



## КОНСТРУКЦИОННЫЕ СВЕРХЛЕГКИЕ ПОРИСТЫЕ МЕТАЛЛЫ (Обзор)

М.А. ХОХЛОВ, Д.А. ИЩЕНКО

ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В последние годы проявляется повышенный интерес к пористым металлам, которые имеют много привлекательных технологических свойств. В статье представлены основные технологические преимущества пористых металлов, обуславливающие перспективность их применения. Пористые металлы, сохраняя основные достоинства исходного материала, имеют во много раз ниже тепло- и электропроводность, а их звукопоглощение и демпфирующая способность выше. В качестве способов соединения пористых металлов могут быть использованы склеивание, пайка или диффузионная сварка. Пористый алюминий способен обеспечить беспрецедентное соотношение прочности к весу, что может активно применяться в аэрокосмических технологиях, где минимизация массы имеет большое значение. Наиболее широко применяемым на сегодняшний день свойством пористого алюминия является демпфирование и максимальное поглощение вибраций, волн и энергии удара при столкновениях. В ближайшем будущем пористые сплавы, в зависимости от степени пористости и проявления новых уникальных свойств, станут основными конструкционными и защитными материалами при создании военной амуниции, в строительстве, приборостроении, а также автомобильной, железнодорожной, аэрокосмической технике и кораблестроении. Пористые металлы интенсивно производятся с 2000 года в Европе, США и Японии. В Украине производство пористого алюминия освоено на экспериментальном уровне и до сих пор является дорогостоящим и энергоемким. Библиогр. 17, рис. 12.

*Ключевые слова:* сверхлегкие материалы, алюминий, магний, пористый алюминий, пеноалюминий, демпфирование, удельная прочность, приборостроение, телекоммуникационный спутник, аэрокосмическая индустрия, свариваемость

В последние годы проявляется повышенный интерес к пористым металлам, которые имеют много привлекательных технологических свойств. Пористый металл (ПМ) — это металлическая пена, ячеистая структура которой содержит большое количество равномерно распределенных пор и перемычек. Существует несколько принципиально различных технологий получения пористых металлов, одной из которых является спекание гранул-полуфабрикатов (рис. 1). Различие в технологиях позволяет получать ПМ с различной конфигурацией пор, что меняет их плотность и технологические свойства до противоположных. К примеру, ПМ с закрытыми порами (рис. 2, а) имеет пористость 50...80 % и обеспечивает теплоизоляционные свойства, а материал с открытыми порами (рис. 2, б) и пористостью 35...95 % позволяет осуществлять теплообмен. У ПМ низкая ги-

гроскопичность (1...3 %), что обуславливает морозостойкость и отсутствие трещин при перепаде температур. Металлические пены из алюминия, магния, стали, титана или цинка хорошо соединяются склеиванием, сваркой, пайкой с различными материалами, имеют повышенную коррозионную стойкость, легко поддаются сверлению, распиливанию и фрезерованию.

Пористый алюминий (ПА) способен обеспечить беспрецедентное соотношение прочности к весу, что может активно применяться в аэрокосмических технологиях, где минимизация массы имеет большое значение. Так как доля алюминия в конструкциях самолетов составляет от 2/3 до 3/4, а ракет — от 1/20 до 1/2, то возможность замены монолитных материалов на пористые в крупных элементах конструкции является перспективной задачей (рис. 3).

