

## Определение механических свойств пеноалюминия при ударном нагружении

д.ф.-м.н. проф. Бондарь В.С., д.т.н. проф. Темис Ю.М., Бирюков М.В.  
 Университет машиностроения, ЦИАМ им. П.И. Баранова  
 8-(495) 223-05-23 [tm@mami.ru](mailto:tm@mami.ru), [jmt@newmail.ru](mailto:jmt@newmail.ru)

**Аннотация.** Проводилось моделирование поведения пористых материалов различной плотности под действием ударного нагружения. Результаты вычислительного эксперимента сравнивались с результатами, полученными с помощью модели пористого материала Дешпанда-Флека.

**Ключевые слова:** пористые материалы, ударное нагружение

Для защиты конструкций от динамических воздействий рассматривается применение энергопоглощающих систем на основе пористых материалов. Одним из перспективных пористых материалов для решения этой проблемы является пеноалюминий. Преимущества этого материала описаны в работе [1].

Для оценки механических свойств пеноалюминия проводилось сравнительное исследование влияния ударного нагружения на образец – сэндвич пакет, состоящий из пеноалюминия, покрытого слоем стали. Расчетная схема исследуемой модели представлена на рисунке 1. Регулярная структура такого типа была выбрана, чтобы достичь малых относительных плотностей пористого материала.

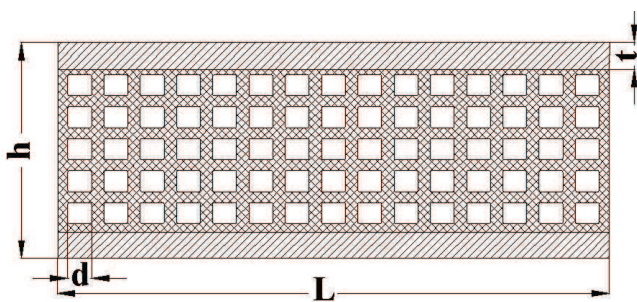


Рисунок 1. Расчетная схема исследуемой модели пористого материала

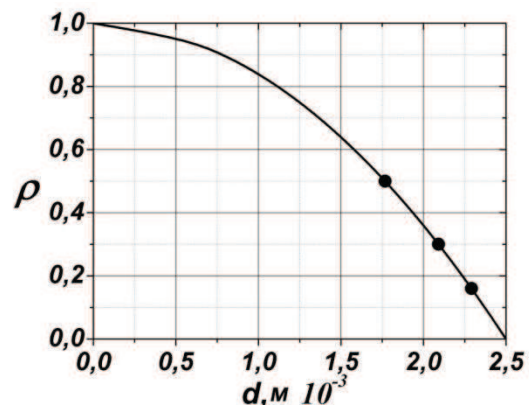


Рисунок 2. Зависимость относительной плотности пористого материала  $\rho$  от размера  $d$  (точками показаны исследуемые плотности)

В работе исследовался пеноалюминий различной плотности с параметрами  $h = 0,0145 м$ ,  $L = 0,0375 м$ ,  $t = 0,001 м$ . Относительная плотность исследуемого материала менялась в зависимости от размера  $d$  (рисунок 2).

В расчетах отклик стали и алюминия моделировался упругопластической моделью с кинематическим упрочнением, с параметрами, указанными в таблице 1.

К узлам верхней грани пластины прикладывалась сила, изменяющаяся по линейному закону от 0 до 100 кН за время 0,001 с. Было наложено равенство перемещений на узлы верхней грани (имитация верхнего штампа). Узлы нижней грани были зафиксированы от перемещений в вертикальном направлении. На рисунке 3 показано изменение толщины  $h$  сэндвич пакета в процессе деформирования.

Из рисунка видно, что материал уплотняется в разной степени и величина уплотнения зависит от относительной плотности  $\rho$ .

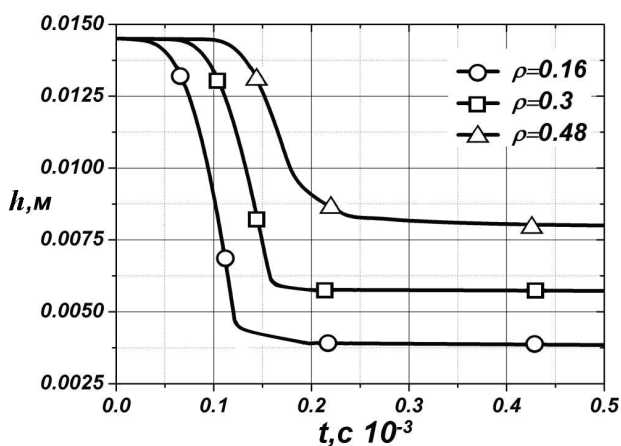
Из расчетов видно (рисунок 4), что коэффициент Пуассона в процессе деформирования

до значений деформации равных  $\varepsilon = \varepsilon_D$  (деформации уплотнения) приблизительно можно считать равным нулю  $\nu \cong 0$  для пенoметаллов с относительной плотностью  $\rho < 0.5$ . Также из расчетов видно, что для пористых материалов деформация уплотнения зависит от относительной плотности материала  $\varepsilon_D(\rho)$ . И она возрастает при уменьшении относительной плотности материала.

