наполнителей, которые обеспечивают сохранение пространственной структуры, или плавление порошковых смесей, которые содержат порофор. Если в прессовку из порошка "замурован" инертный газ, последующая термическая обработка приводят к образованию ячеистых металлов даже в твердом состоянии. Это же явление характерно для различных методов получения ячеистых металлов, таких как спекание, вспенивание металлических суспензий, экструзия и спекание смесей полимера с порошком металла. Кроме того, электроосаждение или осаждение паров металла также приводят к получению высокопористых металлических структур. Во втором разделе данной статьи рассмотрены методы аттестации свойств ячеистых металлических структур. Рассмотрены как неразрушающие методы, так и методы с разрушением образца. В заключение рассмотрены различные области применения пористых металлов. Они разделены по структурному и функциональному применению и рассмотрены в соответствии с важностью для различных отраслей промышленности.

Ключевые слова: ячеистые металлы, пористые металлы, получение, аттестация, применение, обзор.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение	5
2. Методы получения ячеистых металлических материалов	7
2.1. Жидкофазное получение ячеистых металлов	7
2.1.1. Прямое вспенивание металлов	8
2.1.2. Отверждение эвтектической смеси в системе твердое тело - газ ("газары")	18
2.1.3. Метод плавления порошковых прессовок	19
2.1.4. Литьевые методы	27
2.1.5. Вспенивание разбрызгиванием (Процесс Osprey")	32
2.2. Твердофазное получение ячеистых материалов	33
2.2.1. Спекание металлических порошков и волокон	34
2.2.2. Метод "замуровывания" газа	35
2.2.3. Вспенивание суспензий	37
2.2.4. Ячеистые металлы на основе объемных наполнителей, обеспечивающих сохранение ячеистой пространственной структуры	38
2.2.5. Структуры из полых металлических сфер	40
2.2.6. Методы с использованием системы металлический порошок/связующий материал	43
2.2.7. Реакционное спекание	44
2.3. Метод электроосаждения	44
2.4. Осаждение из паровой фазы	45
2.5. Выводы по методам получения	46
3. Методы аттестаций ячеистых материалов	48
3.1. Неразрушающие методы исследования	48
3.1.1. Измерение плотности	48
3.1.2. Измерение просачивания краски	49
3.1.3. Рентгеновская радиография и радиоскопия	49
3.1.4. Рентгеновская компьютерная томография	50
3.1.5. Измерение вихревых токов	52
3.1.6. Акустические измерения	52
3.1.7. Вибрационный анализ	53
3.1.8. Порометрия и измерение проницаемости	53
3.1.9. Измерение электро- и теплопроводности	55
3.1.10. Другие методы	55
3.2. Методы исследования с разрушением образца	56
3.2.1. Анализ оптического изображения	56
3.2.2. Механические испытания	58
3.2.3. Коррозионные испытания	60
4. Применение ячеистых металлических материалов	60
4.1. Общее обсуждения	60

4.2. Применение пенометаллов в качестве конструкционных материалов в различных областях промышленности	62
4.2.1. Автомобилестроение	62
4.2.2. Аэрокосмическая промышленность	69
4.2.3. Кораблестроение	70
4.2.4. Железнодорожный транспорт	70
4.2.5. Строительство	70
4.2.6. Машиностроение	71
4.2.7. Спортивный инвентарь	72
4.2.8. Биомедицинская промышленность	72
4.3. Ячеистые металлы для функциональных применений	73
4.3.1. Фильтрация и сепарация	73
4.3.2. Теплообменники и холодильники	73
4.3.3. Носители для катализатора	74
4.3.4. Хранение и перемещение жидкостей	74
4.3.5. Контроль потоков жидкости	75
4.3.6. Глушители звука	75
4.3.7. Разбрызгиватели	75
4.3.8. Электроды батарей	76
4.3.9. Пламегасители	76
4.3.10. Применение в электрохимии	76
4.3.11. Очистка воды	77
4.3.12. Акустический контроль	77
4.4. Ячеистые материалы для декоративного украшения в искусстве	77
4.5. Общие аспекты выбора областей применения	78
5. Заключение	79
Благодарности	80
Литература	80

1. Введение

Как известно, пены и другие высокопористые материалы ячеистой структуры имеют интересные сочетания физических и механических свойств, таких как высокая прочность при очень низком удельном весе или высокая газопроницаемость при высокой удельной теплопроводности. Из-за этого природа часто использует пористые материалы для конструкционных или функциональных целей (например, древесина или кости). Среди искусственных пористых материалов самыми важными в настоящее время являются полимерные пенопродукты, применяемые почти во всех отраслях промышленности. Менее известным остается тот факт, что даже некоторые металлы и сплавы могут быть получены в виде пористых материалов или пены, а их свойства являются настолько интересными, что в ближайшем будущем ожидается их самое широкое использование.

Ячеистые твердые тела и их свойства детально описаны Гибсоном и Эшби [1]. Общий обзор по ячеистым металлическим материалам был опубликован в 1983г. [2]. С тех пор разработано много новых методов их получения, аттестации свойств и направлений применения металлических пен, и поэтому необходим современный обзор текущего состояния этих технологий. Обширный материал был представлен в недавно опубликованных трудах конференций [3-6,298-301], из которых были заимствованы некоторые примеры, представленные в настоящей статье. Другие обзорные статьи или труды конференций по пористым материалам концентрируют свое внимание, в основном, на их прочностных свойствах [7,8], на особых аспектах производства, или на применении таких материалов [9]. Новое справочное руководство [10] рассматривает свойства металлических пен и их применение. Веб-сайт в Интернете, посвященный ячеистым структурам [349], дает информацию о новых разработках. В настоящей статье представлен текущий обзор по получению пористых материалов, в частности, пенопродуктов, статья снабжена ссылками на источники, описывающие такие материалы. Кроме того, большой раздел посвящен применению пеноматериалов. Стоит отметить, что более 80 % ссылок, представленных в данной работе, были опубликованы после появления обзора Девиса и Шу Жена [2], что указывает, таким образом, на то, как быстро развивается данная область.

Термин "пена" не всегда используется должным образом и поэтому должен быть определен. Согласно рис. 1, на котором представлены все возможные включения одной фазы в другую (где каждая фаза может быть в одном из трех состояний вещества), пена – это однородная взвесь газа в жидкости или в твердом теле [11]. Единичные газовые включения отделены друг от друга жидкостью или твердым телом соответственно. Таким образом, ячейки пены, содержащие газ, являются полностью изолированными друг от друга жидкостью или твердым телом и не связаны друг с другом.



Рис.1 Диспергирование одной фазы в другой. Каждая фаза может быть в одном из трех агрегатных состояний вещества [11].

Термин "пена" в своем первоначальном смысле сохранился для обозначения дисперсии пузырьков газа в жидкости. Однако морфологию таких пен можно сохранить после затвердевания жидкости с образованием так называемой "твердой пены". Говоря о "металлических пенах", обычно имеют в виду твердую пену. Жидкая металлическая пена является промежуточным продуктом при изготовлении материала. Твердая пена является частным случаем материалов с общим названием "ячеистое твердое тело". Как и в случае жидкости, для которой минимизация поверхностной энергии позволяет создавать условия для существования только определенных видов морфологии жидкой пены, в случае твердой пены, которая образуется после затвердевания жидкой пены и которая является всего лишь отображением жидкой пены, условия ее существования ограничены действием того же самого принципа минимизации поверхностной энергии. Напротив, клеточные твердые тела не всегда получают из жидкого состояния, и поэтому они могут иметь почти любую морфологию, например типичную открытую структуру, получаемую спеканием порошков. Часто такие пористые структуры называют "пенами", хотя термин "губка" им соответствует больше. В настоящей работе сделан акцент на методах получения и свойствах "истинных" твердых пен, но очевидно, что обзор был бы неполным без описания методов получения ячеистых металлических каркасов, которые не являются пенами в строгом смысле этого слова.

2. Методы получения ячеистых металлических материалов

Существует много способов получения ячеистых металлических материалов. Некоторые из них подобны методам вспенивания водных растворов или жидких полимеров, тогда как другие способы разрабатывают специально с тем, чтобы использовать благоприятное характерное свойство металлов, например, такое, как их активность при спекании, или используют практическую возможность их получения путем электролитического осаждения. Различные методы получения можно классифицировать в зависимости от состояния, в котором происходит обработка металла. Таким образом, выделяют четыре вида процессов, соответствующих одному из состояний веществ (см. рис.2). Исходными состояниями могут быть:

- (i) – жидкий металл;
- (ii) – твердый порошкообразный металл;
- (iii) – пары металла или газообразных металлических соединений;
- (iv) – растворы с ионами металла.



Рис.2. Классификация различных методов получения ячеистых металлических материалов.

2.1. Жидкофазные методы получения ячеистых металлов

Первая группа процессов позволяет получать ячеистую структуру из жидких металлов. Из расплава металла образуется пористый материал следующими методами: прямым вспениванием, косвенным путем через полимерную пену или, наконец, путем заливания жидкого металла вокруг твердых, заполняющих пространство наполнителей, заполняющие те участки объема, которые после дальнейшей обработки становятся пора́ми. Еще одним возможным способом является плавление порошковых брикетов, содержащих газогенерирующий порофор.

2.1.1. Прямое вспенивание металлов

Расплав металла можно вспенивать напрямую, создавая газовые пузырьки в жидкости. Обычно пузырьки газа, которые образуются в металлическом расплаве, имеют тенденцию к быстрому подъёму на поверхность под действием выталкивающих архимедовых сил в жидкости высокой плотности, однако, этого можно избежать, увеличивая вязкость расплавленного металла. Для этого в расплав добавляют керамические порошки или легирующие добавки, которые образуют стабилизирующие частицы в расплаве. Многочисленные попытки получить вспененные металлы таким способом (в основном, алюминий, магний, цинк или сплавы на основе одного из этих металлов) были предприняты в 1960-х и 1970-х годах [12–19]. Хотя и были получены некоторые пенометаллы вполне хорошего качества, материалы не нашли широкого промышленного применения. Не совсем ясно, было ли управление технологическим процессом получения вспененных металлов в то время неадекватным для того, чтобы получать пенопродукты с удовлетворительным и воспроизводимым качеством и ценой, или же 30 лет назад значительной потребности в материалах такого типа как пеноалюминий еще не было. Однако за последние 10 лет сделано много новых разработок, и, таким образом, в настоящее время для использования в производстве имеется в наличии несколько усовершенствованных производственных процессов.

В настоящее время существует два пути прямого вспенивания металлических расплавов: инъекция газа в расплав металла из внешнего источника или внутрифазное выделение газа в жидкости (*in situ*) путем добавления порофора к расплаву металла.

Интересно отметить, что в одном из самых ранних патентов, полученном в 1940-х годах, предложено использовать ртуть в качестве порофора для вспенивания алюминия [20]. Этот второй металл, испаряясь при нагревании до точки плавления алюминия, создавал, таким образом, поры.

2.1.1.1. Пенообразование инъекцией газа

Первый способ вспенивания алюминия и алюминиевых сплавов в настоящее время используют компания Hydro Aluminium в Норвегии и Cymat Aluminium в Канаде (последняя использует методы и патенты, первоначально разработанные фирмой Alcan International) [21–28]. Согласно этому процессу, как изображено на схеме рис. 3, для увеличения вязкости расплава используют введение частиц карбида кремния, окиси алюминия или окиси магния. Поэтому на первом этапе готовят расплав алюминия, содержащий одну из этих добавок. Основная задача, с которой сталкиваются при создании металлических матричных композитов (ММК), заключается в смачивании добавляемых частиц расплавом и достижении их однородного распределения [29,30]. Подобным образом вспенивают различные

алюминиевые сплавы, например, AlSi10Mg (A359) или сплавы типа 1060, 3003, 6016 или 6061 [28,31].

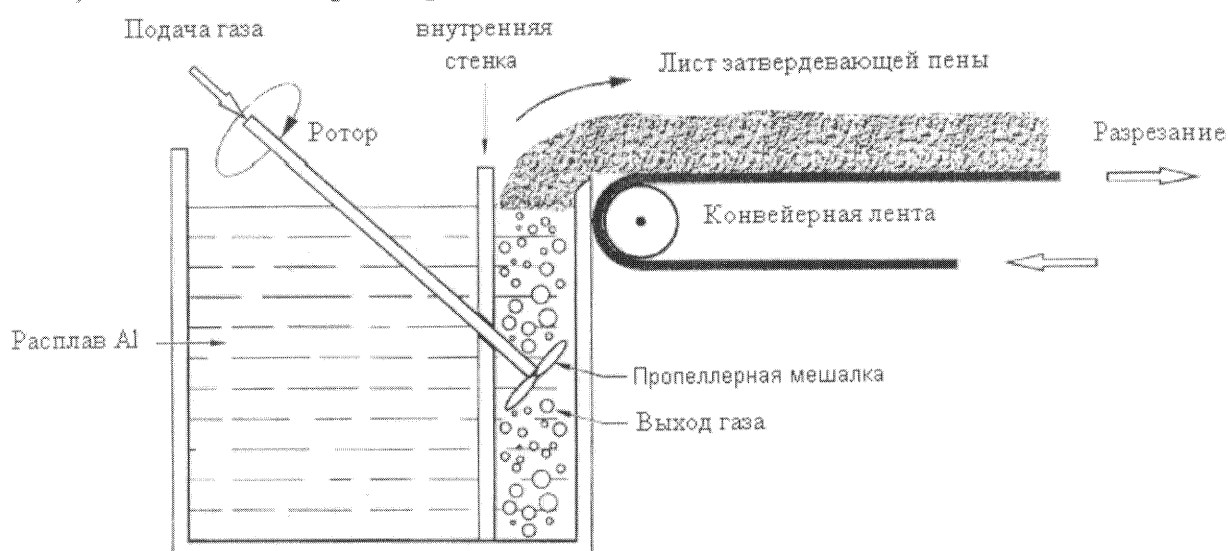


Рис.3. Прямое вспенивание расплавов металлов вдуванием газа (ММК-пены) [28]

На втором этапе жидкий расплав ММК вспенивается вдуванием газа (воздуха, азота, аргона) в расплав с помощью специально разработанных пропеллеров или вибрирующих сопел. Задачей пропеллеров или сопел является создание очень мелких пузырьков газа в расплаве и их равномерное распределение. Это важное требование, т.к. только при достаточно мелких пузырьках может быть получена пена удовлетворительного качества. Получаемая вязкая смесь пузырьков газа и расплавленного металла всплывает на поверхность жидкого металла, где превращается в твердую пену, а жидкий металл опускается вниз. Пена получается относительно стабильной вследствие присутствия керамических частиц в расплаве. Ее можно снять с поверхности расплава с помощью конвейерной ленты, и затем охладить до затвердевания. Необходимо принимать меры предосторожности при срезании пены, чтобы не повредить ее пористую структуру, т.к. пена еще не полностью затвердела. Перед затвердением "полутвердую" пену можно прокатать при помощи одного или нескольких валиков (лент), установленных сверху, для получения пенообразной плоской заготовки со сплошными и довольно гладкими наружными поверхностями [32,33]. Таким образом, можно получать плоскую заготовку из пенометалла необходимой длины, а ее ширина определяется шириной сосуда для вспенивания и составляет обычно 10 см. Два образца такой пены показаны на рис. 4.

Объемная доля добавляемых в расплав керамических частиц изменяется от 10 до 20%, а средний размер частиц – от 5 до 20 мкм [21,34]. Размер частиц и их состав определялся эмпирически. Слишком высокое или слишком низкое содержание частиц, а также выбор их оптимального размера создают проблемы, что отражено на рис. 5. Частицы стабилизируют пену по механизму, который представлен в литературе [35–37]. Известно, что

скопление керамических частиц на стенках ячеек играет ключевую роль в процессе стабилизации. Во-первых, частицы увеличивают поверхностную вязкость, что замедляет дренажные процессы в пленках [35].

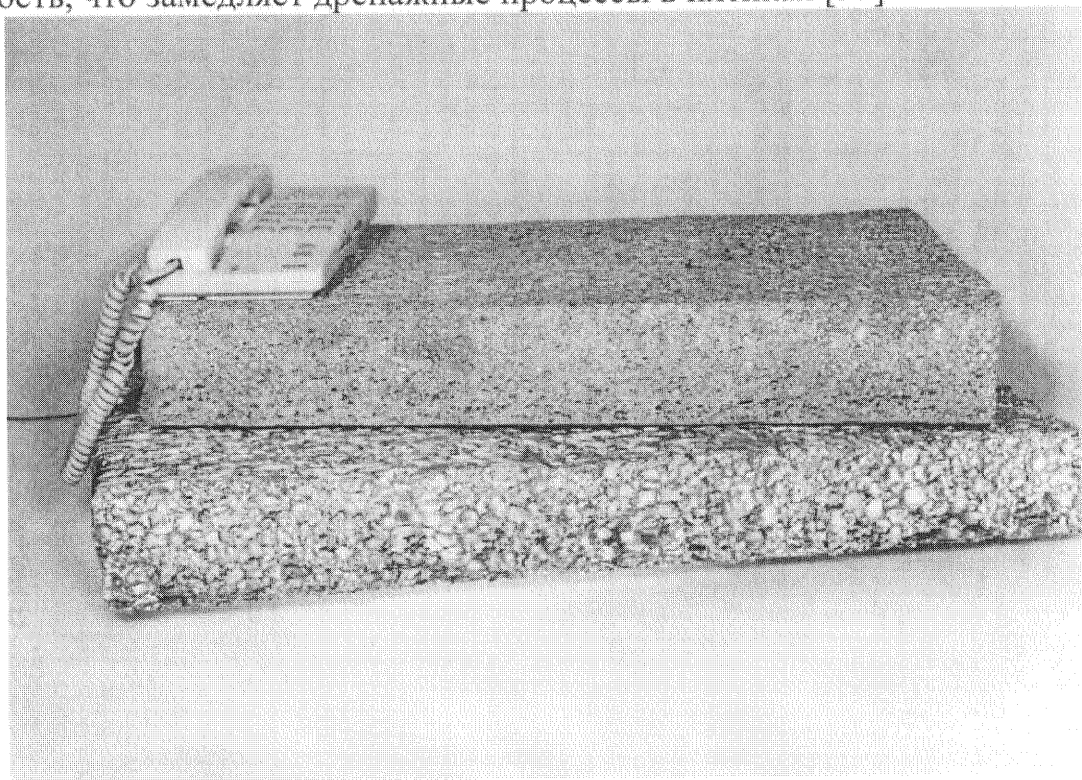


Рис.4. Два блока пены с разной плотностью и размерами ячеек, полученные методом инжекции газа (образец из Hydro Aluminium, Норвегия)

Во-вторых, частицы частично смачиваются расплавом. Было доказано [36], что краевой угол смачивания должен находиться в определенном диапазоне для того, чтобы:

- (i) - поверхность раздела фаз пузырек/частица была устойчивой, т.е. при прохождении пузырька через расплав, частица не должна отрываться от него;
- (ii) - частицы на границе раздела понижали общую энергию пары пузырек и частица, т.е. для стабилизации границы раздела пузырек/частица/пузырек.

Как при плохом смачивании (большой угол контакта), так и при слишком хорошем (очень малый угол контакта) эффект стабилизации отсутствует. В принципе, зная краевые углы смачивания керамических частиц данным расплавом, можно подобрать такие частицы компонентов, которые дадут оптимальный эффект стабилизации [36].

Пористость алюминиевых пен, достигаемая данным методом, изменяется от 80 до 98%, плотность от 0,069 до 0,54 г/см³, средний размер пор – от 3 до 25 мм, толщина стенок – от 50 до 85 мкм [27,31]. Средний размер ячеек обратнопропорционален как среднему значению толщины стенок ячеек, так и плотности, и величину среднего значения размера ячеек можно регулировать путем изменения потока газа, скорости вращения пропеллерной мешалки, параметров вибрации сопла и других параметров

[31]. В блоках пены обычно наблюдается градиент плотности, размера и удлинения пор, который является естественным следствием, вызванных гравитацией, дренажными процессами [38]. Кроме того, деформации сдвига, создаваемые движением конвейерной ленты, приводят к диагональному искажению ячеек в конечном продукте. Это соответственно приводит к тому, что механические свойства блоков пены становятся анизотропными [39]. Эту ситуацию можно исправить при вертикальном вытягивании пены вверх [40]. Пеноматериал используют или сразу в том состоянии, в каком он находится при выходе из литейной машины (при этом пена имеет сплошную наружную поверхность без пор), или разрезается на требуемые куски после вспенивания и отверждения. Из-за высокого содержания керамических частиц механическую обработку ММК пен проводить довольно трудно.

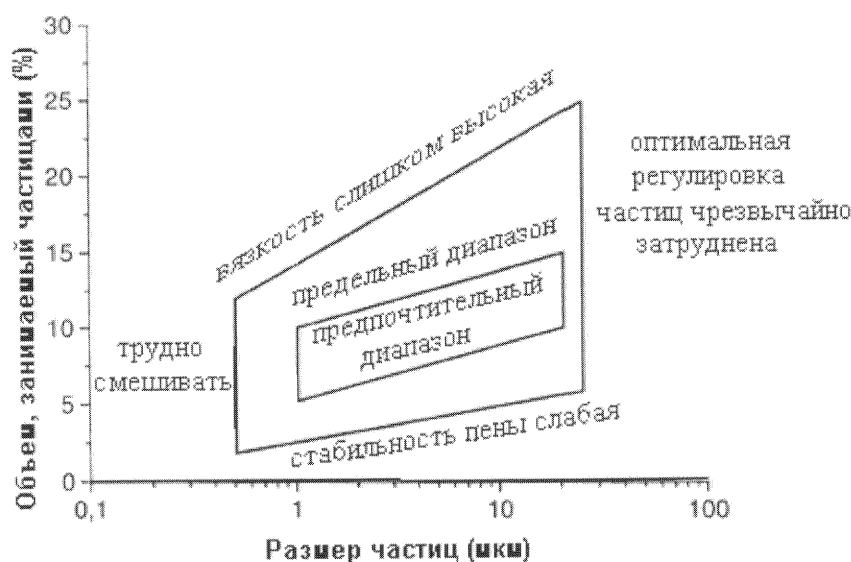


Рис.5. Выбор размера частиц и их состава для вспенивания расплава ММК [21,35]

Преимуществами метода прямого вспенивания являются большое количество пены, получаемой в непрерывном процессе, и самая низкая ее плотность, какая только может быть достигнута. Вероятно, поэтому ММК-пены обладают наименьшей стоимостью по сравнению с другими ячеистыми металлическими материалами. Канадская компания Sumat завершает запуск производственной линии с производительностью пены 1000 кг/ч, шириной до 1,5 м и толщиной от 2,5 до 15 см [41]. Компания Hydro Aluminium производит плиты шириной до 70 см, толщиной от 8 до 12 см и длиной до 2 м при производительности 500-600 кг/ч [28]. Недостатком метода прямого вспенивания является необходимость разрезания пены, при этом ячейки открываются. Кроме того, нежелательным эффектом является хрупкость ММК-пен, вызванная добавлением частиц, которые содержатся в стенках ячеек. Предпринимались попытки получения профилированных деталей путем заливки полужидкой пены в формы [42] или формовкой пены на выходе посредством валиков [32,33] с целью устранить, таким образом, один из указанных недостатков.

Были исследованы структура и свойства металлических пен, полученных методом прямого вспенивания. В настоящем обзоре имеется сводка ссылок на экспериментальные данные, содержащиеся в соответствующей литературе (см. Таблица 1, колонка 4). Большая часть литературы содержит сведения об их механических свойствах, но имеются также и данные по акустическим свойствам и жаростойкости.

Для избежания нежелательного влияния стабилизирующих добавок было предложено вспенивать чистый расплав металла без добавок инертными газами. Для того чтобы сохранить низкую вязкость, процесс вспенивания необходимо проводить при температурах, очень близких к температуре плавления металла. Это можно выполнить барботированием газа через расплав, который постоянно охлаждается при непрерывном процессе литья (за счет непрерывного движения) [55]. Пузырьки при этом захватываются затвердевающей жидкостью и образуют пеноподобную структуру.

2.1.1.2. Вспенивание порообразователями

Второй альтернативный путь прямого вспенивания жидких металлов заключается в добавлении в расплав вспенивающих агентов вместо вдувания газа [12-14,16,17]. Вспенивающий (или газогенерирующий) агент разлагается при нагревании и выделяет газ, который вспенивает расплав. На рис. 6 представлен современный вариант процесса [56-58], который применяли в маломасштабном промышленном производстве с 1986г. в компании Shinko Wire, Амагасаки, Япония, с объемом производства пены до 1000 кг в день.

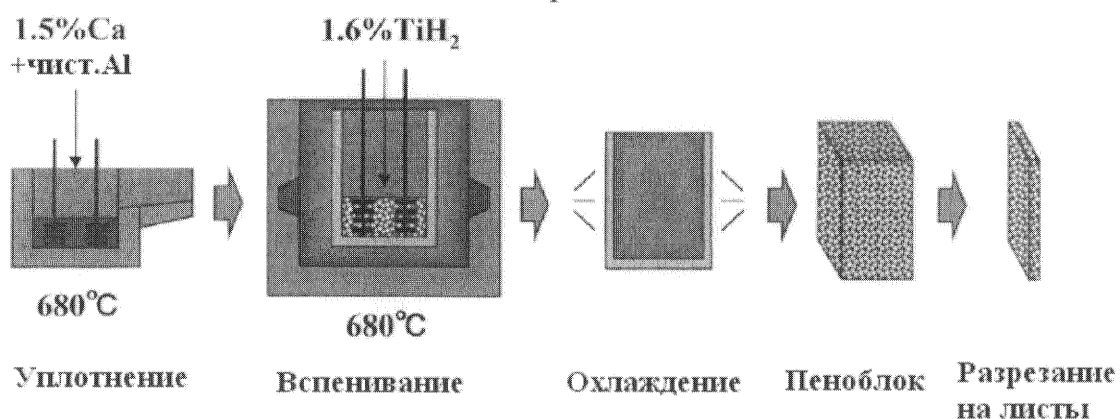


Рис.6. Прямое вспенивание расплава газогенерирующими агентами (процесс "Alporas") [58]

В этом методе к алюминиевому расплаву добавлялся металлический кальций при температуре 680°C. Расплав перемешивался несколько минут, в течение которых вязкость непрерывно увеличивается в пять раз [58-60] из-за образования оксида кальция (CaO), двойного оксида кальция и алюминия (CaAl₂O₄) и, возможно, даже интерметаллида Al₄Ca, которые загущали жидкий металл [38,331]. На рис. 7 показано как влияет перемешивание на вязкость алюминиевого расплава с различными добавками кальция [59,60].

Для производства пены обычно добавляют 1,5-3% масс. кальция. После того, как вязкость достигала нужного значения, добавляют гидрид титана (TiH_2) (обычно ~1,6%), который используется как порообразователь, выделяющий газообразный водород в горячую вязкую жидкость. Расплав начинает медленно расширяться и постепенно заполняет емкость для вспенивания. Вспенивание проводится при постоянном давлении. После остывания емкости до температуры ниже точки плавления расплава, жидкая пена превращается в твердую алюминиевую пену и она готова для дальнейшей обработки. Полностью процесс вспенивания занимает 15 мин. для типичной большой партии [58]. Было показано, что при тщательном подборе параметров процесса получают очень однородную пену [61]. В настоящее время пены, получаемые таким образом (фирменное название "Alporas"), являются фактически наиболее однородными из доступных на сегодняшний день алюминиевых пен, не считая пены, полученные литьевым методом, и описанные в Разделе 2.1.4.

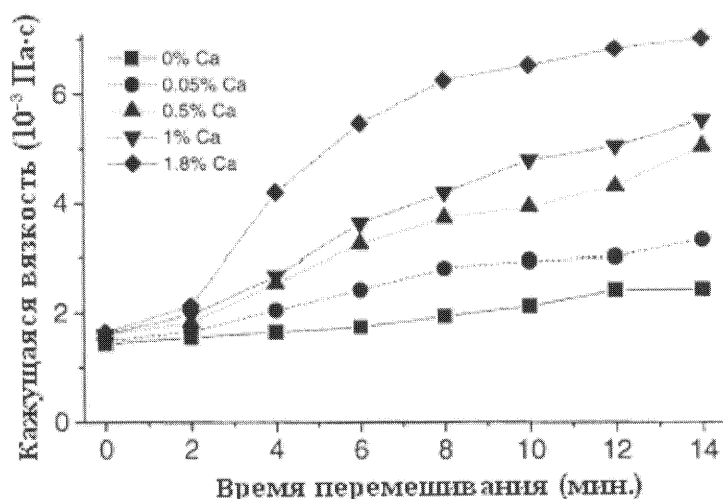


Рис.7. Влияние времени перемешивания на вязкость расплава алюминия после добавления металлического кальция [59]

Морфология такой пены представлена на рис. 8. Существует некоторые эмпирические соотношения не только между средним диаметром пор и вязкостью расплава, но также и между конечной плотностью пены и вязкостью [59,333]. В литературе в качестве вспенивателя для алюминиевых пен рекомендуется гидрид циркония (ZrH_2) с концентрациями от 0,5 до 0,6% масс. [62], а температура вспенивания от 670 до 705°C.

Компания Shinko Wire производит пеноалюминий типовыми блоками с размерами 2050x650x450 мм. Масса одного литого блока ~160 кг, что соответствует общей плотности, включая внешние слои, 0,27 г/см³. Типичные плотности блоков после отрезания краев изменяются от 0,18 до 0,24 г/см³, со средним размером пор от 2 до 10 мм. У литьевого пеноблока наблюдаются градиенты плотности как в горизонтальном, так и вертикальном направлении, с наименьшей плотностью в верхней средней части блока. Блоки обычно

нарезаются в пластины требуемой толщины (5-250 мм, стандартная толщина 10 мм).

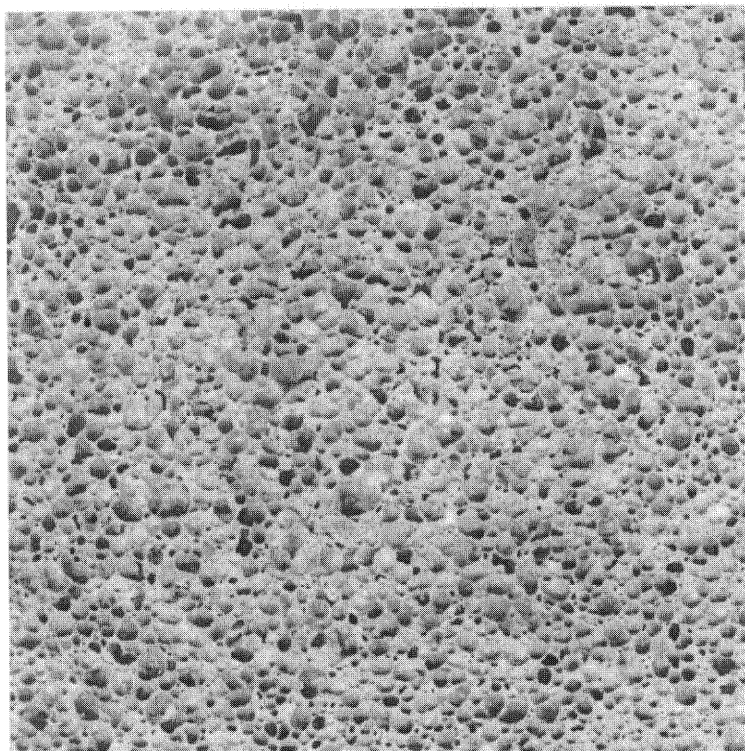


Рис.8. Пористая структура алюминия, получена вспениванием при добавлении TiH_2 . Показано поперечное сечение со сторонами $80 \times 80 \text{ мм}^2$ (образец из Юго-Восточного Университета, г. Нанджин, Китай)

Были определены механические и другие свойства пен "Alporas". Были изготовлены и изучены сэндвич-структуры на основе "Alporas", скрепленные с помощью эпоксидной смолы. Для увеличения коррозионной стойкости поверхность пены "Alporas" обрабатывали водой или парами химических реагентов [76] (см. Таблица 1, колонка 5).

Пена "Alporas" является более дорогой по сравнению с ММК-пенами, получение которых описано выше. Предпринимались попытки наладить непрерывное производство этой пены, и получать детали сложной формы [77]. Авторы работы [78] утверждают, что аналогично алюминию таким образом можно вспенивать даже сплавы на основе железа и другие легкоплавкие сплавы, добавляя в расплав железа вспениватель и "стабилизатор" пены (например, порошок вольфрама).