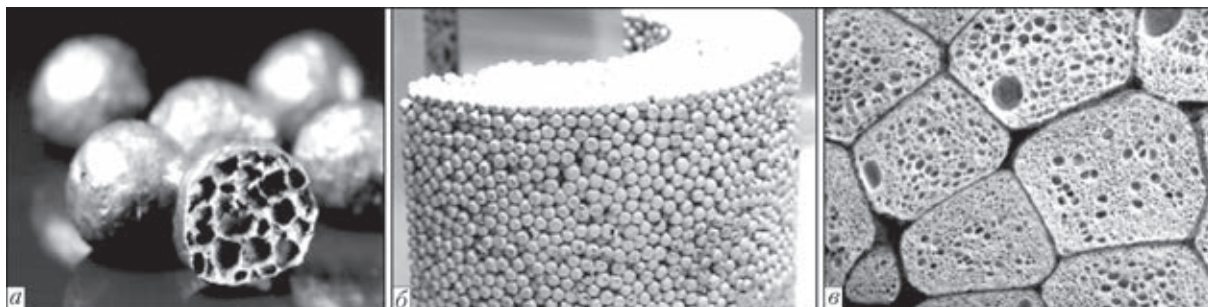


Рис. 1. Гранулы-полуфабрикат (а) помещаются в форму для спекания (б) при получении пористого алюминия (в)

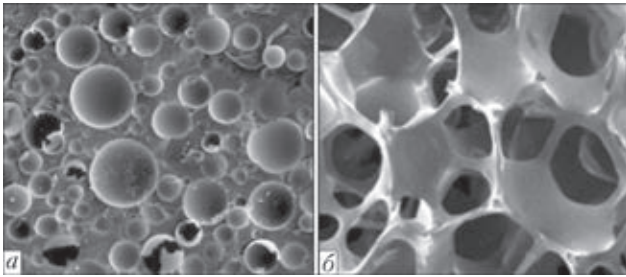


Рис. 2. ПА с закрытым (а) и открытым (б) типом пористости

Замена дорогостоящих сотовых конструкций панелями из ПА [1–3] (рис. 4–6) может существенно сократить издержки производства телекоммуникационных спутников и другой космической техники, где имеет место тенденция роста соотношения массы полезной нагрузки (исследовательское оборудование, закрепленное на спутнике), к общей массе запускаемого космического аппарата (платформа) (рис. 7).

Пористые металлы, сохраняя основные достоинства исходного материала, имеют во много раз ниже тепло- и электропроводность, а их звукопоглощение и демпфирующая способность выше, чем у металла перемычек. Кроме того, они нетоксичны, термо- и биостойки, не разрушаются при воздействии горюче-смазочных веществ, растворителей, ультрафиолета и радиации. При воздействии открытого огня они постепенно размягча-

ются, если температура в зоне нагрева достигает 650...800 °С.

Механические свойства пеноматериалов обусловлены трехмерной изотропной структурой и определяются поведением отдельных структурных элементов — перемычек. Сжатие материала проходит в четыре этапа. На первом происходит деформация при небольших нагрузках самых слабых элементов каркаса и краевых неоднородностей, на втором — упругая деформация, а на третьем перемычки теряют устойчивость, развиваются пластические деформации и диаграмма сжатия переходит в плоский участок (плато сжатия). Процесс носит циклический цепной характер: потеря устойчивости одной из перемычек влечет развитие деформации у соседних и далее по всему слою, постепенно слою материала схлопываются до предела компактификации, когда поры окончательно закрываются и деформированный материал начинает приобретать свойства компактного. На четвертом этапе напряжение в материале снова возрастает и постепенно он приближается к компактному материалу.

Для ПМ характерно нелинейное поведение при деформации, свойственное ячеистым структурам. Поэтому пористые металлы используются не только для демпфирования удара, но и для повы-

