

УДК 629.047

Д. О. Б у т а р о в и ч, А. А. С м и р н о в

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЕНОАЛЮМИНИЯ

Приведены результаты моделирования механических свойств пеноалюминия на основе разработанной программы-макроса, позволяющей описать адекватную геометрическую модель образца, отражающую его микроструктуру.

Ключевые слова: энергопоглощающий материал, пеноалюминий, пористость.

Развитие современных технологий производства новых материалов открывает перед разработчиками транспортной техники возможности по постановке и решению новых задач. Современные тенденции развития как гражданского, 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, которые наряду с хорошими энергопоглощающими свойствами [1] обладают высокими удельными прочностными показателями. Особое место в ряду пенометаллов занимает пеноалюминий. Существует девять основных способов получения металлических пористых материалов [2].

Основные характеристики, определяющие физико-механические свойства пенометаллов (ПМ), — это физико-механические свойства материала стенок пор, относительная плотность ρ/ρ_s (где ρ — плотность ПМ, ρ_s — плотность материала стенок пор), а также вид пор (открытые ячейки или закрытые поры) (рис. 1). Иногда вместо относительной плотности для характеристики ПМ используется пористость $m = 1 - \rho/\rho_s$.

Плотность современных образцов пеноалюминия находится в пределах от 300 до 1900 кг/м³, что соответствует пористости от 0,89 до 0,31.

Для проведения расчетов энергопоглощающих элементов конструкций необходимо знать упругопластические свойства пеноалюминия. Проведение широких экспериментальных исследований часто сопряжено с рядом сложностей, поэтому в настоящей работе предложен расчетный метод прогнозирования упругопластических свойств пеноалюминия, в основу которого положено численное решение упруго-пластической задачи методом конечных элементов для образца материала заданной плотности.

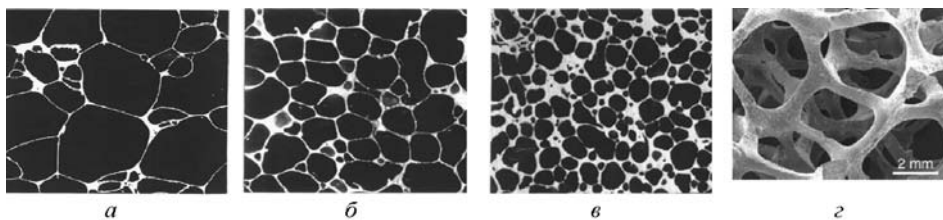


Рис. 1. Структура пор ПМ:

a – 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 ($\rho/\rho_s = 0,25$, $\rho = 435 \text{ кг/м}^3$); *г* – пеноалюминий Duocel ($\rho/\rho_s = 0,08$, $\rho = 216 \text{ кг/м}^3$)

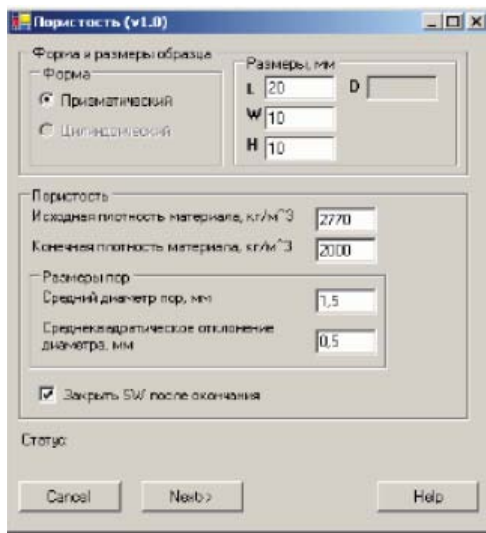


Рис. 2. Окно задания исходных данных программы-макроса

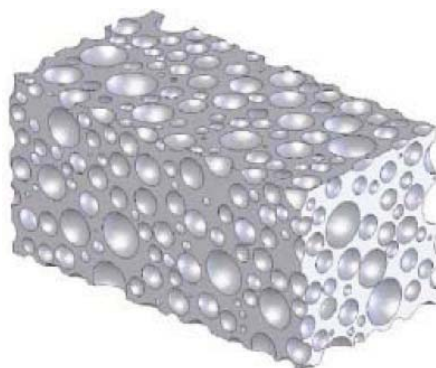


Рис. 3. Геометрическая модель пеноалюминия, полученная с помощью программы-макроса

Основная сложность на пути замены реальных испытаний образцов пеноалюминия численным моделированием — получение адекватной геометрической модели образца, отражающей его микроскопическую структуру. Для решения данной задачи была разработана программа-макрос [3] для системы трехмерного моделирования “SolidWorks” (рис. 2). Входные параметры — размеры образца, плотность материала образца (плотность алюминия), желаемая плотность образца (плотность пеноалюминия), средний диаметр пор, среднеквадратическое отклонение диаметра пор. Результат работы программы-макроса — геометрическая модель пористого образца (рис. 3), 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 разработанной программы созданы геометрические модели образцов с различной плотностью: $\rho = 1003, 1508, 1515, 1631, 1644, 1723, 1818$ и 1904 кг/м^3 .

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

Результатами расчетов для каждого из образцов является зависимость между перемещением незакрепленной грани образца и значением растягивающей силы, вызывающей это перемещение. С использованием полученных зависимостей построены диаграммы растяжения образцов в координатах деформация–напряжение, которые использованы для вычисления механических характеристик пеноалюминия: модуля упругости E , предела текучести $\sigma_{пр}$, коэффициента упрочнения E_T (тангенциального модуля упругости), деформации, соответствующей пределу текучести (табл. 2).

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

Таблица 2

№ образца	ρ , кг/м ³	m	E , ГПа	E_T , ГПа	$\sigma_{пр}$, МПа	$\varepsilon_{пр}$
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 материала усредненный модуль упругости уменьшается; коэффициент упрочнения значительно не меняется при увеличении пористости материала; деформация $\varepsilon_{пр}$ практически не зависит от пористости и для данного материала составляя $\sim 0,004$. Последний вывод подтверждается и другими исследователями. Как отмечено в работе [5], значение деформации образца $\varepsilon_{пр}$, при котором начинается текучесть материала, практически, остается постоянной в широком диапазоне пористости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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 науч.-практ. конф. 26–28 июня 2007 г., Рязань: Ч. 3: кн.1 / Под общ. ред. В.Я. Крымского / Рязань: РВВДКУ им. генерала В.Ф. Маргелова, 2007. – С. 173–177.
2. Meta l 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 междунар. науч.-техн. конф., 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. К о г а е в В. П., М а х у т о в Н. А., Г у с е н к о в А. П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность: Справочник. – М.: Машиностроение, 1985. – 224 с.
5. S e v o s t i a n o v I., K a c h a n o v M. Plastic yield surfaces of anisotropic porous materials in terms of effective electric conductivities // Mechanics of Materials, 38 (2006). – P. 908–923.

Статья поступила в редакцию 6.07.2009

Дмитрий Олегович Бутарович родился в 1983 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2007 г. Аспирант кафедры “Колесные машины” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специализируется в области автомобилестроения и систем автоматизированного проектирования.



D.O. Butarovich (b. 1983) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2007. Post-graduate of “Wheeled Vehicles” department of the Bauman Moscow State Technical University. Specializes in the field of automobile building and systems of computer-aided design.

Александр Анатольевич Смирнов родился в 1972 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1996 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Колесные машины” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 20 научных работ в области автомобилестроения и систем автоматизированного проектирования.



A.A. Smirnov (b. 1972) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 1996. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Wheeled Vehicles” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 20 publications in the field of automobile building and systems of computer-aided design.