Для улучшения свойств и вязкости расплава алюминия вместо кальция можно пропускать через расплав кислород, воздух или другую газовую смесь (приводящую к образованию окиси алюминия) [16,79], можно добавлять порошок оксида алюминия, карбида кремния [329], окалину от производства алюминия [80], отходы производства пеноалюминия [81], или использовать металлические добавки, увеличивающие вязкость [82]. Однако это весьма затруднительно и требует сложных циклических температурных режимов и механического перемешивания. Также для увеличения вязкости

многообещающие результаты были получены при использовании порошка диоксида марганца (MnO_2) со средним размером частицы 20 мкм [64].

Некоторых проблем, связанных с перемешиванием порошка гидрида металла с расплавом, можно избежать, если сначала приготовить легкоплавкий эвтектический сплав-прекурсор, например, Al-Mg, с которым вспениватель может быть перемешан без разложения, а затем вспенивать более тугоплавкие сплавы, например, чистый алюминий, перемешивая его с указанным сплавом-прекурсором [83]. Другие аспекты жидкофазного пенообразования описаны в патентах Джарема [84,85] и Нибыльского [15,18,19,86-88]. Интересный вариант был предложен Пташником [89]: вспениватель добавляется к жидкому сплаву при температуре выше его температуры затвердевания, но ниже температуры разложения вспенивателя. После интенсивного перемешивания металл застывает в матрице необходимой формы. Операция вспенивания происходит на втором этапе, когда композит нагревают до температуры выше температуры разложения вспенивателя. При нагревании выделяется газ и происходит увеличение объема. Этот метод похож на некоторые методы плавления прессовок порошков, описанных в Разделе 2.1.3. Для пен, производившихся в 1970-х годах одним из ранних вариантов метода прямого вспенивания расплава с порообразователем, были определены их механические свойства различными авторами (алюминий [90,91], цинк [92]).

Таблица 1

Свойства металлических пен – ссылки на экспериментальные данные (представлены данные, в основном, для алюминиевых пен, а также для пен из магния и стали): числа соответствуют ссылкам

Класс	Подкласс	Свойство	Пены типа Hydro/Alcan	Пены типа Alporas	Пены типа Foaminal/Alulight	Пены типа Duocel
1	2	3	4	5	6	7
Общие		Распределение ячеек по размерам		58,61,63	137-139	
		Распределение плотности		58	138-141	
		Морфология ячеек	31,43-46,303	45,58,63-66,302-304	45,303	46,63,178,323
		Микроструктура	31,35,38,43,45,47	38,45,67	45,136,142,310	70,178
Механические свойства	Эластичность	Модуль Юнга	31,39,47,48,303,324	48,63,303,324,327	132,137,138,143-150,303	63,175,178,303,323
		Модуль сдвига	31,44		48	175
	Квазиупругость	Коэффициент потерь		329	146,148,150-153,320	
		Одноосное сжатие	31,35,39,43,45,47-50,303,324,	38,45,48-50,58,60,61,63,64,67-70,90,91,303,304,324,328,329	48,115,138-140,144,146,147,150,154,155,303,337	63,175,178,303,318,323,328
	Пластичность	Предел прочности на разрыв	48-50,303	48-50,58,60,63,67,303,304,314,329	147,155,303	175,303
		Предел прочности при сдвиге	44,48-50	48-50,67,328		
		Предел прочности при изгибе	50	67	50,146,147,156	
		Двух- и многоосевая текучесть	51	71,305,325		71,305,325
		Зависимость от скорости деформации	31	63,68,72,308,321	157,158,310	68,157,179,180,308,313
		Влияние градиента плотности	39		141	
		Поглощение энергии	31,35,43,47,48,50	48,50,64,307	48,50,138,139,139,146,150,159	

(продолжение на следующей странице)

Таблица 1
(продолжение)

1	2	3	4	5	6	7
Другие свойства		Усталость при нагружении	52	73,302,322	149,160-163,316,326	73
		Ударная вязкость			163	
		Ползучесть (крип)		74		
		Температурная зависимость	35			
		Термообработка		64	138,145,147,154,164	319
		Сендвич-структуры		50,69,73,75,309	50,69,129,315,317	
	Поведение композитов	Образцы пены с наполнителями	53,54,306,311,312		127,146,154,159,165-167,277,317	
		Электропроводность	47	58,60	132,137,138	175
		Электромагнитное экранирование		67	138,150	
		Теплопроводность	47	50,67	50,138,150	175,330
Другие свойства	Термические	Тепловое расширение		67	156	
		Огне/пожаростойкость	47			
	Акустические	Звукопоглощение	47	58,60,65-67	138,150,168	
		Коррозия		50,76	50,317	

2.1.2. Отверждение эвтектической смеси в системе твердое тело - газ ("газары")

Метод, разработанный около 10 лет назад [93,94], основан на свойстве некоторых жидких металлов образовывать эвтектическую смесь с газообразным водородом. При плавлении таких металлов в атмосфере водорода при высоком давлении (до 50 атм) образуется однородный расплав, насыщенный водородом. При понижении температуры расплав в конечном итоге претерпевает эвтектический переход к гетерогенной системе с двумя фазами: "твердое тело + газ". Если состав системы достаточно близок к эвтектической концентрации, при определенной температуре начинается расслоение (процесс сегрегации). Т.к. эвтектический состав зависит от давления в системе, то величина внешнего давления и содержание водорода должны быть согласованы между собой. Отвод тепла от расплава приводит к направленному затвердеванию. Поскольку фронт затвердевания продвигается через жидкость (приблизительно со скоростью от 0,05 до 5 мм/с), содержание водорода около плоскости фронта затвердевания увеличивается, и образуются пузырьки газа. Параметры процесса необходимо выбрать так, чтобы пузырьки не переходили в оставшуюся жидкость и не исчезали, а оставались около зоны отвердевания и поглощались твёрдым телом [95]. Морфология получаемых пор определяется содержанием водорода, давлением над расплавом, направлением и скоростью отвода тепла и химическим составом расплава. Образуются сильно вытянутые поры, ориентированные в направлении затвердевания. Они кажутся сферическими только тогда, когда их рассматривают в определенном направлении, как показано на рис. 9. Диаметр пор изменяется от 10 мкм до 10 мм, длина – от 100 мкм до 300 мм, отношение длины поры к ее диаметру – от 1 до 300 и пористость – от 5 до 75% [94].

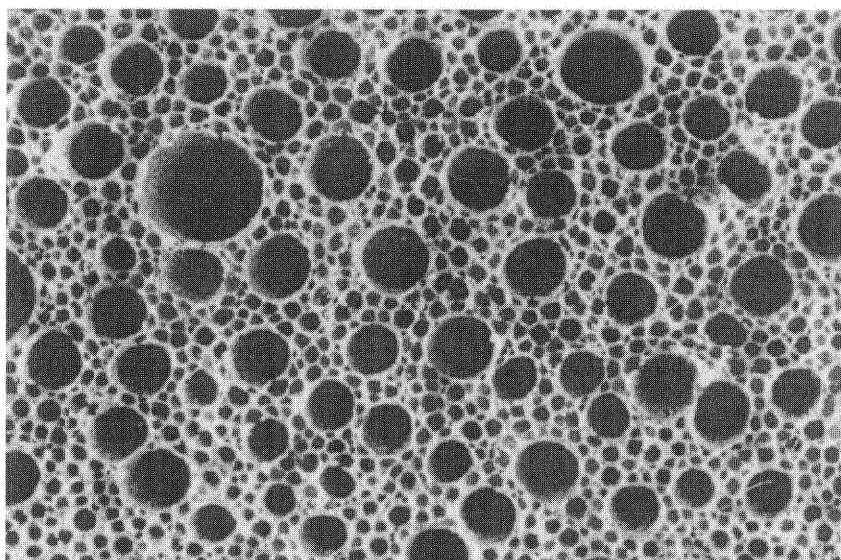


Рис.9. Структура пор "газара". Сечение нормально к направлению пор [96]

Распределение пор по размерам является неоднородным из-за одновременного роста маленьких и больших пор и их слияния. Поры могут быть коническими или даже рифлеными. Гетерогенное зарождение и рост пор

в газах подробно описаны в работе [94]. Пористые материалы, полученные эвтектическим затвердеванием в системе "твердое тело – газ" называют "газарами". Этот термин образован путем сокращения двух русских слов в словосочетании: «/пена/, газом армированная» или "газар".

Один из возможных практических способов получения "газаров" представлен на рис. 10. Автоклав, в котором образуется расплав, необходим для насыщения расплава водородом, и в конечном итоге, для направленного затвердевания. Если сосуд для литья имеет цилиндрическую форму, то можно получить радиальные или осевые поры [93,97] в зависимости от того, как будет охлаждаться образец. "Газары" на основе никеля [95], меди [98-102,334], алюминия [103,104] и магния [105] описаны в литературе. Помимо этих металлов, данный метод применим для различных сталей, кобальта, хрома, молибдена и даже керамики. В работах [98-101] описана морфология пор и микроструктура "газаров". Однако морфология "газаров" зачастую является неудовлетворительной и необходима дальнейшая доработка, чтобы применять эти материалы. Были измерены механические свойства "газаров": прочность на сжатие [102], на растяжение [101,104], модули Юнга и коэффициент Пуассона [104].

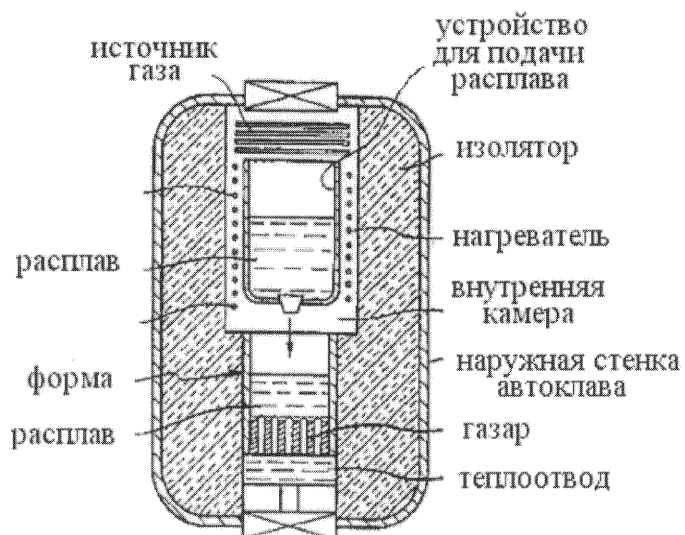


Рис.10 Аппарат для производства "газаров" [93]

2.1.3. Метод плавления порошковых прессовок

Пенометаллы можно получить методом, разработанным во Фраунгоферовском институте в г.Бремен (Германия) [106-112]. Основные идеи процесса получения относительно старые [113,114], но только недавно удалось достичь удовлетворительного качества производимых пен или их компонентов. Метод часто относят к "порошковой металлургии", т.к. исходными материалами являются порошки металлов, но так как вспенивание происходит в жидком состоянии, данный метод будет рассматриваться в настоящем разделе.

Процесс производства пены начинается со смешивания металлических порошков (чистых металлов, сплавов) или смеси порошков металлов со вспенивающим агентом, после чего смесь спрессовывают до получения плотного полупродукта (см. схему на рис. 11). В принципе, прессование можно проводить любым способом, который гарантирует, что вспенивающий агент будет заключен в металлическую матрицу без заметной остаточной открытой пористости. Примерами таких способов являются: горячее одноосное или изостатическое прессование, экструзия или прокатка порошка [106,107]. Выбор метода компактирования зависит от требуемой формы полупродукта. Однако экструзия является наиболее экономичным методом на сегодняшний день и поэтому является предпочтительной [116,117]. Обычно делают прямоугольные заготовки с различным поперечным сечением, и затем, прокатывая их, получают тонкие листы. Приготовление полупродукта следует проводить очень тщательно, т.к. остаточная пористость и другие дефекты приводят к плохим результатам при дальнейшей обработке.

Следующий этап заключается в нагревании матричного материала при температурах, близких к его температуре плавления. При этом порообразователь, равномерно распределенный в плотной металлической матрице, начинает разлагаться. Выделяющийся газ расширяет уплотненный полупродукт. Время полного расширения зависит от температуры и размера заготовки из полупродукта и может составлять от нескольких секунд до нескольких минут.

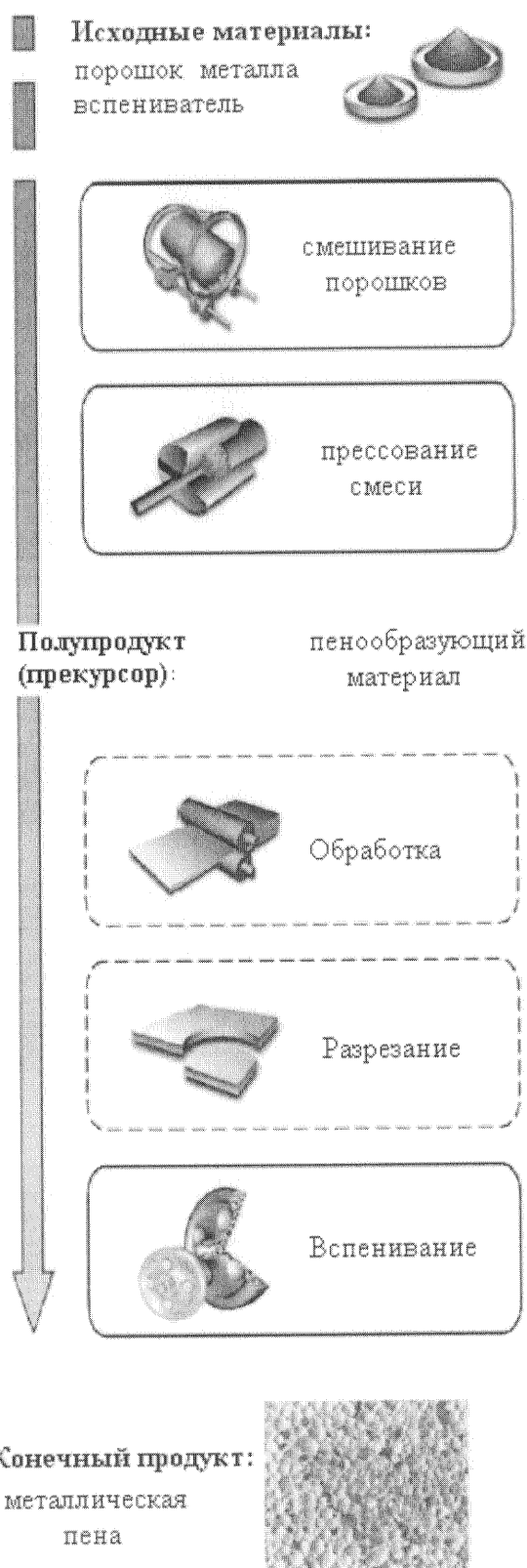


Рис.11. Схема получения пены методом плавления порошковых прессовок [106,115]

На рис. 12 представлены кривые расширения спрессованных смесей порошков алюминия и TiH_2 . Расширяющийся объем пены представлен как функция времени и одновременно показана морфология пены на разных этапах расширения. Из рисунка видно, что максимум расширения

соответствует наиболее равномерной пене, после чего пена коллапсирует. Величину максимального расширения, и соответственно, плотность твердой металлической пены можно контролировать путем выбора содержания порообразователя и некоторыми другими параметрами вспенивания, такими как температура и скорость нагрева. В качестве порообразователя для сплавов на основе цинка и алюминия используют гидриды титана или циркония (TiH_2 , ZrH_2). Сталь может быть вспенена с помощью карбонатов металлов, например, SrCO_3 [119-121,335,336]. Если в качестве порообразователей используются гидриды металлов, то в большинстве случаев достаточно их содержания $<1\%$.

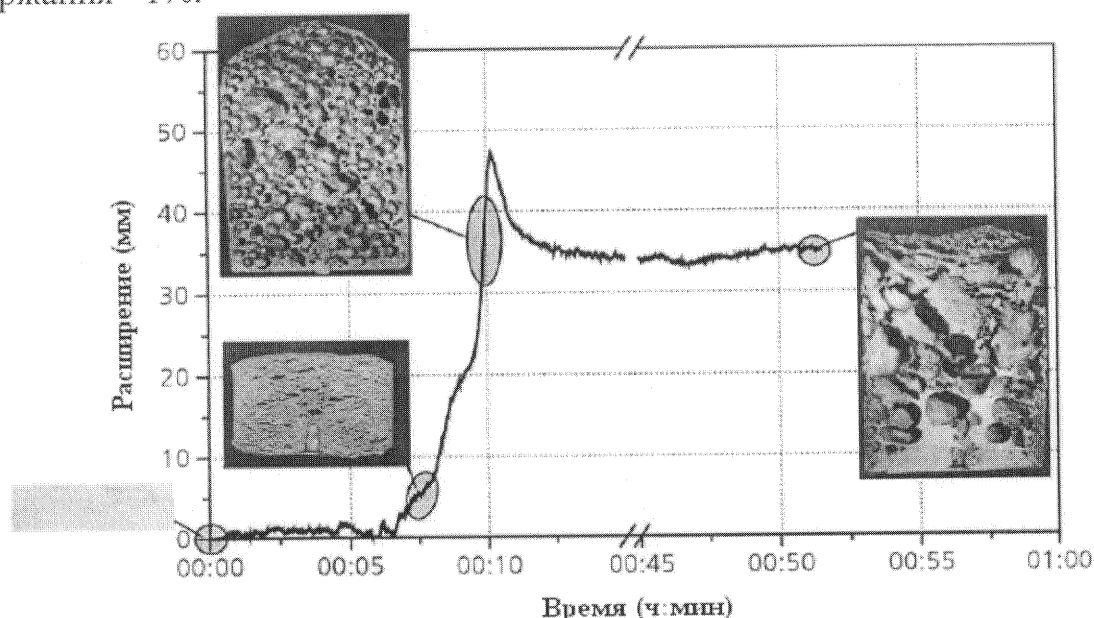


Рис.12. Кривая расширения прессовок алюминий/ TiH_2 , вспененных при температуре 750°C [118]. Показаны объём металлического образца как функция времени и снимки четырёх стадий расширения (включая исходный полупродукт: высота 9 мм, диаметр 32 мм).

При подборе соответствующих вспенивателей и параметров процесса метод применим не только для алюминия и его сплавов, но также и для олова, цинка, меди, свинца, золота и некоторых других металлов и сплавов. Однако наиболее часто вспенивают чистый алюминий или ковкие сплавы, такие как сплавы марок серии 2000 или серии 6000. Литьевые сплавы типа AlSi7Mg (A356) и AlSi12 также часто используются из-за их низкой температуры плавления и хороших свойств, связанных со способностью к вспениванию, хотя в принципе можно получить пену фактически из любого сплава алюминия, нужно только тщательно подобрать параметры процесса. Рис. 13 показывает типичное поперечное сечение пены из свинца. Видно, что распределение пор по размерам и по форме носит случайный характер, что типично для таких процессов.

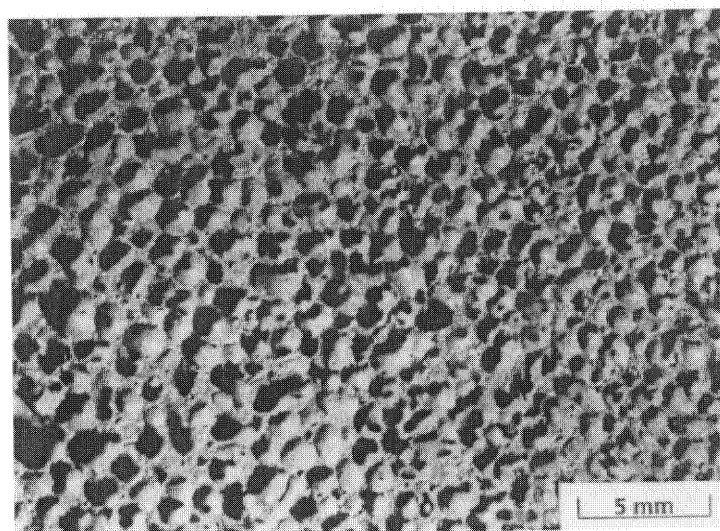


Рис.13. Разрез свинцовой пены, полученной методом плавления порошковых прессовок [115]

При вспенивании полупродукта в печи при неограниченном расширении в разных направлениях получается бесформенный кусок металлической пены неопределенной формы. Если же материал полупродукта поместить в полую форму и расширить его нагреванием, то таким способом можно получать детали заданной формы. Можно выгодно приспособить форму полупродукта под геометрию матрицы, в которой проводят вспенивание, чтобы улучшить условия потока в процессе вспенивания. Можно изготовить весьма сложные детали, помещая расширяющуюся пену в подходящие формы [122]. Последовательность операций в процессе представлена на рис.14 в виде схемы. В соответствии с ней, определенное количество полупродукта нагревают в закрытом резервуаре до температуры, близкой к точке его плавления. После того, как начинается процесс вспенивания, и полупродукт становится квазижидким, эту массу вводят подвижным поршнем в литейную форму, в которой расширение завершается окончательно. Если тщательно не управлять этим процессом, то структура пор вспененных деталей будет обладать дефектами [123]. Однако данный процесс является важным шагом к массовому, экономичному производству готовых деталей сложной формы.

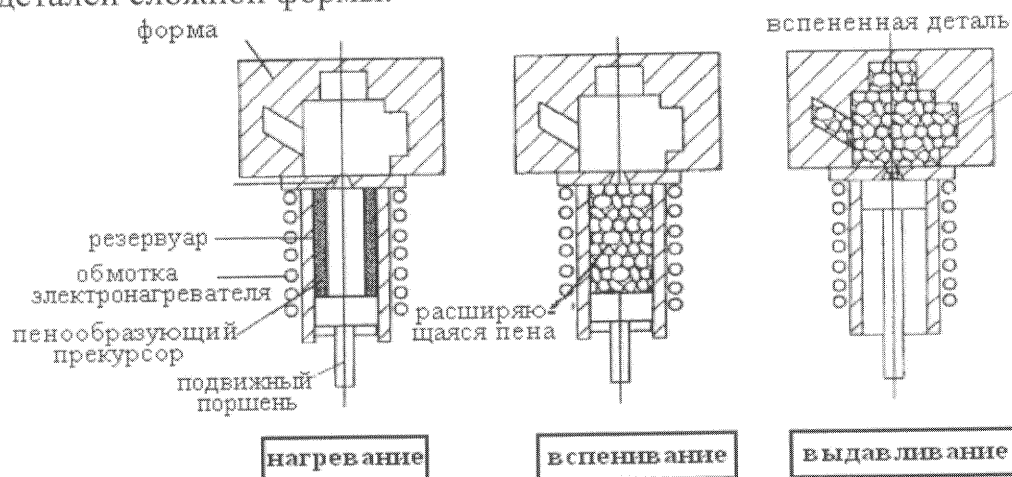


Рис.14. Процесс выдавливания пены [122]

Сэндвич-структуры, состоящие из вспененной металлической плоской сердцевины и двух плоских металлических лицевых обкладок, можно довольно легко получить, приклеив лицевые обкладки к заготовке из пены. И напротив, если требуются чистометаллические соединения, обычные листы металла — алюминия или стали — используют как плакирующие обкладки и прокатывают их с листом полупродукта [111]. Полученный композит можно доработать дополнительно, например, сделав глубокую прокатку в ленту. Заключительная термообработка, при которой расширяется только внутренний слой сэндвича, а лицевые металлические обкладки остаются сплошными, приводит к структурам типа сэндвича, подобным той, которая изображена на рис. 15.

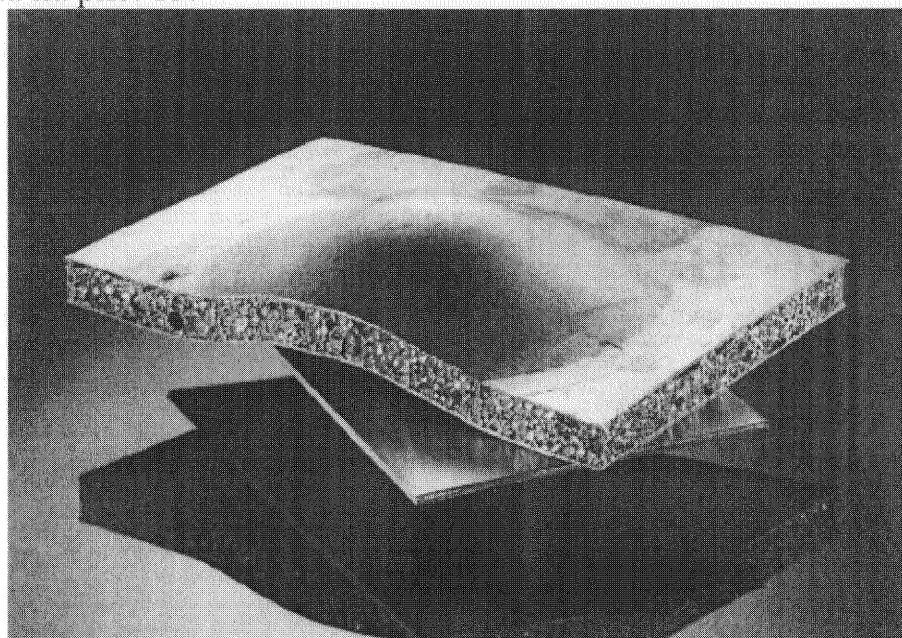


Рис.15. Сэндвич-структура, состоящая из вспененной алюминиевой сердцевины (толщина 12 мм) и двух внешних стальных листов (источник: Fraunhofer-Institute и Studiengesellschaft Stahlanwendungen)

Алюминиевую пену можно плакировать с листами из стали [124] или титана, а также алюминия. В последнем случае необходимо проявить осторожность, чтобы не расплавить обкладки из компактного алюминия на операции вспенивания, поэтому лучше выбирать алюминиевые сплавы с различными точками плавления основного материала сэндвич-структуры и обкладок. Сэндвич-структура на основе системы Al(обкладки)/пеноалюминий больших размеров была разработана объединенными усилиями немецкого автомобильного производителя — компанией Карманн в г.Оснабрюк и Института имени Фраунгофера в Бремене для перспективного автомобиля, в котором было продемонстрировано применение алюминиевой пены как конструкционного материала [125]. Одна из таких деталей представлена на рис. 16. Сэндвич-структуры являются трехмерными с длиной до 2м и шириной ~1м (об их применении см. в разделе 4.2.1).

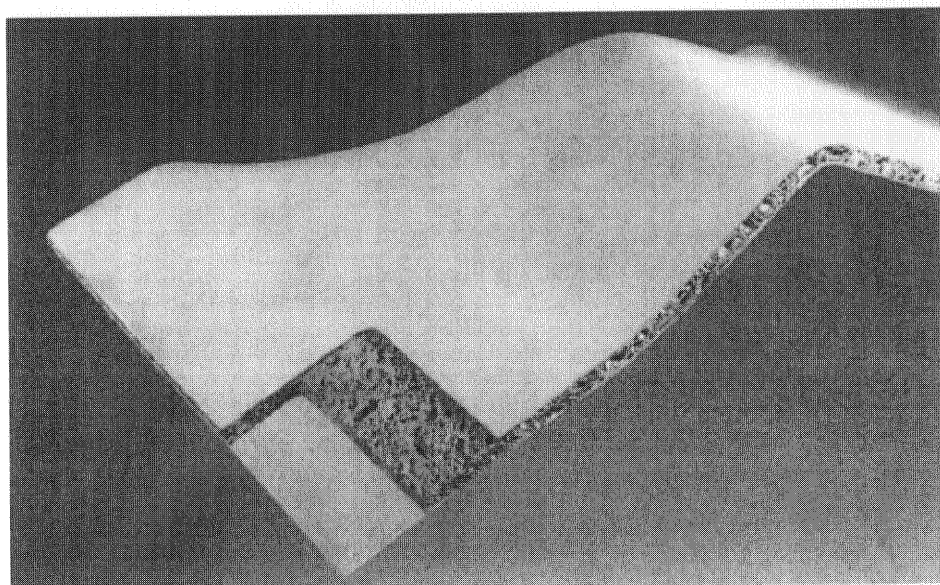


Рис.16. Сэндвичевая структура Al/Al пена, полученная вспениванием плакированного прокаткой прекурсора, имеющего в своем составе TiH_2 в качестве вспенивателя. Толщина сэндвича ~ 10 мм (источник: компания Карманн и Fraunhofer-Institute)

Трубы или колоннообразные заготовки произвольной формы могут быть заполнены алюминиевой пеной следующими способами:

1. Самый легкий путь состоит в том, чтобы вставить стержень из пенообразующего полупродукта в колонну, которую необходимо заполнить, и поместить их в печь. Материал полупродукта начнет вспениваться и в конечном итоге заполнит емкость полностью. Недостаток этого метода заключается в том, что можно использовать только трубы из материалов с высокой температурой плавления по сравнению с материалом, который предстоит вспенивать, например, стальные трубы, если вспенивается алюминий.

2. Альтернативный способ – поместить полую пенообразующую заготовку, хорошо подогнанную к внешней заготовке (трубе, колонне) для заполнения внутреннего пространства вместо использования пенообразующего стержня. Пена при этом сможет расширяться только по направлению к центру такой коаксиальной сборки, одновременно внешняя заготовка будет обеспечивать несущую способность сборки по отношению к механическим напряжениям в течение вспенивания. Кроме того, теплообмен между внешней заготовкой и пеной препятствует слишком сильному разогреванию сборки по мере вспенивания.

3. В третьем случае две концентрически расположенные трубы подвергают штамповке выдавливанием в композит, в котором два компонента связаны "металлургической" связью. Внутреннюю трубу изготавливают из пенообразующего материала, а внешнюю – из алюминиевого сплава. На последующем этапе проводят вспенивание, свод внутренней трубы расширяется к центру трубы и в конечном итоге заполняет весь свободный объем трубы.

4. Еще один метод получения композитов заключается в изготовлении деталей из алюминиевой пены со сплошной внешней оболочкой, которая наносится термическим распылением алюминия. Такой образец показан на рис. 17. Конечно, методика не ограничивается производством труб, и почти любое изделие из пеноматериала можно покрыть таким образом сплошной внешней оболочкой.

5. И, наконец, если использовать детали из алюминиевой пены в качестве сердцевин в традиционном литье в песчаную форму, то можно получить конструкционные материалы, в которых вспененная алюминиевая сердцевина, оставаясь в неизменном виде, окажется полностью покрыта слоем литого компонента [127,128].

Были изготовлены также композиты из пенометалла и керамики. Пеноалюминий из сплава AlSi12 соединяли диффузионной сваркой с пластиной из оксида алюминия при температуре 500°C и давлении 100 кПа в вакууме [129]. Или напротив, пену из алюминиевого сплава 6061 соединяли *in situ* с пластинами из оксида алюминия, позволяя пене расширяться между двумя керамическими слоями, находившимися на установленном расстоянии [130].

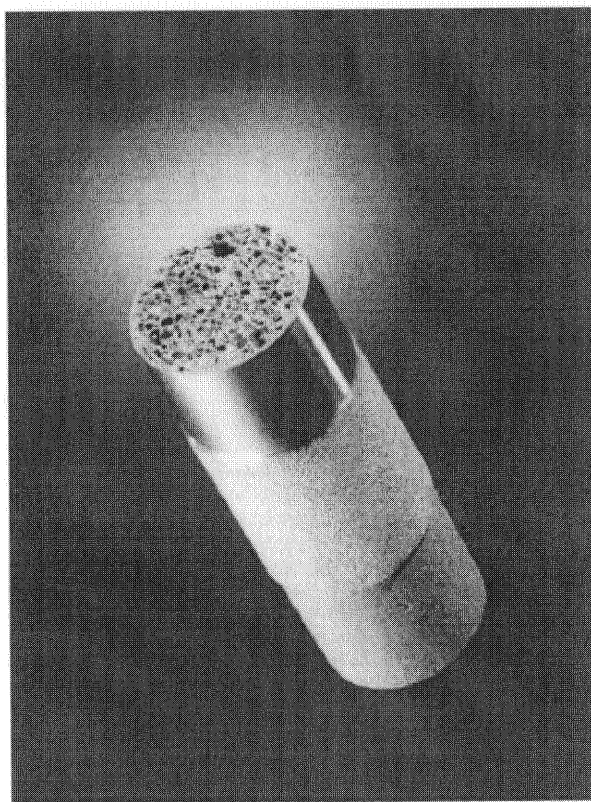


Рис.17. Алюминиевая пена, покрытая алюминиевой оболочкой (источник: Fraunhofer-Institute и RWTH Aachen, длина детали ~60 мм). Нижняя часть: алюминиевая пена до покрытия, средняя часть: после термического напыления, верхняя часть: после чистовой обработки.