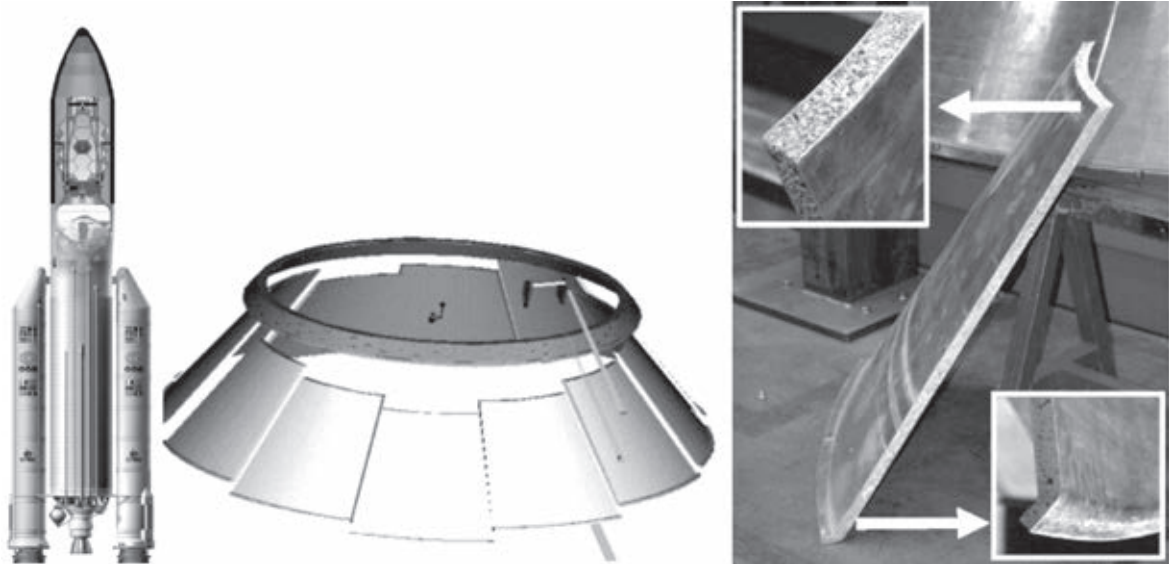


Рис. 3. Сегменты конуса AFS двигателей ракеты Ariane из ПА

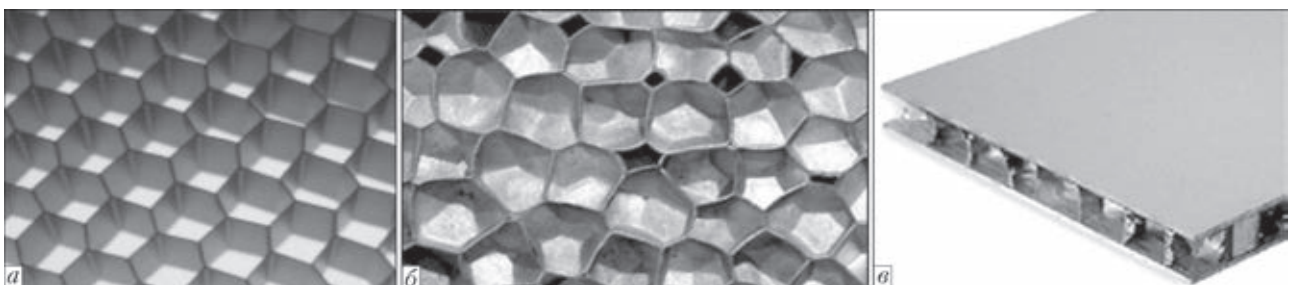


Рис. 4. Традиционный материал для сотовых панелей из фольги (а) и пористый «honeycomb» производства компании «Grauhofet» (Германия) (б) в сотовой панели (в)



шения жесткости полых профилей (рис. 8), изготовления негорючих, легких огне- и теплостойких демпфирующих материалов, а также упрочнения анкеров в бетонных стенах. ПА может использоваться в качестве литейных стержней. После литья они остаются в готовой фасонной отливке взамен пустот, которые предусмотрены для облегчения автомобиля, что дает определенные преимущества в прочности и уменьшает затраты на удаление обычных песчаных стержней.

Прочность изделий из ПА значительно повышается при поверхностной обработке — прокатке, ковке, штамповке [4, 5]. ПА не плавится при температуре плавления исходного сплава: при нагреве в электропечи до температуры 1400 °С он не расплавился; после выдержки 100 ч при температуре 1482 °С сильно окислился, но прочность и размеры образцов остались прежними. Таким образом, ПА можно многократно нагревать до высоких температур и быстро охлаждать, при этом его свойства изменяются незначительно. Для производства гибких листов ПА больших размеров с регулируемыми значениями пористости содержание воздуха по объему доводят до 93...98 %, затем полученный материал прокатывают в листы.

