

УДК 629.047

Пеноалюминий как энергопоглощающий материал и его механические свойства

Д.О. Бутарович, А.А. Смирнов, Д.М. Рябов

Пенометаллы — новый класс материалов с низкой плотностью и новыми физическими, механическими, тепловыми, электрическими и акустическими свойствами. Одним из таких материалов является пеноалюминий. В статье приведены промышленные способы его производства, а также представлены результаты определения механических свойств пеноалюминия численным решением.

Ключевые слова: энергопоглощающий материал, пеноалюминий, пористость.

Metal foams are a new class of materials with low densities and novel physical, mechanical, thermal, electrical and acoustic properties. One of such materials is an aluminum foam. The article deals with its industrial manufacturing processes, as well as the results of determining mechanical properties of the aluminum foam by numerical solution.

Keywords: energy absorbing material, aluminum foam, porosity.

В последнее время развитие современных технологий производства новых материалов открывает перед разработчиками транспортной техники возможности по постановке и решению новых задач. Современные тенденции развития как гражданского транспорта, так и транспорта военного назначения показывают постоянно возрастающую роль вопросов безопасности водителя, пассажиров, экипажа. Большое значение в решении вопросов безопасности в настоящее время отводится энергопоглощающим материалам. Большая группа таких материалов представлена пенометаллами (ПМ), которые наряду с хорошими энергопоглощающими свойствами [1], обладают высокими удельными прочностными показателями. Особое место в ряду ПМ занимает пеноалюминий.

Компания «Karmann GmbH» — мировой поставщик систем для автопроизводителей, занимающаяся разработкой и изготовлением оригинальных авто-компонентов (рис. 1), в недавнем прошлом объявила о разработке новой технологии изготовления пространственных пеноалюминиевых систем для автомобиля, которая позволит совершить революцию в технологии изготовления кузовных панелей.

Существует девять различных способов получения металлических пористых материалов [2]. Рассмотрим некоторые из них, нашедшие применение в промышленных масштабах.



БУТАРОВИЧ
Дмитрий Олегович
инженер НИИ
специального
машиностроения
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)



СМИРНОВ
Александр Анатольевич
кандидат технических
наук, доцент кафедры
«Колесные машины»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)



РЯБОВ
Денис Михайлович
инженер НИИ
специального
машиностроения,
аспирант
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

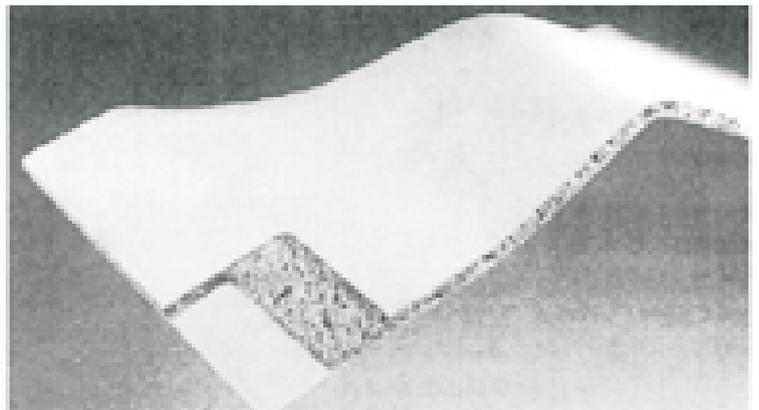
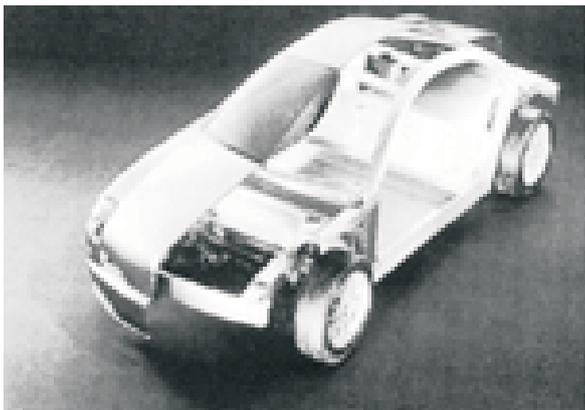


Рис. 1. Пространственная пеноалюминиевая конструкция компании «Karmann GmbH»

1. Продувка газом сквозь расплавленный Al—SiC или Al—Al₂O₃ сплав (рис. 2). Этот метод применим для Al- и Mg-сплавов.