Большинство деталей из металлической пены можно изготовить в промышленных печах при условии достаточно однородного распределения температуры. Однако, чтобы увеличить эффективность массового

производства деталей с точки зрения стоимости конечного продукта, предпочтительнее использовать непрерывные печи, в которых вспенивающийся полупродукт (в виде соответствующей литейной формы или плакированный листами без использования литейной формы) передвигается через различные зоны нагрева, где он вспенивается и в конечном итоге охлаждается. Можно наладить даже производство по изготовлению изделий партиями, используя автоматически загрузку и выгрузку форм. При этом не нужно охлаждать формы до окружающей температуры после каждого цикла вспенивания. При этом температура формы может находиться в интервале между температурой вспенивания и более низкой температурой, при которой пена еще только-только стала твердой. Таким образом, можно сэкономить много энергии при производстве одной детали, значительно уменьшить время вспенивания, и свести трудозатраты к минимуму [332].

Полезным инструментом для заполнения полых секций металлической пеной является переносное устройство для инъекции пены, в котором подготовленная к вспениванию проволока расплавляется и вспенивается непрерывно в полую структуру, заполняя ее. Видимые преимущества: непрерывность действия, локальное наполнение пеной и небольшое тепловое воздействие на материал заготовки.

Дополнительную информацию о методах плавления порошковых прессовок можно найти в литературе [115,118,131-136]. Для пен, получаемых этим методом, были тщательно изучены их свойства, и обширные сведения по ним можно найти в литературе (см. Таблице 1, колонка 6).

Последние разработки касаются модификации процесса плавления порошковых прессовок. Была предпринята попытка получить полупродукт, в который частицы гидрида титана введены непосредственно в расплав алюминия вместо использования смеси порошков металла и порофора [37,169-171]. Во избежание преждевременного выделения водорода, расплав после перемешивания нужно быстро охладить ниже точки его плавления. В качестве альтернативы, гидрид титана может быть подвергнут пассивации путем его предварительной термической обработки для более медленного его термического разложения на стадии пенообразования [170]. Таким методом были получены пены с равномерной морфологией. Интересно отметить, что некоторые из этих идей были выдвинуты уже 40 лет назад [172].

На сегодняшний день метод плавления порошковых прессовок в маломасштабном производстве используется немецкими компаниями Schunk GmbH и Honsel AG и австрийскими компаниями Mepura и Neuman. Алюминиевые пены, изготовленные этим методом, имеют фирменные названия "Foaminal" и "Alulight".

2.1.4. Литейные методы

2.1.4.1. Заполняющее литье с использованием полимерных пен

Пеноматериалы можно приготовить из расплава металла без его прямого вспенивания, это схематично показано на рис. 18. В соответствии с этим процессом в качестве исходного компонента используется полимерная

пена, например, пена из пенополиуретана. Если пена из полимера имеет закрытые поры, то ее преобразуют в пену с открытыми порами ретикуляционной обработкой*. Затем полученную полимерную пену с открытыми порами заполняют суспензией, содержащей довольно термостойкий материал, например, смесь муллита, фенольной смолы и карбоната кальция [173] или просто алебастр [174]. После затвердевания полимерную пену удаляют термообработкой, и заливают металл в полученные открытые ячейки, которые копируют первоначальную структуру уже удаленного пенополимера. Иногда необходимо нагревать литейную форму и прикладывать давление, если заполнение узких пустот жидким металлом не происходит под действием силы тяжести. После удаления материала линейной матрицы (например, водой под давлением), получается металлическая структура, являющаяся точной копией исходной полимерной пены. Трудности заключаются в достижении полного заполнения пустот в наполнителе, необходимости регулирования обычно направленного затвердевания и удаления материала литейной формы без значительного повреждения тонкой структуры.

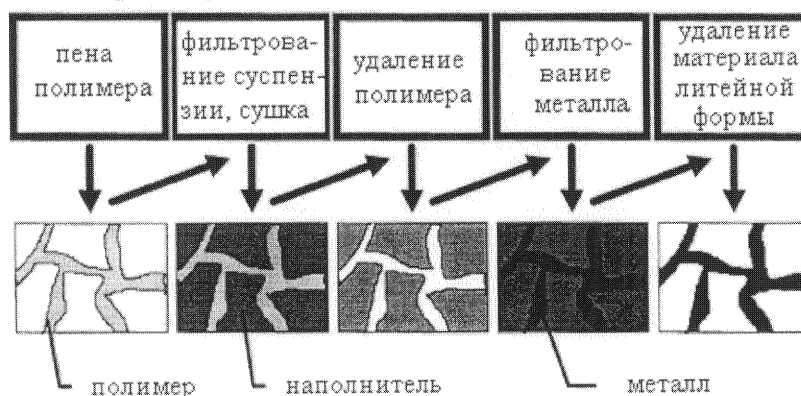


Рис.18. Получение ячеистых металлов литейным методом отливки с использованием полимерной пены

На рис.19 представлена микрофотография ячеистого алюминия, изготовленного этим методом. Такие пены много лет продавались компанией ERG в Окланде (США) под торговой маркой "Duocel" [175], а также как сообщалось, одной из японских компаний [63]. Удельная пористость на единицу длины изменяется от 2 до 16 пор/см (5-40 пор/дюйм). Предварительно формуя необходимую геометрию с полимерной пены, можно получать детали сложной формы. Несколько образцов из алюминиевой пены, изготовленных в Университете Аахена [176], представлены в правой части рис. 19. Обычно для этого используют алюминиевые сплавы, такие как сплав марки 6101 или AlSi7Mg (марки A356) [175], однако, и другие металлы, например, медь [175] и магний [174] также могут быть обработаны.

* Примечание редактора перевода: термин "ретикуляция" (reticulation) обычно используется в кино- и фотопроизводстве и обозначает "создание или нанесение сетки, трафарета, сетчатого узора и т.п." Существование "ретикуляционной обработки" в данном случае нам неизвестно.

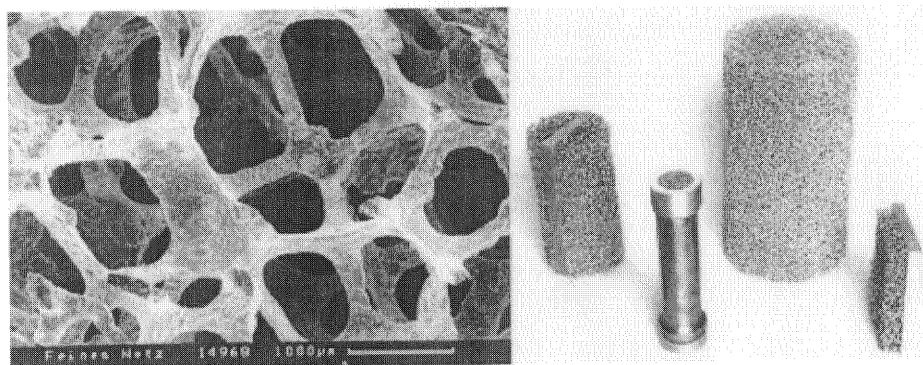


Рис.19. Левая часть: изображение пены "Duocel" на сканирующем электронном микроскопе [175]; правая часть: детали, полученные методом заправляющего литья [176]

Естественно, плотность и морфология металлических пен определяется исходным полимерным материалом. Пористость обычно изменяется от 80 до 97%. Некоторые данные о проницаемости, а также механических и тепловых свойствах таких пен можно найти в литературе (см. Табл. 1, последняя колонка). Цена материала компании ERG достаточно высока (\$10 за 1 дюйм³ пены), вероятно, из-за низкого объема годового производства пены (~8м³), но современные разработки технологии литья обещают снижение стоимости приблизительно на два порядка [176,177].

2.1.4.2. Решеточные блочные материалы

Метод заправляющего литья можно также использоваться для получения упорядоченных, высокопористых металлов, называемых "решеточными блочными материалами" (РБМ). РБМ представляют собой повторяющиеся ячейки, составленные из прямых стержней, каждый из которых соединяет два узла. Такие структуры можно изготовить совершенно регулярными, так, чтобы все они были связаны, например, с 12-тью или 14-тью элементами крепления ("стратами"). Такие структуры можно сделать из полимерных заготовок, предварительно изготовленных методом, похожим на инъекционное литье, соединяя единичные элементы слой за слоем с помощью клея. Полученную структуру затем используют как литевую матрицу на следующем этапе заправляющего литья, в результате чего получается металлический материал, точно повторяющий строение высокоупорядоченного полимерного полупродукта. В принципе в этом методе можно использовать любой литейный материал, например, алюминиевый сплав марки A356 или нержавеющую сталь [181]. Промежутки между решетками обычно составляют от 6,5 до 25 мм, а диаметр элементов крепления ("стратов") – от 1,5 до 3,8 мм. Главным преимуществом металлических РБМ является то, что их механические свойства близки к оптимальному теоретическому пределу, и они легко прогнозируются и воспроизводятся.

2.1.4.3. Литье вокруг материалов, обеспечивающих сохранение пространственной структуры

Высокопористые металлы можно получить, заливая жидким металлом пустое пространство между неорганическими или даже органическими гранулами или полыми сферами с низкой плотностью, а также вводя эти материалы в металлический расплав. Гранулы оставляют в металлопродукте после литья, получая при этом так называемую "синтактическую пену", или же вымывают подходящими растворителями, кислотами или удаляют термической обработкой (см. рис. 20).

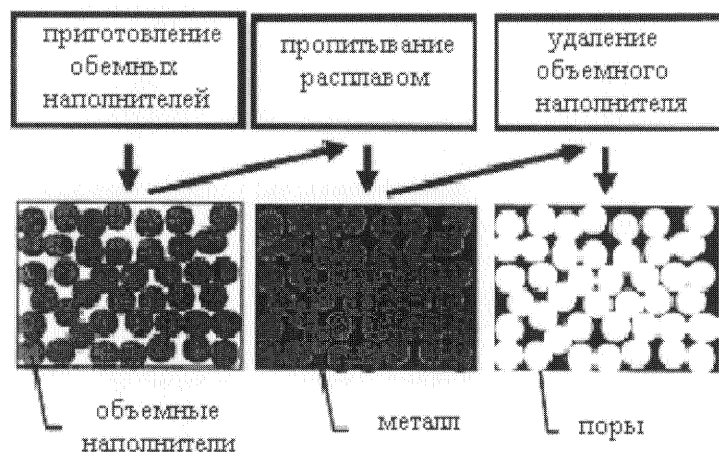


Рис.20. Получение ячеистых металлических материалов с помощью объемных наполнителей

Это удастся осуществить, если содержание пространствоорганизующего неорганического наполнителя, заполняющего объем, так высоко, что все его гранулы соприкасаются между собой. Вермикулит или шарики из обожженной глины [182], растворимые соли [183-185], пустотелые гранулы глины, частички песка [186-187], стеклянные полые сферы или полые сферы из окиси алюминия [188-193] могут служить неорганическим материалом наполнителя. Полимерные сферы также могут быть использованы в качестве объемного органического наполнителя, если застывание расплава происходит достаточно быстро. Это требует осуществления заполнения при высоком давлении, например, в аппаратах литья в постоянные формы [194].

Обычно необходим предварительный нагрев гранул наполнителя, чтобы избежать преждевременного затвердевания расплава, особенно при высокой теплоемкости частиц наполнителя или при низком давлении пропитывания. Из-за высокого поверхностного натяжения жидких металлов смачивание гранул может вызывать затруднения, поскольку плохое смачивание может приводить к неполному заполнению пространства между гранулами. Поэтому важными предпосылками для заполнения являются создание вакуума в пространстве между гранулами или приложение давления к расплаву. Объемные наполнители из солей удаляют их растворением в воде.

Шарики из песка легко удаляются при разложении связующих компонентов под действием высокой температуры [186], полимерные

наполнители удаляют пиролизом. Многие металлы можно обрабатывать таким способом, включая алюминий, магний, цинк, свинец, олово и т.д. Можно изготовить детали заданной формы при использовании конструкций литейных форм требуемой геометрии. Во всех случаях морфологию таких пен можно охарактеризовать как морфологию "подобную губке".

На диаграмме рис.21 показана возможная схема получения синтактических пен [192,193]. В этом случае в качестве наполнителя использовались промышленные полые сферы из оксида алюминия с диаметром 2,1-3,6 мм и толщиной стенок 100-200 мкм*. Сферы помещали в стальную литейную форму и проводили виброукладку сферических частиц для достижения высокой плотности упаковки. Затем блок, состоящий из сфер, заполняли под давлением расплавом магния при температуре ~700°C. Получали равномерную пену, близкую по свойствам к изотропным структурам. Также были изготовлены слоистые детали типа сэндвичей [191]. Для этого керамические сферы помещали в заранее приготовленную структурную оболочку из двух листов металла, а затем заливали ее расплавом. Оболочка оплавлялась на поверхности и образовывалась "металлургическая" связь. Альтернативный способ: получение оболочки заключается в помещении изготовленного спеканием блока из полых сфер в литейную форму и заливке расплавом наружной оболочки и наполнителей.

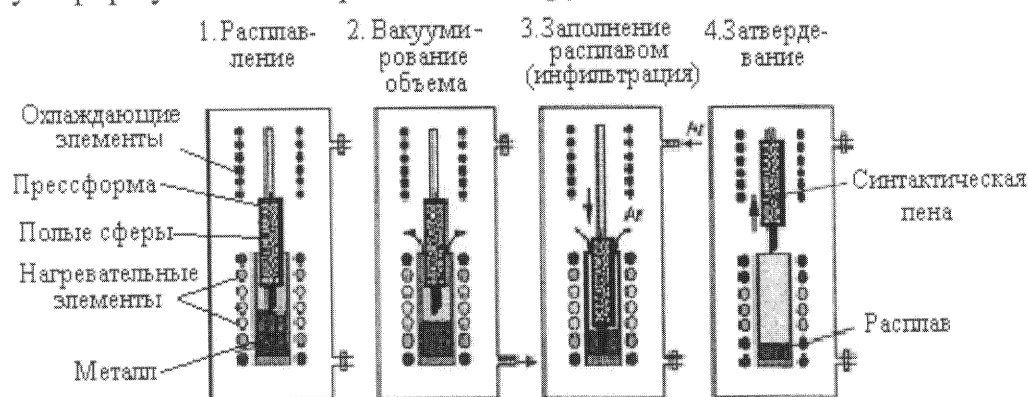


Рис.21. Стадии производства синтактических пен [192,193]

Основным преимуществом метода с использованием объемных наполнителей является полный контроль за распределением пор по размерам, которое определяется распределением по размерам частиц наполнителя. Распределение пор в таких пенах отличается от распределения пор в материалах, вспененных по методам, описанным в разделах 2.1.1-2.1.3, где распределение пор по размерам имеет статистический характер. С другой стороны, максимальная пористость, которую можно достигнуть методом объёмного наполнения, составляет <80%, тогда как методы, описанные в разделе 2.1.1, позволяют получать пористость до 98%.

Морфология пеноалюминия с открытыми порами, полученного методом по технологии заполнения расплавом свободного объема вокруг

* Примечание редактора перевода: в оригинале статьи на английском языке, по-видимому, содержится опечатка и указан интервал толщины стенок "100-200 mm" вместо "100-200 μm".

объемного наполнителя под действием высокого давления, показана на рис. 22. Наполнитель в этом случае удален полностью, и плотность составляет $<1,1 \text{ г/см}^3$.

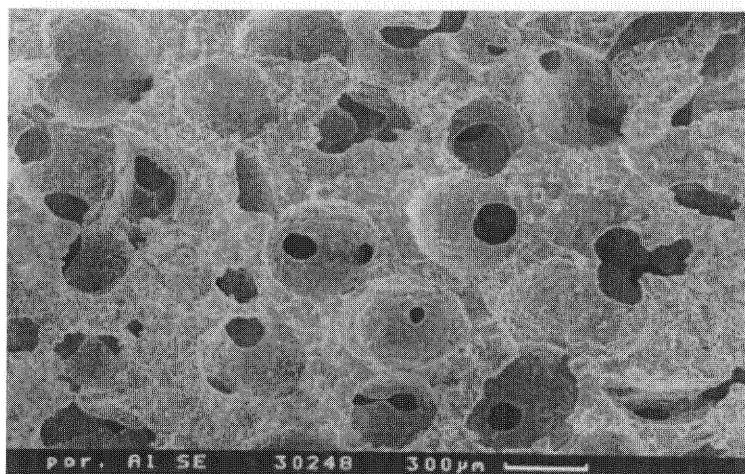


Рис. 22. Ячеистый алюминиевый материал, полученный с использованием наполнителей, обеспечивающих сохранение пространственной структуры. Плотность $1,1 \text{ г/см}^3$.

На рис.23 представлены некоторые детали, изготовленные из такого материала, а также показаны композиты, состоящие из алюминия и пеноалюминия. На тех частях деталей, которые были изготовлены из компактного алюминия, была выполнена резьба для присоединения к газовому выходу пневматического устройства для гашения вибраций.

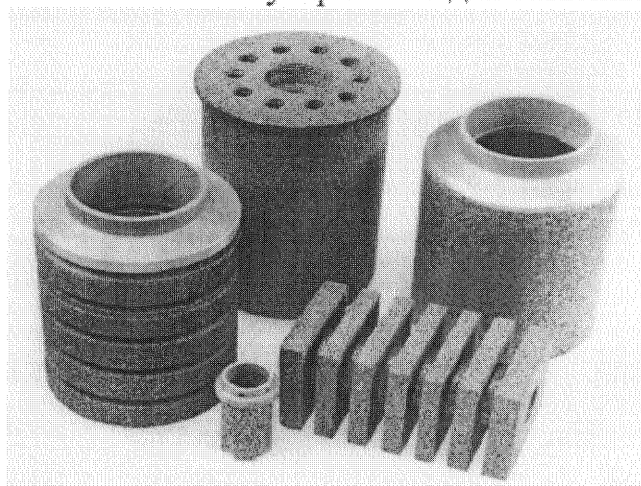


Рис. 23. Детали, полученные из материала, показанного на рис. 22. Компактные части деталей образуют композитную конструкцию, содержащую детали из пеноматериалов (источник: Fraunhofer-Institute). Высота самой длинной детали составляет 130 мм.

2.1.5. Вспенивание разбрызгиванием (Процесс "Osprey")

Метод вспенивания путем разбрызгивания позволяет обрабатывать различные металлы и сплавы. Расплав металла непрерывно диспергируется вплоть до атомарного состояния. При этом образуется аэрозоль из мелких и быстролетающих капель металла. Капельки собираются на подложке, образуя при выборе соответствующих параметров процесса, плотные осадки заданной

формы, например, в виде бруска, листа или трубы. Характерными особенностями спрей-образованных материалов являются низкое содержание оксидов, небольшой размер зерна и высокое содержание метастабильных фаз сплава [195]. Комбинацию таких свойств традиционными литейными методами получить достаточно сложно. Одна отличительная особенность аэрозольного процесса получения пеноматериала делает его особенно привлекательным: это возможность изменять свойства осажденного материала путем добавления порошков оксидов, карбидов или чистых металлов в аэрозоль, реагирующих или смачивающихся капельками жидкого металла с последующим их включением в осадок на подложке. Металлические матричные композиты (ММК) могут быть получены этим путем при добавлении порошков карбидов или оксидов. Если добавляемые порошки разлагаются с выделением большого количества газа при контакте с расплавом металла, то в полученном осадке образуются поры (см. схему на рис. 24).

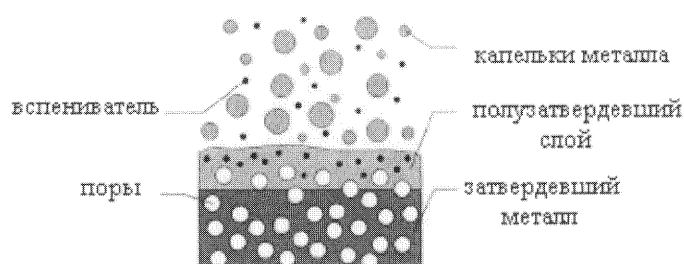


Рис.24. Производство металлической пены методом распыления [196]

Это явление, являющееся обычно нежелательным, можно использовать для получения пористых металлических материалов. Келли и др. [197] исследовали образование пористой структуры в сплавах CuSn6, инжектируя порошок BaCO₃. Банхарт и др. [198] получили пористую сталь, инжектируя оксиды кремния или марганца в аэрозоль из жидких частиц углеродистой стали; при этом в зоне осаждения образовывалось большое количество монооксида углерода по химической реакции: $\text{SiO}_2 + 2\text{C} \rightarrow \text{Si} + 2\text{CO}$. Пористость достигала в этом случае 60%, но морфология пор была недостаточно равномерная.

2.2. Твердофазное получение ячеистых металлов

Для получения ячеистых металлических структур вместо расплава металла можно использовать порошок металла. Порошок остается твердым в течение всего процесса, его просто спекают или обрабатывают другими твердофазными методами. Это важно для морфологии итоговой ячеистой структуры, т.к. только в жидком состоянии действие сил поверхностного натяжения приводит к формированию закрытых пор, тогда как спеченные пористые изделия образуют типичную открытую морфологию изолированных, более или менее сферических частиц, соединенных

перешейками. В настоящее время традиционное спекание больших количеств порошка или волокон является самым легким способом получения пористых металлов и стабильной технологией производства в порошковой металлургии. С использованием более современных технологий можно получать пенометаллы "замуровыванием" газа в прессовках порошка, использованием наполнителей или полых сфер, или же путем вспенивания суспензии металлических порошков.

2.2.1. Спекание металлических порошков и волокон

Производство металлических пенопродуктов для различных областей применения на сегодняшний день является крупномасштабным. Обрабатываются самые различные металлы, включая титан и суперсплавы, хотя чаще всего используются бронза и нержавеющая сталь. В общем случае получение пористых структур состоит из следующих стадий: фракционирование и подготовка порошка, прессование или формовка и затем спекание [199]. Рыхлая упаковка или спекание под действием силы тяжести в основном используются для бронзы (Cu89Sn11). При температуре спекания $\sim 820^\circ\text{C}$ может быть получена пористость от 20 до 50%, однако прочность материала относительно низкая. Один из таких материалов представлен на рис. 25. Одноосное уплотнение в прессформе, изостатическое прессование или прокатка порошков перед спеканием увеличивают прочность исходных заготовок из-за холодной сварки частиц в их контактных областях. Последующее спекание дополнительно увеличивает плотность и прочность, и таким образом, можно изготовить пористые детали "с очень мелкими порами" (см. работу [200] и ее ссылки).

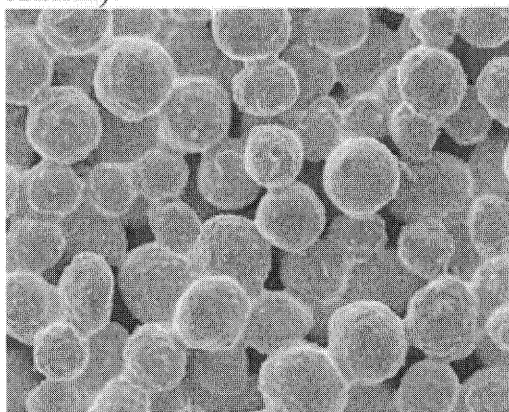


Рис. 25. Пористая спеченная бронза, изготовленная из частиц с диаметром ~ 100 мкм [200]

Влажное распыление порошка включает распыление на пористую подложку суспензии порошок/связующее вещество, которая содержит жидкость-носитель, после чего следует сушка и диффузионная сварка покрытия в вакууме или в атмосфере водорода. Этим способом достигают очень тонкую пористость вплоть до 1 мкм [199].

Получить пористый металл из порошка или гранул алюминиевых сплавов достаточно сложно по сравнению с вышеуказанными металлами, т.к.

алюминий обычно покрыт плотным оксидным слоем, препятствующим спеканию частиц. Чтобы этого избежать, смесь порошков или гранул можно деформировать прессованием, что приводит к разрушению оксидной пленки и образованию металлических связей между частицами. Другой метод — добавление активирующих спекание добавок, таких как порошки меди, кремния или магния, которые образуют с алюминием легкоплавкие эвтектики при спекании при температурах 595-625°C. Для спекания без давления алюминиевые гранулы и активирующие спекание добавки можно размолоть, чтобы активизировать механохимические процессы образования сплава до спекания.

Замена порошков металлическими волокнами открывает новые возможности для получения пористых металлов. Достаточно большое количество металлов можно изготовить в виде волокон и использовать их для производства необходимых спеченных продуктов [201,202], которые предлагаются на рынке потребителям.

2.2.2. Метод "замуровывания" газа

Ячеистые металлы можно изготовить по аналогии с процессом, описанным в Разделе 2.1.3, но без добавления вспенивателей и плавления металла. Для этого порошки прессуют в плотный полупродукт. В ходе прессования создают возможность для того, чтобы газ оказался "замурованным" в прессованном материале [203]. Нагревание полупродукта на втором этапе приводит к расширению металла вследствие внутреннего давления, создаваемого "замурованным" газом. Расширение происходит в твердом состоянии и поэтому является не настоящим вспениванием, а скорее процессом, основанным на твердофазной ползучести.

Этот метод применялся для изготовления пористых титановых структур авиастроительной компанией "Боинг" (США) [204]. На Рис. 26 представлен возможный вариант организации процесса [205].

В предварительно вакуумированную и дегазированную емкость (кассету) помещают порошок титана, после чего наполняют ее аргоном при давлении от 3 до 5 атм [206]. Затем емкость герметично закрывают и подвергают горячему изостатическому прессованию, во время которого происходит уплотнение структуры. Газообразный аргон сжимается и создает равномерно распределенные поры, которые находятся под высоким внутренним давлением, несмотря на то, что они занимают менее 2% от общего объема. Уплотненный материал можно доработать до почти что чистовой формы и преобразовать в ячеистый материал путем отжига. Обычно этап отжига проходит при температуре, равной 0,6T от температуры плавления (T) соответствующего сплава и занимает 6-24 ч. В течение отжига газовые поры медленно расширяются, их внутреннее давление понижается до тех пор, пока не будет достигнуто равновесие между давлением газа в порах и прочностью металла при температуре отжига. В конечном итоге получается пористое тело с относительной пористостью 20-40% с изолированными друг от друга порами. Типичный диаметр пор изменяется от 10 до 100 мкм.

Теоретические соотношения показывают, что пористости более 50% методом "замуровывания" газа достигнуть нельзя [207,338]. Стенки емкости, в которую помещают порошок, выполняют двойную функцию: помимо создания герметичного объема с порошком, они формируют плотный внешний слой на ячеистой структуре после отжига, что позволяет получать затем сэндвич-структуры, состоящие из вспененного ядра и двух лицевых сторон-обкладок.

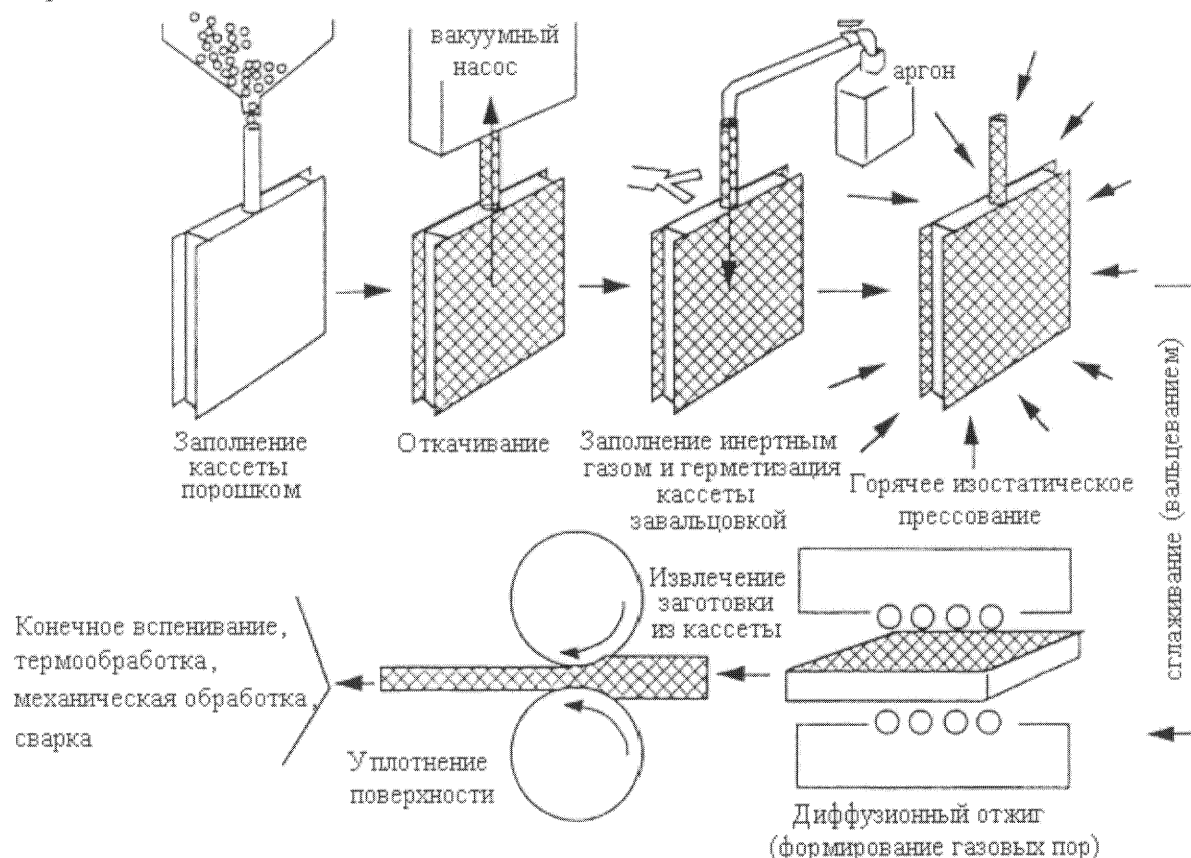


Рис.26. Метод "замуровывания" газа [205]

Разрез одной из таких сэндвич-структур показан на рис.27. Он был вырезан из листа размером 1,2×2,1 м, обработанного горячей прокаткой для уплотнения перед расширением (операцией формирования пор). Его относительная плотность составляет ~66% от плотности компактного титана. Характеристики некоторых упругих механических свойств пористого титана, полученного методом "замуровывания" газа, можно найти в работе [208].

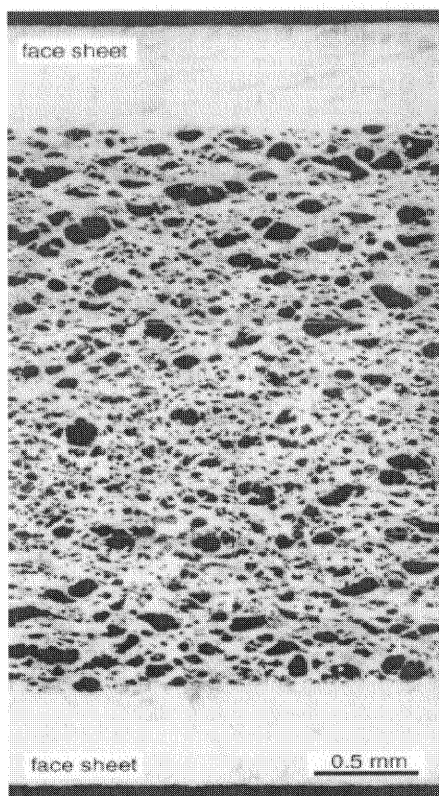


Рис.27 Сэндвич-структура из сплава TiAl6V4 с пористой сердцевиной, полученной методом "замуровывания" газа [206]

2.2.3. Вспенивание суспензий

Пенометаллы можно также получать приготовлением суспензий из металлических порошков, порообразователей и некоторых реакционно-способных добавок. Суспензия после перемешивания заливается в форму и остается там при повышенной температуре. Под влиянием добавок и порообразователя суспензия становится вязкой и начинает расширяться с началом выделения газа. Если предпринять достаточные меры по стабилизации, то вспененную суспензию можно сохранить и полностью высушить, после чего ее подвергают спеканию до получения металлической пены, имеющей значительную прочность. Получены пены из порошка алюминия с добавлением ортофосфорной кислоты с гидроксидом алюминия или соляной кислоты в качестве вспенивающего агента [209]. Относительная плотность составляет до ~7%. Однако, остаются проблемы, связанные с недостаточной прочностью вспененного материала [210], и в пеноматериале могут появляться трещины.

