



*The authors of the article give the review of the existing technologies of the foam aluminium alloys production and their physical-mechanical characteristics, what is of a certain interest not only of metallurgists but of designers as well.*

В. А. КАЛИНИЧЕНКО, А. С. КАЛИНИЧЕНКО, БНТУ

## СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ ВСПЕНЕННОГО АЛЮМИНИЯ, ОБЛАСТИ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ И РЯД ОСОБЕННОСТЕЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Повышение конкурентоспособности продукции напрямую связано с созданием новых конструкционных и функциональных материалов. К таким относятся и вспененные материалы, позволяющие наряду с облегчением конструкций разрабатывать новые виды изделий. Наибольший интерес среди вспененных металлических материалов представляют пены на основе алюминия и его сплавов, первое получение которых было осуществлено 40 лет назад [1].

Главной особенностью вспененных материалов является их высокая пористость при хорошей демпфирующей способности, которая превосходит такие природные материалы, как древесина и кость. Металлические пены, несмотря на низкую плотность (0,1–0,8 г/см<sup>3</sup>), характеризуются достаточно высокими прочностными свойствами и жесткостью, а также способностью поглощать энергию.

Наряду с разработкой новых изделий, использующих вспененные материалы, представляют интерес и вопросы переработки вторичных

сплавов и отходов цветных металлов и сплавов. Вспененные материалы, полученные из отходов цветных сплавов или металлов, могут использоваться в изделиях неотвественного назначения или не несущих значительных конструкционных нагрузок.

Благодаря своей пористой структуре первые вспененные металлические материалы использовались как фильтры грубой очистки.

Алюминиевые вспененные материалы являются концептуальными для автомобилестроения, авиа- и космической промышленности, а также для различных областей машиностроения и строительства. Следует отметить, что в отличие от целого ряда аналогичных материалов металлическая пена экологически чистая и не требует особых затрат на переработку. Для примера можно провести сравнение между металлическими вспененными материалами и пористыми пластиками, которые уже применяются в промышленности (табл. 1).

Таблица 1. Сравнительные свойства алюминиевых вспененных материалов и пористых пластиков

Пористые пластиковые массы	Вспененный алюминий
Легкие (в связи с высокой пористостью)	
Имеют хорошую тепло- и звукоизоляцию	
Имеют высокую поглощающую способность при ударных нагрузках	
Горючие	Плохо- или совсем негорючие
Низкая стойкость к повышенным температурам	Хорошая стойкость к повышенным температурам
Проблематичны в переработке	Хорошо перерабатываемые

Применительно к автомобилестроению основные возможности можно обозначить как защита человека в салоне автомобиля, защита узлов и агрегатов, защита окружающей среды (снижение шумов, а также в результате снижения массы автомобиля — экономия горючего). Пожалуй, наиболее перспективными развиваемыми направлениями в автомобилестроении являются поглощение разрушающих энергетических воздействий, облегчение конструкции и улучшение изоляционных

показателей. В качестве энергопоглотителя наиболее интересными узлами для применения алюминиевых вспененных материалов служат бампера, наполнители продольных рам, а также участки изоляции днища и ряд других элементов [2].

Облегчение конструкции возможно осуществлять путем использования пластин из вспененного материала для моторного отсека и пространства багажника, разделительных перегородок, а также при производстве термофургонов. Возможно, в

перспективе применять металлическую пену вплоть до создания цельных кузовов (в особенности требующих повышенной жесткости, как на кабриолетах) [3]. Представляет интерес использование «сэндвичей», например, алюминиевый листовой металл — вспененный алюминий — металл).

Для строительной промышленности также представляет интерес применение вспененного алюминия как энергосберегающего материала в конструкциях облегченного строительства. Это обеспечивается такими свойствами пеноалюминия, как достаточно высокая механическая прочность, его негорючесть, гигиеничность и экологичность, защита от излучений, уменьшение потерь тепла. Примером использования пеноматериалов могут быть пластины временных понтонных мостов, защитные подушки лифтов, облицовочные плиты павильонов, звукоизоляционные стены сооружений, находящихся возле шумных зон (аэропорты, вокзалы, дискотеки и т.п.). Исследования показывают, что в случае пожара помещение из пеноалюминиевых плит (сплав  $AlCu_4$ ) выдерживает сильный пожар в течение 30 мин, хотя более высокую несущую

способность имеют плиты из сплавов системы  $AlMgSi$  [1].