Данный метод наименее дорогостоящий и с его помощью получают пеноалюминий с относительной плотностью 0,03...0,1 и диаметром пор 5...20 мм.

Этот метод используют следующие компании: «NORSK-HYDRO» (Норвегия) и «СУМАТ» (Канада), позднее стала использовать данную технологию компания «ALCAN» (Канада).

2. Ввод гидрида титана (TiH₂) в расплавленный алюминиевый сплав с последующим динамическим перемешиванием, нагреванием и контролем давления во время охлаждения полученного материала (рис. 3). Подобный ме-

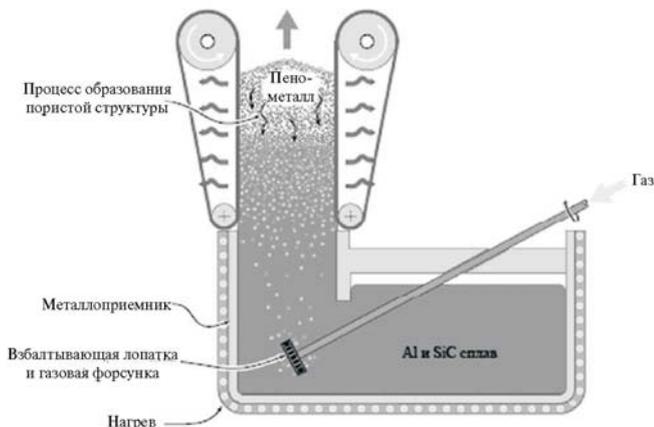


Рис. 2. Получение пеноалюминия методом продувки жидкого металла газом

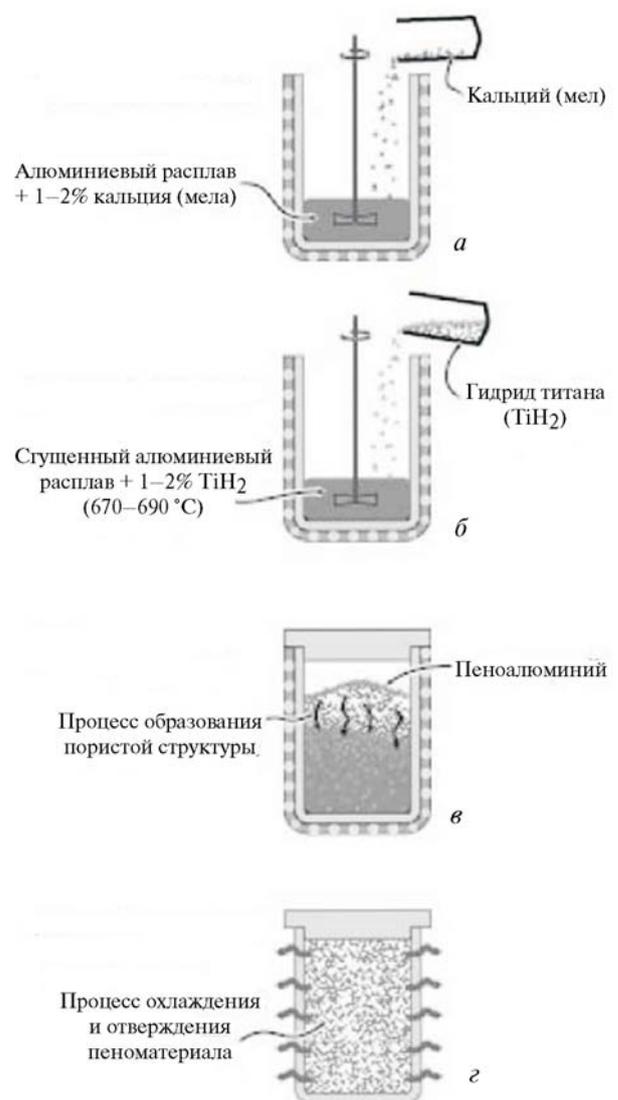


Рис. 3. Метод получения пеноалюминия с использованием гидрида титана: а — повышение вязкости; б — ввод гидрида титана; в — вспенивание материала; г — охлаждение полученного материала