Суспензии могут быть использованы и для приготовления пенометаллов с открытой пористостью. В этом случае полимерную пену с открытыми порами необходимо погрузить в суспензию, содержащую смесь порошков серебра и оксида серебра [211]. После этого покрытый таким образом полимер высушивают и нагревают до температуры, при которой полимер выгорает, а частицы металлического порошка начинают спекаться и образуют жесткую ячеистую металлическую структуру.

2.2.4. Ячеистые металлы на основе объемных наполнителей, обеспечивающих сохранение ячеистой пространственной структуры

Пористые материалы со структурой губки можно получить по аналогии с процессами, описанными в Разделе 2.1.4, с использованием наполнителей и металлических порошков. Отличительной особенностью данного метода является заполнение свободного объема с наполнителями мелким металлическим порошком вместо пропитывания их расплавленным металлом, как это было описано в разделе 2.1.4 (рис. 28). Металлическим порошком заполняют или насыпную массу "сухого" объемного наполнителя [339], или подходящий растворитель [212,213] или даже органическую связку [214] для получения смеси объемных наполнителей и металлических порошков. В качестве наполнителей могут быть использованы керамические частицы или полые сферы, полимерные гранулы или полые полимерные сферы, или же соли и даже металлы. После этого полученную систему или просто спрессовывают при комнатной температуре, или же, если наполнитель термостойкий, прессуют при повышенной температуре для улучшения уплотнения и инициирования процесса спекания частиц металлического порошка. В обоих случаях получается композит, состоящий из металлической матрицы с включенными в нее гранулами наполнителя. Если содержание металла достаточно низкое, то на следующих стадиях процесса можно почти полностью удалить наполнитель, т.к. трехмерная сетка, образованная частицами наполнителя, взаимосвязана. Удалить наполнитель можно термообработкой, выщелачиванием или растворением с помощью водных растворов. Можно применить дополнительное спекание, чтобы увеличить плотность металлической сетки.



Рис.28. Метод получения пористых металлических структур из порошка металла с использованием объемных наполнителей (использована схема из работы [213])

Например, титановая пена может производиться одним из следующих способов:

1. Используя в качестве наполнителя полимерные сферы. Осуществляют виброукладку смеси объемных полимерных наполнителей с порошком титана, после чего проводят холодное прессование, затем путем термообработки удаляют полимер, и, наконец, спекают (левая часть рис. 29).
2. Используя в качестве наполнителя гранулы магния. Насыпную массу из наполняющих гранул магния заполняют порошком титана, после чего смесь подвергают горячему прессованию при температуре ниже точки плавления магния. Затем гранулы магния удаляют испарением при температурах $>1400^{\circ}\text{C}$ [215], при которых одновременно происходит спекание частиц титана. Преимущества магния заключаются в его низкой температуре кипения (1107°C) и его полной несмешиваемости с титаном (правая часть рис. 29).

3. И, наконец, высокопористый титан можно получить, используя в качестве наполнителя частицы карбамида с размерами от 0,4 до 2,5 мм, добавляя к нему мелкий порошок титана с размером менее 45 мкм после смачивания карбамида петролейным эфиром. Смесь прессуют при давлении 166 МПа и подвергают термообработке сначала при 170°C, а затем при 1400°C. Получают пористость до 70% [212]. Таким образом были получены ячеистые материалы из нержавеющей стали (марки 316L) и из некоторых суперсплавов на никелевой основе с пористостью от 60 до 80% [213].

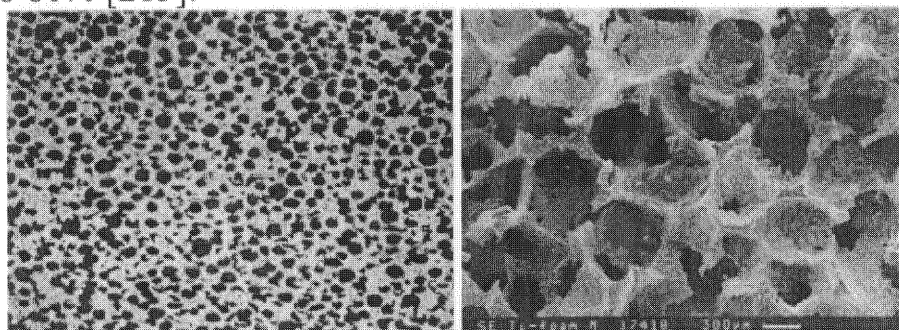


Рис.29. Ячеистый титан, полученный из металлического порошка с использованием в качестве наполнителя полимера (слева) и гранул магния (справа) (источник: Fraunhofer-Institute).

2.2.5. Структуры из полых металлических сфер

Полые сферы из меди, никеля, титана и стали можно использовать для производства высокопористых структур, связывая отдельные шарики друг с другом спеканием. Металлические полые сферы можно изготовить различными способами: комбинированным химическим и электрическим осаждением соответствующего металла на сферы полимера с последующим удалением полимера [217], или покрывая сферы полимера (например, полистирола) суспензией из связующего вещества и металлического порошка с последующим спеканием металла до образования плотного металла, полистирол при этом будет удален (см. рис. 30) [218]. Вспомогательные операции могут состоять в распылении суспензии порошков металла, оксида металла или гидрида металла до микросферических капель с помощью коаксиальных насадок (сопел), сушке микросфер в трубе при их падении, а затем спекании высушенных сфер или восстановлении их от оксидов до металла [219,220]. Еще один возможный способ заключается в распылении расплава металла и выборе параметров этого процесса таким образом, чтобы происходило формирование полых сфер [221].

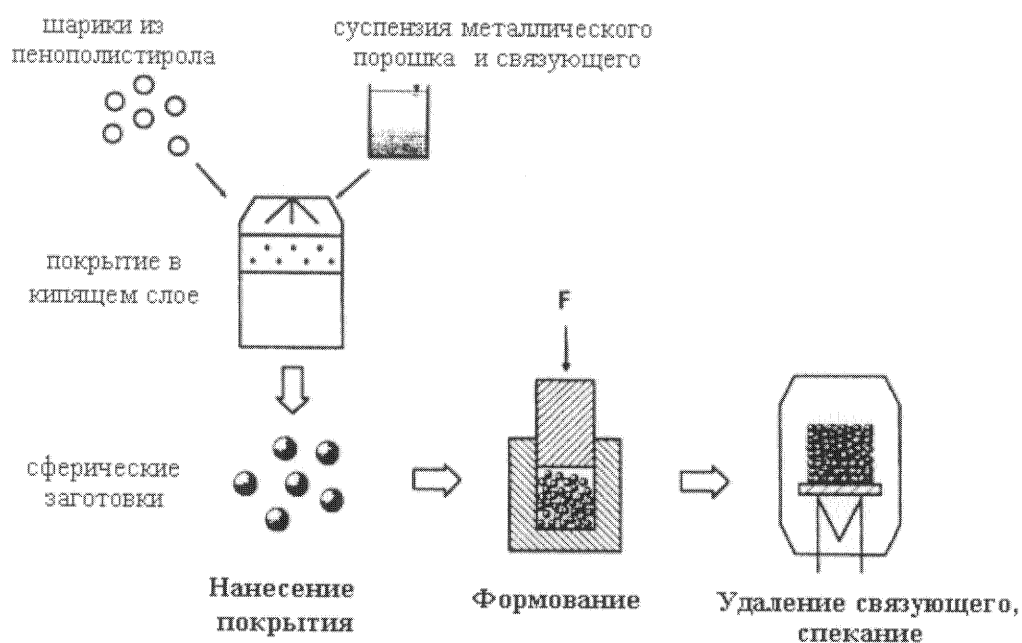


Рис. 30. Покрытие шариков из пенополистирола для производства полых сферических структур из металла

Обычно диаметр шариков изменяется от 0,8 до 8 мм, толщина стенок от 10 до 100 мкм. Полые шарики можно использовать для получения легких материалов с открытыми и закрытыми порами как с упорядоченным, так и с беспорядочным строением ячеек: открытые структуры получают спеканием полых металлических сфер, образуя перешейки между смежными сферами [217]. Если перед спеканием сферы уложены регулярно по узлам решетки Браве – для этого, например, можно использовать соты из пчелиного воска в качестве трафарета для регулярной укладки – получают материал с упорядоченным строением. Приложение усилия во время спекания приводит к деформированию сфер до многогранных тел, что не только увеличивает спекающиеся контакты, но также и уменьшает степень открытой пористости. При использовании связующей суспензии область соприкосновения между индивидуальными сферами может быть увеличена [222]. Один из методов заключается в связывании шариков оксидов с использованием оксидной связки в суспензии и затем проведении операции восстановления и спекания на одном этапе [222]. В альтернативном методе начинают, исходя из покрытых методом суспензии пенополистироловых шариков, которые связаны вместе. Удаление связки и сцепление частиц спеканием достигается на одном этапе [218,340]. Для получения открытых структур используют сферы с не слишком тонкими стенками.

В типичном ячеистом металле, полученном одним из вышеуказанных способов из сплава Ti-6Al-4V, пористость в расчете на свободный объем между спеченными шариками (на "интерстициальный" свободный объем) составляет 36%, пористость в расчете на свободный объем внутри спеченных шариков (от сферических пустот) – 44% и объем твердых стенок сфер – 20 %, таким образом, общая плотность образца $0,9 \text{ г/см}^3$ [219]. Пример открытой

структуры, спеченной из полых сфер, после и до одноосной деформации показан на рис. 31.

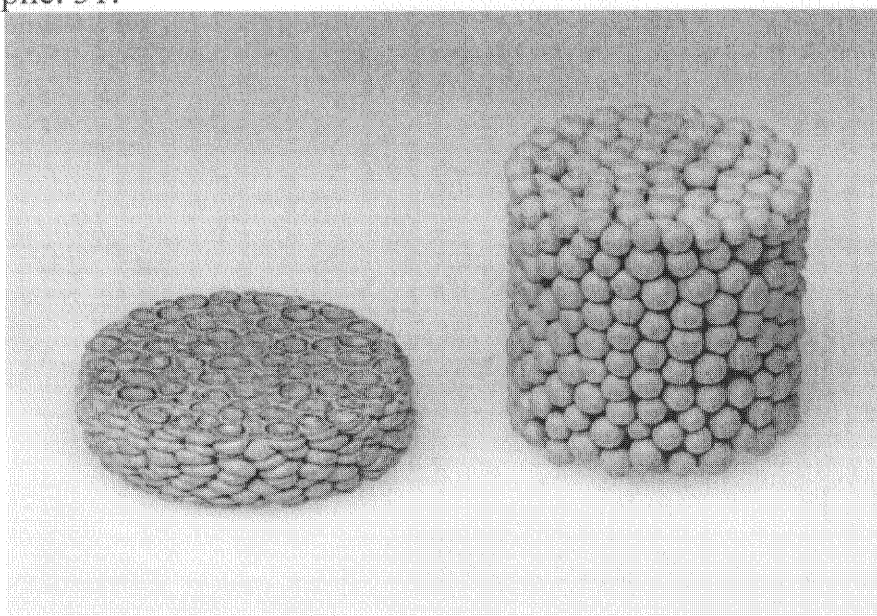


Рис. 31. Открытая полая сферическая структура, полученная спеканием шариков из нержавеющей стали: до и после одноосной деформации. Диаметр деталей ~20 мм (источник: Fraunhofer-Institute).

Закрытые структуры можно получить, заполняя свободный объем в промежутках между шариками металлическим порошком с последующим спеканием [223]. В этом случае удовлетворяют требованиям тонкостенные сферы. Слоистые структуры типа сэндвича могут быть получены непосредственным спеканием насыпной массы полых сфер между двумя лицевыми обкладками, создавая, таким образом, соединение между собой не только шариков, но и обкладок с шариками.

Одно из преимуществ структур из полых сфер заключается в том, что распределение пор по размерам носит не случайный характер, как в случае пен, описанных в Разделах 2.1.1-2.1.3, и может быть предопределено соответствующим выбором полых сфер. Механические и другие физические свойства структур из полых сфер являются, таким образом, более предсказуемыми, чем свойства "истинных пен" со случайным набором размеров пор. Дополнительным преимуществом является широкий диапазон материалов, которые могут быть использованы в этом процессе, это и суперсплавы, и сплавы титана, и интерметаллиды. Поэтому полые сферические структуры можно использовать в конструкциях, работающих при высоких температурах.

Вместо заполнения свободного объема в промежутках металлическим порошком можно использовать пропитку жидким металлом [217], но при этом лучше прикладывать давление и предварительно подогревать сферы, чтобы добиться полного заполнения структуры [224,225]. Эти операции создают прямую связь рассматриваемых процессов с процессами, описанными в Разделе 2.1.4.

2.2.6. Метод с использованием системы металлический порошок/связующий материал

Смеси из металлических порошков и полимерных связывающих материалов можно спрессовать или экструдировать, а затем нагревать до получения пористых материалов и изделий [226-228]. Хотя объемные наполнители здесь не используются, можно достигнуть пористости до 50%. Подобным образом на основе разнообразных металлов и сплавов можно получить материалы с ориентированной пористостью (названные "микросотами") [229,230] с каналами диаметром от нескольких микрон до нескольких миллиметров. Стадии этого процесса представлены на рис. 32.

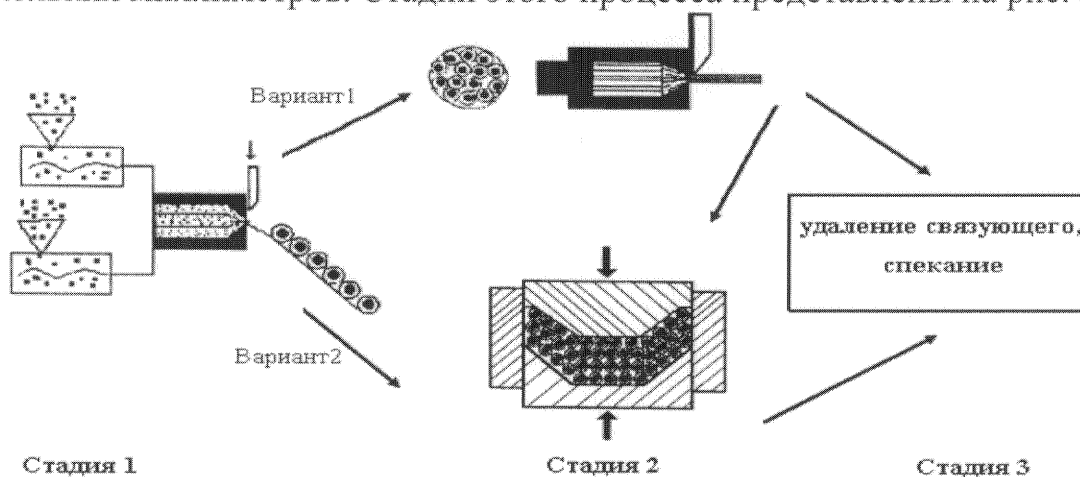


Рис. 32. Процесс производства ячеистых материалов с ориентированной пористостью из порошков металлов [230]

На первом этапе получают двухслойные стержни, имеющие сердцевину, состоящую из смеси пластической связки с объемным наполнителем, и оболочку из смеси металлический порошок/связующий материал. Затем пучки таких прутков спрессовывают в заготовку. Это можно сделать или экструзией стержней, получая заготовки почти любого произвольного сечения, или осевым прессованием с получением деталей со сложной формой. На третьем этапе связующий материал и наполнитель удаляют, а металлический порошок уплотняется спеканием. На рис. 33 представлены микросоты, полученные из железа.

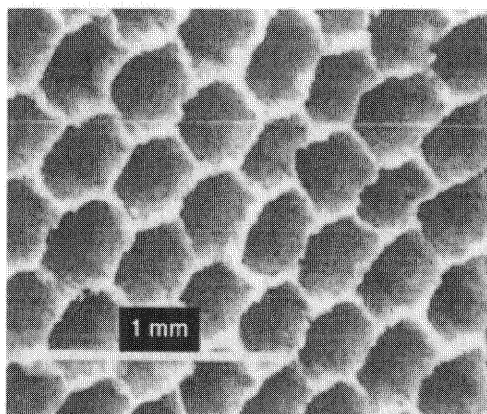


Рис.33. Образец пористого железа с ориентированными ячейками гексагонального строения (пористость 86%) [230]

2.2.7. Реакционное спекание

Как известно, реакционное спекание смесей металлических порошков, например, $Ti + Al$, $Fe + Al$ или $Ti + Si$ приводит к образованию пористых структур [231-235]. Это происходит из-за разных коэффициентов взаимной диффузии элементов в многокомпонентной системе.

2.3. Метод электроосаждения

Методы электроосаждения или гальванические методы исходят из использования металлов, находящихся в ионном состоянии, т.е. из растворов ионов в электролитах [236]. Покрытия из металла гальваническим осаждением наносят на полимерную пену с открытыми порами, которая затем удаляется (см. рис. 34). Этот процесс и метод точного литья по литьевым моделям рассмотрены в Разделе 2.1.4, потому что действительное вспенивание не может происходить в действительно металлическом, т.е. в твердом состоянии. Вместо этого используется вспененный полимер, который затем заменяется металлом в ходе последующей обработки. Гальваническое осаждение металла на полимерную пену требует того, чтобы она в исходном состоянии обладала электропроводными свойствами. Это может быть достигнуто после пропитки пены полимера электропроводной суспензией на основе графита или сажи, путем электролитического покрытия пены погружением в раствор электролита, или покрытием полимера тонким наружным проводящим слоем путем катодного напыления [237,238]. После проведения операции гальванического покрытия полимер может быть удален из металло-полимерного композита термической обработкой.

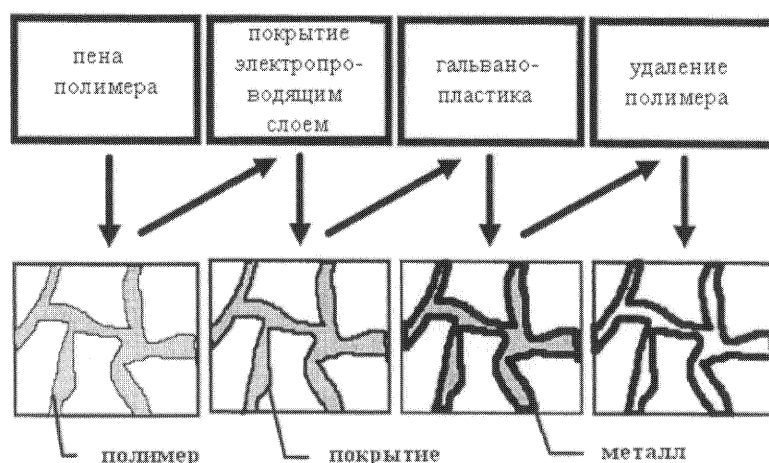


Рис.34. Метод электроосаждения для получения металлических пен

В конечном итоге получают трехмерную структуру из полых металлических перемычек ("стратов"), как показано на рис. 35. Вставка в верхнем углу на фотографии показывает, что перемычки являются полыми. Можно приготовить пены с удельной пористостью на единицу длины от 2,5 до 30 пор/см ($\sim 6-70$ пор/дюйм), удельная поверхность изменяется от 500 до 7500 m^2/m^3 [239]. Предпочтение отдается таким металлам как никель или сплавам

хрома с никелем, но также используется и медь. Никель-хромовую (нихромовую) пену получают путем отдельного покрытия никелем и хромом, после чего высокотемпературной обработкой обеспечивают взаимную диффузию этих металлов. Такие пены предлагались на рынке на коммерческой основе под фирменными названиями Retimet (Dunlop, GB), Celmet (Sumitomo Electric, Япония) [239] и Recemat (SEAC, Нидерланды) [240]. Объем производства пены в фирме Сумитомо Электрик (Япония) составляет сотни тонн в год. Листы никель-хромовых (нихромовых) пен выпускают с толщиной от 2 до 20 мм и плотностью от 0,4 до 0,65 г/см³. Установлено, что плотность таких пен фактически не зависит от среднего размера пор [240]. Сведения о механических свойствах и некоторых простых моделях для этих материалов можно найти в литературе [238,341].

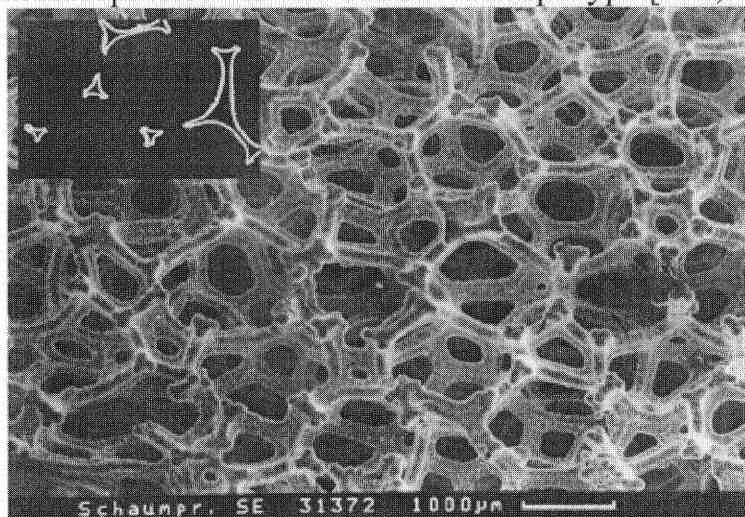


Рис.35. Никелевая пена, полученная электроосаждением. Вставка в верхнем углу: микроснимок границ некоторых полых перегородок

2.4. Осаждение из паровой фазы

Пенометаллы могут быть также получены из металлов в газообразном состоянии или их газообразных соединений. Для этого требуется твердая заготовка со структурой, которая будет определять геометрию пены или ячеистого материала при их получении. Например, можно использовать заготовки из сетчатой полиуретановой пены или заготовки из решеточных полимерных блоков, рассмотренные ранее в Разделе 2.1.4. Пары металла создаются в вакуумной камере, а затем осаждаются на холодной поверхности заготовки. Конденсированный металл покрывает поверхность полимерной заготовки с образованием пленки, толщина которой определяется плотностью паров и временем экспозиции. Один из методов организации этого процесса является электродуговое испарение металла [241]. Альтернативный и очень эффективный метод получения никелевых пен при весьма низких температурах заключается в использовании карбонила никеля. Карбонил никеля получают по реакции $\text{Ni} + 4\text{CO} \rightarrow \text{Ni}(\text{CO})_4$ [242]. Карбонил никеля — это газ, который разлагается на никель и оксид углерода при температуре $>120^\circ\text{C}$. Поэтому покрытие полимерной заготовки производят

пропусканием через нее потока газообразного карбонила никеля при таких температурах. Никель, образующийся при разложении, наслаивается на заготовке и образует металлическое покрытие. В целях упрощения процесса полимер можно выдерживать при требуемой температуре разложения карбонила никеля, используя нагрев источником инфракрасных лучей [243,244]. После охлаждения полимер удаляют температурной или химической обработкой, и получают точно такой же материал с полыми перемычками-"распорками" как и в гальваническом процессе, описанном в Разделе 2.3. Таким образом, получают листы никелевой пены с толщиной до 3,3 мм, их торговое название "Incofoam" [245]. Диапазон плотности изменяется от 0,2 до 0,6 г/см³, чистота материала очень высока (99.97% Ni), а предел прочности на разрыв составляет ~0,6 МПа для средней плотности пены. Внешний вид пены "Incofoam" (см. рис.36) напоминает пену, полученную гальваническим осаждением (см. также рис.35). На сегодняшний день их основное применение заключается в использовании в качестве вспомогательного материала для пастообразных электродов батарей.

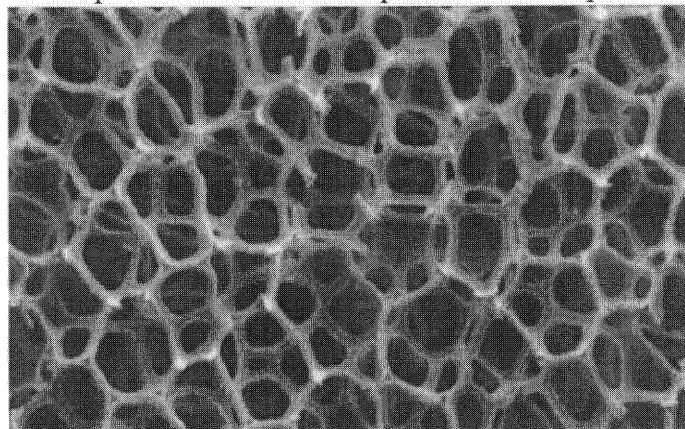


Рис. 36. Образец пены "Incofoam", полученной с использованием карбонила никеля (20 пор/дюйм) [245]

2.5. Выводы по методам получения

В таблице 2 представлен краткий обзор всех методов получения, описанных в Разделе 2. Нужно отметить, что представленные данные о достигнутой пористости и сведения о вспенивании определенных металлов различными способами не являются окончательными, т.к. исследования в данной области продолжаются. Коммерческая доступность означает, что можно купить необходимый материал прямо со склада, а не возможность поставки его по заявке в течение приемлемого срока.

Таблица 2

Методы получения ячеистых металлов и металлических пен

Категория	Раздел	Процесс	Возможная пористость (%)	Металлы (примеры)	Имеется ли коммерческая доступность?
Жидкофазные процессы	2.1.1	Прямое вспенивание инъекцией газа	80-95.7	Al, Zn	Да
	2.1.1	Прямое вспенивание газогенерирующими агентами	91-93	Al, Zn	Да
	2.1.2	Газары	5-75	Ni, Cu, Al, Mg	Нет
	2.1.3	Метод плавления прессовок порошков	60-90	Al, Zn, Pb	Да
	2.1.4	Точное литье по литьевым моделям с использованием пен полимеров	80-97	Al, Zn	Да
	2.1.4	Решеточные блоковые материалы	-	Al	Нет
	2.1.4	Литье с объемными наполнителями	≤65	Al, Zn, Pb, Cu	Да
	2.1.5	Вспенивание разбрызгиванием	≤60	Сталь, Cu	Нет
Твердофазные процессы	2.2.1	Спекание порошков и волокон	20-80	Бронза, сталь	Да
	2.2.2	"Замуровывание" газа	≤45	Ti	Нет
	2.2.3	Вспенивание суспензий	≤93	Al	Нет
	2.2.4	Прессование порошков с объемными наполнителями	≤70	Ti	Нет
	2.2.5	Полые сферические структуры	≤80	Сталь	Нет
	2.2.6	Методы для систем: порошок/связующий материал		Fe, Cu	Нет
	2.2.7	Реакционное спекание	≤50	TiAl, FeAl	Нет
	2.3	Гальваническое осаждение	92-95	Ni, Cu	Да
Осаждение из паровой фазы	2.4	Осаждение из паровой фазы	93-97.5	Ni, Ni-Cr, Cu	Да

3. Методы аттестации ячеистых материалов

Ячеистые металлы и сплавы можно исследовать различными методами. Цель этих исследований заключается либо в получении данных о механических или физических характеристиках исследуемого ячеистого материала, либо технологической аттестации характеристик ячеистого металла, содержащего различные компоненты. Существует два пути исследования ячеистых материалов: с атомистической или молекулярной точки зрения ячеистый материал представляет собой некоторую механическую *конструкцию*, состоящую из многочисленных перемычек, мембран и других элементов, которые сами обладают механическими свойствами компактного металла. Поэтому испытания ячеистого материала аналогичны испытаниям какого-то технического узла (или детали). С макроскопической точки зрения ячеистая структура является *материалом*, и в ходе испытаний проверке подлежат свойства, соответствующие данному материалу. Принимая во внимание эту точку зрения, ячеистую структуру рассматривают как гомогенную среду, которая характеризуется эффективными (или усредненными) параметрами материалов.

Различные методы аттестации ячеистых металлов кратко рассмотрены в настоящем разделе. Однако обзор конкретных результатов измерений не приводится, т.к. все это находится за рамками ограниченного объема настоящей статьи. Ссылки на работы по изучению свойств ячеистых металлов, которые были изготовлены одним из методов, описанным в Разделе 2, представлены в соответствующих подразделах, а также в Таблице 1.

Методы исследования можно разделить на неразрушающие и разрушающие, в зависимости от того, деформируется или изменяется пена необратимо, или же она остается неизменной или минимально поврежденной во время ее аттестации.

3.1 Неразрушающие методы исследования

Существует много доступных неразрушающих методов изучения свойств материалов и компонентов [246]. В следующих разделах представлены только те методы, которые уже использовались для изучения ячеистых металлов, или те из них, для которых возможность их использования для этих целей уже обсуждалась.

3.1.1. Измерение плотности

Общую плотность пористого материала можно определить его взвешиванием и измерением его объема по принципу Архимеда, т.е. измеряя гидростатическую подъемную силу, равную весу объема жидкости с известной плотностью. Если исследуемый образец не имеет сплошной замкнутой внешней оболочки, то необходимо предотвратить проникновение

жидкости в поры образца, например, покрыв герметично его поверхность пленкой полимера.

3.1.2 Измерение просачивания краски

Методы жидкофазного вспенивания, описанные в Разделе 2.1 приводят к образованию пен с закрытыми ячейками или даже пен со сплошной замкнутой внешней оболочкой. Однако, на практике при получении пен часто возникают дефекты, например, на заключительной стадии охлаждения после вспенивания. Дефектами могут быть небольшие отверстия или трещины на стенках ячейки или на внешней оболочке. Методы просачивания идеально подходят для обнаружения таких поверхностных дефектов [246]. Для этого к исследуемой пене сначала добавляют жидкий химикат. Этот химикат в конечном счете адсорбируется отверстиями и трещинами. После высушивания поверхности применяют окрашивающий реагент, дающий окраску только в тех местах, где сохранился адсорбированный химикат (химический реактив). Таким образом, можно получить карту дефектов, которую можно наблюдать простым визуальным способом [247].

3.1.3. Рентгеновская радиография и радиоскопия

Карту ячеистых металлов можно получить простыми методами поглощения рентгеновских лучей (просвечивающая радиография). На образец направляют поток рентгеновских лучей и измеряют его ослабление. Проводят усреднение по некоторой боковой области и сканируют по двум измерениям, получая, таким образом, двумерную карту поглощения рентгеновских лучей пеной. Метод дает интегрированный сигнал по направлению рентгеновского пучка, т.е. ослабление связано с величиной общей массы в столбике материала. Если исследовать тонкие слои пены, т.е. тонкие срезы пены с толщиной порядка среднего диаметра пор, то можно выявить индивидуальные поры и картину истинной морфологии пор. Однако, если вырезанные слои являются достаточно толстыми, то отдельные поры будут неразличимы. Даже большие поры или отверстия с размерами, составляющими $1/4$ от толщины слоя пены, в некоторых случаях могут быть определены неправильно [247]. На рис.37 продемонстрированы неоднородности свинцовой пены на просвет. Можно увидеть ряд очень больших пор, но невозможно разглядеть маленькие поры, т.к. множество изображений пор накладываются друг на друга. Для тонких слоев пены или для пен с небольшой плотностью ситуация выглядит более благоприятной. Недавно в реальном масштабе времени удалось наблюдать развитие процесса образования металлической пены с толщиной 4-10 мм, используя запись изображения, полученного методом синхротронного рентгеновского излучения [343]. Получали до 3 снимков в секунду с пространственным разрешением 40 мкм, и можно было наблюдать, например, как разрушались стенки индивидуальных ячеек. Процесс уплотнения алюминиевых пен, изучаемый по картине измерения поглощения пучка рентгеновских лучей,

перпендикулярных по направлению к направлению нагрузки [250], позволил непосредственно наблюдать развитие деформационных зон.