Потребителем вспененных материалов является машиностроение. Ведутся разработки по созданию легких валцов из вспененного алюминия для печатной и бумажной промышленности. К тому же возможно потенциальное использование в теплообменниках, фильтрах и катализаторах, а также в некоторых случаях в качестве дизайнерской мебели и т.п.

Однако до настоящего времени их широкое использование ограничено как из-за консервативности применяемых технологий, так и отсутствия изделий, специально разработанных с применением вспененных металлических материалов. Еще одной проблемой на первых стадиях было отсутствие стабильности качества получаемой металлической пены.

В настоящее время принято различать три основные группы вспененных материалов по способу изготовления: литейно-металлургические, порошково-металлургические пены и прочие (включая напыленные и синтаксические) (рис. 1). Эти группы делятся на подгруппы по дополнительным признакам, например, характеру сформированных пор (открытые и закрытые).

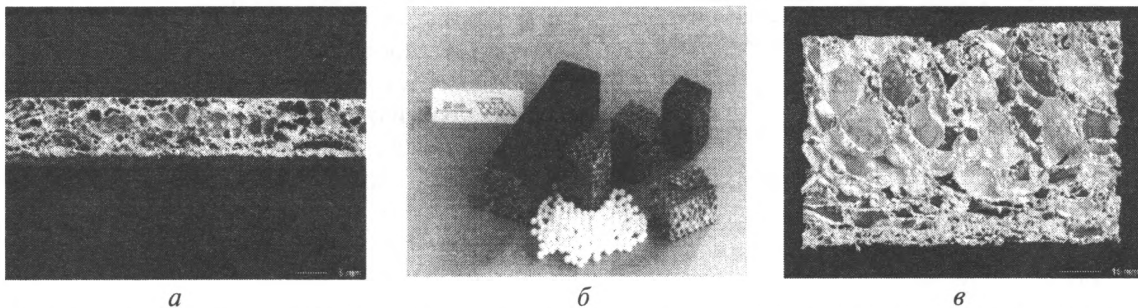


Рис. 1. Вспененные материалы: а — порошково-металлургическая алюминиевая пена; б — примеры синтаксических пенообразных материалов [1]; в — литейно-металлургический вспененный алюминиевый сплав

На рис. 2 приведены кривые, показывающие соотношение между исследованиями в области металлических пен и темпом их внедрения в промышленность. Однако для более широкого внедрения в высокотехнологических областях машиностроения необходимо решить ряд технологических и материаловедческих задач:

- обеспечение воспроизводимости свойств вспененных материалов;
- прогнозирование и управление процессом формирования заданных свойств с учетом области использования;
- достижение высоких антикоррозионных свойств;
- разработка методов размерной обработки.

К сожалению, необходимо отметить, что до настоящего времени, кроме прототипов и опытных партий, нет широкомасштабного применения вспененного алюминия в высокотехнологических областях машиностроения. Для решения проблем прогнозирования должны применяться методы



Рис. 2. Зависимость между исследованиями в области вспененных материалов и их внедрением в промышленность (по данным IFAM Bremen) [1]

компьютерного моделирования. При этом следует уделять особое внимание учету в расчетах свойств и вида исходных шихтовых материалов.

Рассмотрим способы получения вспененных металлических материалов, в первую очередь,

получаемых литейно-металлургическими способами, которые наиболее перспективны для Республики Беларусь. Практически все вспененные материалы, полученные литейно-металлургическими способами, являются пенами с закрытым типом пор. Основными компонентами получения данного типа материалов могут быть расплавленная алюминиевая основа, а также (в зависимости от типа процесса) материалы, увеличивающие вязкость расплава, такие, как натрий, кальций, оксид алюминия, карбид кальция или ряд других добавок.