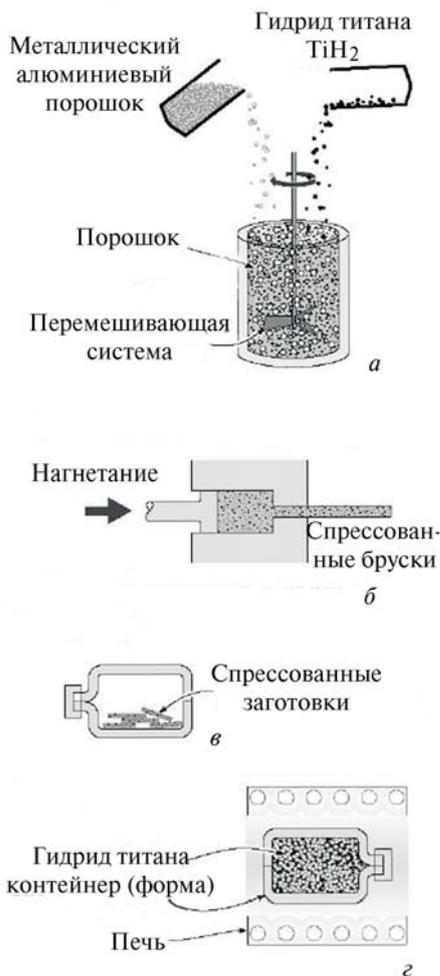


Рис. 4. Получение пеноалюминия методом смешивания алюминиевого порошка и гидрида титана:

- a* — объединение порошков; *б* — получение заготовок выдавливанием через фильеру;
- в* — укладка заготовок в контейнер;
- г* — процесс преобразования

тод применим для Al-сплавов. Объемные частицы кальция и титана, добавленные в расплав в конечном счете определяют относительную плотность и, в совокупности с условиями охлаждения, размер пор. Размер пор может варьироваться от 0,5 до 5 мм в зависимости от содержания TiH_2 и условий охлаждения. Компания «Shinko Wire Company» (Япония) развила данную технологию получения пеноалюминия до промышленных масштабов и назвала полученный материал Alporas. Относительная плотность при производстве в промышленных масштабах составляет 0,2 до 0,07.

3. Смешивание металлического порошка (в основном алюминиевого) с гидридом титана

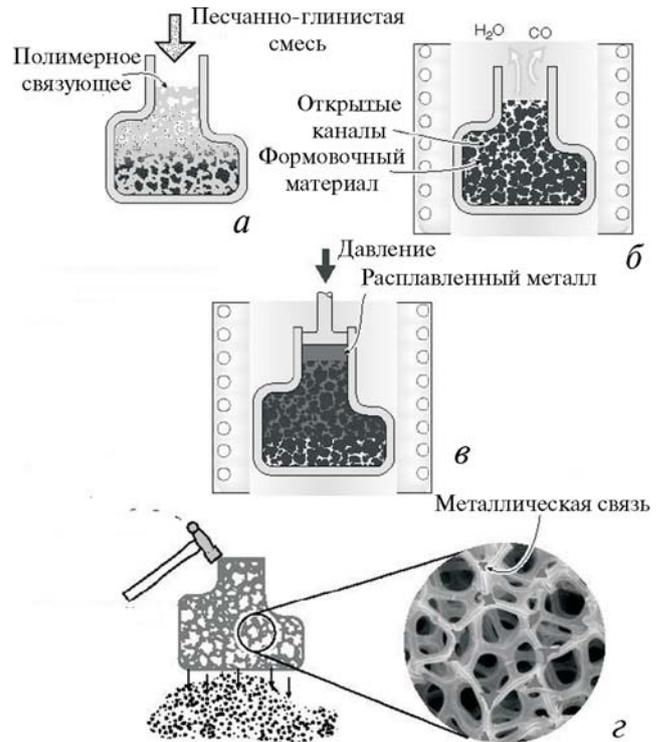


Рис. 5. Получение пеноалюминия методом литья по выплавляемым моделям: *a* — подготовительное формование; *б* — выжигание; *в* — пропитывание металлом; *г* — удаление формовочного материала