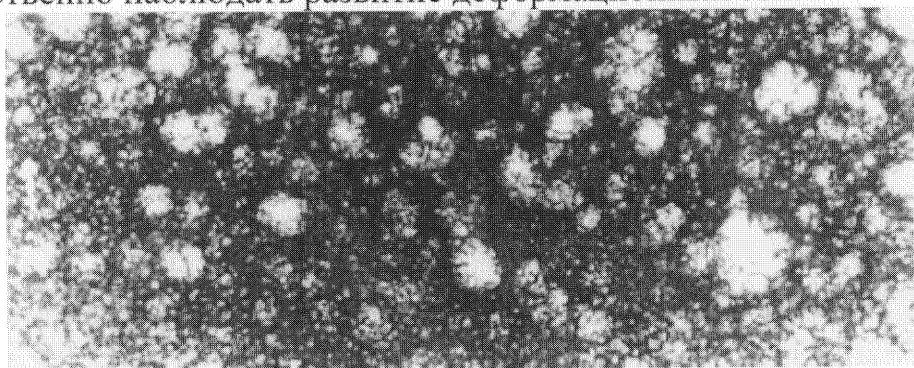


Рис.37. Изображение свинцовой пены, полученное методом рентгеновской просвечивающей радиографии. Образец (толщина 6 мм) содержит большие поры вследствие агломерации вспенивающих агентов в прекурсоре (см. Раздел 2.1.3). Изображение показывает участок с площадью $60 \times 20 \text{ мм}^2$ (источник: Fraunhofer-Institute).

3.1.4. Рентгеновская компьютерная томография

Трехмерное распределение плотности можно получить методом рентгеновской компьютерной томографии (КТ) [251,342]. Рентгеновские изображения образца получают для большого числа направлений, обычно получаемых вращением и перемещением источника излучения и детектора вокруг образца (при спиральном сканировании, см. рис. 38).

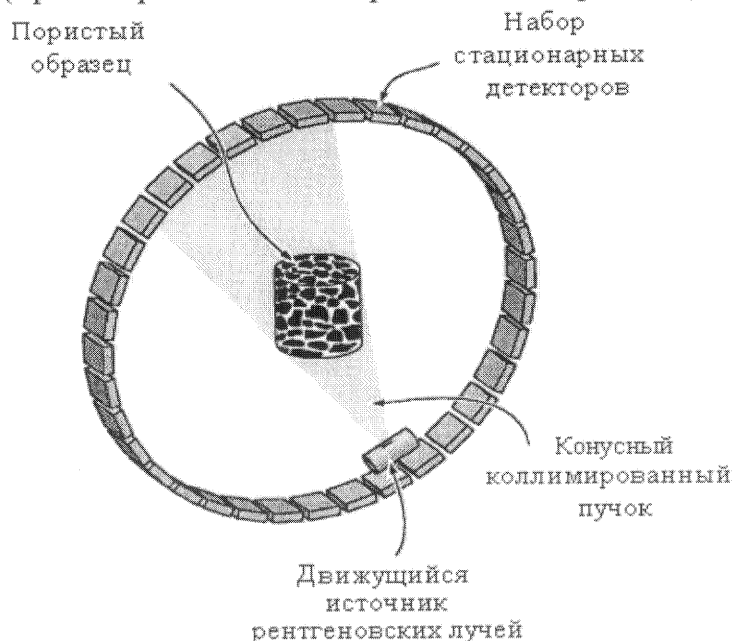


Рис.38. Экспериментальная схема рентгеновской компьютерной томографии [46]

На основании полученного набора различных изображений можно уже чисто математическими методами (с использованием ЭВМ) реконструировать, т.е. вычислить для любой точки исследуемого объекта величину ослабления пучка рентгеновских лучей и, следовательно, значение локальной плотности

материала [46]. На рис.39 показано с высоким разрешением изображение цинковой пены, полученное этим методом. Размеры образца $\sim 5 \times 5 \times 5$ мм*, пространственное разрешение – 5 мкм. Для получения изображения образца применяли синхротронный источник рентгеновских лучей (52 кэВ), который позволяет определить даже внутреннюю поверхностную структуру стенок ячейки. Обычные медицинские или технические томографы имеют более ограниченное пространственное разрешение, составляющее $\sim 0,7$ и 0,1 мм соответственно.

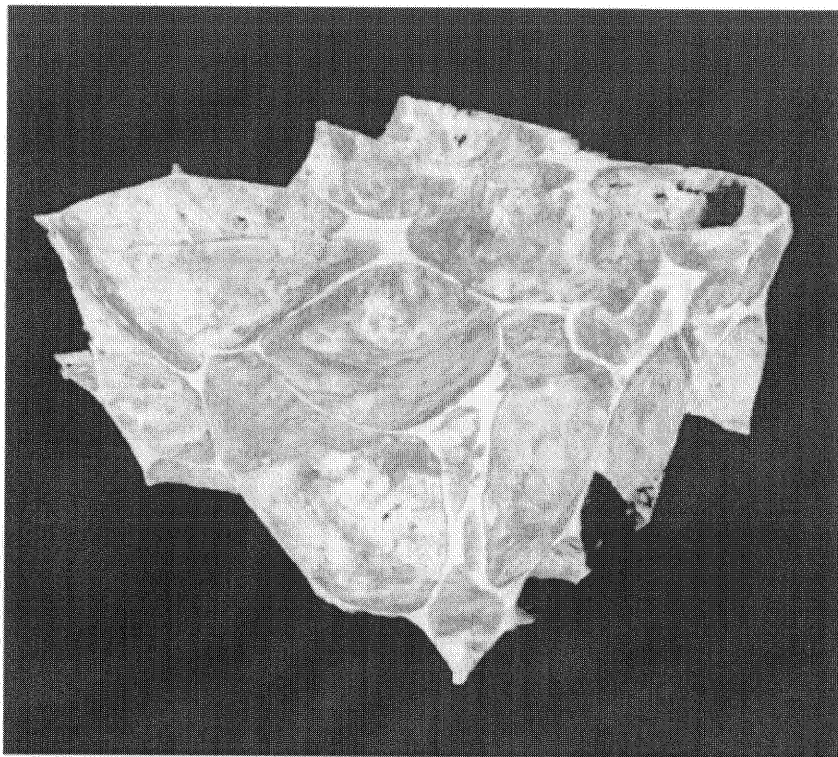


Рис.39. Трехмерное изображение с высоким разрешением цинковой пены, полученное методом компьютерной томографии. Размеры образца $\sim 5 \times 5 \times 5$ мм (источник: L. Helfen и T. Baumbach, ESRF Grenoble)

Однако, такое низкое разрешение этих приборов в большинстве случаев является достаточным для контроля качества ячеистых изделий, т.к. для получения трехмерного распределения плотности, исходные данные компьютерной томографии усредняют по достаточно большому количеству трехмерных элементарных объемов. Выбор размера этих элементов зависит от информации, которую желательно получить. Если необходимо обнаружить плотные и рыхлые участки в пене, то усредняемый объем должен составлять по порядку величины средний объем ячейки, т.е. находиться в миллиметровом диапазоне [247].

Сравнение двумерных и трехмерных методов представлено в работах [252,253]. Компьютерную томографию применяли для визуализации деформационных зон в алюминиевой пене, обрабатывая ряд изображений

* Примечание редактора перевода: в оригинале статьи на английском языке, вероятно, содержится неточность и линейные размеры образца указаны в единицах "мм³". Следовало бы указать их в мм или прямо указать величину объема образца: ~ 125 мм³.

компьютерной томографии на различных стадиях деформации одного и того же образца и конструируя карты трехмерного смещения попарных изображений по аналогии с методикой поверхностного смещения, описанной ранее [249].

Томография ядерного магнитного резонанса, являющаяся ценным инструментом для сканирования тела человека, не применяется для исследования металлических структур, т.к. для обычно применяемых частот возбуждающего ВЧ-поля глубина проникновения, т.е. глубина скин-слоя, очень мала (например, для алюминия глубину скин-слоя можно оценить, используя произведение: $11 \text{ МГц} \times \text{магнитную индукцию поля в Теслах}$).

3.1.5. Измерение вихревых токов

Пены можно охарактеризовать по их относительной плотности и по размеру пор, проводя многочастотные измерения электрического импеданса [255]. Для этого используют катушку возбуждения, создающую переменное магнитное поле. Индукция создает вихревые токи и соответствующее индуцированное магнитное поле вокруг образца металлической пены, которое может быть зарегистрировано вторичной измерительной катушкой, индуктивно связанной с катушкой возбуждения. Вихревые токи зависят не только от геометрических факторов и частоты, но также и от свойств пены. Можно показать, что пористость заметно влияет на выходной сигнал. Поэтому этот метод можно применять для измерения локальной плотности и других параметров пор в образце после соответствующей калибровки.

3.1.6. Акустические измерения

Звукопоглощающие свойства пористой среды обычно измеряются в импедансной акустической трубе, которая позволяет получать быстрые и точные измерения. Однако, поскольку измерять количественно можно только лишь параметры для акустической волны, падающей на образец перпендикулярно, приходится приводить дополнительные испытания каждый раз прежде, чем какой-то впервые разработанный образец звукопоглотителя, например, образец нового пеноматериала, может быть использован в качестве объекта испытаний. Труба содержит дискообразный образец у одного конца трубы, причем имеется возможность измерять расстояние от него до задней стенки трубы, источник звука и детектор на противоположной стороне [256]. Для обычного диапазона ультразвуковых акустических частот используются трубы с длиной ~ 60 см и диаметром ~ 30 или 100 мм для высоких ($\sim 0,8$ кГц) и низких частот ($\sim 1,6$ кГц) соответственно. Обычно измеряют ослабление акустической волны как функцию частоты. Если изменяют расстояние между образцом и задней стеной, то получают ряд функций $\alpha(\nu)$, т.е. зависимостей коэффициента поглощения от частоты. Если образцы имеют связанные между собой поры, то при увеличении указанного расстояния кривые поглощения сдвигаются в область более низких частот. Однако, плотные образцы и пористые образцы с закрытыми порами имеют такую же кривую поглощения независимо от

расстояния, т.к. звук не может проникать через образец, и поглощение происходит только на его поверхности. Необходимо выполнить измерения более чем на одном образце, особенно для труб небольших диаметров, а лучше провести по два измерения для каждого образца, причем каждое измерение проводить для одной из возможных ориентаций его сторон. Преобладающая абсорбция акустических волн поверхностью для пен с закрытой пористостью явно отличается для двух различных ориентаций, тогда как преобладающая абсорбция открытыми структурами остается неизменной при повороте образца с фиксацией различных его ориентаций.

3.1.7. Вибрационный анализ

Модуль Юнга и коэффициент потерь материала можно определить вибрационным анализом. Самый простой метод заключается в принудительной вибрации длинного бруска прямоугольной или круглой формы или тонкой квадратной пластины, сделанных из исследуемого материала. Создаются продольные, поперечные или вращательные колебания. Образец может быть зажат с одной или с двух сторон, или удерживаться в подвешенном состоянии на тонких проводах. Колебания образца могут быть возбуждены магнитными полями, а полученные колебания фиксироваться импедансной катушкой. Другая возможность заключается в размещении образца непосредственно в электромагнитном вибраторе без закрепления [257]. При этом амплитуда колебаний как функция частоты возбуждения показывает характерные резонансные пики. Положения пиков ν_r позволяют рассчитывать модуль Юнга (E), исходя из размера образца и массы с помощью стандартных формул. По ширине $\Delta\nu/\nu_r$ резонансных пиков определяют коэффициент потерь η [258]. Однако, измерения свойств ячеистых материалов не являются тривиальными. Часто встречаются неоднородные материалы с неизвестным распределением массы. Эффективный (усредненный) модуль Юнга, полученный на основании значений резонансных частот, для неоднородных материалов, зависит от распределения массы. При измерении коэффициента потерь следует подавлять влияние паразитных потерь от подставки образца. При использовании зажимов следует учитывать силу трения между зажимами и образцом, тогда как крепление брусков пены на тонких проводах создает проблемы, поскольку местонахождение вибрационных узловых точек для неоднородного образца неизвестно [151].

3.1.8. Порометрия и измерение проницаемости

Работая с ячеистыми металлическими материалами с открытыми порами, интересно определить параметры, связанные с их внутренней структурой: удельную площадь поверхности, распределение пор по размерам и распределение каналов по размерам. В настоящее время используются следующие методы:

Ртутная порометрия. Она основана на внедрении и проникновении ртути в пористый объем под давлением. Внедряемый объем ртути и

давление связаны с размером ячеек. Однако, поры с размерами больше нескольких сотен микрон определить этим методом трудно.

Методы газовой абсорбции (БЭТ). Они позволяют достаточно точно определять полную внутреннюю поверхность ячеистого материала. Могут быть определены даже очень маленькие поры вплоть до размеров атомной шкалы.

Измерение проницаемости. Оно основано на изучении прохождения потока газа или жидкости через пористую среду. Измеряют падение давления Δp на колонке с пеной высотой s как функцию средней скорости газа или жидкости v , и находят линейные отношения для очень медленного потока (по закону Дарси для потоков, определяемых силами вязкости) и квадратичную зависимость для более высоких скоростей потока (по закону Форххаймера), при которых потери энергии из-за инерции текущего газа или жидкости становятся значительными. Некоторые результаты, полученные при измерении падения давления для потока газа через различные образцы алюминиевых пен с открытой пористостью, приведены на рис. 40. Зная вязкость газа или жидкости, можно определить проницаемость и коэффициент трения. Принимая во внимание тот факт, что сила трения связана с площадью внутренней поверхности объема, занимаемого порами, можно оценить значение удельной площади поверхности. Значения, полученные методом проницаемости, оказываются значительно ниже по сравнению с результатами измерения методом газовой абсорбции по методу БЭТ, т.к. только часть внутренней поверхности взаимодействует с потоком газа или жидкости [259].

Метод точки пузырька. Первоначально в этом методе объем пор заполняют жидкостью. Постепенно увеличивают прикладываемое внешнее давление. При определенном значении давления преодолеваются капиллярные силы жидкости, и жидкость выплескивается из исследуемого образца, вызывая падение сопротивления.

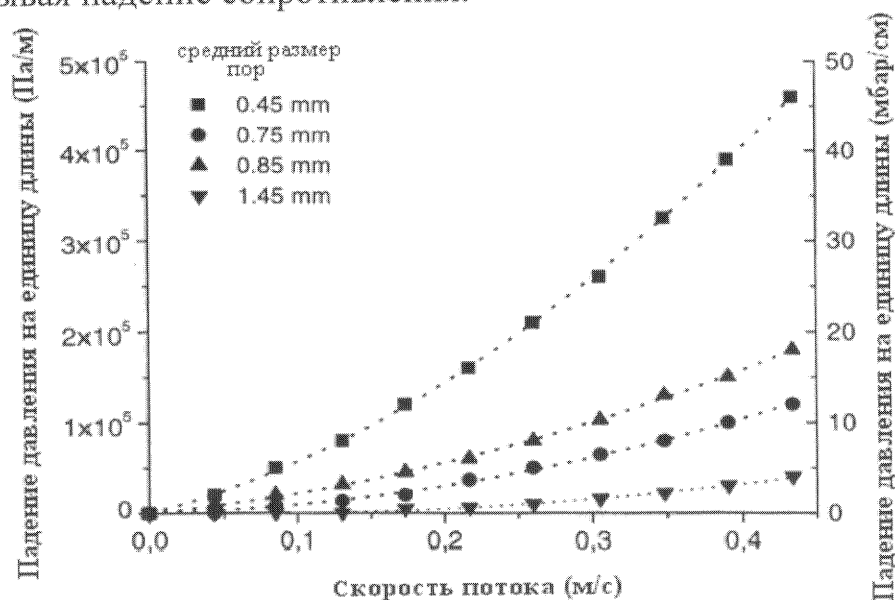


Рис.40. Измерение падения давления для различных материалов с открытыми ячейками (структуру материала см. на рис.22) [184]

При дальнейшем увеличении давления, можно вытеснить жидкость из более мелких пор и в итоге достичь полного высушивания образца. Сравнивая скорость потока как функцию падения давления с соответствующей кривой для сухого образца, можно определить наибольшие сквозные поры образца и получить некоторую информацию о распределении пор по размерам (точнее, о распределении по размерам каналов).

3.1.9. Измерение электро- и теплопроводности

Измерения электрического сопротивления являются прямыми. Из-за низкого сопротивления металлических материалов желательно брать образец малого сечения. Однако, конечный размер ячеек налагает ограничение на минимальное сечение. Следует обеспечить хороший контакт между подводящими контактами и пеной. Для алюминиевых пен со средним диаметром пор порядка 2 мм использовали прямоугольные образцы с поперечным сечением 200 мм² и длиной 200 мм. Измерения проводились четырехзондовым методом с медными контактными пластинами, прижатыми к пене [132].

Теплопроводность образцов алюминиевой пены с поперечным сечением 20×20 мм измеряли по модифицированной стандартной методике [50].

3.1.10. Другие методы

Ниже перечисленные методы могут быть применены для аттестации ячеистых металлов, хотя некоторые из них до сих пор не использовались, таким образом, до сих пор нет никаких доказательств, что они могут быть полезны.

3.1.10.1 Рентгеновское и нейтронное рассеяние на малых углах

Рассеяние на малых углах применяют для определения распределения пор по размерам в ячеистых системах. Коллимированный пучок моноэнергетических рентгеновских лучей или нейтронов направляется на образец и рассеивается под малыми углами. Затем проводят построение графика зависимости интенсивности рассеянного пучка I от величины вектора волнового рассеяния q [260]. Функция рассеяния $I(q)$ зависит от внутренней структуры образца. Металл со случайным распределением сферических пор одинакового размера будет давать некоторую характеристическую функцию. Принимая такую простую модель, можно определить радиус пор или распределение пор по размерам [344]. Рентгеновские лучи позволяют исследовать поры нанометровых размеров, тогда как нейтроны позволяют исследовать более крупные поры с диаметром до нескольких десятков микрометров. В любом случае эти методы применимы только для микропористых металлических систем.

3.1.10.2 Волновая спектроскопия рассеяния

Использование акустической волновой спектрометрии рассеяния было предложено для исследования металлических пен [261]. Оптический аналог этого метода успешно применялся к жидким водным пенам [262]. Этим методом можно обнаружить небольшие изменения в структуре пены, например, после небольших механических деформаций.

3.1.10.3 Визуализация при ультразвуковом исследовании

Ультразвуковое исследование позволяет получать изображения внутренней структуры ячеистых материалов. Но на сегодняшний день о проведении удачных экспериментов в этом направлении ничего неизвестно [247]. Однако, применение ультразвукового исследования для регистрации изображений структуры жидких водных пен по крайней мере в качественном виде представляется вполне реальным [263], что оставляет надежду на применение данного метода к изучению металлических пен.

3.2. Методы исследования с разрушением образца

3.2.1. Анализ оптического изображения

Морфологию ячеек и микроструктуру ячеистых материалов можно анализировать по оптическим изображениям шлифов при различном увеличении. Хотя метод и относится к неразрушающим, но приготовление образца требует таких операций как разрезание, заливка заготовок шлифа или полирование материалов и поэтому фактически этот метод является методом, основанным на разрушении образца.

Используя коммерчески доступные компьютерные программы анализа изображения, можно определить распределение по размерам ячеек или пор, а также провести анализ формы ячеек. Указанные программы идентифицируют индивидуальные ячейки в плоскости шлифа (образца). Однако, весьма трудно получить надежные результаты. Необходима как очень аккуратная подготовка материалов, так и тщательное изготовление шлифов. Мембраны (стенки) ячеек и их внутренняя поверхность должны проявляться на их оптических изображениях с различной яркостью. Один метод заключается в помещении ячеистого материала в черную смолу и полировании плоскости шлифа (образца). Получают изображения, аналогичные представленным на рис. 41. Необходима некоторая доработка вручную для того, чтобы помочь компьютерной программе в идентификации индивидуальных пор и вычислении распределения пор по размерам. Конечно, размер пор, измеряемый таким образом, не является истинным, т.к. поперечные сечения индивидуальных ячеек в пространстве ориентировано случайным образом. Вследствие этого требуется соответствующая интерпретация полученных результатов.

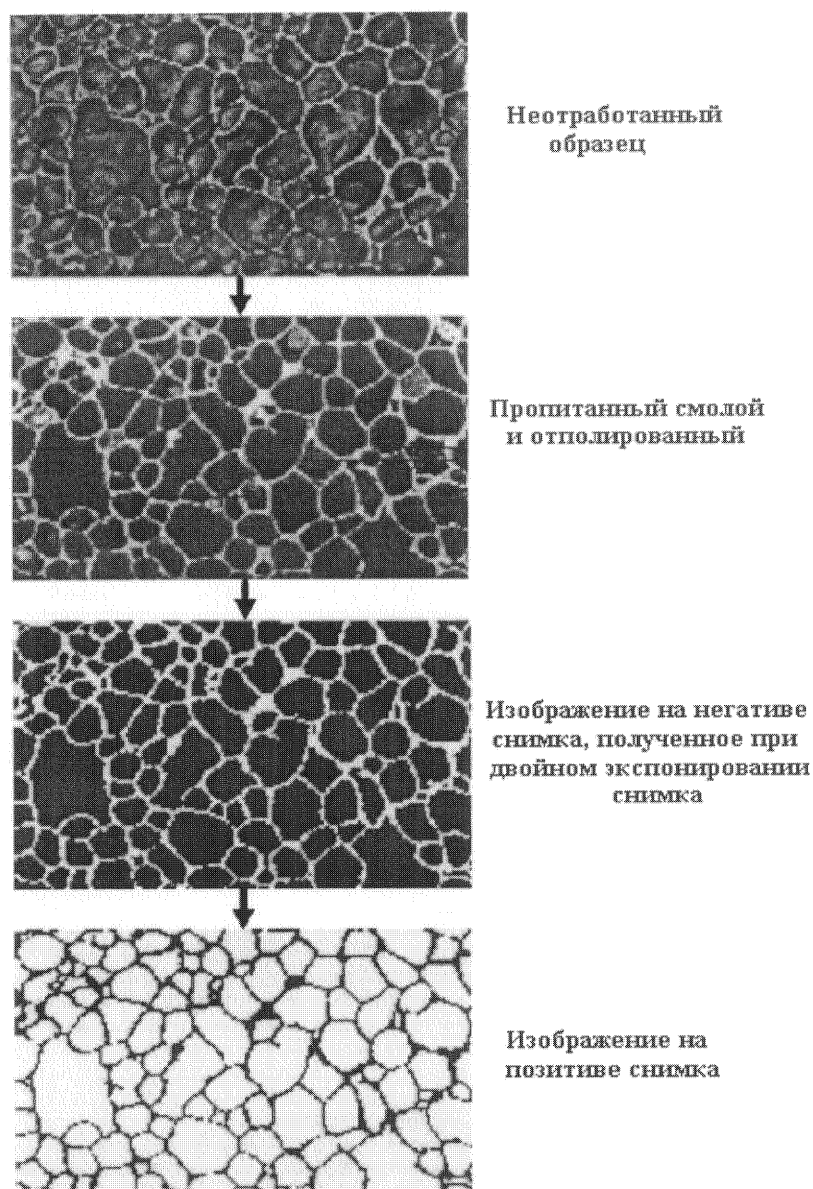


Рис.41. Анализ оптического изображения алюминиевой пены: различные стадии подготовки образца и обработки изображения [50]

Процессы деформации металлических пен исследовались методом, который называется "анализ поверхностной деформации". При деформации блока пены изображение наружной поверхности образца непрерывно фиксируют видеокамерой. Затем проводят корреляционный анализ между парными изображениями, который позволяет получить поле векторов смещения в поверхностной области [248,249,254,327]. Этим методом четко идентифицировано появление полос деформации, наблюдаемых при "коллапсе" пены (рис. 42).

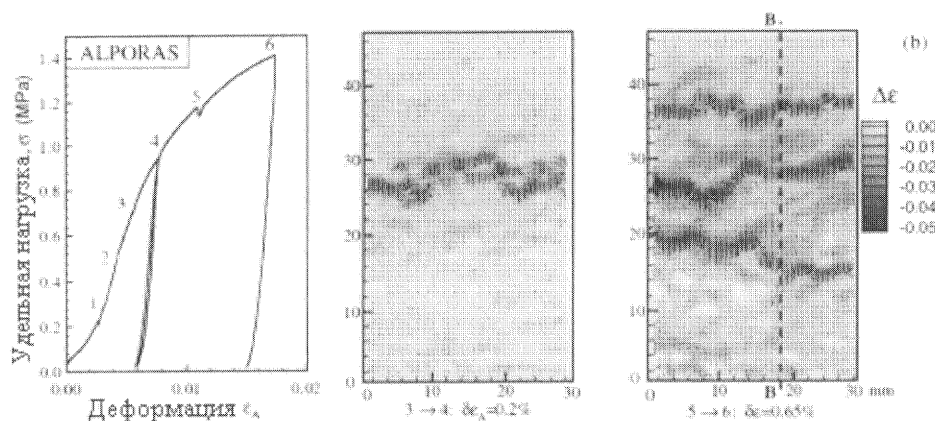


Рис.42. Характер деформации металлической пены, полученный анализом поверхностной деформации [254]. Более темные области отвечают наибольшим деформациям $\Delta\epsilon$ (сила направлена сверху вниз).

3.2.2. Механические испытания

Механические испытания ячеистых металлов являются необходимым элементом перед любым их применением в конструкциях. Данные механических испытаний необходимы как для оценки возможности конкретного применения этих материалов, так и в более широком значении для создания баз данных, необходимых для компьютерного моделирования ячеистых материалов или узлов, содержащих такие материалы. В принципе, используют те же самые методы испытаний, что и для неячеистых материалов. Однако, иногда необходима некоторая модификация методик испытаний вследствие специфической природы ячеистых материалов.

Например, одна из особенностей применения механических методов испытания к ячеистым материалам касается статистики. Если была испытана металлическая пена данного сплава, то результирующие параметры механических свойств нескольких образцов с одной и той же общей плотностью пены могут показать более значительный разброс значений по сравнению с испытаниями традиционных материалов. Причина заключается в "скрытых параметрах" ячеистых материалов, таких как распределение массы, неоднородность микроструктуры и т.д., которые различаются для различных образцов при одинаковой общей плотности. Поэтому, чтобы получить надежные результаты и усреднить скрытые параметры, необходимо исследовать как можно большее количество образцов по сравнению с требованиями к количеству образцов при стандартных испытаниях неячеистых материалов. Кроме того, поскольку в ячеистых материалах характерная длина макроскопической неоднородности находится иногда в миллиметровом диапазоне, то размеры образцов при механических испытаниях, возможно, придется увеличить по сравнению с существующими стандартами [328].

Различные механические испытания можно разделить по следующим признакам:

Вид прилагаемой нагрузки: одноосная, двуосная, многоосная, гидростатическая. Одноосные испытания до сегодняшнего дня являются

стандартными для большинства экспериментальных работ по определению механических свойств ячеистых материалов. Только сравнительно недавно были выполнены многоосные испытания: с двумя перпендикулярными осями сжатия в работе [51] и с одной осью сжатия в комбинации с гидростатическим сжатием в работе [71].

Способ нагружения: сжатие, растяжение, сдвиг, изгиб, кручение. Наиболее часто выполняют испытания *на сжатие*, т.к. для этих целей необходимы образцы простой кубической формы и не требуется зажимных приспособлений для образца. Испытания *на растяжение* выполняют или с кубическими образцами или с образцами в форме собачьей кости. Для испытаний *на сдвиг* требуется один или два плоских листа ячеистого металла, прижатых к двум или трем стальным пластинам. Испытания *на изгиб* могут быть выполнены в трех - или четырехточечной конфигурации. Необходимо тщательно подходить к выбору опорных роликов и роликов, передающих усилие, т.к. локальные углубления могут приводить к неверным результатам. При испытании пен с закрытыми внешними оболочками следует принимать в расчет тот факт, что они оказывают существенное влияние на результаты испытаний.

Временная зависимость нагружения: постоянная нагрузка, медленно увеличивающаяся (квазистатическая, $\epsilon \approx 10^{-3} \text{ с}^{-1}$), динамическая, циклическая. Большинство работ, найденных в литературе, проведены в квазистатических условиях. Высокие скорости деформации могут быть реализованы в испытаниях на вертикальных опорах (до 100 с^{-1}), в испытаниях раскалывающим ударным стержнем Гопкинсона (до $5 \times 10^3 \text{ с}^{-1}$) [158 157] или в баллистических испытаниях (до 10^5 с^{-1}) [158]. Испытания на усталость металлических пен легче проводить по схеме нагружения в режиме сжатие-сжатие по тем же самым причинам, которые относятся к режимам нагружения при квазистатических испытаниях, однако, проводились испытания также в режимах растяжение-сжатие, растяжение-растяжение и циклического изгиба с подготовкой и фиксированием соответствующих образцов. Если разрушение происходит при сжатии, проблема заключается в идентификации точки, при которой происходит разрушение. Можно определить критическую деформацию как критерий разрушения [160] или точку перегиба на кривой зависимости деформации от числа циклов [52]. Испытания на ползучесть выполняют при заданных постоянных нагрузках.

Другие механические испытания включают испытания с разрушением надрезанных образцов для определения ударной вязкости и определения работы разрушения по величине отпечатка (углубления) от удара падающего индентора (бойка) с различной конфигурацией его наконечника [345]. Для сэндвич-структур с ячеистой сердцевиной существуют технологические испытания определения качества соединения между лицевыми сторонами и внутренней частью, такие как испытания на расслаивание с использованием аналога машины с барабаном для обдирки коры (ASTM D1781). Процессы при механической деформации в металлических пенах также можно проследить, записывая акустическую эмиссию при разрушении стенок ячеек

[346], причем этот метод является дополнительным к обычным методам измерения деформации.

3.2.3. Коррозионные испытания

На сегодняшний день не существует строго установленных стандартов для коррозионных испытаний ячеистых металлов. Обычно применяют стандартные испытания, принятые для других целей, например, для проверки автомобильных деталей и узлов. Сэндвич-структуры со вспененной алюминиевой сердцевинкой испытывались по семидневной программе из 10 циклов, включающей 24-х часовое воздействие на объект диспергированного в воздухе аэрозоля соли, выдерживание в течение 4 суток при переменной влажности и в течение двух суток при комнатной температуре и нормальной влажности (23°C, 50%) [50].

4. Применение ячеистых металлических материалов

4.1. Общее обсуждение

Ячеистые металлические материалы находят все большее применение во многих областях. Решение вопроса о том, можно ли подобрать пористый металл или металлическую пену, пригодные для решения той или иной задачи, зависит от многих условий, суммированных ниже следующими ключевыми словами:

(i) морфология: она определяет необходимый тип пористости (открытая или закрытая); величину необходимых размеров пор; диапазон желательной пористости; требуемую величину общей внутренней площади поверхности ячеистого материала;

(ii) металлургия: она определяет требуемый тип металла или сплава или его микроструктурное состояние;

(iii) обработка: она определяет возможность придания формы пене или ячеистому телу, а также возможность получения композитов путем соединения заготовки из пены и обычными металлическими листами и профилированными деталями;

(iv) экономика: она определяет исход решения спорных вопросов стоимости изготовления продукта и возможной выгоды его массового промышленного производства.

Первый пункт имеет решающее значение для любой оценки применения ячеистых металлических материалов. Часто требуется, чтобы ячеистый материал являлся проницаемым для жидкости или газа. При этом могут потребоваться различные степени "открытости": от "очень открытых" для высокоскоростного потока газа или жидкости до "полностью закрытых" для применения в конструкциях, несущих нагрузку, и необходимо подбирать соответствующие материалы, удовлетворяющие этим условиям. Рис. 43 показывает, какие виды пористости требуются в различных прикладных областях применения (более подробно эти области будут обсуждены в

следующих разделах). Обычно различают "функциональное применение" и "применение в конструкциях", хотя различие между этими двумя понятиями является довольно условным.

Также важен вопрос, из каких металлов или сплавов может быть изготовлен данный тип ячеистой структуры. Детали конструкций, несущие нагрузку, должны быть легкими, иначе их можно бы было изготовить из обычных компактных металлов или сплавов. Поэтому для таких применений предпочтение отдается алюминиевым, магниевым или титановым пенам или соответствующим пористым металлам. В медицине предпочитают использовать титан из-за его совместимости с живой тканью. Нержавеющую сталь или титан применяют при работе в агрессивных средах, а также при высоких температурах.