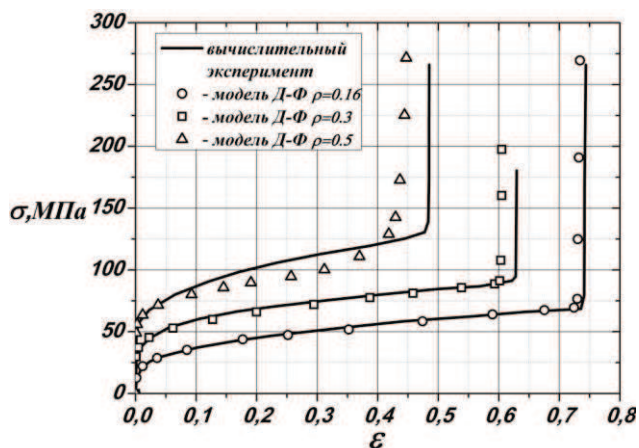
Таблица 1

**Параметры материалов**

Параметры	Сталь	Алюминий
$\rho, \text{кг} / \text{м}^3$	7800	2730
$E, \text{ГПа}$	200	76
$\nu$	0.3	0.3
$\sigma_p, \text{МПа}$	500	146
$E_\tau, \text{ГПа}$	1	0.5



**Рисунок 3.** Изменение толщины сэндвич пакета  $h$  в зависимости от относительной плотности  $\rho$



**Рисунок 4.** Кривые деформирования пористых материалов плотностью  $\rho = 0.16, 0.3, 0.5$

Модуль упругости  $E$ , предел текучести  $\sigma_p$ , полученные для разных относительных плотностей пенoметалла  $\rho$  в результате вычислительного эксперимента (таблица 2), сравнивались с известной моделью пористого металла Дешпанда-Флека [2]. Исходные данные для этой модели были получены из вычислительного эксперимента. Кратко опишем эту модель.

Таблица 2

**Механические свойства пенoметаллов, полученные из вычислительного эксперимента**

$\rho$	$\rho^*, \text{кг} / \text{м}^3$	$E, \text{ГПа}$	$\sigma_p, \text{МПа}$
0.16	427.5	5.3	10.5
0.33	827.2	17	29
0.5	1318.6	27.7	50

Функция текучести, определяющая поверхность текучести, описывается как:

$$F = \hat{\sigma} - Y, \tag{1}$$

где:  $\hat{\sigma}$  – эквивалентное напряжение,  $Y$  – напряжение течения пористого материала, которое может быть выражено как:

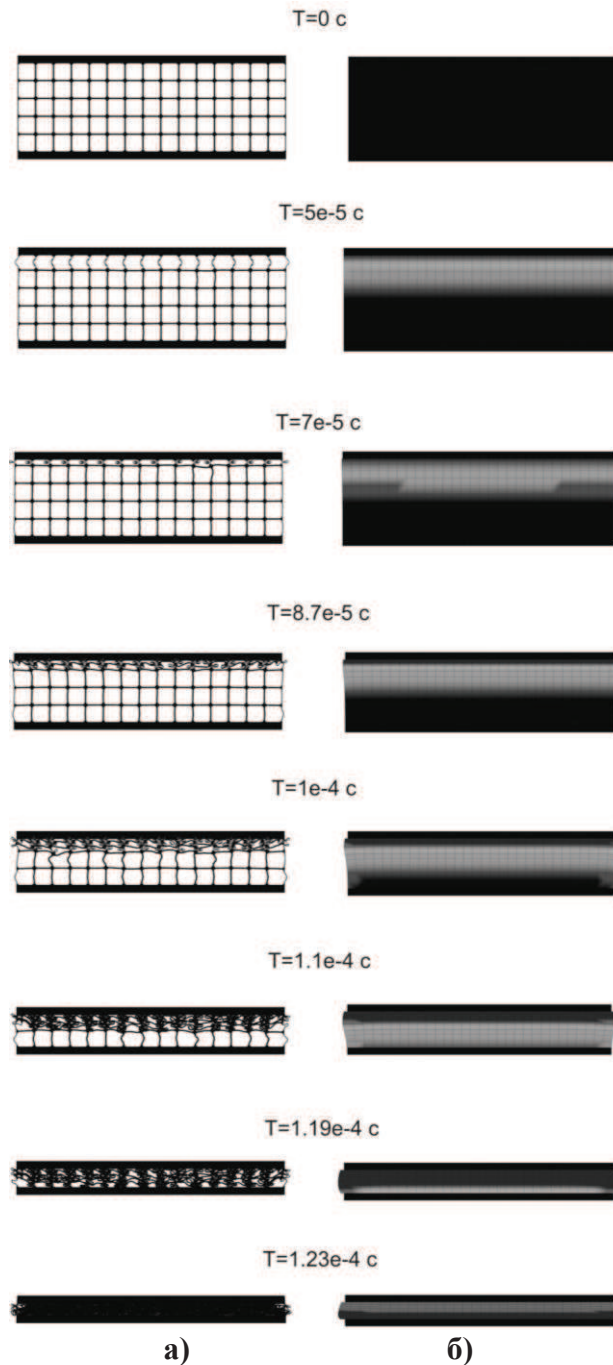
$$Y = \sigma_p + R(\hat{\varepsilon}), \tag{2}$$