(TiH_2), с последующим плавлением до кашеобразной консистенции (рис. 4). Этот метод применим для Al-, Zn-, Fe-, Pb- и Au-сплавов.

В данном методе пенообразование происходит путем ввода в металл в твердой форме смешанных порошков различных химических веществ.

4. Смешивание в литейной форме песчанно-глинистой смеси и полимерного порошка с последующим выжиганием частичек полимера и наполнение под давлением литейной формы расплавленным металлом (рис. 5). Подобный метод применим для Al-, Mg-, Ni-Cr и Cu-сплавов.

Если рассматривать технологический процесс с самого начала, то перед непосредственным получением пористого материала создают полимерный пористый материал (шаблон для последующего пенометалла) с открытыми порами с желаемой относительной плотностью и размерами пор. Для этого в литейную форму засыпают песчанно-глинистую смесь и полимерные компоненты, затем смесь тщательно

перемешивается. Литейную форму с заформованной смесью начинают подогревать, песчано-глинистая смесь отвердевает, при этом происходит дегидратация смеси и выделение углекислого газа. Далее в литейную форму с полученной смесью нагнетают расплавленный металл под давлением. После полного проникновения расплава в смесь немного увеличивают температуру. В результате полимерные компоненты расплавляются, а их объем занимает расплавленный металл. Далее литейную форму охлаждают, извлекают из нее формованное изделие и удаляют песок путем вибрации. Данный метод напоминает метод литья по выплавляемым моделям в традиционных технологиях литья металлов и дает структуру с открытыми порами и размерами пор 1...5 мм в диаметре и относительной плотностью до 0,05.

Остальные методы целесообразно опустить в связи с их промышленной нераспространенностью и ограниченной применимостью к алюминиевым сплавам.

Основными характеристиками, определяющими физико-механические свойства ПМ, являются физико-механические свойства материала стенок пор, относительная плотность ПМ: ρ/ρ_s (где ρ — плотность ПМ, ρ_s — плотность материала, из которого сформированы стенки пор), а также структура пор (открытые ячейки или закрытые поры) (рис. 6). Иногда вместо относительной плотности для характеристики ПМ используется величина пористости $m = 1 - \rho/\rho_s$.

Плотность образцов пеноалюминия, получаемых в настоящее время, составляет

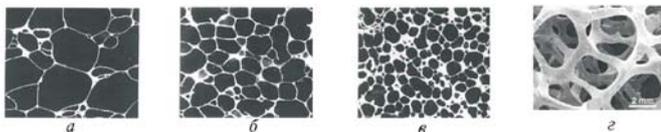


Рис. 6. ПМ с различной структурой пор:
 а — пеноалюминий Sumat $\rho/\rho_s = 0,04$ ($\rho = 108 \text{ кг/м}^3$); б — пеноалюминий Alporas $\rho/\rho_s = 0,09$ ($\rho = 240 \text{ кг/м}^3$); в — пеноалюминий Alulight $\rho/\rho_s = 0,25$ ($\rho = 435 \text{ кг/м}^3$); з — пеноалюминий Duocel $\rho/\rho_s = 0,08$ ($\rho = 216 \text{ кг/м}^3$)

300...1900 кг/м³, что соответствует пористости от 0,89 до 0,31.

Для проведения расчетов энергопоглощающих элементов конструкций необходимо знать упруго-пластические свойства пеноалюминия. Проведение широких экспериментальных исследований часто сопряжено с рядом сложностей, поэтому в данной работе предлагается расчетный метод прогнозирования упруго-пластических свойств пеноалюминия. В основе метода лежит численное решение упруго-пластической задачи методом конечных элементов для образца материала заданной плотности.