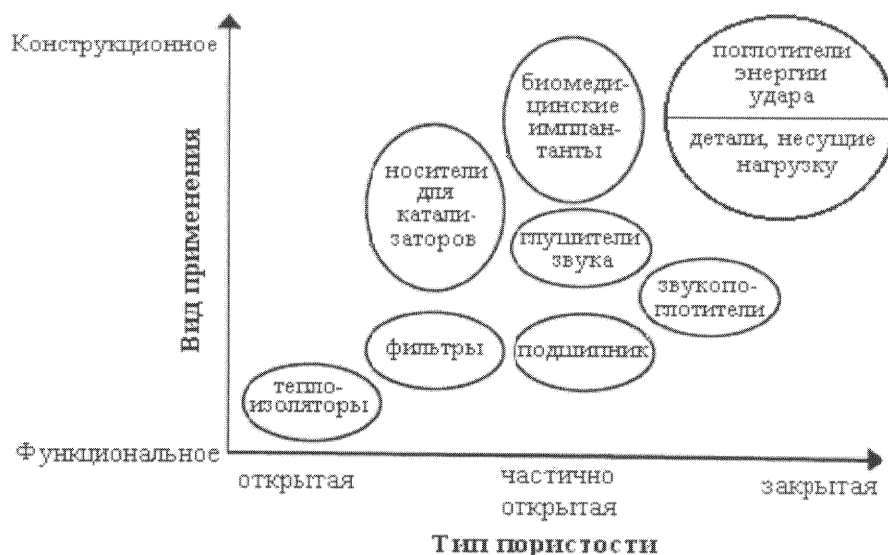


Рис.43. Применения ячеистых металлов, классифицированные по требуемой степени "открытости", а также в зависимости от того, преобладает ли функциональное применение или применение для изготовления конструкций.

Наконец, нужно рассмотреть вопросы технологии и стоимости (выпуска готового продукта) [347,348]. Необходимо иметь в своем распоряжении технологию переработки выбранного ячеистого металла в деталь с заданной формой и для ее последующей установки в состав какого-то механизма или транспортного средства. Технология производства ячеистого металла будет бесполезной, если требуемый компонент нельзя изготовить по разумной цене.

В следующих двух разделах обсуждается применение ячеистых материалов. Во многих случаях представлены концепции применения, которые все еще находятся на стадии проверки практикой. Далее представлено применение ячеистых металлов *в конструкциях* (главным образом применение пен с закрытыми ячейками). После этого обсуждено *функциональное* применение, требующее материалов с открытой пористостью.

4.2. Применение пенометаллов в качестве конструкционных материалов в различных областях промышленности

4.2.1. Автомобилестроение

Увеличивающиеся требования к безопасности автомобилей приводят во многих случаях к их высокому весу. Это противоречит дополнительным требованиям, связанным с низким расходом топлива, вынуждающим принимать дополнительные меры по снижению веса. Кроме того, особенно в Европе и в Японии, предпочтительными являются автомобили с кузовом небольшой длины. Однако, длина их кузова не должна уменьшаться за счет размеров пассажирского салона. Поэтому для сохранения комфорта салона делаются попытки введения новых компактных двигателей или уменьшения других составных частей автомобиля. Это создает новые проблемы, связанные с рассеянием тепла в моторном отсеке, т.к. составляющие узлы автомобиля расположены очень близко друг к другу и со снижением уровня безопасности для человека в автомобиле при аварии вследствие уменьшения длины демпфирующих зон разрушения. Наконец, необходимость снижения уровня шума в автомобилях привела к появлению требования по использованию новых звукопоглощающих материалов.

Пенометаллы обеспечивают возможное решение некоторых из этих проблем.

Рис.44 обобщает применение пенометаллов, в основном — алюминиевой пены, по трем различным функциональным назначениям в автомобильной промышленности. Каждый круг представляет одну конкретную область функционального назначения, а в прямоугольниках представлена информация о свойствах пены, которые определяют преимущества для использования в данной области. Идеальным применением была бы такая деталь, которая выполняла бы функцию панельной обшивки, поглощала бы ударные нагрузки в условиях аварии и выполняла бы еще и функции звуко- и теплопоглощения (это сочетание для идеального выполнения нескольких функций показано на рис.44.). Конечно, такое многофункциональное применение найти трудно, и зачастую приходится довольствоваться использованием детали из пены, сочетающей в себе два функциональных значения, например, когда структурная легкая панель в конструкции служит одновременно и звукопоглотителем.

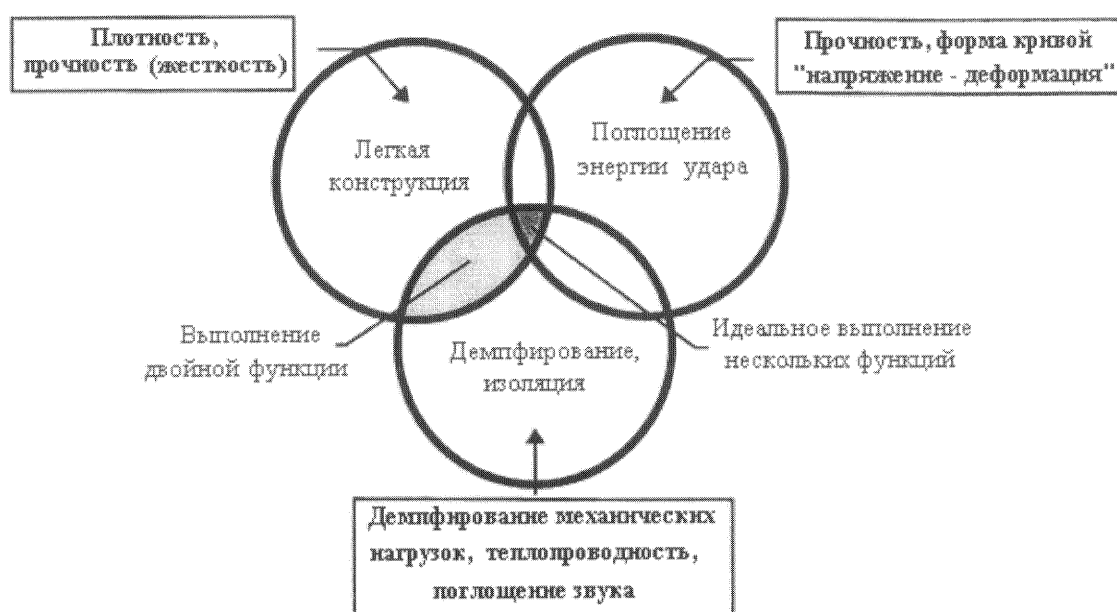


Рис. 44. Основные области применения металлических пен в конструкциях для автомобильной промышленности

4.2.1.1. Легкие конструкции

Применение металлических пен в лёгких конструкциях зависит от двух свойств: наличия области обратимой квазиупругой деформации и высоким значением отношения жесткости к массе. Последнее свойство легко понять, рассмотрев следующий пример. Известно, что жесткость плоской панели прямопропорциональна Eh^3 , где E – модуль Юнга материала, а h – толщина панели. Предположим, что различные панели, изготовленные из вспененных материалов различной плотности, имеют одинаковый вес на единицу площади. В первом приближении модуль Юнга E прямопропорционален квадрату плотности пены ρ , в то время как $h \sim \rho^{-1}$. Отсюда следует, что жесткость плоской панели заданного веса пропорциональна ρ^{-1} , и это означает, что пена, для которой, например, величина плотности составляет лишь пятую часть от плотности компактного металла, имеет величину отношения жесткости к массе в пять раз выше, чем для соответствующей панели того же веса. Принятая квадратичная зависимость модуля Юнга E от плотности отражает большинство эмпирических наблюдений для полуфабрикатов дефектной пены. Для совершенной пены с закрытыми ячейками, ожидается линейная зависимость модуля Юнга E от плотности ρ . Если будет возможность изготовить пены с меньшим количеством дефектов, то можно будет ожидать более высоких значений модуля [264] и получить более высокий выигрыш от увеличения жесткости при использовании таких панелей.

Для панелей из сэндвич-структур весовое преимущество еще больше по сравнению с простыми листами из пены без облицовки, но для определения оптимальной толщины лицевых слоев и наиболее подходящей плотности вспененной сердцевины необходимо выполнить соответствующую оптимизацию конструкции [1,10,265].

Однако, анализ конструкций с минимальным весом и оптимальной жесткостью является более сложным, чем анализ предложенный для простого сравнения вспененных и плотных (невспененных) листов материала. В действительности конструкции на основе пены должны вступать в соперничество с традиционными конструкциями, которые уже имеют оптимальные распределения массы. т.е. алюминиевые пены необходимо сравнивать с экструдированным алюминием, сэндвич-конструкции с пеной внутри – с конструкциями из сотового алюминия или с жесткими вафельными панелями [10,264,266]. Однако, конструкций на основе пены могут казаться более предпочтительными по следующим причинам:

(i) из них можно легче изготовить детали заданной сложной формы (и поэтому они могут быть дешевле). Сотовые алюминиевые структуры превосходят плоские пенные панели в жесткости на единицу веса, но трехмерные соты очень трудно и дорого изготавливать в отличие от сэндвичевых пенных панелей;

(ii) конструкции на основе пены являются более устойчивыми к повреждениям, и их поведение при разрушении носят менее катастрофический характер;

(iii) металлические пены обладают дополнительными полезными свойствами, такими как термостойкость и хорошее звукопоглощение.

Легкие, жесткие конструкции из алюминиевой пены – предпочтительно в виде сэндвичевых панелей могут помочь в уменьшении веса автомобиля. Например, материал для изготовления капота, крышки багажника и раздвижных конструкций крыши кузова, должен обладать высокой жесткостью для предотвращения деформации при скручивании и исключения вибрации этих частей. В проекте, выполненном фирмой Даймлер-Крайслер (DaimlerChrysler), задняя промежуточная панель, изготовленная из алюминиевой пены (плотность $0,6 \text{ г/см}^3$, без лицевых обкладок), сравнивалась с деталью, изготовленной методом литья в постоянные формы при высоком давлении. Было найдено, что при одинаковом весе жесткость при кручении в обоих случаях одинакова [267]. Немецкий изготовитель-фирма Карманн (г.Оснабрюк) в настоящее время проводит испытание трехмерных сэндвичеобразных панелей для автомобилей с откидным верхом и для гоночных автомобилей, где нахождение оптимального соотношения между жесткостью и весом является сложной задачей. Две алюминиевых сэндвич-детали, одна – для передней перегородки, а другая – для задней стенки, заменяют традиционные детали из штампованных стальных листов, и таким образом, сокращают вес на 25% и, одновременно в одном случае увеличивают жесткость на 700% [125 126]. Поскольку сэндвич-конструкции из алюминиевой пены являются более дорогими, чем обычные штампованные стальные листы, то они не смогли бы найти широкого применения в автомобильной промышленности, несмотря на достигнутое сокращение веса, если бы при этом была осуществлена одна только простая замена одного материала на другой. Однако, используя очень

жесткие сэндвич-конструкции вместо традиционных листов, можно ввести новые принципы конструирования для изготовления кузова транспортного средства. Следствием этого оказывается возможность заметного уменьшения количества сборочных единиц и узлов, необходимых для автомобиля, в случае применения технологии алюминиевых сэндвич-структур, при этом снижается стоимость конструкции в целом.

4.2.1.2. Поглощение энергии при ударе

Для поглощения энергии используют пластический необратимый режим деформации. Многие ячеистые тела являются превосходными поглотителями энергии вследствие их деформации при почти постоянном уровне напряжения в широком диапазоне нагрузок [1]. Металлические пены могут выигрывать у обычных пен, например полимерных, из-за их высокой прочности. Алюминиевые пены еще более привлекательны из-за их низкого уровня отдачи в условиях динамического удара, который составляет менее 3% меньше по сравнению с 15% для пены полиуретана [91]. Вследствие этого важной прикладной областью применения ячеистых металлов вообще, а, в частности, металлических пен, является поглощение энергии при ударе.

Правила техники безопасности транспортных средств требуют, чтобы энергия столкновения была рассеяна в определенных областях конструкции для защиты салона с пассажирами. Наблюдаются различные скорости ударного воздействия. При низкоскоростном режиме (от ≤ 3 до ≤ 10 км/час в зависимости от нормативов производителя) происходит обратимое поглощение энергии удара упругими материалами или гидравлическими демпферами ударов. В промежуточном режиме (до 20 км/час) срабатывает контролируемая, запрограммированная деформация некоторых определенных аварийных элементов конструкции, так называемых "аварийных коробок" [268]. Такие элементы могут быть простыми круглыми алюминиевыми трубами и их довольно легко заменить после аварии, что обеспечивает ремонтпригодность конструкции. Только при ударе в высокоскоростном режиме получают безвозвратно искореженное шасси, что приводит к серьезным повреждениям транспортного средства. Различают такие типы аварии как лобовое столкновение, боковое столкновение, наклонный (косой) удар, переворот кувырком и т.д. [269]. Для каждой ситуации поглотитель энергии должен выполнять свою функцию определенным способом, но можно выделить некоторые общие критерии хорошего поглотителя энергии удара:

(i) характеристики энергопоглощения при ударе должны приближаться, по возможности, к идеальным. Это означает, что как правило, требуется, чтобы поведение материала под нагрузкой описывалось бы некоторой прямоугольной зависимостью "удельная нагрузка-деформация", т.е. текучесть материала или его пластическая деформация должны наблюдаться после того, как достигнута соответствующая предельная удельная нагрузка, а далее увеличение степени пластической деформации должно соответствовать постоянной величине удельной нагрузки, отвечающей положению "плато" на

соответствующей прямоугольной зависимости "удельная нагрузка-деформация";

(ii) высокая поглотительная способность по отношению к энергии удара на единицу объема, длины или массы;

(iii) изотропный характер поглощения энергии, т.е. хорошие абсорбционные характеристики, по крайней мере, для широкого диапазона направлений ударного воздействия.

Гомогенный пеноалюминий и синтактические ячеистые металлы обладают весьма неплохими поглотительными свойствами: они демонстрируют довольно длинный диапазон "плато", хотя часто наблюдается некоторый нежелательный остаточный наклон кривой "удельная нагрузка-деформация" [269]. Кроме того, поглощение энергии является вполне изотропным [154] за исключением тех случаев, когда промышленные методы получения приводят к анизотропии свойств материала. Однако, большинство исследований по применению концентрирует внимание на тех ячеистых металлах, которые имеют плотную внешнюю оболочку или лицевые стороны-обкладки, окружающие вспененную сердцевину. Причина этого состоит в том, что кроме преимуществ улучшенной защиты от коррозии, такие сложные структуры могут иметь еще и улучшенные характеристики поглощения энергии удара, в отличие от непокрытых обкладками пен. Влияние взаимодействия между пеной и внешними обкладками можно увидеть на рис. 45, на котором сравнивается сжатие двух алюминиевых пен. Одна пена имеет плотные внешние обкладки, поверхности которых параллельны прикладываемой силе, тогда как другая пена покрытия не имеет. Очевидно, что внешние обкладки приводят к лучшему поведению "плато" на диаграмме сжатия и к более высоким удельным нагрузкам на уровне "плато", хотя соответствующий образец пены, нагружавшийся силой, параллельной плоскостям обкладок, имел более низкую плотность. Эффект может стать еще заметнее, если заполненные пеной профилированные секции сравнивать с пустыми профилированными секциями [53,54,154].

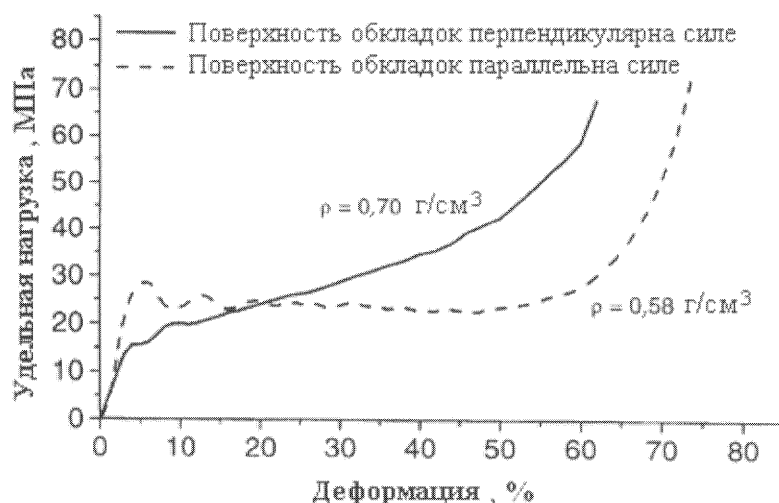


Рис.45. Сравнение кривых удельная нагрузка-деформация для пен, у которых внешние поверхности плотных обкладок ориентированы в разных направлениях относительно прикладываемой силы

Заполнение профилированных секций пеной значительно изменяет характер деформации и вид разрушения полых профилированных секций, и поэтому может приводить к дополнительному положительному эффекту в отношении поглощения энергии удара и снижения веса. С другой стороны, использование профилированных секций приводит к некоторой анизотропии. Если рассматривать профилированные секции, то необходимо различать их поведение при осевом нагружении [53,54,154,166,167,268,270-276] и их поведение при изгибе [165,276].

Примеры применений, где заполненные пеной конструкции разрушаются аксиально, включают "аварийные коробки" для уменьшения последствий лобовых столкновений или защитные устройства от последствий аварий с движущимися грузовиками, тогда как в разрушения в режиме изгиба наблюдаются для арматуры типа А или В или для других приспособлений защиты от боковых ударов.

4.2.1.3. Ограничение шума

Полимерные пены часто используются для снижения шума. Следовательно, было вполне очевидно, что металлическую пену можно использовать для снижения шума [278]. Существуют различные пути применения, в которых алюминиевые пены смогли бы помочь в уменьшении шума, но при этом необходимо видеть отличия при их различном функциональном назначении. Прежде всего, существуют проблемы, связанные с нежелательными колебаниями конструкций (механизма, транспортного средства, и т.д.), которые вызывают разрушения и эмиссию звуковых волн (шума). Так как модуль Юнга металлических пен значительно ниже по сравнению с соответствующим обычным невспененным металлом, резонансная частота структуры металлической пены будет сдвигаться в область более низких частот по сравнению с обычной конструкцией. Кроме того, коэффициент потерь для пен выше, чем коэффициент потерь для обычного металла, по крайней мере, в 10 раз, из-за чего колебания будут демпфироваться, т.е. преобразовываться в тепло, более эффективно [151-153]. Вследствие этого, пены дают возможность решить проблему шумов, хотя нужно отметить, что коэффициент потерь для металлических пен все еще намного меньше по сравнению с его значением для большинства полимеров.

Иногда, однако, задача заключается в ослаблении падающих или возникших случайно звуковых волн. Пассажиры должны быть защищены от внешних шумовых источников, а звук, исходящий от создающих шум механизмов (например, автомобиля), не должен беспрепятственно распространяться в окружающую среду. Звуковая волна, падая на пористый материал, частично поглощается, а частично входит в материал конструкции. Часть вошедшей волны поглощается, а оставшаяся часть волны передается далее. Кроме того, могут возникать резонансные колебания. Отраженная волна ослабляется за счет гибельной для волны интерференции всякий раз, когда поверхность пены закрыта не полностью. Однако, если средний размер

ячейки находится в миллиметровом диапазоне, то этот механизм ослабления будет эффективен только для довольно высоких частот (порядка >300 кГц). Звук, входящий в материал конструкции, особенно заметно уменьшается, если поры пены взаимосвязаны маленькими каналами. Звуковая волна продавливает воздух через эти каналы много раз в секунду. Так как воздух протекает через эти каналы, трение между воздухом и стенками ячеек, а также турбулентный поток рассеивают энергию звуковой волны. С учетом всех действующих механизмов металлическая пена может поглощать до 99 % шума для некоторых диапазонов частот (обычно в диапазоне от 1 до 5 кГц). Воздушный зазор между пеной и стенкой, закрепленной за слоем пены, приводит к понижению частоты, если структура ячеек – открытая.

Поглощение и изоляция звука являются очень важными проблемами в автомобильной промышленности. Наиболее часто встречающаяся проблема заключается в том, что звукопоглощающие элементы конструкции должны быть одновременно термостойкими и способными к несению нагрузки. Решением этой проблемы могла бы стать комбинация из полимерных пен и алюминиевой фольги, но зачастую она нежелательна. Алюминиевые пены, полученные по современным технологиям, не обладают очень хорошими звукопоглощающими свойствами из-за преобладания закрытой пористости, но, по крайней мере, являются термостойкими и способными нести нагрузку. Если бы удалось улучшить их звукопоглощающие свойства, то из этих пен можно было бы получать превосходный термостойкий звукопоглотитель.

Пену типа "Alporas" (см. раздел 2.1.1) используют в качестве материала для изготовления звукопоглощающих панелей, размещаемых вдоль автострад и на других загруженных дорогах Японии для уменьшения шума от движения автомобилей, а также в железнодорожном туннеле Синкансен для уменьшения звуковых ударных волн [67]. Для этой цели листы пены после вспенивания прокатывают и разрезают [65]. Уменьшение толщины от 10 до 9 мм приводит к образованию достаточного количества трещин и других дефектов в стенках ячеек, которые существенно улучшают поглощение звука, хотя все эти улучшенные свойства еще несопоставимы со свойствами широко используемых звукопоглощающих материалов (основанных на полимерных пенах или стекловате) [66]. Однако, комбинация звукопоглотительных свойств с такими характеристиками, как огнеупорные свойства, стойкость к климатическим воздействиям, отсутствие выделения вредных газов при пожаре и довольно легкая очистка гладких поверхностей панелей при эксплуатации, делают панели из пены "Alporas" вполне подходящим материалом. Панели из пены используют также и в качестве внутренних звукопоглотителей в вестибюлях общественных зданий. Кроме того, интересный внешний вид металлической пены также, возможно, является важным аспектом для такого применения.

4.2.2. Аэрокосмическая промышленность

Подход к легким конструкциям из пенометаллов в аэрокосмическом и автомобильном производстве очень схож. В аэрокосмической промышленности замена дорогих сотовых конструкций их аналогами из вспененных алюминиевых листов или сэндвичевыми панелями из металлической пены может привести к более эффективным эксплуатационным качествам при меньших затратах. С одной стороны, ведется поиск материалов с более высокой стойкостью к изгибу и повреждениям [206], тогда как с другой стороны важным преимуществом вспененных конструкций является изотропия их механических свойств (без лицевых сторон-обкладок или с ними) и возможность изготовления конструкций из композитов без клеевых соединений. Последнее обстоятельство порождает и более устойчивое поведение конструкции в условиях пожара, чтобы конструкция сохраняла свою целостность максимально долго. Компания "Боинг" (США) провела испытания по использованию больших сэндвичевых деталей из титановой пены, полученных методом "замуровывания" газа (см. Раздел 2.2.2 и рис. 27) и алюминиевых сэндвичевых конструкций со вспененной алюминиевой сердцевинкой для изготовления лонжерона хвостовой фермы вертолетов. Важное преимущество таких сэндвич-структур состоит в возможном изготовлении деталей с изгибами и даже трехмерной конфигурации в отличие от обычных плоских сотовых конструкций. По этой причине производители вертолетов пытаются использовать детали из алюминиевой пены, чтобы заменить ими некоторые из сотовых деталей, используемых в настоящее время.

Дальнейшие области применения пенометаллов включают в себя использование для изготовления деталей конструкции в турбинах, где важным фактором является повышенная жесткость в сочетании с улучшенными демпфирующими свойствами. Уплотнения между различными частями двигателя также делают из пористых металлов. Лопасть турбины при ее первом включении вырезает нужный контур в ячеистом материале в начале работы и создает, таким образом, почти герметичное и непроницаемое для газа уплотнение.

В космической промышленности алюминиевую пену используют для изготовления элемента конструкции, поглощающего энергию при ударе для посадочного модуля космического корабля, а также арматуры для конструкций, несущих нагрузку на спутниках, вместо материалов, которые создают проблемы при эксплуатации в неблагоприятных условиях окружающей среды в космосе (изменения температуры, вакуум и т.д.). Для космической промышленности рассмотрено использование очень реакционноспособных, но очень легких пеносплавов, таких как Li-Mg [279,280]. Эти сплавы обычно не применяют из-за их высокой реакционной способности, однако, они могут быть пригодны при эксплуатации в вакуумной среде.

4.2.3. Кораблестроение

Легкие конструкции нашли применение в судостроении. Современные пассажирские суда могут быть полностью построены из деталей, изготовленных из экструдированного алюминия, алюминиевых листов и алюминиевых сотовых конструкций. Большие алюминиевые сэндвичевые структуры с пеноалюминиевой сердцевиной имеют все предпосылки для того, чтобы стать важной составной частью в некоторых таких конструкциях для кораблестроения. Если лицевые стороны-обкладки сэндвич-структуры соединить с сердцевиной очень эластичным полиуретановым клеем, то получаются легкие и жесткие структуры с превосходными демпфирующими свойствами даже при низких частотах, возникающих в судах. Для судостроения важно, чтобы соединения со слоистыми металлопенными деталями были выполнены эффективным способом, и в процессе строительства судна были использованы подходящие элементы закрепления [281]. Для ячеистых материалов был выявлен также и ряд их применений при строительстве военных кораблей, которые включает в себя изготовление платформ подъемников, конструкционных переборок, платформ для антенн и замыкаемых ящиков для пиротехнических изделий [282].

4.2.4. Железнодорожный транспорт

Применение металлических пен в оборудовании для железнодорожного транспорта обусловлено теми же причинами, что и их применение в автомобильной промышленности согласно трем основным областям применения. Проблема поглощения энергии удара особенно важна для легких железнодорожных составов и трамваев, работающих в городах, где могут произойти столкновения с автомобилями. Японские поезда оборудованы блоками пены "Alporas" с объемом $2,3 \text{ м}^3$ для улучшения поглощения энергии при ударе [77]. Преимущества применения легких вспененных элементов в конструкциях на железнодорожном транспорте те же самые, что и в автомобилях, однако, в случае железнодорожного транспорта составные части конструкции железнодорожных вагонов имеют намного бóльшие габариты.

4.2.5. Строительство

Металлические пены нашли широкое применение и в строительстве. Поскольку современные офисные здания строят из бетона, то их фасады украшают отделочными плитами, которые закрывают бетон и улучшают внешний вид здания. Эти плиты должны быть легкими, прочными и огнестойкими. Весьма часто тонкие плиты из мрамора или других декоративных горных пород сначала скрепляют с подложечными плитами, которые затем и фиксируют креплениями на стенах здания. Такие подложечные плиты для крепления могут быть изготовлены из алюминиевой пены вместо некоторых дорогих сотовых креплений, используемых в настоящее время. Ограждения балконов должны удовлетворять строгим правилам техники безопасности. Некоторые материалы, используемые на

сегодняшний день, являются слишком тяжелыми и создают проблемы при пожарах. Если бы их можно было заменить образцами из алюминиевых пен, то можно было бы решить многие проблемы.

Алюминиевые пены или панели из пены могут быть очень полезны в сокращении энергии, потребляемой подъемниками. Из-за многократных циклов ускорения и замедления, а также из-за высокой скорости современных подъемников, важным вопросом является возможность изготовления более легких конструкций. Однако, правила техники безопасности зачастую препятствуют применению излишне легких конструкций. Так как пеноалюминий может действовать одновременно и как поглотитель энергии и как жесткий конструкционный материал, то его применение в этом случае кажется многообещающим.

Для изготовления легких дверей запасных пожарных выходов и люков можно использовать такие полезные свойства как относительно низкая теплопроводность и огнестойкость ряда малоплотных алюминиевых пен. Хотя температура плавления алюминия довольно низка ($<660^{\circ}\text{C}$), пеноалюминий проявляет удивительную стойкость к открытому пламени из-за сильного окисления металла без его воспламенения в таких условиях [282,283].

В строительстве могут быть использованы также и свойства прекурсора, способного к вспениванию, который используется в методе плавления порошковых прессовок, т.е. прекурсора из смеси металлического порошка и порообразователя (см. Раздел 2.1.3). Например, для закрепления розеток в бетонной стене кусок прекурсора на основе алюминия вставляют в просверленное отверстие вместе с розеткой. Вспениваемый прекурсор затем локально нагревают, что приводит к его расширению. Полученная таким образом пена будет заполнять пространство между бетоном и розеткой и обеспечит достаточно прочную связь при условии, что полученный пенометалл будет иметь достаточную плотность.

4.2.6. Машиностроение

Существуют некоторые интересные области применения металлических пен в машиностроении. Жесткие детали из пены или заполненные пеной колонки с уменьшенной инерцией и увеличенной демпфирующей способностью могут заменить детали типа осей, валов или платформ, изготавливаемых в настоящее время из обычного металла. Такие детали можно использовать в сверлильных или фрезерных станках, а также в печатных машинах. Применение ячеистых материалов для изготовления кожухов для небольших ручных дрелей или точильных машинок вместо традиционных материалов для изготовления кожухов является выгодным из-за увеличенной внутренней демпфирующей способности. Использование пенометаллов для изготовления кожухов машин с электроприводом добавило бы к спектру полезных свойств материала еще и экранирование от электромагнитного излучения. Внутреннюю основу шлифовальных кругов можно также изготовить из алюминиевой пены с нанесением шлифующего

материала на периферийную часть круга. Внутреннее демпфирование шлифовального круга помогло бы избежать вредных колебаний, а частично открытая пористость могла бы служить коллектором-сборником для шлифовальной пыли. Алюминиевая пена также использовалась для изготовления опорных стоек зеркал телескопа [175 284]. Другие области применения требуют сверхлегких плавучих материалов с высокой прочностью для изготовления специальных поплавков, измеряющих уровень жидкости в сосудах, работающих в горячих или агрессивных средах. Поскольку пену полимера нельзя применять для этих целей, то используют конструкции со сварными поплавками, изготовленными из тонкой титановой фольги с магнитной системой, позволяющей определить местоположение поплавка. Такие титановые поплавки очень дороги, однако, их можно заменить поплавками из алюминиевой пены с плотной внешней оболочкой, которая одновременно будет вмещать в себя и магнитную систему, а также будет противостоять внешнему давлению и создавать необходимую плавучесть.

4.2.7. Спортивный инвентарь

Изготовление спортивного инвентаря – перспективное направление для применения новых материалов из-за высоких цен на готовый инвентарь, общепринятых в данной отрасли. Однако, автору известно немного предложений по использованию ячеистых металлов в данном направлении. Единственный пример – изготовление футбольных щитков для защиты голени, где может быть использована хорошая способность алюминиевой пены к поглощению энергии удара.

4.2.8. Биомедицинская промышленность

Титан или кобальт-хромовые сплавы используют для протезов или зубных имплантантов из-за их биосовместимости. Для гарантии срастания тканей, обычно наносят пористый слой того же самого или другого биологически совместимого материала на протез методом металлизации термическим распылением или другими методами. С другой стороны, для протезов можно использовать пористый титан или пену из титана и добиться правильного выбора в распределении плотности, которое удовлетворяет требованиям по прочности, упругости и т.д. для таких изделий Нет единого мнения по вопросу о том, какова должна быть конструкция имплантантов, для того, чтобы обеспечить им максимальное сопротивление износу и оптимальное выполнение ими своего функционального назначения. Согласно одному мнению, величина модуля для материала зубных имплантантов должна соответствовать величине модуля для костей челюсти. Зная соотношение между модулем и плотностью металлической пены, можно легко изготовить имплантанты с тем значением модуля, который подходит для данного применения, обеспечивающие биологическую совместимость и стимулирующие врастание кости в открытую пористость имплантанта [215]. Магниево-алюминиевые пены можно использовать в качестве разлагаемых

биологическими процессами имплантантов, которые способны выдерживать нагрузки, пока кость еще не выросла, причем продукты биоразложения имплантанта постепенно поглощаются в органах тела человека на более поздней стадии повторного выздоровления [216].

4.3. Ячеистые металлы для функциональных применений

Пористые спеченные металлы, полученные традиционными методами порошковой металлургии, имеют широкий круг применений [199,200,285]. В настоящем разделе рассмотренные области применения ячеистых материалов с определенной долей открытой пористости.

4.3.1. Фильтрация и сепарация

Существуют два типа фильтров: фильтры, которые задерживают и отделяют твердые частицы или волокна, распределенные в жидкости в виде суспензии, и фильтры, которые задерживают твердые или жидкие частицы, диспергированные в газе в виде дыма или тумана соответственно. Примерами первого типа фильтров являются фильтры для очистки повторно-утилизируемых расплавов полимеров, для удаления частиц дрожжей из пива или для очистки масла от примесей твердых частиц. Второй тип включает фильтрацию выхлопных газов дизельного двигателя или удаление паров воды из воздуха в воздухопроводах. Важными характеристиками фильтров являются хорошая фильтрующая способность тонкой очистки, хорошее удерживание частиц, способность обеспечить требуемый уровень очистки от них, хорошие механические свойства и коррозионная стойкость, а также приемлемая стоимость. Некоторые из ячеистых материалов, описанные в настоящей статье (см. Разделы 2.1.4, 2.2.4, 2.3, и 2.4), обладают комбинацией свойств, которой не обладают традиционные пористые металлические материалы, полученные методом порошковой металлургии, и поэтому они могут рассматриваться в качестве дополняющих к этим традиционным материалам.

