

DOI 10.8562/JEST.214.20  
УДК 669.2.017:543

*В.Г. Михайлов, Г.Е. Коджаспиров, Ф.Ю. Исупов*

## **АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОЛУЧЕНИЯ «СЭНДВИЧЕЙ С АЛЮМИНИЕВОЙ ПЕНОЙ» ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛЕГКИХ КОНСТРУКЦИЙ**

*V.G. Michailov, G.E. Kodzhaspirov, F.Yu. Isupov*

### **ANALYSIS OF THE METHODS FOR ALUMINIUM FOAM SANDWICHES MANUFACTURING TO PRODUCE LIGHTWEIGHT STRUCTURES**

Сэндвич с алюминиевой пеной (САП) — один из наиболее перспективных вариантов изделий, в которых применяются современные достижения материаловедения и предназначенных для изготовления легких конструкций в различных областях современной техники. Статья имеет обзорный характер и предлагает анализ современного состояния исследований в данной области. Описаны особенности изготовления и промышленного применения САП, рассмотрены достоинства и недостатки сэндвич-соединений, полученных различными технологическими способами. Также в статье представлены некоторые физико-механические свойства алюминиевых пен, описаны примеры использования САП на практике и перспективы расширения области его применения.

ЛЕГКИЕ КОНСТРУКЦИИ; СЭНДВИЧ С АЛЮМИНИЕВОЙ ПЕНОЙ; АЛЮМИНИЕВАЯ ПЕНА; ПОРИСТАЯ СТРУКТУРА; ИЗГОТОВЛЕНИЕ; ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ.

Aluminium foam sandwich (AFS) is one of the most perspective product versions based on state-of-art material science achievements, being intended to be used in light constructions production in different technological areas. The article is a review, presenting the analysis of the current state of research in this area. The peculiarities of production technique of the sandwich type and their applications in industry are presented in the paper. The advantages and disadvantages of sandwich-connection produced by different production technique are discussed. Some characteristics of physical-mechanical properties of aluminium foam, examples of AFS practical application and perspectives of expansion application area as well are demonstrated.

LIGHTWEIGHT CONSTRUCTIONS, ALUMINIUM FOAM SANDWICH, ALUMINIUM FOAM, POROUS STRUCTURE, PRODUCTION, APPLICATION AREA.

#### **Введение**

Статья является обзором научных и технологических разработок в области создания новых материалов и конструкций, изготавливаемых из легких сплавов. Известные публикации по рассматриваемому перспективному направлению в большей степени относятся к анализу возможностей использования комбинированных многослойных материалов, в частности сэндвичей с алюминиевой пеной (САП) [1–5].

Однако существующие данные об изготовлении САП и перспективах их применения для ответственных изделий конструкционного назначения, используемых в авиационно-космической технике и транспортном машиностроении, сви-

детельствуют о необходимости дальнейшего усовершенствования материалов данного типа и технологических процессов изготовления из них конкретных изделий.

Цель нашей работы — анализ методов получения сэндвичей с алюминиевой пеной в приложении к задачам разработки новых материалов и усовершенствования технологических процессов изготовления из них перспективных изделий для высокотехнологичных отраслей.

#### **Материалы**

«Сэндвич с алюминиевой пеной» — это трехслойное соединение, внешними слоями кото-

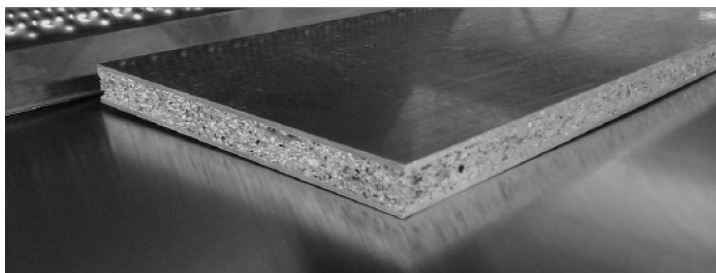


Рис. 1. «Сэндвич с алюминиевой пеной»

рого является, как правило, листовой прокат из алюминиевых сплавов, а внутренний слой — пеноалюминий, полученный нагревом спрессованной порошковой смеси из металлической крошки (обычно сплав Al-Si или Al-Si-Cu с содержанием 6–8 % Si и 3–10 % Cu и гидрида титана  $TiH_2$ ) до температуры ее плавления, что сопровождается выделением водорода, приводящего к созданию пористой структуры [3].

