

Демпферная система защиты конструкций при взрыве на основе пеноалюминия

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, jmt@newmail.ru

Аннотация. В качестве наиболее перспективных материалов в энергопоглощающих системах рассматривается пеноалюминий. Проводятся сравнительные исследования влияния взрывных волн различной интенсивности на стальную пластинку с защитой пеноалюминием и без защиты.

Ключевые слова: пеноалюминий, взрыв, демпфирование

В настоящее время пеноалюминий рассматривается в качестве одного из перспективных материалов в энергопоглощающих системах для защиты от удара и действия взрывных волн. Перечислим наиболее важные свойства пеноалюминия, играющие определяющую роль при использовании его в качестве демпфирующего защитного покрытия:

- почти полностью закрытая пористая структура;
- малая масса;
- высокая энергопоглощающая способность при пластическом деформировании;
- высокая жесткость;
- низкий коэффициент теплопроводности и электропроводности;
- хорошее механическое и акустическое демпфирование;
- не горюч;
- пригоден к переработке;
- хорошая обрабатываемость.

Пеноалюминий может деформироваться при постоянном напряжении и поэтому может поглощать больше энергии, чем сплошной алюминий. Основная часть поглощенной энергии безвозвратно превращается в энергию пластической деформации, и в этом есть большое преимущество пеноалюминия. При том же уровне напряжений плотный металл деформируется в зоне обратимой упругой деформации и освобождает большее количество накопленной энергии после снятия нагрузки. Таким образом, пеноалюминий с его способностью хорошо поглощать энергию может быть рекомендован к использованию в качестве защиты различных технических объектов.

Для оценки эффективности защиты технических объектов слоем пеноалюминия проводится сравнительное исследование влияния взрывных волн различной интенсивности на стальную пластину с защитой и без защиты. Исследовалась стальная квадратная пластина со стороной 1300 мм и толщиной 1 мм, толщина защитного слоя 50 мм. Конечноэлементная модель пластины с защитой показана на рисунке 1.

Принимается, что плотность стального материала $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$, модуль упругости $E = 200 \text{ ГПа}$, коэффициент Пуассона $\nu = 0.3$, предел текучести $\sigma_T = 300 \text{ МПа}$, касательный модуль $E_T = 10 \text{ ГПа}$.

Для описания упругопластического поведения защитного слоя из пеноалюминия применяется нелинейная модель сотового материала. Для плотности сотового материала $\rho = 300 \text{ кг/м}^3$ принимается, что модуль упругости алюминия $E = 72 \text{ ГПа}$, коэффициент Пуассона $\nu = 0.33$, предел текучести $\sigma_T = 145 \text{ МПа}$; предельное относительное изменение объема $V_f = 0.15$ [1].

К передней грани пластины прикладывается давление, моделирующее ударную волну. Для моделирования такого поведения в качестве нагрузки использовалось представление

Рендерса-Персона и Беннистера [2]. Эта модель аппроксимирует экспериментальные данные, полученные Кингери [3].

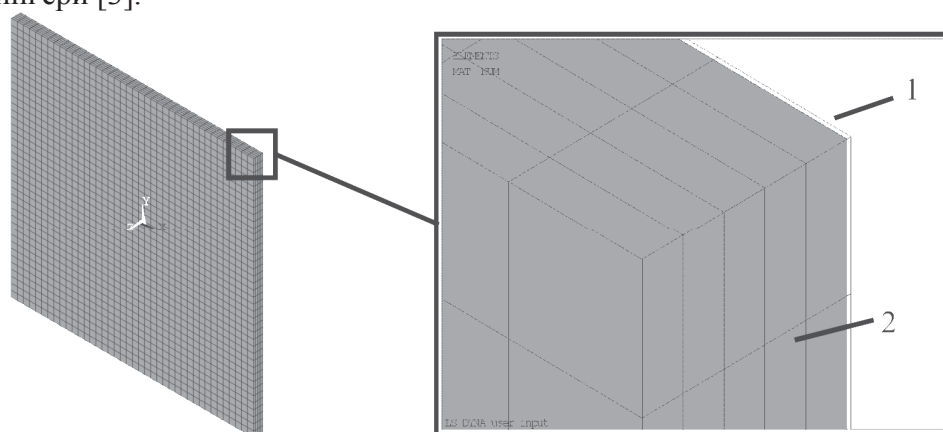


Рисунок 1. Конечноэлементная модель пластины с защитой: 1- сталь, 2- пеноалюминий