4.3.2. Теплообменники и холодильники

Пены с высокой теплопроводностью на основе меди и алюминия можно использовать в качестве материала для изготовления теплообменников. В этом случае необходимы структуры с открытой пористостью, подобные тем, о которых подробно рассказано в разделах 2.1.4 и 2.2.5 [286]. Тепло можно отводить или подводить газом или жидкостью, пропуская их через пену, с одновременным охлаждением или нагреванием пены. Вследствие открытой пористости перепады давления могут быть сведены к минимуму. Пример такого применения – компактные радиаторы для охлаждения микроэлектронных устройств типа компьютерных чипов с высокой плотностью рассеиваемой мощности теплового источника или для элементов силовой электроники. В настоящее время стандартным решением задачи в таких случаях является использование набора из штырьковых

электровводов, выполненных в форме радиаторных пластин (fin-pin arrays). Пенометаллы могут лучше выполнять свои функции в теплообменниках, если они подобраны таким образом, чтобы максимально возможная удельная теплопроводность сочеталась с максимально низким сопротивлением потоку. Так как указанные требования противоречат друг другу, то необходимо найти компромисс. Вопросы проектирования теплообменников подробно рассмотрены в литературе [264 287].

Другая область применения ячеистых материалов с открытой пористостью – устройства с испарительным охлаждением. Высокая площадь поверхности, низкое сопротивление потоку и хорошая удельная теплопроводность некоторых материалов делают их весьма перспективными для использования в данной области.

4.3.3. Носители для катализаторов

Эффективность катализаторов очень сильно зависит от величины контактной площади поверхности между газом или жидкостью и катализатором. Из-за этого катализатор либо изготавливается в виде высокопористой структуры, либо, если это невозможно, наносится на другую пористую структуру, например, пористую керамику. Ячеистые металлы могут заменить пористую керамику, даже если они не в полной мере соответствуют требованиям к удельной площади поверхности, т.к. они обладают другими полезными свойствами, такими как высокая пластичность и теплопроводность. Одна из концепций в данной области применения заключается в приготовлении тонкой пластины из коррозионно-устойчивой металлической пены, заполнении прокаткой пластины из пены суспензией с добавлением каталитического соединения и, в конечном итоге, его отверждении при повышенных температурах [288]. Полученный катализатор имеет хорошее механическое сцепление, так что даже после многих температурных циклов слой катализатора не отстает от пенометаллической подложки-носителя. Одно из применений таких катализаторов – удаление оксидов азота (NO_x) из выбросов промышленных теплоэлектростанций.

4.3.4. Хранение и перемещение жидкостей

Одним из первых применений пористых металлических материалов, полученных методами порошковой металлургии, было их использование в самосмазывающихся подшипниках, в которых масло хранится в промежутках между частицами и медленно выступает наружу, заменяя использованное масло. Конечно, некоторые вышеописанные ячеистые материалы могут выполнять ту же функцию, однако они обладают преимуществом, заключающемся в большем объеме для хранения смазки по сравнению с традиционными деталями из пористых металлических материалов. Их применение не ограничивается пропиткой пористой детали маслом: можно сохранять в порах и затем медленно выделять воду при автоматическом поддержании влажности. Можно хранить в порах духи и давать им возможность медленно выделяться. Пористые катки или валики

могут удерживать в себе и распределять по поверхности воду или клей. Выделение жидкости может осуществляться за счет капиллярных сил или путем ее выдавливания на поверхность валиков. В конечном счете сильно открытопористые металлические структуры можно использовать для хранения жидкостей при постоянной и равномерной температуре в криогенных условиях. Кроме того, пена может уменьшить нежелательное движение жидкости в частично заполненных емкостях (при этом достигается подавление разбрызгивания) [10,175].

4.3.5. Контроль потоков жидкости

Пористые материалы можно использовать для контроля потоков жидкости и газа [200]. Известно, что ограничители потока, изготовленные методами порошковой металлургии, являются более надежными и точными, чем традиционные микрометрические краны. Вследствие того, что имеется возможность получить ячеистые металлы с различной долей открытых пор, путем специального подбора подходящего ячеистого металла можно выбрать правильные решения еще большего количества задач по их применению. Пенометаллы уже использовались в качестве выравнивателей потока в аэродинамических трубах [240] или в распределителях потока в вентилях [175].

4.3.6. Глушители звука

Компоненты для демпфирования звука, пульсаций давления или механических вибраций являются традиционными областями применения продуктов порошковой металлургии [200]. Материалы с определенной степенью открытой пористости могут применяться для глушения определенных частот с пропусканием при этом остальных. Резкие скачки давления, возникающие в компрессорах или пневматических устройствах, могут гаситься спеченными пористыми деталями. Такие материалы как пены, полученные методами литья по выплавляемым моделям (Разделе 2.1.4), или пены, полученные методами осаждения (Раздел 2.3), могут заменить традиционные материалы, используемые в деталях для глушителей звука по соображениям стоимости и эффективности [240].

4.3.7. Разбрызгиватели

Некоторые применения требуют, чтобы газ вводился в жидкость однородно и с постоянной скоростью. Примером такого применения является газирование напитков с помощью углекислого газа. Для этой операции необходима пористая деталь, которая создает достаточно маленькие пузырьки газа и обладают стойкостью к коррозии, теплу и удару. Использование пористых металлов может быть наилучшим решением по сравнению с использованием других материалов, таких как, например, пористая керамика.

4.3.8. Электроды батарей

Свинцовая пена может служить носителем активного материала в кислотосвинцовых аккумуляторных батареях взамен традиционных свинцовых решеток, что позволяет создать очень легкие электроды. Электрохимически активная пастообразная масса, содержащая очень мелкий порошок оксида свинца, может быть помещена в открытые поры свинцовой пены, где она будет находиться в контакте с электролитом (раствором серной кислоты). Свинцовая пена действует как высокопроводящая решетка и приводит к снижению внутреннего сопротивления батареи. Никелевые пены (см. Разделы 2.3 и 2.4) уже используются как электроды в пастовых перезаряжаемых никель-кадмиевых батареях, для которых могут быть достигнуты снижение веса и более высокая удельная энергия на единицу объема [245,289]. Пористые материалы порошковой металлургии с очень высокой площадью поверхности используются в топливных элементах [200,245].

4.3.9. Пламегасители

Ячеистые металлы с высокой теплопроводностью можно использовать для предотвращения распространения пламени в горючих газах. Пены с открытой пористостью, описанных в Разделе 2.3, показали свою пригодность для гашения пламени даже при его движении со скоростью 550 м/с и выше. На практике протяженные трубопроводы, транспортирующие горючие газы, защищают пламегасителями, установленными вблизи от возможных источников возгорания, а в случае возгорания пламя не может ускориться до высоких скоростей [240].

4.3.10. Применение в электрохимии

Никелевые пены используются в качестве материала для электродов в реакторах электрохимического синтеза. В электродах типа прессованных фильтров используется набор изолированных металлических пластин. Пластины разделены пластиковыми решетками, способствующими развитию турбулентности, и изолирующими мембранами. Если эти решетки заменить слоями ячеистого никеля с открытыми каналами (каждый слой соединить с одной из этих пластин), то поверхность электрода увеличится при сохранении содействия развитию турбулентности [290]. Используя такие методы, можно создавать более компактные реакторы. Никелевые пены можно также использовать для улучшения параметров каталитических процессов, таких как электрохимические окисление бензилового спирта с помощью NiOOH , который образуется при электрическом синтезе на никелевых анодах. При использовании блоков из никелевой пены в таких реакторах было продемонстрировано повышение их производительности [291].

4.3.11. Очистка воды

Ячеистые металлические материалы можно применять для снижения концентрации нежелательных ионов, растворенных в воде. В этом случае поток загрязненной воды пропускают через высокопористый ячеистый металл с открытой структурой. Ионы вступают в окислительно-восстановительную реакцию с металлом матрицы ячеистой структуры. Неэлектрическое восстановление ионов Cr (VI) литыми алюминиевыми пенами (см. Раздел 2.1.4) исследовано в работе [292].

4.3.12. Акустический контроль

Устройство для управления звуковой волной можно изготовить из линзо- или призмобразных деталей, из жесткого ячеистого материала, например, пенометалла. Звуковые волны будут направляться и передаваться этим акустическим устройством [293]. Кроме того, исследовано применение пен с закрытой пористостью в качестве переходных деталей с полным акустическим сопротивлением (импедансных адаптеров) в ультразвуковых источниках.

4.4. Ячеистые материалы для декоративного украшения и в искусстве

Как только пенометаллы стали широко известны, мысли об их применении начали будоражить воображение дизайнеров и художников. Главной задачей применения ячеистых материалов в декоративной или художественной области является создание ясного визуального или чувственного впечатления по сравнению с применением традиционных материалов. В качестве потенциального материала для изготовления ювелирных изделий предлагалось использовать пены на основе золота или серебра, чтобы создать небывалое впечатление и достичь большого объема украшения при достаточно небольшом его весе. Пеноалюминий использовали для создания оригинальной мебели, часов, ламп и т.д. [294]. При изготовлении мебели (кресел, столов) из пеноалюминия главную роль, конечно, играет механическая прочность, тогда как для многих других применений физические и механические свойства не столь важны. Дорогостоящие громкоговорители высокого качества также изготавливают из алюминиевой пены. Пена не только обеспечивает необходимую высокую жесткость и механическое демпфирование, но и внешний вид “хай-тека”, который может быть более привлекательным по сравнению с обычными материалами. Для материаловедов такие применения могут быть и не вполне удовлетворяющими их требованиям, что основывается на том факте, что этот материал просто “модный”, а любая мода имеет свойство быстро исчезать. Однако, поскольку цена материала не так важна для дизайнерских применений, данная область применения ячеистых металлов может дать хорошую возможность для разработки новых методов их получения.

4.5. Общие аспекты областей применения

Часто бывает так, что довольно трудно найти применение для нового материала. Это касается также и ячеистых металлов и металлических пен. Обсуждения в последние годы показали, что наиболее перспективными областями применения являются те из них, которые используют совместно различные свойства металлических пен. Если для применения в определенной области требуется только малый удельный вес материала, то вполне вероятно, что уже существует привычный и более дешевый материал. Однако, если малый удельный вес должен сочетаться с хорошими энергопоглощающими свойствами или термостойкостью, то конкурентоспособность металлических пен будет значительно возрастать. Поэтому каждая идея о новом применении материала в новой области начинается с рассмотрения существенных свойств, которые необходимы. После этого необходимо определить, существует ли ячеистый металл с необходимым набором свойств и есть ли привычный материал со сравнимыми свойствами. Если оба материала подходят для данной области, то необходимо рассматривать другие критерии, такие как стоимость, и только после этого можно будет решить: которому из материалов отдать предпочтение.

5. Заключение

Современные технологические достижения привели к увеличению числа освоенных процессов производства ячеистых металлов и сплавов. Получены открытая и закрытая морфология пор с относительными плотностями от 50 до 98%. В противоположность многим материалам, применявшимся ранее, ячеистые металлы в настоящее время можно получать с меньшими затратами, поэтому они пригодны для различного рода применений на массовом рынке. Применение их как конструкционных материалов в различных областях промышленности – автомобильной, аэрокосмической, машиностроительной и т.д., также как и функциональные применения, рассматриваются или уже состоялись.

Проводимые в настоящее время исследования в направлении улучшения процессов производства сосредоточены на совершенствовании методов производственного контроля процессов для обеспечения повышения качества материалов и достижения лучшей воспроизводимости и прогнозируемости их свойств. Под "более лучшим качеством" обычно понимается хорошая морфологическая и структурная однородность ячеистых материалов. Для применений в качестве конструкционных материалов необходимо устранить искривление или стягивание стенок ячеек, "инородные" включения, разрушенные или отсутствующие стенки ячеек, а также другие дефекты, в то время как параметры распределения пор по размерам представляются менее важными [264,295-297]. В то же время для функциональных материалов равномерность пор или размер каналов между порами могут быть важными.

Для большинства процессов на сегодняшний день нет подходящей теоретической или математической модели, позволяющей предсказать влияние изменения тех или иных параметров процесса на характеристики конечного продукта. Усовершенствование процесса во многих случаях приходится приводить методом "проб и ошибок". Если бы удалось разработать хорошие модели для описания процессов получения ячеистых металлов, то можно было бы ускорить совершенствование способов производства.

Снижение стоимости также является важной проблемой для ведущихся разработок. Основными направлениями этих работ являются использование более дешевых исходных материалов, исключение или совмещение технологических операций и уменьшение количества отходов производства. По мере реализации на практике некоторых из этих усовершенствований появляется и определенная надежда на то, что в очень недалеком будущем будут освоены такие области промышленного применения, которые связаны с выходом на рынок массовых партий товарного продукта и которые, в свою очередь, продвинули применение ячеистых металлических материалов в других областях.

Благодарности

Автор хотел бы поблагодарить за представленные фотографии, рисунки, информацию и другую помощь следующих лиц: O. Andersen, T. Baumbach, V. Belyi, M. Bram, F. Chen, H. von Hagen, M. Hartmann, R. Mitchell, T. Miyoshi, V. Paserin, F. Schörghuber, D. Schwartz, V. Shapovalov, D. Sypeck, L. Tuchinskiy and I. Wagner.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Gibson LJ, Ashby MF. Cellular solids. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1997.
- [2] Davies GJ, Zhen S. J Mat Sci 1983; 18:1899.
- [3] Metallschäume. In: Banhart J., editor. Proc. Symp. Metallschäume, Bremen, Germany, 6–7 March. Bremen: MIT Press–Verlag, 1997 [partially in German].
- [4] Metal foams. In: Banhart J, Eifert H, editors. Proc. Fraunhofer USA Symposium on Metal Foams, Stanton, USA, 7–8 October. Bremen: MIT Press–Verlag, 1997.
- [5] Porous and cellular materials for structural applications. In: Schwartz DS, Shih DS, Evans AG, Wadley HNG, editors. MRS Symp. Proc., vol. 521, 1998.
- [6] Metal foams and porous metal structures. In: Banhart J, Ashby MF, Fleck NA, editors. Int. Conf., Bremen, Germany, 14–16 June. Bremen: MIT Press–Verlag, 1999.
- [7] Mechanical properties of porous and cellular materials. In: Sieradzki K, Green DJ, Gibson LJ, editors. MRS Symp. Proc., vol. 207, 1990.
- [8] Weaire D, Fortes MA. Adv Phys 1994; 43:685.
- [9] Shapovalov VI. MRS Bull 1994; 19:24.
- [10] Ashby MF, Evans AG, Fleck NA, Gibson LJ, Hutchinson JW, Wadley HNG. Metal foams: a design guide. Boston: Butterworth–Heinemann, 2000.
- [11] Banhart J. Europhys News 1999; 30:17.
- [12] Elliott JC. US Patent 2,983,597, 1961.
- [13] Fiedler WS. US Patent 3,214,265, 1965.
- [14] Hardy PW, Peisker GW. US Patent 3,300,296, 1967.
- [15] Niebylski LM. German Patent 2,006,445, 1970.
- [16] Berry CB. US Patent 3,669,654, 1972.
- [17] Bjorksten J, Rock EJ. US Patent 3,707,367, 1972.
- [18] Niebylski LM, Jarema CP, Immethun PA. US Patent 3,794,481, 1974.
- [19] Niebylski LM, Jarema CP, Lee TE. US Patent 3,940,262, 1976.
- [20] Sosnick B. US Patent 2,553,016, 1947.
- [21] Jin I, Kenny LD, Sang H. US Patent 4,973,358 (=Int. Patent Application WO 91/03578), 1990.
- [22] Ruch W, Kirkevag B. Int. Patent Application WO 91/01387 (=European Patent Application EP 0,483,184, B1), 1991.
- [23] Jin I, Kenny LD, Sang H. US Patent 5,112,697, 1992.
- [24] Thomas M, Kenny LD, Sang H. Int. Patent Application WO 94/17218, 1994.

- [25] Sang H, Thomas M, Kenny LD. Int. Patent Application WO 92/03582, 1992.
- [26] Åsholt P. Metallschäume. In: Banhart J, editor. Proc. Symp. Metallschäume, Bremen, Germany, 6–7 March. Bremen: MIT Press–Verlag, 1997. p. 27 [partially in German].
- [27] Wood J. Metal foams. In: Banhart J, Eifert H, editors. Proc. Fraunhofer USA Symposium on Metal Foams, Stanton, USA, 7–8 October. Bremen: MIT Press–Verlag, 1998. p. 31.
- [28] Åsholt P. Metal foams and porous metal structures. In: Banhart J, Ashby MF, Fleck NA, editors. Int. Conf., Bremen, Germany, 14–16 June. Bremen: MIT Press–Verlag, 1999. p. 133.
- [29] Lloyd DJ, McLeod AD, Morris PL, Jin I. Int. Patent Application WO 91/19823, 1991.
- [30] Ridgway JA. US Patent 3,297,431, 1967.
- [31] Kenny LD. In: Materials science forum, vols 217–222. Switzerland: Transtec Publications, 1996.
- [32] Sang H, Kenny LD, Jin I. US Patent 5,334,236 (=Int. Patent Application WO 92/21457), 1994.
- [33] Linke M, Jungk W, Fischer E. European Patent Application 0,544,291, 1993.
- [34] Kenny LD, Thomas M. Int. Patent Application WO 94/09931, 1994.
- [35] Prakash O, Embury JD, Sang H, Sinclair C, Silvetti P. In: Ward-Close CM, Froes FH, Chellman DJ, Cho SS, editors. Synthesis/processing of light-weight metallic materials II. The Minerals, Metals and Materials Society, 1997. p. 19.
- [36] Kaptay G. Metal foams and porous metal structures. In: Banhart J, Ashby MF, Fleck NA, editors. Int. Conf., Bremen, Germany, 14–16 June. Bremen: MIT Press–Verlag, 1999. p. 141.
- [37] Gergely V, Degischer HP, Clyne TW. In: Comprehensive composite materials, vol. 3. Amsterdam: Elsevier Science, 2000.
- [38] Simone AE, Gibson L J. Acta Mater 1998; 46:3109.
- [39] Beals JT, Thompson MS. J Mat Sci 1997; 32:3595.
- [40] Simone AE. Thesis, Mass. Inst. Technol. Cambridge, USA, 1997.
- [41] Cymat Corp., Canada. Product information sheets and (<http://www.cymat.com>), 1998.
- [42] Kleinheyer S, Bilz G. German Patent 43,26,982, 1995.
- [43] Prakash O, Sang H, Embury JD. Mat Sci Eng 1995; A199:195.
- [44] Saenz E, Baranda PS, Bonhomme J. Porous and cellular materials for structural applications. In: Schwartz DS, Shih DS, Evans AG, Wadley HNG, editors. MRS Symp. Proc., vol. 521, 1998. p. 83.
- [45] Sugimura Y, Meyer J, He MY, Bart-Smith H, Grenestedt J, Evans AG. Acta Mater 1997; 45:5245.
- [46] Sypeck DJ, Wadley HNG, Bart-Smith H, Koehler S, Evans AG. Rev Prog in Quantitative Nondestructive Evaluation 1998; 17:1443.
- [47] Hydro Aluminium Norway. Product data sheets. 1994.
- [48] Huschka S. Thesis, Düsseldorf, Germany: VDI-Verlag, 1998 [in German].

- [49] von Hagen H, Bleck W. Porous and cellular materials for structural applications. In: Schwartz DS, Shih DS, Evans AG, Wadley HNG, editors. MRS Symp. Proc., vol. 521, 1998. p. 59.
- [50] von Hagen H. Thesis, University of Aachen, Aachen, Germany: Shaker-Verlag, 1999 [in German].
- [51] Ehlers W, Müllerschön H, Klar O. Metal foams and porous metal structures. In: Banhart J, Ashby MF, Fleck NA, editors. Int. Conf., Bremen, Germany, 14–16 June. Bremen: MIT Press–Verlag, 1999. p. 255.
- [52] Olurin OB, Fleck NA, Ashby MF. Metal foams and porous metal structures. In: Banhart J, Ashby MF, Fleck NA, editors. Int. Conf., Bremen, Germany, 14–16 June. Bremen: MIT Press–Verlag, 1999. p. 365.
- [53] Hanssen AG, Hopperstad OS, Langseth M. Structures under Shock and Impact V (SUSI 98), Thessaloniki, Greece, 24–26 June 1998. p. 143.
- [54] Langseth M, Hopperstad OS, Hanssen AG. Thin-Walled Structures 1998; 32:127.
- [55] Weber J. German Patent Application 3,516,737, 1986.
- [56] Akiyama S, Imagawa K, Kitahara A, Nagata S, Morimoto K, Nishikawa T, Itoh M. European Patent Application 0,210,803 A1, 1986.
- [57] Akiyama S, Imagawa K, Kitahara A, Nagata S, Morimoto K, Nishikawa T, Itoh M. US Patent 4,713,277, 1987.
- [58] Miyoshi T, Itoh M, Akiyama S, Kitahara A. Porous and cellular materials for structural applications. In: Schwartz DS, Shih DS, Evans AG, Wadley HNG, editors. MRS Symp. Proc., vol. 521, 1998. p. 133.
- [59] Ma L, Song Z. Scripta Met 1998; 39:1523.
- [60] Miyoshi T, Itoh M, Akiyama S, Kitahara A. Advanced Engineering Materials 2000; 2:179.
- [61] Otsuka M, Kojima A, Itoh M, Ishii E. Proc. Conf. Recent Advances in Science and Engineering of Light Metals (RASELM'91), Tokyo, October. Sendai: Japan Institute of Light Metals, 1991. p. 999.
- [62] Niebylski LM, Jarema CP, Lee TE. US Patent 3,816,952, 1974.
- [63] Otsuka M, Houjo N, Kojima A, Itoh M, Ishii E. In: Kim NJ, editor. Light metals for transport systems. Pohang, Korea: Centre for Advanced Aerospace Materials, 1993. p. 435
- [64] Han F, Zhu Z, Gao J. Met Trans 1998;29A:2497.
- [65] Ishii E, Itoh M, Morisawa Y. Kobe Steel Engineering Reports 1991;41:59 [in Japanese].
- [66] Lu TJ, Hess A, Ashby MF. J Appl Phys 1999; 85:7528.
- [67] Shinko Wire Co., Japan. Product information “Alporas”, 1998.
- [68] Mukai T, Kanahashi H, Higashi K, Yamada Y, Shimojima K, Mabuchi M, Miyoshi T, Nieh TG. Metal foams and porous metal structures. In: Banhart J, Ashby MF, Fleck NA, editors. Int. Conf., Bremen, Germany, 14–16 June. Bremen: MIT Press–Verlag, 1999. p. 353.
- [69] von Hagen H, Bleck W. Metal foams and porous metal structures. In: Banhart J, Ashby MF, Fleck NA, editors. Int. Conf., Bremen, Germany, 14–16 June. Bremen: MIT Press–Verlag, 1999. p. 317.

- [70] Bart-Smith H, Bastawros AF, Mumm DR, Evans AG, Sypeck DJ, Wadley HNG. *Acta Mat* 1998;46:3583.
- [71] Deshpande VS, Fleck NA. Metal foams and porous metal structures. In: Banhart J, Ashby MF, Fleck NA, editors. *Int. Conf., Bremen, Germany, 14–16 June. Bremen: MIT Press–Verlag, 1999. p. 247.*
- [72] Mukai T, Kanahashi H, Miyoshi T, Mabuchi M, Nieh TG, Higashi K. *Scripta Mater* 1999; 40:921.
- [73] Harte AM, Fleck NA, Ashby MF. *Acta Mater* 1999; 47:2511.
- [74] Andrews EW, Huang J-S, Gibson LJ. *Acta Mater* 1999; 47:2927.
- [75] Harte AM, Fleck NA, Ashby MF. *Advanced Engineering Materials* 2000; 2:219.
- [76] Kaminaga K, Toyoda K, Sato T . *Proc. Interfinish 96 World Congress, Birmingham, UK, 10–12 September 1996.*
- [77] Miyoshi T. Private communication, 1998.
- [78] Albright DM, Chilcott WR, Floridis TP. US Patent 3,360,361, 1967.
- [79] Hall CG. US Patent 3,692,513, 1972.
- [80] Berry CB. 1972, US Patent 3,671,221, 1972.
- [81] Berry CB, Valdo AR. US Patent 3,725,037, 1973.
- [82] Niebylski LM, Jarema CP, Lee TE. US Patent 3,843,353, 1974.
- [83] Bjorksten J. US Patent 3,782,919, 1974.
- [84] Jarema CP, Niebylski LM. US Patent 3,719,223, 1973.
- [85] Jarema CP, Niebylski LM. US Patent 3,839,080, 1974.
- [86] Niebylski LM, Jarema CP. US Patent 3,790,365, 1974.
- [87] Niebylski LM. US Patent 3,790,367, 1974.
- [88] Niebylski LM, Jarema CP. US Patent 3,847,591, 1974.
- [89] Ptashnik WJ. US Patent 3,758,291, 1973.
- [90] Thornton PH, Magee CL. *Met Trans* 1975; 6A:1253.
- [91] Niebylski LM, Fanning RJ. *SAE Transactions. New York, USA: Society of Automotive Engineers, Paper 720490, 1972.*
- [92] Thornton PH, Magee CL. *Met Trans* 1975; 6A:1801.
- [93] Shapovalov VI. US Patent 5,181,549, 1993.
- [94] Shapovalov VI. Porous and cellular materials for structural applications. In: Schwartz DS, Shih DS, Evans AG, Wadley HNG, editors. *MRS Symp. Proc., vol. 521, 1998. p. 281.*
- [95] Apprill GM, Poirier DR, Maguire MC, Gutsch TC. Porous and cellular materials for structural applications. In: Schwartz DS, Shih DS, Evans AG, Wadley HNG, editors. *MRS Symp. Proc., vol. 521, 1998. p. 291.*
- [96] Shapovalov VI. Private communication, 1999.
- [97] Zheng Y, Sridhar S, Russell KC. Advances in porous materials. In: Komarneni S, et al., editors. *MRS Symp. Proc., vol. 371, 1995. p. 365.*
- [98] Pattnaik A, Sanday SC, Vold CL, Aaronson HI. Advances in porous materials. In: Komarneni S, et al., editors. *MRS Symp. Proc., vol. 371, 1995. p. 371.*
- [99] Wolla JM, Provenzano V. Advances in porous materials. In: Komarneni S, et al., editors. *MRS Symp. Proc., vol. 371, 1995. p. 377.*

- [100] Provenzano V, Wolla J, Matic P, Geltmacher A, Kee A. Advances in porous materials. In: Komarneni S, et al., editors. MRS Symp. Proc., vol. 371, 1995. p. 383.
- [101] Simone AE, Gibson LJ. Acta Met 1996; 44:1437.
- [102] Simone AE, Gibson LJ. J Mat Sci 1997; 32:451.
- [103] Paradies CJ, Tobin A, Wolla J. Porous and cellular materials for structural applications. In: Schwartz DS, Shih DS, Evans AG, Wadley HNG, editors. MRS Symp. Proc., vol. 521, 1998. p.297.
- [104] Bonenberger RJ, Kee AJ, Everett RK, Matic P. Porous and cellular materials for structural applications. In: Schwartz DS, Shih DS, Evans AG, Wadley HNG, editors. MRS Symp. Proc., vol. 521, 1998. p. 303.
- [105] Park C, Nutt SV. Porous and cellular materials for structural applications. In: Schwartz DS, Shih DS, Evans AG, Wadley HNG, editors. MRS Symp. Proc., vol. 521, 1998. p. 315.
- [106] Baumeister J. German Patent 4,018,360, 1990.
- [107] Baumeister J, Schrader H. German Patent DE 4,101,630, 1991.
- [108] Baumeister J. US Patent 5,151,246, 1992.
- [109] Baumeister J. European Patent 0,460,392, 1996.
- [110] Baumeister J, Banhart J, Weber M. German Patent DE 4,424,157, 1996.
- [111] Baumeister J, Banhart J, Weber M. German Patent DE 4,426,627, 1997.
- [112] Fraunhofer-Institute Bremen. Product information sheet of "Foaminal" and (<http://www.ifam.fhg.de>), 1999.
- [113] Pashak JF. US Patent 2,935,396, 1960.
- [114] Allen BC, Mote MW, Sabroff AM. US Patent 3,087,807, 1963.
- [115] Banhart J, Baumeister J, Weber M. Euro. Conf. Advanced PM Materials (PM '95), Birmingham, UK, 23–25 October 1995. p. 201.
- [116] Baumgärtner F, Gers H. Metal foams and porous metal structures. In: Banhart J, Ashby MF, Fleck NA, editors. Int. Conf., Bremen, Germany, 14–16 June. Bremen: MIT Press–Verlag, 1999. p. 73.
- [117] Baumgärtner F, Duarte I, Banhart J. Advanced Engineering Materials 2000; 2:168.
- [118] Duarte I, Weigand P, Banhart J. Metal foams and porous metal structures. In: Banhart J, Ashby MF, Fleck NA, editors. Int. Conf., Bremen, Germany, 14–16 June. Bremen: MIT Press–Verlag, 1999. p. 97.
- [119] Weber M, Knüwer M. Metallschäume. In: Banhart J., editor. Proc. Symp. Metallschäume, Bremen, Germany, 6–7 March. Bremen: MIT Press–Verlag, 1997. p. 73 [in German].
- [120] Kriszt B, Falahati A, Degischer HP. Metallschäume. In: Banhart J., editor. Proc. Symp. Metallschäume, Bremen, Germany, 6–7 March. Bremen: MIT Press–Verlag, 1997. p. 59 [in German].
- [121] Yu CJ, Eifert H, Knüwer M, Weber M, Baumeister J. Porous and cellular materials for structural applications. In: Schwartz DS, Shih DS, Evans AG, Wadley HNG, editors. MRS Symp. Proc. vol.521, 1998. p. 145.
- [122] Simančik F, Schörghuber F, Hartl E. European Patent Application, EP 0,804,982 A2, 1997.

- [123] Simančík F, Kováčik J, Schörghuber F. Metallschäume. In: Banhart J, editor. Proc. Symp. Metallschäume, Bremen, Germany, 6–7 March. Bremen: MIT Press–Verlag, 1997. p. 171.
- [124] Baumeister J. Metal foams and porous metal structures. In: Banhart J, Ashby MF, Fleck NA, editors. Int. Conf., Bremen, Germany, 14–16 June. Bremen: MIT Press–Verlag, 1999. p. 113.
- [125] Seeliger H-W. Metal foams. In: Banhart J, Eifert H, editors. Proc. Fraunhofer USA Symposium on Metal Foams, Stanton, USA, 7–8 October. Bremen: MIT Press–Verlag, 1997. p. 79.
- [126] Seeliger H-W. Metal foams and porous metal structures. In: Banhart J, Ashby MF, Fleck NA, editors. Int. Conf., Bremen, Germany, 14–16 June. Bremen: MIT Press–Verlag, 1999. p. 29.
- [127] Simančík F, Schörghuber F. Porous and cellular materials for structural applications. In: Schwartz DS, Shih DS, Evans AG, Wadley HNG, editors. MRS Symp. Proc., vol. 521, 1998. p. 151.
- [128] Höpler T, Schörghuber F, Simančík F. Metal foams and porous metal structures. In: Banhart J, Ashby MF, Fleck NA, editors. Int. Conf., Bremen, Germany, 14–16 June. Bremen: MIT Press–Verlag, 1999. p. 79.
- [129] Markaki AE, Clyne TW. Metal foams and porous metal structures. In: Banhart J, Ashby MF, Fleck NA, editors. Int. Conf., Bremen, Germany, 14–16 June. Bremen: MIT Press–Verlag, 1999. p. 359.
- [130] Gergely V, Simančík F, Matthams TJ, Clyne TW In: Massard T, editor. Proc. Int. Conf. on Composite Materials (ICCM-12), Paris 5–9 July, 1999.
- [131] Banhart J, Baumeister J, Weber M. Metal powder technologies and applications. In: ASM handbook, vol. 7. Materials Park, USA: ASM International, 1998. p. 1043.
- [132] Weber M. Thesis. University of Clausthal, MIT Press–Verlag, Bremen, 1997 [in German].
- [133] Weigand P, Banhart J. Metallschäume. In: Banhart J, editor. Proc. Symp. Metallschäume, Bremen, Germany, 6–7 March. Bremen: MIT Press–Verlag, 1997. p. 91 [in German].
- [134] Weigand P. Thesis. University of Aachen, MIT Press–Verlag, Bremen, 1999 [in German].
- [135] Simančík F, Mináriková N, Čulák S, Kováčik J. Metal foams and porous metal structures. In: Banhart J, Ashby MF, Fleck NA, editors. Int. Conf., Bremen, Germany, 14–16 June. Bremen: MIT Press–Verlag, 1999. p. 105.
- [136] Duarte I, Banhart J. Acta Mater 2000; 48:2349.
- [137] Kováčik J, Simančík F. Scripta Mater 1998; 39:239.
- [138] Simančík F, Jerz J, Kováčik J, Minár P. Kovové Materialy (Slovakia) (Metallic Materials) 1997; 35:265.
- [139] Saenz E, Villate A, Garuz I, Irisarri AM, Rausch G, Weber M. Metal foams and porous metal structures. In: Banhart J, Ashby MF, Fleck NA, editors. Int. Conf., Bremen, Germany, 14–16 June. Bremen: MIT Press–Verlag, 1999. p. 269.
- [140] Simančík F, Kováčik J, Mináriková N. Proc. 1998 PM World Congress. European Powder Metallurgy Association, vol. 5, 1998. p. 245.