Важная конструктивная особенность такого соединения — наличие прочной металлической связи между внешними и внутренним слоями, обеспечивающей изделию высокую жесткость при изгибающей нагрузке [2, 6]. Пеноалюминий, в свою очередь, ввиду высокой пористости (до 70–75 %) обеспечивает облегчение конструкции за счет малой плотности пены. Однако малая плотность и высокая жесткость — это еще далеко не все преимущества таких изделий.

Сэндвич с алюминиевой пеной, помимо высокой жесткости на изгиб, способен к восприятию без разрушения большой равномерно распределенной по его поверхности нагрузки и обладает высокими демпфирующими свой-

ствами [4]. Последнее достоинство обусловлено центральным слоем из пеноалюминия.

Пеноалюминий — разновидность металлической пены, т. е. вид пористого металла, пористость которого достигает 70 %, а поры имеют закрытый тип, представляя собой объемы, ограниченные стенками типа границ зерен. Металлическая пена, в частности алюминиевая, обладает рядом важных свойств: а) низкой плотностью (от 0,2 до 1 г/см<sup>3</sup>); б) низкой теплопроводностью ввиду малой толщины стенок между соседними порами; в) высокой эффективностью поглощения энергии при ударной нагрузке; г) низким пределом прочности на сжатие и растяжение [4, 5]. Эффективность поглощения энергии алюминиевой пеной согласно [4] в 5–10 раз больше, чем массивным материалом. В таблице представлены основные механические свойства наиболее широко известных производимых промышленностью алюминиевых пен.

Из сказанного понятно, что металлическая пена и ее соединения (в частности САП) имеют большую значимость для применения в различных отраслях машиностроения: в автомобиле-

Свойства некоторых коммерческих алюминиевых пен [4]

Параметры	Значения параметров для пен разных марок			
	Alporas	Alulight	Cymat	ERG
Материал	Al	Al	Al-SiC	Al
Плотность, г/см <sup>3</sup>	0,20–0,25	0,30–1,00	0,07–0,56	0,16–0,25
Относительная плотность	0,08–0,10	0,10–0,35	0,02–0,20	0,05–0,10
Модуль упругости, ГПа	0,40–1,00	1,70–12,0	0,02–2,00	0,06–0,30
Модуль сдвига, МПа	0,30–0,35	0,60–5,20	0,001–1,0	0,02–0,10
Коэффициент Пуассона	0,31–0,34	0,31–0,34	0,31–0,34	0,31–0,34
Предел прочности при сжатии, МПа	1,30–1,70	1,90–14,0	0,04–7,00	0,90–3,00
Предел прочности при растяжении, МПа	1,60–1,90	2,20–30,0	0,05–8,50	1,90–3,50

и судостроении, при создании бытовой и производственной техники, в военной промышленности, строительной отрасли и т. д.

### Производство сэндвича с алюминиевой пеной

В настоящее время разрабатываются различные способы и технологии промышленного производства подобных сэндвичей. Основные из них представлены на рис. 2 [3].

Получение подобной многослойной конструкции возможно путем прямого соединения отдельных его слоев (двух листов из алюминиевого сплава и блока пеноалюминия) с помощью клеящего вещества или пайкой (рис. 2, *а*). Однако данный способ имеет недостатки: применение клея увеличивает себестоимость продукта и усложняет процесс его переработки, что в свете возрастающих требований к экологичности используемых материалов весьма важно; пайкой же не удастся добиться нужного качества соединения между слоями, что негативно сказывается на жесткости конечного продукта. Еще один способ объединения отдельных слоев в САП — это их диффузионное соединение при вспенивании центрального слоя (рис. 2, *б*), про-

изводимое непосредственно при высокой температуре (температура вспенивания), равной или превышающей температуру плавления плиты из спрессованной порошковой смеси. Этот метод позволяет избежать применения клея, однако он имеет определенный недостаток: для достижения прочного соединения необходим равномерный нагрев заготовок и особый контроль за процессом вспенивания алюминиевой смеси, реализация чего весьма затруднительна. Неравномерность нагрева и наличие окисной пленки на границе соединения слоев приводит к неравномерности протекания процесса диффузии и, как следствие, к разному качеству соединения слоев в разных частях САП.