В модели учитывается угол падения волны θ , отраженное давление P_{ref} и падающее давление P_{in} :

$$P(t) = P_{ref} \cdot \cos^2 \theta + P_{in} \cdot (1 + \cos^2 \theta - 2 \cos \theta). \quad (1)$$

Здесь отраженное давление P_{ref} выражается в терминах коэффициента затухания a и пикового отраженного давления P_{r0} . Падающее давление P_{in} выражается в терминах коэффициента затухания b и пикового падающего давления P_{s0} . Уравнения для положительной фазы продолжительностью t_0 записываются в виде:

$$P_{ref} = P_{r0} \left(1 - \frac{t}{t_0}\right) e^{-a \frac{t}{t_0}}, \quad P_{in} = P_{s0} \left(1 - \frac{t}{t_0}\right) e^{-b \frac{t}{t_0}}. \quad (2)$$

Модель Рендерса-Персона и Беннистера требует следующих входных параметров:

- масса- эквивалент массы тринитротолуола (m);
- координаты точки взрыва;
- время задержки между началом расчета и моментом взрыва (τ).

В нашем случае рассматривается ударная волна, приходящая по нормали к поверхности, то есть $\theta = 0^0$ и уравнение (1) преобразуется к виду:

$$P(t) = P_{ref} + P_{in}. \quad (3)$$

Исследуется зависимость накопленной пластической деформации в зависимости от массы заряда (прикладываемого давления) с учетом того, что эпицентр взрыва находится на расстоянии 1 м от образца и время запаздывания равняется $\tau = 0.0001$ с. Расчетная схема показана на рисунке 2.

Сравнение результатов проводится для двух моделей:

- стальная пластина, покрытая слоем пеноалюминия;
- стальная пластина без защиты.

В таблице 1 приведены зависимости накопленной пластической деформации от массы заряда m , полученные из расчетов для двух моделей. Соответствующие графики показаны на рисунке 3.

Если принять за критерий разрушения стальной пластины уровень предельных пластических деформаций $\delta = 20\%$, то из полученных результатов видно, что при массе заряда,

равной $m \approx 1.2$ кг, пластина без защиты разрушается, в то время как в пластине, покрытой слоем пеноалюминия, пластическая деформация достигает уровня $\varepsilon_p \approx 7-8\%$, что ниже предельного значения в 2.5 раза.

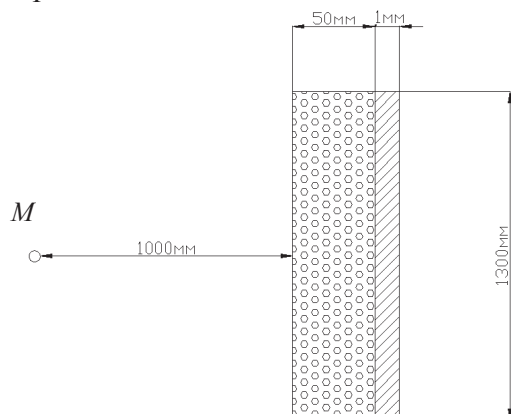


Рисунок 2. Расчетная схема исследуемой модели:
 M - место расположения заряда массой m

Таблица 1.

m , кг	ε_p , % (пластина с защитой)	ε_p , % (пластина без защиты)
0.3	0.8	2.3
0.5	2	4
0.7	3	7
1.0	5.5	15
1.3	8.5	22
1.5	10.5	27
1.7	12.5	37
2.0	15	46