Характеристики структуры ПА влияют на степень деформации при его сжатии [6]. ПМ из сплава АМг6 плотностью 0,5...0,6 г/см<sup>3</sup> устойчив к упругой релаксации до и после пластической деформации, вплоть до 27 % сжатия. При 4,5...5 % сжатия этот материал деформируется упруго; при 5,5...6 % — упругая деформация в нем переходит в пластическую. Упрочнение материала после многократного сжатия в упругой и упруго-пластической области для образца плотностью 0,6 г/см<sup>3</sup>

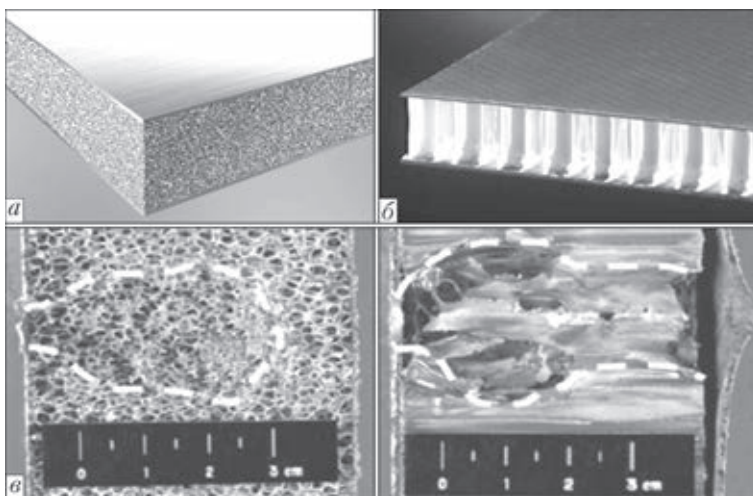


Рис. 5. Сравнительное испытание (б) сотовой панели из алюминиевой фольги (б) и сэндвичевой панели из высокопористого алюминия (а)

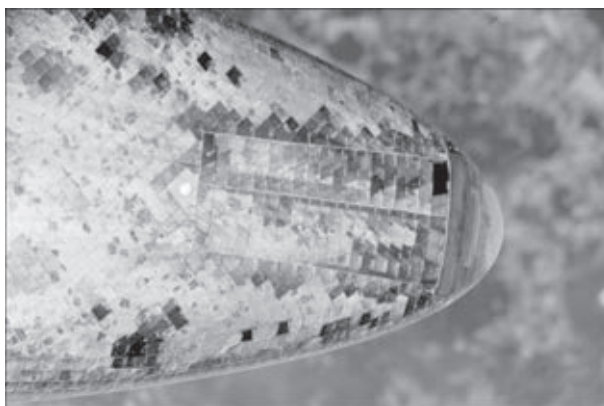


Рис. 6. Повреждения антиметеоритной защиты Space Shuttle Discovery

не превышает  $\Delta\sigma = 1$  МПа, а для образца меньшей плотности 0,5 г/см<sup>3</sup> достигает  $\Delta\sigma = 2,7$  МПа, что может быть связано с механизмом эволюции каркаса. В процессе сжатия структура материала плотностью 0,5 г/см<sup>3</sup> эволюционирует по механизму захлопывания и кручения пор.