К процессам получения вспененного алюминия можно отнести ALPORAS, Alcan N. Hydro, GASAR, порошково-металлургические и др.

Схема установки ALPORAS приведена на рис. 3.

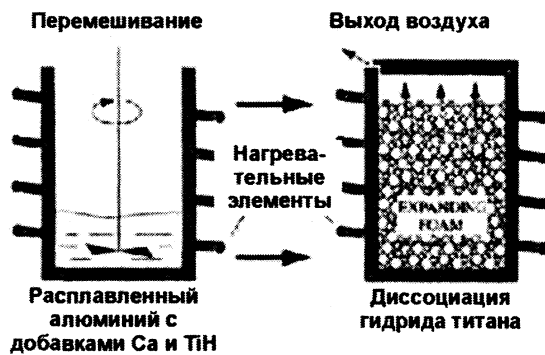


Рис. 3. Литейно-металлургический ALPORAS-процесс

В общих чертах принцип ALPORAS-процесса можно охарактеризовать как введение специальных веществ в расплав с последующим вспениванием. Способ получения включает в себя следующие этапы: расплавление алюминия → добавление кальция для увеличения вязкости расплава → введение реагента → вспенивание материала в кокиле → придание пенообразному материалу конечной формы. Для обеспечения однородности распределения размеров пор в отливке необходимо вводить реагент в расплав с температурой, приблизительно равной температуре плавления алюминия. Процесс проводят в герметично закрытой форме. После окончания процесса получают вспененный материал с пористостью 89–93% и плотностью 0,2–0,3 г/см<sup>3</sup> [4].

Процесс Alcan N. Hydro разработан в рамках международной программы MMC (композиционные материалы с металлической матрицей) (рис. 4). Следует отметить, что в этом процессе дополнительно идет армирование алюминиевой основы карбидом кремния или оксидом алюминия, добавляемых в расплав в количестве от 5 до 20%. Схематически процесс можно разделить на следующие этапы: плавка алюминия → добавление керамического упрочнителя → введение инертного газа → вытяжка вспененной субстанции на алюминиевой фольге. В результате получим вспе-

ненный алюминий с варьируемой пористостью от 80 до 97%.

Однако получаемая при этом процессе пена плохо обрабатывается, что приводит к высокому износу режущего инструмента из-за содержания керамических частиц.

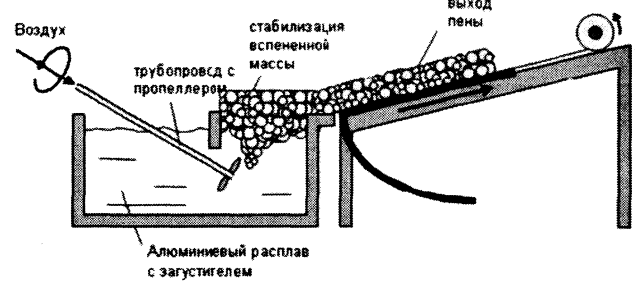


Рис. 4. Литейно-металлургический процесс получения алюминиевой пены Alcan N. Hydro

Как отдельный вид рассматриваются синтаксические пены. Название этого вида произошло от слова «syntax» – соединенные вместе. В настоящее время этим способом производятся практически все магниевые пены, а также некоторые алюминиевые вспененные материалы. Данные пены получают путем пропитки металлической матрицы формы, заполненной неметаллическими шариками. Наиболее типичными материалами шариков являются дерево, оксиды алюминия или титана, различные типы пластиков и ряд других материалов. Размер шариков обычно составляет от 1 до 5 мм, толщина металлических переемычек – от 50 мкм до 1,0 мм при плотности конечного материала 0,2 – 0,9 г/см<sup>3</sup>.

Производство данного типа вспененных материалов начинается с плавки расплава (желательно в автоклаве). Заливку производят под давлением, в атмосфере аргона, в форму, заполненную шариками. При различных вариациях данный тип пен можно использовать для получения строительных «сэндвичей». Как правило, «сэндвичи» получают методами пропитки в отличие от литья в формы, осуществляемого под давлением.