Интересным способом производства САП является так называемое «структурное», или «интегральное», вспенивание порошковой смеси (рис. 2, *г*), позволяющее избежать необходимости использования заранее изготовленного листового проката в качестве внешних слоев. Данный способ позволяет за счет зонного нагрева спрессованной порошковой плиты создать пористую структуру в заданном участке, избежав вспенивания в других. К сожалению, данная технология очень сложна для управления и контроля и пока еще плохо изучена, что мешает ее широкому распространению в промышленном производстве «сэндвичей».

Наибольшую известность в сфере производства САП получила немецкая технология — так называемый Тагон-процесс (рис. 2, *в*) пакетная прокатка листовых заготовок с плитой из спрессованной порошковой смеси, впоследствии образующей пористый центральный слой соединения, [4, 7]. Данная технология была разработана Фрауэнхоферским Институтом соединений и исследования материалов (IFAM). Схематично она изображена на рис. 3. Отличительной особенностью этого процесса является то, что соединение слоев САП происходит за счет деформационной сварки, еще до стадии вспенивания центрального слоя. Это позволяет получить достаточно прочное соединение между слоями. Полученная после пакетной прокатки заготовка может быть далее любым известным способом пластически деформирована, что дает возможность задать определенную форму будущего САП-изделия. К недостаткам данного способа получения САП можно отнести,

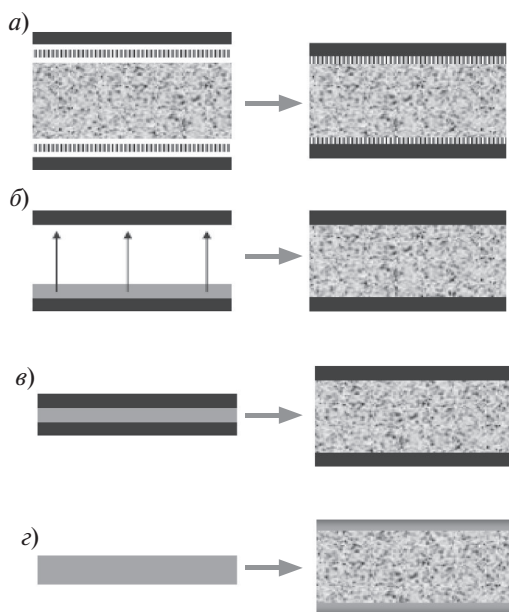


Рис. 2. Способы производства «сэндвича с алюминиевой пеной» [3]: *а* — соединение на основе клеящего вещества (пайка); *б* — диффузионное соединение при вспенивании; *в* — Тагон-процесс; *г* — структурное/интегральное вспенивание

пожалуй, его энергозатратность и длительность, что не мешает рассматривать Тагон-процесс в качестве главного на сегодня промышленного способа получения САП и изделий из САП.

### Применение «сэндвичей с алюминиевой пеной»

Сэндвич-соединения обладают огромным потенциалом для применения в различных отраслях промышленности. Наиболее яркий пример использования данного материала — это попытка заменить стальные несущие конусные конструкции в ракете «Ariane 5» на конструкции такой же формы (рис. 4, в), но изготовленные с помощью сварки двенадцати панелей САП (внешние слои — листовой прокат марки AW-6060, толщиной 1,3 мм; базовый материал центрального слоя — алюминиевый сплав AlSi6Cu6) [3]. Испытания полученной детали прошли успешно, а их результаты, в частности отражающие жесткость конструкции, позволяют ожидать, что в будущем с большой долей вероятности удастся реализовать замысел инженеров в промышленности.

Возможными вариантами применения «сэндвичей» являются также кузов, стойки и другие элементы конструкции легковых и грузовых автомобилей, поездов, судов и самолетов [3, 5]. Разработки в данном направлении ведутся различными организациями Германии, Канады и Китая. Так, компания AngewandteMicro-Messtechnik GmbH совместно с Бранденбургским Техническим университетом (Коттбус) проводила исследования, целью которых было определение прочностных характеристик «сэндвича», а также попытка разработать технологию создания кузова электропоезда из такого материала. Результатами работы стали пробное изготовление носовой