В университете Северной Каролины (США) получена «самая прочная металлическая пена в

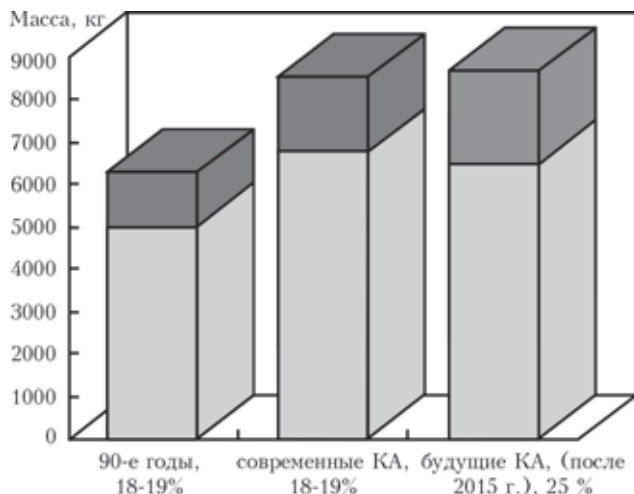


Рис. 7. Перспектива соотношения массы полезной нагрузки (окрашено в темный цвет) к общей массе космического аппарата (КА) (окрашено в светлый цвет)

мире» [7]. Материал может сжиматься до 80 % своего размера под действием веса и сохранять первоначальную форму после снятия нагрузки. Новая металлическая пена уникальна благодаря однородности ячеек и их стенок. Именно это придает ей прочность и эластичность, необходимую для сжатия без деформации.

Наибольший интерес к ПА проявляют автомобилестроители. При изготовлении кузова используются трехслойные алюминиевые листы с алюминиевой пеной. Низкая масса подобной конструкции уменьшает расход бензина. Кузов на 50 % легче соответствующего стального, но в 10 раз стабильней. Трехмерные многослойные структуры усиливают жесткость рамы. Из них можно изготавливать также детали корпуса — от дверец до сложной группы элементов днища. Такие детали очень легкие и имеют жесткость в 15 раз выше, чем обычные листовые конструкции.

ПА фирмы «Сумат» (Канада) в виде профилей прямоугольного сечения используется для амортизаторов дверец легковых автомобилей и аварийных перегородок. В отличие от сотовой конструкции алюминиевого материала ПА изотропен и может противостоять удару под любым углом.

Применение технологии производства пеномагния фильтрацией через гранулы водорастворимых солей позволяет получать изделия пористостью 55...75 %, плотностью 0,7...0,9 г/см<sup>3</sup>, с пределом прочности при сжатии 5...10 МПа. У пеномагния высокие демпфирующие свойства, а его коэффициент упругой и вязкой деформации в 2...5 раз меньше, чем у ПА [8].

Разработанные сотрудниками университета в г. Бойсе (штат Айдахо, США) и Северо-Западного университета (штат Иллинойс, США) сплавы никеля с марганцем и галлием отличаются крупнопористой структурой.

Это делает их легкими, при этом материалы сохраняют и исключительную прочность. Но у новых сплавов есть и совсем необычное свойство — они удлиняются под действием внешнего магнитного поля до 10 % от исходной длины. При этом им присущ эффект памяти — они сохраняются в измененном состоянии сколь угодно долго при снятии поля, но могут вернуться в исходное состояние при вращении магнитного поля на 90°. Новый сплав получен в виде поликристаллического материала. Обычно такие материалы отличаются отсутствием пор, а их упругие свойства и способность к деформации в целом очень незначительные.

Новый материал с «магнитной памятью формы» получен путем заливки расплава в образец из соли алюмината натрия, имеющего внутри поры. Затем алюминат натрия растворяют с по-

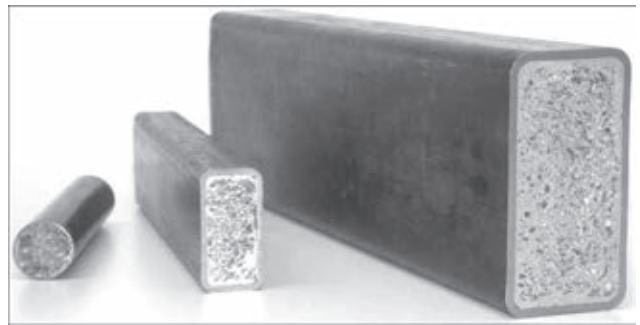


Рис. 8. Типы панелей с наполнителем из ПА

мощью кислоты и там, где были заполненные им фрагменты, образуются большие поры. Этот материал подвергали различным испытаниям, в частности, вращающимся магнитным полем. После 10 млн. оборотов в магнитном поле материал сохранял свои способности к упругой деформации, что делает его вполне пригодным для использования в различных системах магнитного привода. Разработчики считают, что есть еще резервы для дальнейшего усовершенствования подобных систем. Пористая структура материала и, соответственно, малая плотность, реакция на магнитные поля позволят в перспективе использовать его в таких отраслях, как биомедицинские насосы без движущихся частей, различные устройства для контроля малых перемещений.