К литейно-металлургическим процессам получения вспененных материалов можно отнести GASAR, DUOCELL, CELLMET и др. К сожалению, их применение либо дорого, либо связано с рядом технологических трудностей. Например, процесс GASAR связан с плавлением чистого алюминия в автоклаве с последующей добавкой водорода высокого давления и последующей разливкой в кокиль.

При порошково-металлургическом процессе производства вспененного алюминия отсутствует прочное сцепление между алюминиевыми частичкам в отличие от литейных способов производства. Изготовление порошково-металлургической пены включают в себя следующие этапы (рис. 5): смешение алюминиевого порошка с реагентом →

компактирование → прессование (к примеру, экструзия) → вспенивание через нагрев при температурах от 100°C и выше.

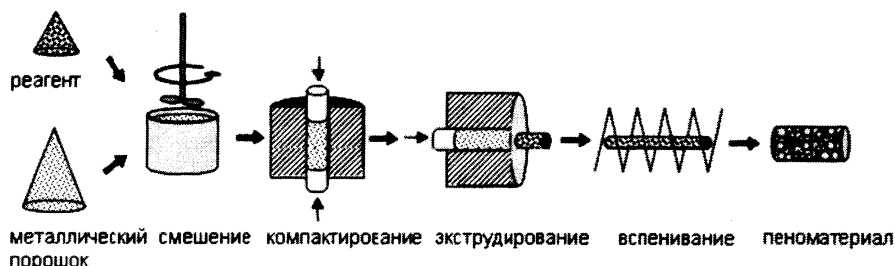


Рис. 5. Порошково-металлургический процесс получения пены типа Fraunhofer Mepura

Рассматривая различные способы получения пены, необходимо отметить свойства готовых пенообразных материалов, полученных конкретными способами, а также зависимость свойств алюминиевых вспененных материалов от химического состава матрицы. Вспененные материалы обладают весьма необычными свойствами по сравнению со сплавами аналогичного химического состава, но полученными традиционными методами литья:

они плавают в воде, сохраняют заданную форму без деформации вплоть до момента плавления и др.

Основные физико-механические свойства алюминиевых пен приведены в табл. 2, а зависимость свойств вспененных материалов от вида сплава — в табл. 3.

Таблица 2. Основные свойства алюминиевых пен

Тип пены	Alcan N. Hydro	Schinko Wire (ALPORAS)	Fraunhofer Mepura
Процесс производства	Расплав Al + газ	Расплав Al + TiH <sub>2</sub>	Кусковой Al + TiH <sub>2</sub>
$\rho^*$ , г/см <sup>3</sup>	0,08 – 0,38	0,21	0,35 – 0,7
$\rho^*/\rho_s(-)$	0,03 – 0,14	0,08	0,13 – 0,26
Вид пор	Закрытые	Закрытые	Закрытые
Размер пор, мм	4 – 18	6	3
Стоимость, у.е./кг	5 – 10	Неизвестна	300

Таблица 3. Влияние химического состава сплава на свойства алюминиевых вспененных материалов [1]

Сплав	Al 99,5 чушковой	Al 99,5	AlCu4	AlSi12		
Применяемый реагент	–	TiH <sub>2</sub>	TiH <sub>2</sub>	TiH <sub>2</sub>		
Термообработка	–	нет	закалка	нет		
Плотность, г/см <sup>3</sup>	2,7	0,4	0,7	0,54	0,84	
Средний диаметр пор, мм	–	4,0	3,0	–	–	
Прочность на сжатие, МПа	–	3,0	21,0	7,0	15,0	
Поглощение энергии при 30%:						
	МДж/м <sup>3</sup>	–	0,72	5,2	2,0	4,0
	КДж/кг	–	1,8	7,4	3,7	4,8
Модуль эластичности, ГПа	67,0	2,4	7,0	5,0	14,0	
Электропроводность, м/(Ω·мм <sup>2</sup> )	34,0	2,1	3,5	нет данных		
Удельное электросопротивление, мΩсм	2,9	48,0	29,9	нет данных		
Теплопроводность, Вт/(м·К)	235,0	12,0	–	13,0	24,0	
Коэффициент термического расширения, ·10 <sup>6</sup> К <sup>-1</sup>	23,6	23,0	24,0	нет данных		