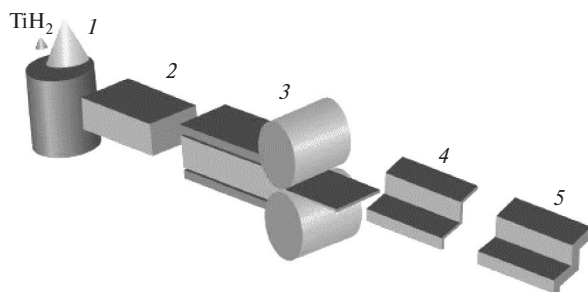


Рис. 3. Технологическая цепочка промышленного производства «сэндвича с алюминиевой пеной» [7]: (1 — создание порошковой смеси (сплав Al + TiH<sub>2</sub>); 2 — компактирование порошковой смеси (с помощью прессы); 3 — пакетная прокатка; 4 — гибка или другая операция формоизменения заготовки; 5 — нагрев под вспенивание и последующее охлаждение заготовки)

части кузова поезда (рис. 4, б), а также экспериментальное подтверждение возможности применения САП в рассматриваемых целях.

Применение «сэндвичей с алюминиевой пеной» в медицинских целях (к примеру, в качестве протезов), в радио- и локационной технике также весьма актуально, но вместе с тем требует более детального изучения структуры, свойств, напряженного состояния в каждой точке изделия [4]. Существенным резервом повышения технологических и эксплуатационных свойств подобных соединений представляется создание специальных, в том числе ультрамелкозернистых, структур [8–10].

### Заключение

«Сэндвичи с алюминиевой пеной» — перспективный материал для изготовления конструкций, в которых важна удельная прочность, демпфирующие акустические свойства (шумопоглощение)

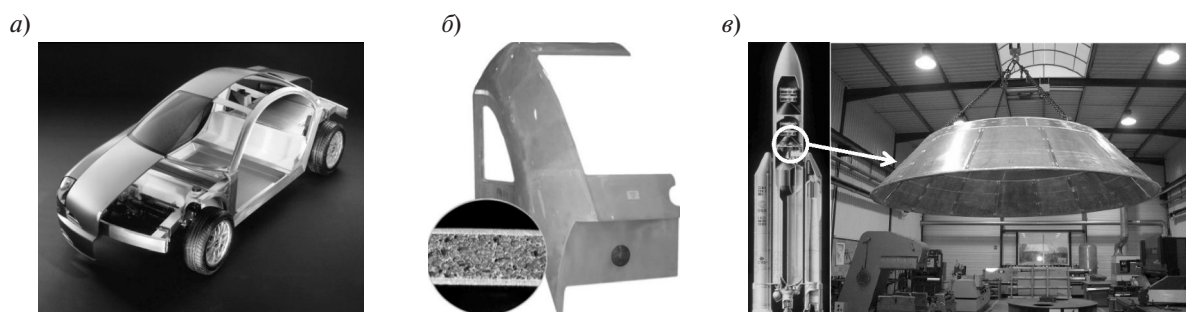


Рис. 4. Примеры возможного промышленного применения «сэндвичей с алюминиевой пеной» [3, 5]

и жесткость конструкции. Внедрение подобных материалов в авиационно-космической промышленности, транспортном машиностроении и других отраслях требует развития и оптимизации технологий в соответствии с конкретными

условиями эксплуатации изготавливаемых из данных материалов изделий.

Работа выполнена в СПбГПУ по договору № 14.Z50.31.0018 с Министерством образования и науки Российской Федерации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Wiedemann J.** Leichtbau: Elemente und Konstruktion 3. Aufgabe. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. 889 s.
2. **Bahnhart J., Seeliger H.-W.** Aluminium Foam Sandwich Panels: Manufacture, Metallurgy and Applications // *Advanced Engineering Materials*. 2008. № 9. P. 793–802.
3. **Bollinghaus T.** Werkstoffeigenschaften und Verarbeitung von Aluminiumschäumen RWTH. Aachen, 2003. 195 s.
4. **Hipke T., Lange G., Poss R.** Taschenbuch für Aluminiumschäume 1. Auflage. Düsseldorf: Aluminiumverlag, 2007. 204 s.
5. **Haders H.** Ermüdung von Aluminiumschaum. Braunschweig, 2005. 222 s.
6. **Viehweger B., Sviridov A.** Frontmodule für Schienenfahrzeuge aus Aluminiumschaumsandwich Fertigungstechnologien zur Bauteilherstellung // *Forum der For-*

schung 20, Cottbus. 2007. S. 69–72.