Основной сложностью, стоящей на пути замены реальных испытаний образцов пеноалюминия численными, является получение адекватной геометрической модели образца, отражающей его микроскопическую структуру. Для решения данной задачи была разработана программа-макрос [3] для системы трехмерного моделирования SolidWorks (рис. 7). Входными параметрами для программы являются: размеры образца, плотность материала образца (плотность алюминия), желаемая плотность образца (плотность пеноалюминия), средний диаметр пор, среднеквадрати-

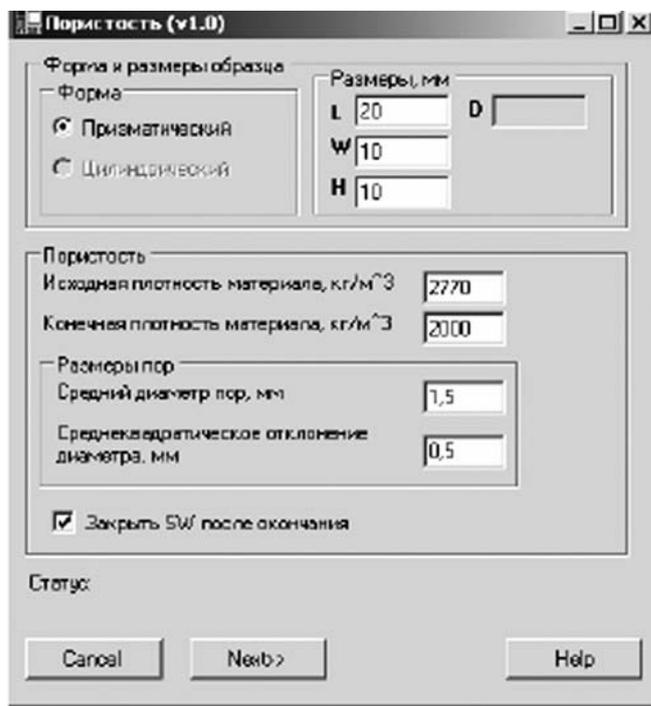


Рис. 7. Программа-макрос для генерации геометрической модели

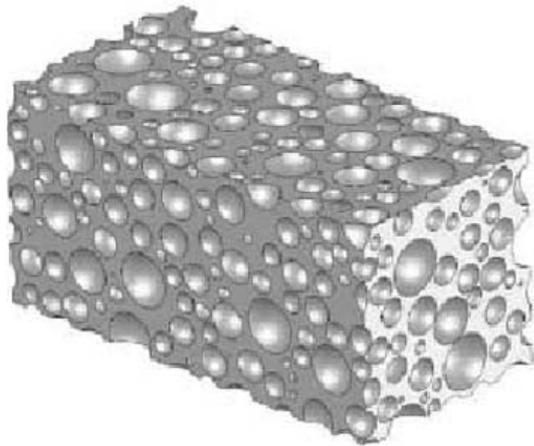


Рис. 8. Геометрическая модель пеноалюминия, полученная с помощью программы-макроса

ческое отклонение диаметра пор. Результат работы программы-макроса геометрическая модель пористого образца (рис. 8), в котором поры распределены равномерно по объему и имеют диаметры, распределенные по нормальному закону с заданными параметрами, при этом плотность образца близка к заданной. При помощи данной программы были созданы геометрические модели образцов с различной плотностью и диаметрами пор: $\rho_1=1003 \text{ кг/м}^3$, $\rho_2=1508 \text{ кг/м}^3$, $\rho_3=1515 \text{ кг/м}^3$, $\rho_4=1631 \text{ кг/м}^3$, $\rho_5=1644 \text{ кг/м}^3$, $\rho_6=1723 \text{ кг/м}^3$, $\rho_7=1818 \text{ кг/м}^3$, $\rho_8=1904 \text{ кг/м}^3$.

Следует отметить, что типичная геометрическая модель объемом 2 см^3 содержит около 1000 пор, а процесс ее генерации занимает более часа.