- [141] Simančik F. Metal foams and porous metal structures. In: Banhart J, Ashby MF, Fleck NA, editors. Int. Conf., Bremen, Germany, 14–16 June. Bremen: MIT Press–Verlag, 1999. p. 235.
- [142] Gradinger R, Rammerstorfer FG. *Acta Mater* 1999;47:143.
- [143] Banhart J, Baumeister J, Weber M. *VDI-Berichte* 1993; 1021:277 [in German].
- [144] Kunze H-D, Baumeister J, Banhart J, Weber M. *Powder Met Int* 1993; 25:182.
- [145] Degischer HP, Galovski U, Gradinger R, Kretz R, Simančik F. Metallschäume. In: Banhart J, editor. *Proc. Symp. Metallschäume*, Bremen, Germany, 6–7 March. Bremen: MIT Press–Verlag, 1997. p. 79 [in German].
- [146] Yu CJ, Banhart J. Metal foams. In: Banhart J, Eifert H, editors. *Proc. Fraunhofer USA Symposium on Metal Foams*, Stanton, USA, 7–8 October. Bremen: MIT Press–Verlag, 1998. p. 37.
- [147] Gradinger R, Simančik F, Degischer HP In: Felber S, Varga T, Zeman JL, editors. *Proc. Int. Conf. Welding Technology, Materials and Materials Testing, Fracture Mechanics and Quality Management*, Vienna, Austria, vol. 2, 1997. p. 701.
- [148] Tobolka P, Kováčik J. *Kovové Materialy (Slovakia) (Metallic Materials)* 1996; 34:17.
- [149] Zettl BE, Stanzl-Tschegg SE, Gradinger R, Degischer HP. Porous and cellular materials for structural applications. In: Schwartz DS, Shih DS, Evans AG, Wadley HNG, editors. *MRS Symp.Proc.*, vol. 521, 1998. p. 97.
- [150] Mepura GmbH Ranshofen, Product information of "Alulight", 1999, and www.alulight.com.
- [151] Banhart J, Baumeister J, Weber M. *Mat Sci Eng* 1996; A205:221.
- [152] Liu CS, Han FS, Zhu ZG, Banhart J. *J Mat Sci* 1998; 33:1769.
- [153] Liu CS, Zhu ZG, Han FS, Banhart J. *Phil Mag* 1998; A78:1329.
- [154] Banhart J, Baumeister J. *J Mat Sci* 1998; 33:1431.
- [155] McCullough KYC, Fleck NA, Ashby MF. *Acta Mater* 1999; 47:2323.
- [156] Banhart J, Baumeister J, Weber M In: Roller D, editor. *Proc. 29th Int. Symp. on Automotive Technology and Automation*. Croydon, UK: Automation Automotive Ltd, 1996. p. 611 [Paper 96NM006].
- [157] Deshpande VS, Fleck NA. *Int J Impact Eng* 2000; 24:277.
- [158] Yu CJ, Claar TD, Hall IW, Frantz RE, Hasson DF. Metal foams and porous metal structures. In: Banhart J, Ashby MF, Fleck NA, editors. *Int. Conf.*, Bremen, Germany, 14–16 June. Bremen: MIT Press–Verlag, 1999. p. 347.
- [159] Pannkoke K, Hop R, Templin C, Brede M, Stephan A, Hennemann OD In: Roller D, editor. *Proc. 29th Symposium on Automotive Technology and Automation*, Florence, 3–6 June. Croydon, UK: Automotive Automation Ltd, 1996. p. 645.
- [160] Banhart J, Brinkers W. *J Mat Sci Lett* 1999; 18:617.
- [161] Zettl BE, Stanzl-Tschegg SE. Metal foams and porous metal structures. In: Banhart J, Ashby MF, Fleck NA, editors. *Int. Conf.*, Bremen, Germany, 14–16 June. Bremen: MIT Press–Verlag, 1999. p.373.

- [162] Schultz O, des Ligneris A, Haider O, Starke P. *Advanced Engineering Materials* 2000; 2:215.
- [163] McCullough KYC, Fleck NA, Ashby MF. *Acta Mater* 1999; 47:2331.
- [164] Lehmhus D, Banhart J. *Acta Mater* 2000 [submitted for publication].
- [165] Santosa S, Banhart J, Wierzbicki T. Metal foams and porous metal structures. In: Banhart J, Ashby MF, Fleck NA, editors. *Int. Conf.*, Bremen, Germany, 14–16 June. Bremen: MIT Press–Verlag, 1999. p. 337.
- [166] Seitzberger M, Rammerstorfer FG, Degischer HP, Gradinger R. *Acta Mech* 1997; 125:93.
- [167] Gradinger R, Seitzberger M, Rammerstorfer FG, Degischer HP, Blaimschein M, Walch C. Metal foams and porous metal structures. In: Banhart J, Ashby MF, Fleck NA, editors. *Int. Conf.*, Bremen, Germany, 14–16 June. Bremen: MIT Press–Verlag, 1999. p. 313.
- [168] Kováčik J, Tobolka P, Simančík F. Metal foams and porous metal structures. In: Banhart J, Ashby MF, Fleck NA, editors. *Int. Conf.*, Bremen, Germany, 14–16 June. Bremen: MIT Press–Verlag, 1999. p. 405.
- [169] Banhart J, Baumeister J, Melzer A, Weber M. *German Patent* 198,13,174, 1998.
- [170] Gergely V, Clyne TW. Porous and cellular materials for structural applications. In: Schwartz DS, Shih DS, Evans AG, Wadley HNG, editors. *MRS Symp. Proc.*, vol. 521, 1998. p. 139.
- [171] Gergely V, Clyne TW. *Advanced Engineering Materials* 2000; 2:175.
- [172] Fiedler SO, Bjorksten J, Fiedler WS. *US Patent* 2,979,392, 1961.
- [173] Yosida Y, Hayashi C. *Conf. Casting Science and Technology*, September 1990. p. 103.
- [174] Yamada Y, Shimojima K, Sakaguchi Y, Mabuchi M, Nakamura M, Asahina T, Mukai T, Kanahashi H, Higashi K. *Advanced Engineering Materials* 2000; 2:184.
- [175] ERG Inc. Oakland, USA. Product information of "Duocel" and ([url http://www.ergaerospace.com](http://www.ergaerospace.com)), 1996.
- [176] Hintz C, Wagner I, Sahm PR, Stojanov P. Metal foams and porous metal structures. In: Banhart J, Ashby MF, Fleck NA, editors. *Int. Conf.*, Bremen, Germany, 14–16 June. Bremen: MIT Press–Verlag, 1999. p. 153.
- [177] Mpore GmbH Dresden, Germany. Product data sheet of "mpore" foam, 1999 and www.m-pore.de
- [178] Nieh TG, Kinney JH, Wadsworth J, Ladd AJC. *Scripta Mater* 1998; 38:1487.
- [179] Lankford J, Dannemann KA. Porous and cellular materials for structural applications. In: Schwartz DS, Shih DS, Evans AG, Wadley HNG, editors. *MRS Symp. Proc.*, vol. 521, 1998. p. 103.
- [180] Mukai T, Kanahashi H, Yamada Y, Shimojima K, Mabuchi M, Nieh TG, Higashi K. *Scripta Mater* 1999; 41:365.
- [181] Renauld ML, Giamei AF, Thompson MS, Priluck J. Porous and cellular materials for structural applications. In: Schwartz DS, Shih DS, Evans AG, Wadley HNG, editors. *MRS Symp. Proc.*, vol. 521, 1998. p. 109.
- [182] Kreigh JR, Gibson JK. *US Patent* 3,055,763, 1962.
- [183] Kuchek HA. *US Patent* 3,236,706, 1966.

- [184] Banhart J. Aluminium 1999; 75:1094.
- [185] Chen F, He DP. Metal foams and porous metal structures. In: Banhart J, Ashby MF, Fleck NA, editors. Int. Conf., Bremen, Germany, 14–16 June. Bremen: MIT Press–Verlag, 1999. p. 163.
- [186] Zwissler M. German Patent 19,725,210, 1997.
- [187] Grote F, Busse P. Giesserei 1999;86:75 [in German].
- [188] Thiele W. German Patent, 1,933,321, 1971.
- [189] Thiele W. Metals and Materials 1972;6:349.
- [190] Drury WJ, Rickles SA, Sanders TH, Cochran JK In: Lee EW, Chin EH, Kim NJ, editors. Proc. Conf. Light alloys for Aerospace Applications, Las Vegas, USA, 28 February–2 March, 1989. p.311.
- [191] Rawal SP, Lanning BR, Misra MS. Proc. Conf. ICCM/9, Zaragoza, Spain, 12–16 July 1993, vol.1:203.
- [192] Hartmann M, Singer RF. Metallschäume. In: Banhart J, editor. Proc. Symp. Metallschäume, Bremen, Germany, 6–7 March. Bremen: MIT Press–Verlag, 1997. p. 39 [in German].
- [193] Hartmann M, Reindel K, Singer RF. Porous and cellular materials for structural applications. In: Schwartz DS, Shih DS, Evans AG, Wadley HNG, editors. MRS Symp. Proc., vol. 521, 1998. p. 211.
- [194] Ma L, Song Z, He DP. Scripta Mater 1998; 41:785.
- [195] Lavernia EJ, Grant NJ. Mat Sci Eng 1988; 98:381.
- [196] Kelley P. US Patent 5, 266, 099, 1992.
- [197] Kelley P, Wong CR, Moran A. Int J Powder Metallurgy 1993; 29:161.
- [198] Banhart J, Knüwer M. Proc. 1998 PM World Congress, European Powder Metallurgy Association, vol. 5, 1998. p. 265.
- [199] Neumann P. Metal foams and porous metal structures. In: Banhart J, Ashby MF, Fleck NA, editors. Int. Conf., Bremen, Germany, 14–16 June. Bremen: MIT Press–Verlag, 1999. p. 167.
- [200] Eisenmann M. Metal powder technologies and applications. In: ASM Handbook, vol. 7. Materials Park, USA: ASM International, 1998. p. 1031.
- [201] Lotze G, Stephani G, Budach P, Albracht F, Schneider K. Proc. 1998 PM World Congress. European Powder Metallurgy Association. vol. 5, 1998. p. 195 [see also p. 259].
- [202] Andersen O, Stephani G. Metal Powder Report 1999; 54:30.
- [203] Kearns MW, Blenkinshop PA, Barber AC, Farthing TW. Int J Powder Met 1988; 24:59.
- [204] Martin RL. US Patent 5,564,064, 1996.
- [205] Martin RL, Lederich RJ. Metal Powder Report, October 1992, p. 30.
- [206] Schwartz DS, Shih DS, Lederich RJ, Martin RL, Deuser DA. Porous and cellular materials for structural applications. In: Schwartz DS, Shih DS, Evans AG, Wadley HNG, editors. MRS Symp. Proc., vol. 521, 1998. p. 225.
- [207] Elzey DM, Wadley HNG. Acta Mater 2001; 49:849.
- [208] Queheillalt DT, Wadley HNG. Porous and cellular materials for structural applications. In: Schwartz DS, Shih DS, Evans AG, Wadley HNG, editors. MRS Symp. Proc., vol. 521, 1998. p. 237.

- [209] Drolet JP. *Int J Powder Met* 1977; 13:223.
- [210] Kulkarni SB, Ramakrishnan P. *Int J Powder Met* 1973; 9:41.
- [211] Arrance FC. US Patent 3,287,166, 1966.
- [212] Stiller C, Buchkremer HP, Joos R, Stöver D, Nelles H. *Proc. 1998 PM World Congress. European Powder Metallurgy Association. vol. 5, 1998. p. 189.*
- [213] Bram M, Stiller C, Buchkremer HP, Stöver D, Bauer H. *Advanced Engineering Materials* 2000; 2:196.
- [214] Fischer GW. US Patent 3,052,967, 1962.
- [215] Wheeler KR, Karagianes MT, Sump K.R. *Conf. Titanium Alloys in Surgical Implants. Philadelphia, USA: American Society for Testing and Materials, 1983. p. 241.*
- [216] Niemeyer M., 1999, DFG Symposium 11–12 November 1999, Bonn, Germany.
- [217] Jäckel M. German Patent DE, 3,210,770, 1983.
- [218] Andersen O, Waag U, Schneider L, Stephani G, Kieback B. *Advanced Engineering Materials* 2000; 2:192.
- [219] Uslu C, Lee KJ, Sanders TH, Cochran JK In: Ward-Close CM, Froes FH, Chellman DJ, Cho SS, editors. *Proc. Conf. Synthesis of light-weight metallic materials II, Orlando, USA, 9–13 February, 1997.*
- [220] Nagel AL, Uslu C, Lee KJ, Cochran JK, Sanders TH In: Ward-Close CM, Froes FH, Chellman DJ, Cho SS, editors. *Proc. Conf. Synthesis of light-weight metallic materials II, Orlando, USA, 9–13 February, 1997.*
- [221] Sypeck DJ, Parrish PA, Wadley HNG. Porous and cellular materials for structural applications. In: Schwartz DS, Shih DS, Evans AG, Wadley HNG, editors. *MRS Symp. Proc., vol. 521, 1998. p.205.*
- [222] Clark JL, Hurysz KM, Lee KJ, Cochran JK, Sanders TH. Metal foams and porous metal structures. In: Banhart J, Ashby MF, Fleck NA, editors. *Int. Conf., Bremen, Germany, 14–6 June. Bremen: MIT Press–Verlag, 1999. p. 171.*
- [223] Smarsly W, Track W. German Patent 3,902,032, 1990.
- [224] Amagi Y, Shiiki Z, Nakao M, Urawa S, Bunrin H. German Patent Application 2,218,455, 1972.
- [225] Nadler JH, Hurysz KM, Clark JL, Cochran JK, Lee KJ, Sanders TH. Metal foams and porous metal structures. In: Banhart J, Ashby MF, Fleck NA, editors. *Int. Conf., Bremen, Germany, 14–16 June. Bremen: MIT Press–Verlag, 1999. p. 179.*
- [226] Lundsager CB. German Patent Application 24,59,475, 1975.
- [227] Zhevnovatyai AI, Shenberg GF. *Soviet Powder Met Metal Ceram* 1965;2:95.
- [228] Knüwer M, Weber M. *Proc. 1998 Powder Metallurgy World Congress, Granada, Spain, 18–22 October, vol. 2:233.*
- [229] Tuchinskiy L, Loutfy R. Metal foams. In: Banhart J, Ashby MF, Fleck NA, editors. *Proc. Fraunhofer USA Symposium on Metal Foams, Stanton, USA, 7–8 October. Bremen: MIT Press–Verlag, 1997. p. 23.*
- [230] Tuchinskiy L, Loutfy R. Metal foams and porous metal structures. In: Banhart J, Ashby MF, Fleck NA, editors. *Int. Conf., Bremen, Germany, 14–16 June. Bremen: MIT Press–Verlag, 1999. p. 189.*

- [231] Kubo Y, Igarashi H. US Patent 4,331,477, 1991.
- [232] Wang GX, Dahms M. Met Trans 1993; 24A:1517.
- [233] Knüwer M., Thesis, University of Bremen, Stuttgart, Germany: Fraunhofer IRB Verlag, 1999.
- [234] Knüwer M. Metal foams and porous metal structures. In: Banhart J, Ashby MF, Fleck NA, editors. Int. Conf., Bremen, Germany, 14–16 June. Bremen: MIT Press–Verlag, 1999. p. 203.
- [235] Krueger BR, Mutz AH, Vreeland T. Met Trans 1992; 23A:55.
- [236] Cohen LA, Power WH, Fabel DA. Mater Eng 1968; 67:44.
- [237] Bugnet B, Doniat D. European Patent Application, 0,151,064, 1985.
- [238] Badiche X, Forest S, Guibert T, Bienvenu Y, Bartout JD, IennyP, Croset M, Bernet H. Materials Science and Engineering 2000;A289:176.
- [239] Sumitomo Electric, Japan. Product data sheet of "Celmet", 1986.
- [240] SEAC International B.V., Krimpen, Netherlands, Product data sheet of "Recemat" and ([url http://www.seac.nl](http://www.seac.nl)), 1998.
- [241] Pinkhasov E. US Patent 5,011,638, 1991.
- [242] Pickering S. Metal Powder Report 1998; 53:24.
- [243] Ettel VA. Taipeh Battery Forum, April 1999.
- [244] Babjak J, Ettel VA, Paserin V. US Patent 4,957,543, 1990.
- [245] Inco Ltd., Canada, Product data sheet of "Incofoam" and <http://www.inco.com>, 1998.
- [246] Bray DE, Stanley RK. Non-destructive evaluation. Boca Raton, USA: CRC Press, 1997.
- [247] Degischer HP, Kottar A. Metal foams and porous metal structures. In: Banhart J, Ashby MF, Fleck NA, editors. Int. Conf., Bremen, Germany, 14–16 June. Bremen: MIT Press–Verlag, 1999. p. 213.
- [248] Bastawros A, McManuis R. Expt Techniques 1998; 22:35.
- [249] Bart-Smith H, Bastawros AF, Mumm DR, Evans AG, Sypeck DJ, Wadley HNG. Porous and cellular materials for structural applications. In: Schwartz DS, Shih DS, Evans AG, Wadley HNG, editors. MRS Symp. Proc., vol. 521, 1998. p. 71.
- [250] Burzer J, Bernard T, Bergmann HW, Damm O. Metal foams and porous metal structures. In: Banhart J, Ashby MF, Fleck NA, editors. Int. Conf., Bremen, Germany, 14–16 June. Bremen: MIT Press–Verlag, 1999. p. 277.
- [251] Schmidt M. Non-destructive testing (Australia) 1989; 26:42.
- [252] Grote F, Schievenbusch A, Mathes M. Metal foams and porous metal structures. In: Banhart J, Ashby MF, Fleck NA, editors. Int. Conf., Bremen, Germany, 14–16 June. Bremen: MIT Press–Verlag, 1999. p. 227.
- [253] Cornelis E, Kottar A, Sasov A, van Dyck D. Metal foams and porous metal structures. In: BanhartJ, Ashby MF, Fleck NA, editors. Int. Conf., Bremen, Germany, 14–16 June. Bremen: MIT Press–Verlag, 1999. p. 233.
- [254] Bastawros A, Evans AG. Advanced Engineering Materials 2000; 2:210.
- [255] Dharmasena KP, Wadley HNG. Porous and cellular materials for structural applications. In: Schwartz DS, Shih DS, Evans AG, Wadley HNG, editors. MRS Symp. Proc., vol. 521, 1998. p. 171.

- [256] German standard DIN 52,215, 1963.
- [257] Lee GF. *Met Trans* 1995;26A:2819.
- [258] Beshers DN. In: Bunshah RF, editor. *Techniques of Metal Research*, 1976; 7 (Part 2):529.
- [259] Montillet A, Comiti J, Legrand J. *J Mat Sci* 1992; 27:4460.
- [260] Guinier A, Fournet G. *Small angle scattering of X-rays*. New York: Wiley, 1955.
- [261] Höhler R, Cohen-Addad S In: Weaire D, Banhart J, editors. *Foams and films*. Bremen, Germany: MIT Press–Verlag, 1999. p. 125
- [262] Höhler R, Cohen-Addad S, Hoballah H. *Phys Rev Lett* 1997; 79:1157.
- [263] Povey MJW. *Ultrasonic techniques for fluids characterisation*. San Diego, USA: Academic Press, 1997.
- [264] Evans AE, Hutchinson JW, Ashby MF. *Prog Mater Sci* 1999; 43:171.
- [265] Simone AE, Gibson LJ. *Mat Sci Eng* 1997; A229:55.
- [266] Bhat BT, Wang TG. *J Mater Sci* 1990; 25:5157.
- [267] Kretz R, Hombergsmeier E, Eipper K. Metal foams and porous metal structures. In: Banhart J, Ashby MF, Fleck NA, editors. *Int. Conf.*, Bremen, Germany, 14–16 June. Bremen: MIT Press–Verlag, 1999. p. 23.
- [268] Haberling C, Haldenwanger HG, Bernhard T, Burzer J, Bergmann HW. Metal foams and porous metal structures. In: Banhart J, Ashby MF, Fleck NA, editors. *Int. Conf.*, Bremen, Germany, 14–16 June. Bremen: MIT Press–Verlag, 1999. p. 37.
- [269] Siebels JE. Metal foams and porous metal structures. In: Banhart J, Ashby MF, Fleck NA, editors. *Int. Conf.*, Bremen, Germany, 14–16 June. Bremen: MIT Press–Verlag, 1999. p. 13.
- [270] Shinotani S, Magusa H, Oiwa T. US Patent 3,842,944, 1974.
- [271] Wierzbicki T, Santosa S. Metal foams. In: Banhart J, Eifert H, editors. *Proc. Fraunhofer USA Symposium on Metal Foams*, Stanton, USA, 7–8 October. Bremen: MIT Press–Verlag, 1997. p. 49.
- [272] Santosa S, Wierzbicki T. *Computers and Structures* 1998; 68:343. 630.
- [273] Seitzberger M, Rammerstorfer FG, Degischer HP, Gradinger R. Metallschäume. In: Banhart J., editor. *Proc. Symp. Metallschäume*, Bremen, Germany, 6–7 March. Bremen: MIT Press–Verlag, 1997. p. 137 [in German].
- [274] Lorenzi L, Fuganti A, Todaro E, Fossat E. *Proc. Conf. Applications for Aluminium in Vehicle Design*, Detroit, USA, 24–27 February 1997. p. 23.
- [275] Fuganti A, Lorenzi L, Hanssen AG, Langseth M. *Advanced Engineering Materials* 2000; 2:200.
- [276] Meyer B, Lempenauer K, Nohr M In: *Proc 29th Symposium on Automotive Technology and Automation*, Florence, 3–6 June, vol II Croydon, UK: Automotive Automation Ltd, 1996 p. 1217 [paper 96SAF044]
- [277] Santosa S, Banhart J, Wierzbicki T. *Advanced Engineering Materials* 2000; 2:223.
- [278] Endler F, Lahner S, Homann M. Metallschäume. In: Banhart J, editor. *Proc. Symp. Metallschäume*, Bremen, Germany, 6–7 March. Bremen: MIT Press–Verlag, 1997. p. 117 [in German].

- [279] Cocks FH. *Journal of Spacecraft and Rockets* 1984; 21:510.
- [280] Cocks FH. *Proc. Conf. Light Metals*, New Orleans, USA, 2–6 March 1986, vol. 2. p. 1019.
- [281] Banhart J, Schmoll C, Neumann U In: Faria L, editor. *Proc. Conf. Materials in Oceanic Environment (Euromat '98)*, vol. 1, 1998. p. 55.
- [282] Giamei AF. Metal foams. In: Banhart J., Eifert H., editors. *Proc. Fraunhofer USA Symposium on Metal Foams*, Stanton, USA, 7–8 October. Bremen: MIT Press–Verlag, 1997. p. 63.
- [283] Lu TJ, Chen C. *Acta Mater* 1999;47:1469.
- [284] Geiger AL. *Advances in Optical Structure Systems*. In: *Proc. Ser. Society for Photo-Optical Engineering (SPIE)* vol. 1303, 1990. p. 546.
- [285] Johnson WR, Shenuski M. *Machine design*, January 1987. p. 89.
- [286] Frischmann W. *European Patent Application EP 0,666,129*, 1995.
- [287] Lu TJ, Stone HA, Ashby MF. *Acta Mater* 1998; 46:3619.
- [288] Swars H. *German Patent Application 3,619,360*, 1987.
- [289] Matsumoto I, Iwaki T, Yanagihara N. *US Patent 4,251,603*, 1981.
- [290] Montillet A, Comiti J, Legrand J. *J Appl Electrochem* 1993; 23:1045.
- [291] Cognet P, Berlan J, Lacoste G, Fabre P-L, Jud JM. *J Appl Electrochem* 1996; 26:631.
- [292] Ibanez JG, Fresan A, Fregoso A, Rajeshwar K, Basak S. *Electrochem Soc Proc* 1995; 95-12:102.
- [293] Iida K, Mizuno K, Kondo K. *US Patent 4,726,444*, 1988.
- [294] Kammer C. *Metallschäume*, Aluminiumzentrale Düsseldorf, Germany, 1998 [in German].
- [295] Grenestedt J. *J Mech Phys Solids* 1998; 46:29.
- [296] Simone AE, Gibson LJ. *Acta Mater* 1998; 46:3929.
- [297] Sanders W, Gibson LJ. Porous and cellular materials for structural applications. In: Schwartz DS, Shih DS, Evans AG, Wadley HNG, editors. *MRS Symp. Proc.*, vol. 521, 1998. p. 53.
- [298] Degischer HP, editor. *Metallschäume*, Special Issue of *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 2000; 31:391–580 [in German].
- [299] Banhart J, Ashby MF, Fleck NA, editors. *Metal foams*, Special Issue of *Advanced Engineering Materials* 2000; 2:147–227.
- [300] Simančik F, Clyne TW. Metal matrix composites and metallic foams. *Proc. Euromat 1999*, Munchen, October 1999, Vol.5. Weinheim: Wiley–VCH, 2000.
- [301] Banhart J, Ashby MF, Fleck NA, editors. *Cellular metals and metal foamng technology*, *Proc. 2nd Int. Conf. Bremen*, 2001. Bremen: MIT–Verlag, in preparation.
- [302] Sugimura Y, Rabiei A, Evans AG, Harte AM, Fleck NA. *Mat Sci Eng* 1999; A269:38.
- [303] Andrews AE, Sanders W, Gibson L. *J Mat Sci Eng* 1999; A270:113.
- [304] Fusheng H, Zhengang Z. *J Mat Sci* 1999; 34:291.
- [305] Gioux G, McCormack TM, Gibson LJ. *Int J Mech Sci* 2000; 42:1097.
- [306] Hanssen AG, Langseth M, Hopperstadt OS. *Int J Mech Sci* 1999; 41:967.

- [307] Miyoshi T, Itoh M, Mukai T, Kanahashi H, Kohzu H, Tanabe S, Higashi K. *Scripta Mater* 1999; 41:1055.
- [308] Dannemann KA, Lankford J. *Mater Sci Eng* 2000; A293:157.
- [309] Chen C, Harte AM, Fleck NA. *Int J Mech Sci* 2001; 43:1483.
- [310] Hall IW, Guden M, Yu CY. *Scripta Mater* 2000; 43:515.
- [311] Hanssen AG, Hopperstadt OS, Langseth M. *Acta Mech* 2000; 142:13.
- [312] Hanssen AG, Langseth M, Hopperstadt OS. *Int J Impact Eng* 2000; 24:347 and 475.
- [313] Kanahashi H, Mukai T, Yamada Y, Shimojima K, Mabuchi M, Nieh TG, Higashi K. *Mat Sci Eng* 2000; A280:349.
- [314] Paul A, Seshacharyulu T, Ramamurty U. *Scripta Mater* 1999; 40:809.
- [315] Markaki AE, Clyne TW. *Mat Sci Technology* 2000; 16:785.
- [316] Zettl B, Mayer H, Stanzl-Tschegg S, Degischer HP, *Mat Sci Eng* 2000; A292:1.
- [317] Wolf K, Kreuzer W, Banhart J. *Aluminium* 2000; 76:166.
- [318] Yamada Y, Shimojima K, Sakaguchi Y, Mabuchi M, Nakamura M, Asahina T, Mukai T, Kanahashi H, Higashi K. *Mat Sci Eng* 1999; A272:455.
- [319] Yamada Y, Shimojima K, Sakaguchi Y, Mabuchi M, Nakamura M, Asahina T, Mukai T, Kanahashi H, Higashi K. *Mat Sci Eng* 2000; A280:225.
- [320] Liu CS, Zhu Z, Han FS, Banhart J. *Philosophical Magazine* 2000; A80:1085.
- [321] Paul A, Ramamurty U. *Mat Sci Eng* 2000; A281:1.
- [322] Rabiei A, Evans AG, Hutchinson JW. *Metallurgical and Materials Transactions* 2000; 31A:1129.
- [323] Nieh TG, Higashi K, Wadsworth J. *Mat Sci Eng* 2000; A283:105.
- [324] Olurin, NA, Fleck NA, Ashby MF. *Mat Sci Eng* 2000; A291:136.
- [325] Deshpande VS, Fleck NA. *J Mech Phys Solids* 2000; 48:1253.
- [326] McCullough KYC, Fleck NA, Ashby MF. *Fatigue Fract Engng Mater Struct* 2000; 23:199.
- [327] Bastawros AF, Bart-Smith H, Evans AG. *J Mech Phys Solids* 2000; 48:301.
- [328] Andrews EW, Gioux G, Onck P, Gibson LJ. *International Journal of Mechanical Sciences* 2001; 43:701.
- [329] Gui MC, Wang DB, Wu JJ, Yuan GJ, Li CG. *Mat Sci Eng* 2000; A286:282.
- [330] Boomsma K, Poulikakos D. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2001; 44:827.
- [331] Banhart J. *Journal of Metals* 2000; 52,22.
- [332] Banhart J, Baumeister J, Irretier O, Jöbstl J. *Aluminium* 2000; 76:491.
- [333] Song Z, Ma LQ, He DP. *Mat Sci Eng* 2001; A298:137.
- [334] Hyun SK, Shiota Y, Murakami K, Nakiyama H. *Proc. 1999. Int. Conf. Solid-state phase transformations (JIMIC-3)*, Koiwa M, Otanka K, Miyazaki T, editors. Japan Institute of Metals (JIM), p. 345.
- [335] Park C, Nutt SR. *Mat Sci Eng* 2001; A288:111.
- [336] Park C, Nutt SR. *Mat Sci Eng* 2001; A297:62.
- [337] Park C, Nutt SR. *Mat Sci Eng* 2001; A299:68.
- [338] Queheillalt DT, Choi BW, Schwartz DS, Wadley HNG. *Metallurgical and Materials Transactions* 2000; 31A:261.

- [339] Zhao YY, Sun DX. Scripta Mater 2001; 44:105.
- [340] Waag U, Schneider L, Löthman P, Stephani G. Metal Powder Report 2000; 55:29.
- [341] Yamada Y, Wen C, Shimojima K, Mabuchi M, Nakamura M, Asahina T, Aizawa T, Higashi K. Materials Transactions—JIM 2000; 41:1136.
- [342] Sassov A. Adv. Eng. Mater. 2000;2:466.
- [343] Banhart J, Stanzick H, Helfen L, Baumbach T. Applied Physics Letters 2001; 78:1152.
- [344] Banhart J, Bellmann D, Clemens H. Acta Mater 2001; [in press].
- [345] Olurin OB, Fleck NA, Ashby MF. Scripta Mater 2000; 43:983.
- [346] Schwalbe HJ, Baumgortner F, Beichelt C. Aluminium 2001; 77:87.
- [347] Maine E, Ashby MF. Advanced Engineering Materials 2000; 2:205.
- [348] Kaufmann H, Konrad B, Kretz R. Metal foams and porous metal structures. In: Banhart J, Ashby MF, Fleck NA, editors. Int. Conf., Bremen, Germany, 14–16 June. MIT Press–Verlag, 1999. p. 57 S. 51.
- [349] URL: www.metalfoam.net.632.

Перевод: Анфилов Н.В.
 Царева И.А.
 Царев М.В.
 Редактор: Бережко П.Г.