Фирма «Neuman Alufoam» (Австрия) изготавливает из ПА корпусные ненагруженные детали автомобилей (рис. 9) и гасители бокового удара, которые закладываются в боковые дверцы. Плотность деталей из ПА — 0,5...0,6 г/см<sup>3</sup>. Отмечается, что закрытая внешняя оболочка, окружающая пористую структуру, обеспечивает более высокую жесткость, чем у структуры с открытой пористостью. Фирма выпускает также детали кузова и ходовой части, работающие на изгиб и кручение, для усиления их жесткости.

Фирма «Alulight International GmbH» (Германия, Австрия) предлагает ПА плотностью от 300 до 1000 кг/м<sup>3</sup> для изготовления: корпусных шумопоглощающих деталей; электромагнитных экранов в виде настенных и потолочных плит,

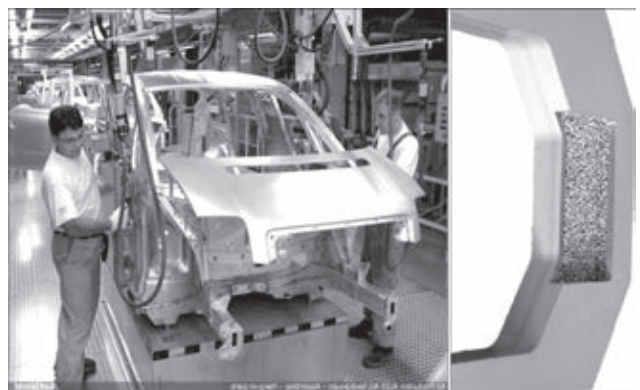


Рис. 9. Корпусные детали автомобилей из ПА



Рис. 10. Изделия с применением ПА производства «ERG Aerospace Corporation» (США) [9]

защищающих от проникновения или излучения электромагнитных волн частотой от 0,1 до 1000 МГц, а также корпусов электронных приборов; тепловых экранов; легких строительных материалов как негорючую альтернативу дереву и пластмассам (может поставляться в виде плит с максимальными размерами 625×625 мм, толщиной от 8 до 25 мм); гасителей удара для автомобильного и рельсового транспорта; шумогасителей, работающих в тяжелых условиях (высокая температура, влажность, пыль, вибрация), в стерильных или пожароопасных помещениях.

Интересен способ получения плит ПА увеличенной длины [10]. Плиты из ПА, полученные горячей прокаткой смеси порошка алюминиевых сплавов с порофором в листовую заготовку с последующим вспениванием, соединяют последовательно встык. Между торцами плит размещают порошковую прослойку из смеси алюминиевых гранул размером не менее 200 мкм и порофора в количестве, на 50 % превышающем количество порофора в смеси для производства листовой заготовки. Собранные плиты фиксируют от взаимных перемещений и нагревают место стыка до темпе-