Полученные геометрические модели были импортированы в пакет конечно-элементного анализа Ansys Workbench, в котором проводились виртуальные испытания образцов на растяжение. При расчетах для задания свойств алюминиевого пористого образца использовалась модель материала с билинейным кинематическим упрочнением (алюминиевый сплав Д16) [4], параметры которой приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметр	Значение
Предел пропорциональности $\sigma_{пр}$, МПа	319
Модуль упругости E , ГПа	74,6
Коэффициент упрочнения (тангенциальный модуль упругости) E_T , ГПа	4,66

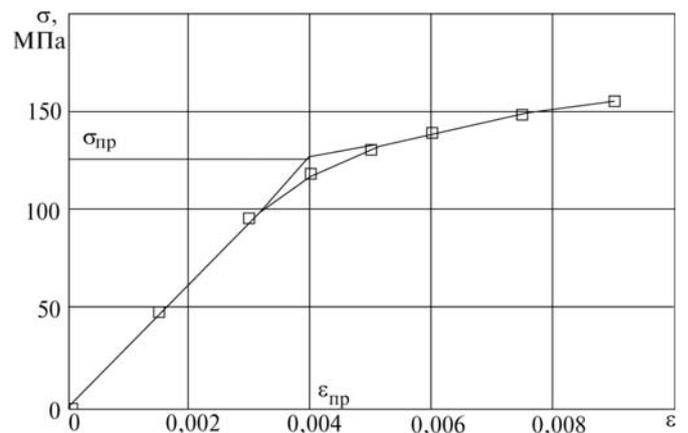


Рис. 9. Диаграмма растяжения для образца с $\rho = 1631 \text{ кг/м}^3$

Результатами расчетов для каждого из образцов является зависимость между перемещением незакрепленной грани образца и значением растягивающей силы, вызывающей это перемещение. С использованием данных зависимостей были построены диаграммы растяжения образцов в координатах деформация — напряжение.

Полученные диаграммы растяжения образцов были использованы для вычисления ряда механических характеристик пеноалюминия: модуля упругости E , предела текучести $\sigma_{пр}$, коэффициента упрочнения E_T (тангенциального модуля упругости), деформации, соответствующей пределу текучести (рис. 9, табл. 2).

Таблица 1

Номер образца	ρ , кг/м ³	m	E , ГПа	E_T , ГПа	$\sigma_{пр}$, МПа	$\epsilon_{пр}$
1	1003	0,638	8,0303	2,880	60,227	0,00750
2	1508	0,456	29,272	5,174	113,526	0,00388
3	1515	0,453	27,312	6,256	104,197	0,00381
4	1631	0,411	32,313	5,127	129,614	0,00401
5	1644	0,406	31,415	5,482	124,822	0,00397
6	1723	0,378	34,768	5,822	136,088	0,00391
7	1818	0,344	36,678	6,008	143,053	0,0039
8	1904	0,313	38,114	6,312	155,874	0,00409

Анализируя результаты расчетов можно отметить следующее: с ростом пористости мате-

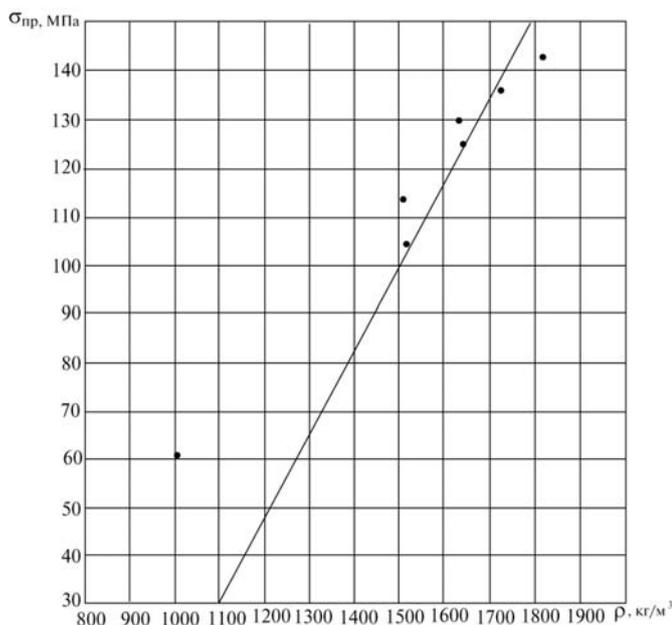


Рис. 10. Зависимость предела текучести пористого алюминия от его плотности:

- — результаты численного моделирования;
- — результаты вычисления по формуле (1)

риала усредненный модуль упругости уменьшается; коэффициент упрочнения значительно не изменяется при увеличении пористости материала; деформация $\varepsilon_{пр}$ практически не зависит от пористости и для данного материала составляет около 0,004. Последний вывод подтверждается и другими исследователями. Как отмечается в работе [5], экспериментальные данные тестов на растяжение пористых образцов свидетельствуют, что значение деформации образца $\varepsilon_{пр}$, при котором начинается текучесть материала, практически, остается постоянной в широком диапазоне пористости.

Сравним полученные результаты с известными теоретическими результатами. В настоящее время для определения поверхности текучести пористого материала широко используется формула Гарсона [6, 7] с поправкой, введенной Твергаардом [8], которая в случае одноосного напряженного состояния дает следующее выражение для вычисления напряжения текучести пористого материала по известному пределу текучести основного материала σ_s и пористости m :

$$\frac{\sigma_{пр}^2}{\sigma_s^2} + 2k m \operatorname{ch}\left(\frac{\sigma_{пр}}{2\sigma_s}\right) - (1 + k^2 m^2) = 0, \quad (1)$$

где $k = 1,5$ — поправка Твергаарда.

На рис. 10 представлено сравнение результатов, полученных численным моделированием, со значениями, рассчитанными по формуле (1). Анализ представленных графиков позволяет сделать вывод о применимости предложенного метода для определения механических свойств пористых материалов. Однако стоит отметить, что в интервале низких плотностей наблюдается расхождение теоретических и расчетных результатов. Это свидетельствует о возможной необходимости изменения модели материала для алюминиевых пористых образцов с низкой плотностью.

Литература

1. Исследование процессов ударно-волнового нагружения алюминиевых сотовых конструкций / Теоретические и лабораторно-полевые исследования и внедрение опытно-конструкторских разработок в учебный процесс и эксплуатацию специальной техники с легким бронированием: материалы научн.-практ. конференции, 26—28 июня 2007 г., г. Рязань: ч. 3: кн.1 / под общ. ред. В.Я. Крымского / Рязань: РВВДКУ им. генерала В.Ф. Маргелова, 2007. С. 173—177.
2. Metal Foams: A Design Guide. M.F. Ashby, A.G. Evans, N.A. Fleck, L.J. Gibson, J.W. Hutchinson and H.N.G. Wadley, Butterworth-Heinemann, 2000.
3. Проектирование колесных машин. Материалы международной научно-технической конференции, посвященной 70-летию кафедры «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана. 22—23 ноября 2006 г. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006, 504 с.
4. Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность: Справочник М.: Машиностроение, 1985. 224 с.
5. Sevostianov I., Kachanov M. Plastic yield surfaces of anisotropic porous materials in terms of effective electric conductivities // Mechanics of Materials, N 38 (2006). P. 908—923.
6. Ударно-волновые процессы в двухкомпонентных и двухфазных средах / С.П. Кисилев, Г.А. Руев, А.П. Трунев и др. Новосибирск: ВО «Наука», Сибирская издательская фирма, 1992. 261 с.
7. Гарсон А.Л. Континуальная теория вязкого разрушения, обусловленного образованием и ростом пор. Ч. 1. Критерий текучести и законы течения для пористой пластической среды // Теоретич. основы инж. расчетов. 1975. № 1. С. 1—16.
8. Tvergaard V. Numerical study of localization in avoid-shet // Int. J. Sol-ids Structures. 1989. V. 25. N 10. P. 1143.

Статья поступила в редакцию 26.05.2011 г.