где:  $R(\hat{\varepsilon})$  – функция упрочнения,  $\hat{\varepsilon}$  – эквивалентная деформация.

Особенностью функции текучести является то, что она включает в себя гидростатическое давление, так как при сжатии материала поры разрушаются и тем самым изменяется его объем. То есть, в отличие от обычного металла, объемные деформации пенометалла могут быть пластическими. Таким образом, функция текучести содержит в себе как девиаторную часть тензора напряжений  $s_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3}\sigma_{kk}\delta_{ij}$ , так и шаровую  $\sigma_m = \frac{1}{3}\sigma_{kk}$ . Эквивалентные напряжения описываются как:

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{1 + (\alpha/3)^2} [\sigma_i^2 + \alpha^2 \sigma_m^2], \quad (3)$$

где параметр  $\alpha$  отвечает за форму поверхности текучести.



**Рисунок 5. Сравнение процессов деформирования сэндвич-пакета  $\rho = 0.16$ :  
а) вычислительный эксперимент, б) математическая модель**

Функция упрочнения в выражении (2) описывается как:

$$R(\hat{\varepsilon}) = \gamma \frac{\hat{\varepsilon}}{\varepsilon_D} + \alpha_2 \ln \left( \frac{1}{1 - \left( \frac{\hat{\varepsilon}}{\varepsilon_D} \right)^\beta} \right). \quad (4)$$

Таким образом, напряжение течения имеет вид:

$$R(\hat{\varepsilon}) = \gamma \frac{\hat{\varepsilon}}{\varepsilon_D} + \alpha_2 \ln \left( \frac{1}{1 - \left( \frac{\hat{\varepsilon}}{\varepsilon_D} \right)^\beta} \right). \quad (5)$$

где:  $\sigma_p, \gamma, \alpha_2, \beta$  – параметры материала из аппроксимации кривой деформирования, полученные из теста на одноосное сжатие.

Кривые деформирования, полученные при помощи математической модели и взятые из вычислительного эксперимента, представлены на рисунке 4. Анимация процесса деформирования для пенометалла плотностью  $\rho = 0.16$  представлена на рисунке 5.

Из рисунка 4 видно, что представленная математическая модель хорошо аппроксимирует результаты вычислительного эксперимента для малых относительных плотностей пеноалюминия. Для пеноалюминия с относительной плотностью  $\rho \geq 0.5$  необходимо учитывать влияние коэффициента Пуассона  $\nu$ .

### Заключение

Для оценки механических свойств пенометаллов различной плотности проводилось сравнительное исследование влияния ударного нагружения на образец – сэндвич-пакет, состоящий из пеноалюминия, покрытого слоем стали. Найдены значения модуля упругости  $E$ , предела текучести  $\sigma_p$ , деформации уплотнения  $\varepsilon_D$  в зависимости от относительной плотности  $\rho$  пенометалла. Показано, что при малых относительных плотностях коэффициент Пуассона можно считать равным нулю ( $\nu \approx 0$ ). Для пеноалюминия с относительной плотностью  $\rho \geq 0.5$  необходимо учитывать влияние коэффициента Пуассона  $\nu$ .

### Литература

1. Бондарь В.С., Темис Ю.М., Бирюков М.В, Демпферная система защиты конструкций при взрыве на основе пеноалюминия, Москва: Известия МГТУ «МАМИ», Том 1 Серия 3. Естественные науки (2013).
2. A. Reyes et al. / European Journal of Mechanics A/Solids 22 (2003) 815-835.
3. J. Baumeister, J. Banhart, M. Weber, Aluminium foams for transport industry- Materials & Design, Vol. 18, Nos. 4, 1997, 217-220.