Однако какой бы тип вспененных материалов не рассматривался, важнейшими параметрами являются его свойства и стабильность. Можно выделить четыре группы параметров, определяющих пены:

- 1) характеристики исходных материалов (химический состав сплава, тип реагента);
- 2) параметры вспенивания (температура, время выдержки, атмосфера в печи, скорость охлаждения и стабильность параметров процесса);
- 3) параметры изготовления (тип формы, размер изделия и его масса);
- 4) способ приготовления шихты.

Как показывает практика, исходный состав алюминиевых сплавов (особенно при порошково-металлургическом процессе) практически не влияет на процесс вспенивания и размер пор во вспененных материалах. Однако в процессе вспенивания возможно изменение структуры металли-

ческой основы, что может привести к охрупчиванию материала.

Для параметров вспенивания весьма важен контроль температуры. Однако следует учитывать, что этот параметр напрямую связан с геометрией и материалами тигля и формы, конструкцией формы, печной атмосферой и свойствами сплава (в первую очередь его вязкостью и жидкотекучестью). Вид печного оборудования для производства вспененных материалов не имеет значения, это могут быть как лабораторные печи сопротивления, так и промышленные агрегаты. Однако для промышленного производства рекомендуются печи непрерывного действия.

Большое значение имеет приготовление расплава, ведь только при гомогенном распределении пенообразующего реагента в металлической матрице получается равномерная по свойствам и структуре пенообразная масса.

Независимо от способа получения пены готовый продукт представляет собой либо пенометаллический блок, либо пластину неравномерную по толщине. Для промышленных нужд требуются изделия конечных форм. Поэтому необходима обработка полуфабриката для придания формы, учитывая следующие условия:

- процесс механической обработки обязан быть дешевым;
- процесс должен быть рассчитан для массового производства с высоким качеством готовых изделий, не требующим значительной реконструкции станочного парка.

С целью определения особенностей механической обработки вспененных материалов для придания им требуемой формы были проведены эксперименты с использованием различных видов размерной обработки.

К нежелательным процессам обработки можно отнести плазменную резку (процесс изна-

чительно дорогой и требует специального оборудования), а также резку водой или лазером. Процесс лазерной резки не является дорогим, однако нетехнологичен для массового производства. Это частично объясняется тем, что лазерным лучом весьма энергоемко обработать литую пену, а после обработки порошково-металлургической пены необходима окончательная доработка контуров. Пример лазерной обработки пены показан на рис. 6, 7. Исходя из этих фотографий, можно отметить ряд следующих особенностей: во-первых, порошково-металлургическая пена, обладающая относительно малой толщиной (около 10 мм), достаточно хорошо обрабатывается лазерным лучом. Разрезанная пора приведена на рис. 7. Однако нельзя не заметить обилие оплавленных зон (см. рис. 6), а также бахрому из оплавленного алюминия на нижней части пены, получающуюся в результате обработки и ведущую к нарушению геометрии заготовки.