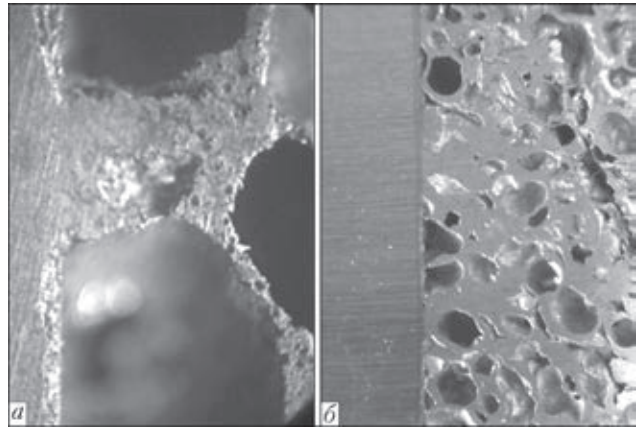


Рис. 11. Соединения ПА с монолитными алюминиевыми (а) и магниевыми (б) сплавами

ратуры, обеспечивающей вспенивание порошковой прослойки, со скоростью 150...300 °С/мин. Способ позволяет повысить прочность и качество мест соединения.

Таким образом, применение ПМ возможно для следующих изделий: фильтры; огнепреградители; шумопоглотители (при повышенных частотах более 800 Гц); носители катализаторов; демпферы механических, акустических и электромагнитных импульсов; конструктивные элементы; сэндвич-панели; заполнители полостей и емкостей (рис. 10).

В качестве способов соединения ПМ могут быть использованы склеивание, пайка, диффузионная или электронно-лучевая сварка.

В отделе физико-металлургических процессов сварки легких металлов и сплавов ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины методом механо-химической активации соединяемых поверхностей были получены экспериментальные биметаллические соединения ПА из сплавов В95 и АК7 с монолитными алюминиевыми (АД1, АК12, АМг6) и магниевыми (МЛ4, МА2-1) сплавами (рис. 11) при температуре 140...300 °С применительно к созданию сверхлегких блоков капсулирования микроэ-



Рис. 12. Крепление гранул ПА (а) для изготовления панели-вкладыша (б) общевойскового штурмового бронежилета (в)

лектроники аэрокосмического назначения [11–17]. Подобные соединения также могут применяться для крепления гранул-полуфабрикатов при создании композитных бронепанелей общевойскового штурмового бронезилета (рис. 12), построенного по модульному принципу, что обеспечивает круговую защиту торса от осколков, холодного и стрелкового оружия.

Наиболее широко применяемым на сегодняшний день свойством ПА является демпфирование и максимальное поглощение вибраций, волн и энергии удара при столкновениях. В ближайшем будущем пористые сплавы, в зависимости от степени пористости и проявления новых уникальных свойств, станут основными конструкционными и защитными материалами при создании военной амуниции, в строительстве, приборостроении, а также автомобильной, железнодорожной, аэрокосмической технике и кораблестроении. Пористые металлы интенсивно производятся с 2000 года в Европе, США и Японии. В Украине производство ПА освоено на экспериментальном уровне и до сих пор является дорогостоящим и энергоемким. Учитывая военно-политическую ситуацию в стране, развитие производства ПА и создание из него легких и прочных конструкций могло бы существенно повлиять на оборонный потенциал Украины.