7. **Коджаспиров Г.Е., Рудской А.И., Рыбин В.В.** Физические основы и ресурсосберегающие технологии изготовления изделий пластическим деформированием. СПб.: Наука, 2007. 350 с.

8. **Рудской А.И., Коджаспиров Г.Е.** Технологические основы получения ультрамелкозернистых металлов. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2012. 247 с.

9. **Banhart J., Baumeister J., Melzer A., Seeliger W., Weber M.** Aluminiumschaum für den Fahrzeugbau // *Metall* 1998. Vol. 52(12). S. 726–729.

10. **Михайлов В.Г., Коджаспиров Г.Е., Исупов Ф.Ю.** Перспективные методы повышения прочности сэндвичей с алюминиевой пеной путем диспергирования структуры // *Международ. научно-техн. конф. «Нанотехнологии функциональных материалов»*. СПб., 2014. С. 140–141.

## REFERENCES

1. **Wiedemann J.** Leichtbau: Elemente und Konstruktion 3. Aufgabe. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. 889 s.
2. **Bahnhart J., Seeliger H.-W.** Aluminium Foam Sandwich Panels: Manufacture, Metallurgy and Applications. *Advanced Engineering Materials*. 2008. № 9. P. 793–802.
3. **Bollinghaus T.** Werkstoffeigenschaften und Verarbeitung von Aluminiumschäumen RWTH. Aachen, 2003. 195 s.
4. **Hipke T., Lange G., Poss R.** Taschenbuch für Aluminiumschäume 1. Auflage. Düsseldorf: Aluminiumverlag, 2007. 204 s.
5. **Haders H.** Ermüdung von Aluminiumschaum. Braunschweig, 2005. 222 s.
6. **Viehweger B., Sviridov A.** Frontmodule für Schienenfahrzeuge aus Aluminiumschaumsandwich Fertigungstechnologien zur Bauteilherstellung. *Forum der Forschung* 20. Cottbus. 2007. S. 69–72.
7. **Kodzhaspirov G.Ye., Rudskoi A.I., Rybin V.V.** Fizicheskiye osnovy i resursosberegayushchiye tekhnologii

izgotovleniya izdeliy plasticheskim deformirovaniyem. [Physical basics and energy saving technologies of plastic deformation producing technique]. SPb.: Nauka, 2007. 350 s. (rus.)

8. **Rudskoi A.I., Kodzhaspirov G.Ye.** Tekhnologicheskiye osnovy polucheniya ultramelkozernistykh metallov. [Technological basements of UFG metals producing]. SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2012. 247 s. (rus.)

9. **Banhart J., Baumeister J., Melzer A., Seeliger W., Weber M.** Aluminiumschaum für den Fahrzeugbau, *Metall* 1998. Vol. 52(12). S. 726–729. (rus.)

10. **Mikhailov V.G., Kodzhaspirov G.Ye., Isupov F.Yu.** Perspektivnyye metody povysheniya prochnosti sendvichey s alyuminiyevoy penoy putem dispergirovaniya struktury. [Strength increasing perspective methods for aluminum foam sandwiches by means refinement of structure]. *Mezhdunar. nauchno-tekhn. konf. «Nanotekhnologii funktsionalnykh materialov»* [Proceeding of international scientific conference Nanotechnologies of funkcionalnykh materials (NFM'2014)]. SPb., 2014. S. 140–141. (rus.)

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**МИХАЙЛОВ Веселин Георгиев** — доктор технических наук заведующий лабораторией легких материалов и конструкций Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: [michailov@tu-cottbus.de](mailto:michailov@tu-cottbus.de)

**КОДЖАСПИРОВ Георгий Ефимович** — доктор технических наук директор Центра новых материалов Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: [gkodzhaspirov@gmail.com](mailto:gkodzhaspirov@gmail.com)

**ИСУПОВ Федор Юрьевич** — младший научный сотрудник Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: [isupov\\_fedia@mail.ru](mailto:isupov_fedia@mail.ru)

**AUTHORS**

**MICHAILOV Veselin G.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: [michailov@tu-cottbus.de](mailto:michailov@tu-cottbus.de)

**KODZHASPIROV Georgii E.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: [gkodzhaspirov@gmail.com](mailto:gkodzhaspirov@gmail.com)

**ISUPOV Fedor Yu.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: [isupov\\_fedia@mail.ru](mailto:isupov_fedia@mail.ru)