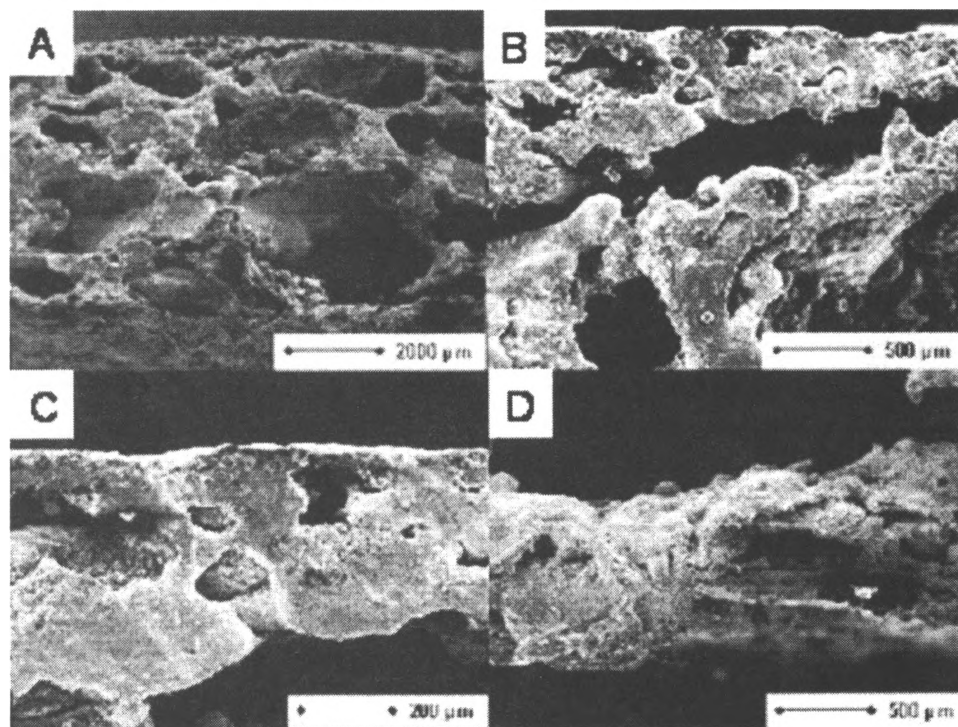


Рис. 6. Порошково-металлургическая пена, обработанная диффузионным лазером МЕРУРА CO<sub>2</sub> в защитной атмосфере азота при давлении 20 бар: А – общий вид пены после обработки (наклон 41°); В – зона расплава в пене совместно с зонами среза; С – верхняя кромка пены; D – нижняя кромка

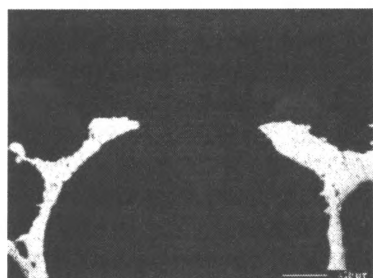


Рис. 7. Шлиф порошково-металлургической пены после лазерной обработки, как на рис. 6. x25

Также необходимо учитывать, что дальнейшее применение металлической пены как конструктивного элемента для легкого строительства требует сохранения ее изначальной плотности. Поэтому представляют

интерес такие методы обработки, как специальные методы резания и электрохимическая размерная обработка.

Для построения математической модели обработки пены необходимо ввести ряд приближений. Как известно, литейно-металлургическая пена представляет собой пористый материал с условным диаметром пор от 0,5 до 30 мм. Это значит, что при резании возникают напряжения не только в поверхностном слое, но и по всей массе обрабатываемого материала (имеются в виду металлические перегородки). Для упрощения мате-

матического описания целесообразно рассматривать исключительно приповерхностный слой, а процессы, происходящие внутри материала, — как имеющие место в монолитном теле. Это связано с тем, что рассмотрение пены как композиционного материала металл–воздух требует сложных математических моделей, решение которых не всегда возможно найти.

Таким образом, процессы получения вспененных металлических материалов имеют практический интерес для Республики Беларусь. Причем данные методы могут применяться для переработки и вторичных алюминиевых сплавов и от-

ходов, которые по своим свойствам не могут использоваться для ответственного литья.

#### Литература

1. Aluminiumschaum // Aluminium – Zentrale e.V. / Merkblatt W 17 – 1. Aufgabe, Dusseldorf, 02. 1999.
2. Energieabsorbierende Materialien // Firmenprospekt. Volkswagen AG / Wolfsburg, 1998.
3. Friedrich H. Einsatz innovativer Werkstoffe – Sicherheit für das Auto der Zukunft // VW – Presskonferenz Hannovermesse, April 1998.
4. Y. Sugimura, J. Meyer, Y. He, H. Bart-Smith, J. Grensted, A.G. Evans // On the mechanical performance of closed cell Al alloys foams. – Acta Materialia. 1997. Vol. 45. P. 5245–5259.