1. Ryan S., Christiansen E.L. Honeycomb vs. foam: evaluating potential upgrades to ISS module shielding [Электронный ресурс: // <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20090016347.pdf>].
2. Ryan S., Hedman T., Christiansen E.L. Honeycomb vs. foam: evaluating a potential upgrade to international space station module shielding for micrometeoroids and orbital debris [Электронный ресурс: [http://ston.jsc.nasa.gov/collections/trs/\\_techrep/TM-2009-214793.pdf](http://ston.jsc.nasa.gov/collections/trs/_techrep/TM-2009-214793.pdf)].
3. <http://www.aviationspectator.com/image/latest-aviation-images?page=223>
4. Металлическая пена [Электронный ресурс: <http://msd.com.ua/pena/metallicheskaya-pena>].
5. Крушенко Г.Г. Некоторые технологии получения пенометаллов из металлических расплавов и их применение // Технология металлов. – 2013. – № 10. – С. 11–16.
6. Мартынюк А.М., Крупин Ю.А. Влияние структуры пеноалюминия на устойчивость материала при сжатии // Металлургия машиностроения. – 2011. – № 5. – С. 35–37.
7. Богданова А. Металл будущего станет пористым [Электронный ресурс: [www.equipnet.ru/articles/metall/metall\\_556.html](http://www.equipnet.ru/articles/metall/metall_556.html)].
8. Ковтунов А.И., Хохлов Ю.Ю., Новский И.В. Перспективы использования магния для производства пенометаллов // Металлургия машиностроения. – 2013. – № 4. – С. 9–11.
9. Why is Duocel aluminum foam so special [Электронный ресурс: <http://www.ergaerospace.com/Aluminum-properties.htm>].
10. Пат. 2404020 Россия, МПКВ 22 F 3/10 (2006.01) В 22 F 3/11 (2006.01). Способ получения плит пеноалюминия увеличенной длины / Н.В. Пасечник, В.В. Павленко, В.К. Орлов и др. – ВНИИМЕТМАШ. – N 2009110127/02; Заявл. 23.03.2009; Опубл. 20.11.2010.
11. Khokhlova J. Inter-granular phase formation during reactive diffusion of gallium with Al alloy // Materials science forum. Trans tech publication, Max Planck Institute for intelligent systems. – 2014. – Vol. 768–769. – P. 321–326.
12. Ищенко А.Я., Хохлова Ю.А., Хохлов М.А. Низкотемпературное соединение элементов биметаллических теплообменных блоков капсулирования микроэлектроники с использованием в конструкции пористых металлов // Матер. IV Междунар. конф. «Космические технологии: настоящее и будущее», 17–19 апреля 2013 г., Днепропетровск: ГП «КБ «Южное» им. М. К. Янгеля». – С. 107.
13. Пат. 69145 UA, МПК (2012.01) B01B 1/00, B23K 1/00. Спосіб з'єднання біметалевого блока для термоізоляції елементів мікроелектроніки / М.А. Хохлов, Ю.А. Хохлова. – №№ 10712 и 201110712; Заявл. 05.09.2011; Опубл. 25.04.2012.
14. Micro-structure transformation of diffusion zone in aluminum foam and monolithic magnesium alloy bimetallic joint / M. Khokhlov, Yu. Falchenko, Yu. Khokhlova, V. Syniuk // Proc. of the 5th Intern. conf. «Fracture mechanics of materials and structural integrity», June 24–27, 2014, Lviv, Ukraine: Karpenko Physico-Mechanical Institute, NASU. – P. 551–556.
15. Khokhlov M., Falchenko Yu., Khokhlova Yu. Peculiarities of forming diffusion bimetallic joints of aluminium foam with a monolithic magnesium alloy // Proceedings of Cellmat-2014, 22–24 October 2014, Dresden, Germany. – 1 электрон. опт. диск (CD).
16. Khokhlova J., Khokhlov M. International Hi-Tech Match-Making Meeting // International Department of Organizing Committee of CCHTF, Chongqing, China, April 2014. – 4 p.
17. Ishchenko A., Khokhlova J., Khokhlov M. Low-temperature diffusion joining of dissimilar materials using gallium // European Conference of Aluminium Alloys «Aluminium Science and Technology», 5–7 October 2011. – Bremen, Germany. P. 31.

Поступила в редакцию 24.10.2014

## ДЕТЕРМИНИРОВАННЫЙ ХАОС В НЕЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЯХ С ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГОЙ. В Н. Сидорец, И.В. Пентегов. – Киев: Международная ассоциация «Сварка», 2013. – 272 с. Твердый переплет, 165x235 мм.

Монография посвящена изложению результатов исследования фундаментальных свойств электрической дуги как нелинейного элемента электрических цепей. Описаны выявленные закономерности и механизмы возникновения детерминированного хаоса в этих цепях и сценарии его развития. Особое внимание уделено оригинальным математическим методам исследования нелинейных динамических систем. Все полученные результаты проиллюстрированы. Монография рассчитана на широкий круг специалистов в областях теоретической электротехники и нелинейных динамических систем. Она может быть полезна ученым, аспирантам и студентам.