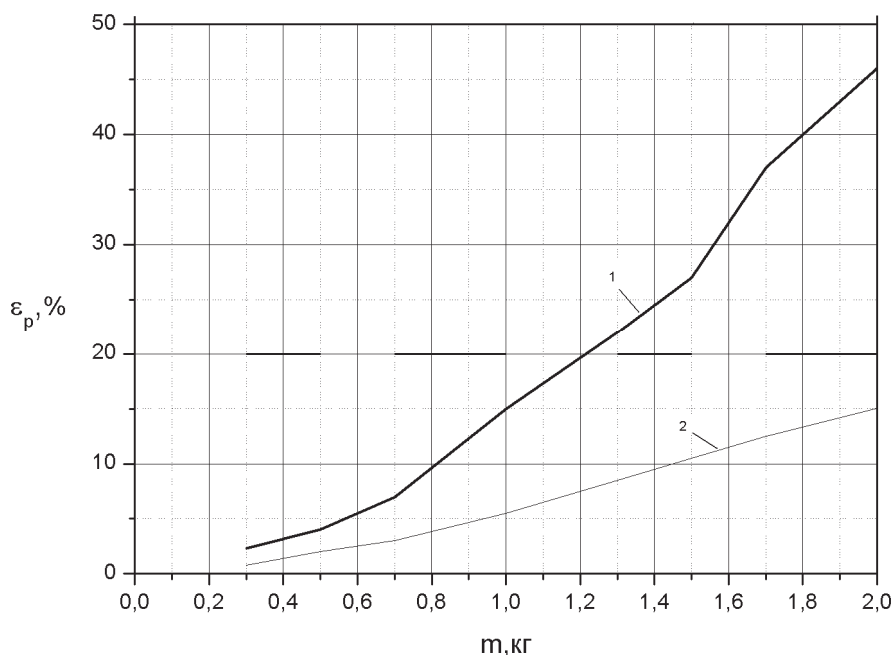


Рисунок 3. Зависимость накопленной пластической деформации от массы заряда:
 1- пластины без защиты, 2- пластины с защитой

На рисунке 4 приведены графики, иллюстрирующие процесс накопления пластических

деформаций в зависимости от массы заряда.

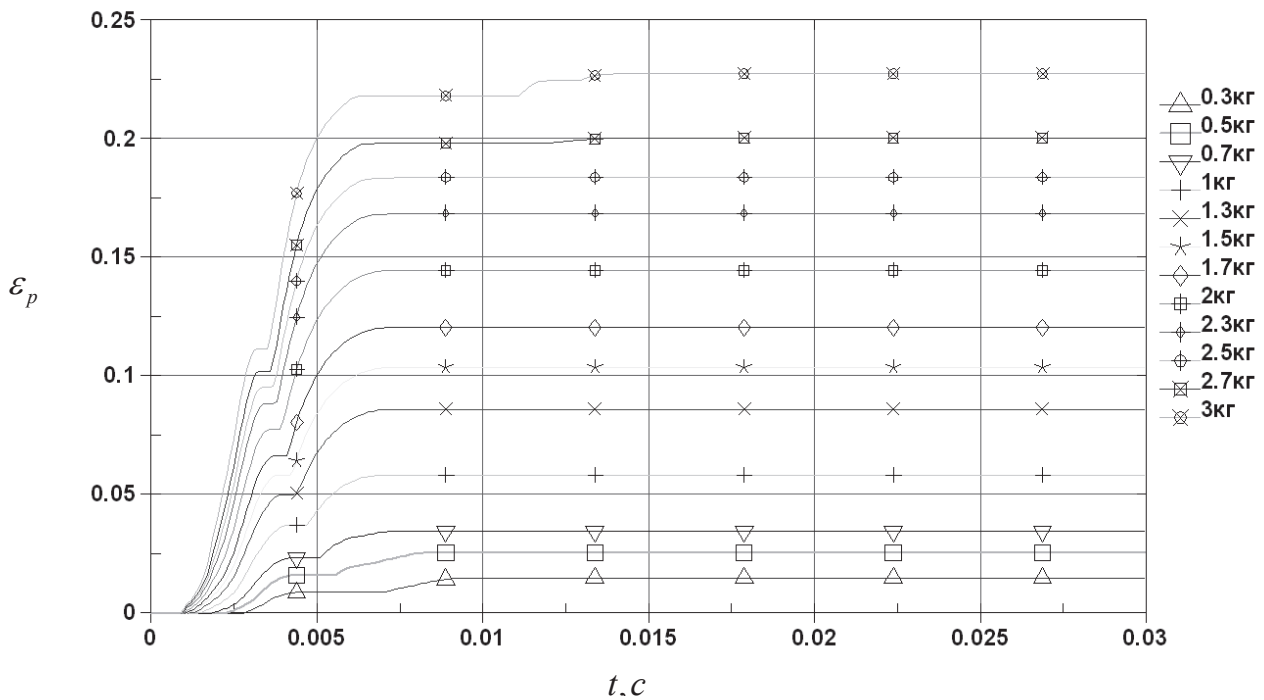


Рисунок 4. Графики зависимостей процесса накопления пластической деформации от времени при разной массе заряда для пластины, защищенной слоем пеноалюминия

Как видно из рисунков 3 и 4 пластина, защищенная слоем пеноалюминия, может выдержать массу взрывчатки, равную $m \approx 2.7$ кг, что в 2.25 раза больше, чем для незащищенной пластины.

Далее на рисунке 5 приводится анимация поведения стальной пластины, показывающая распределение смещения в процессе деформирования.

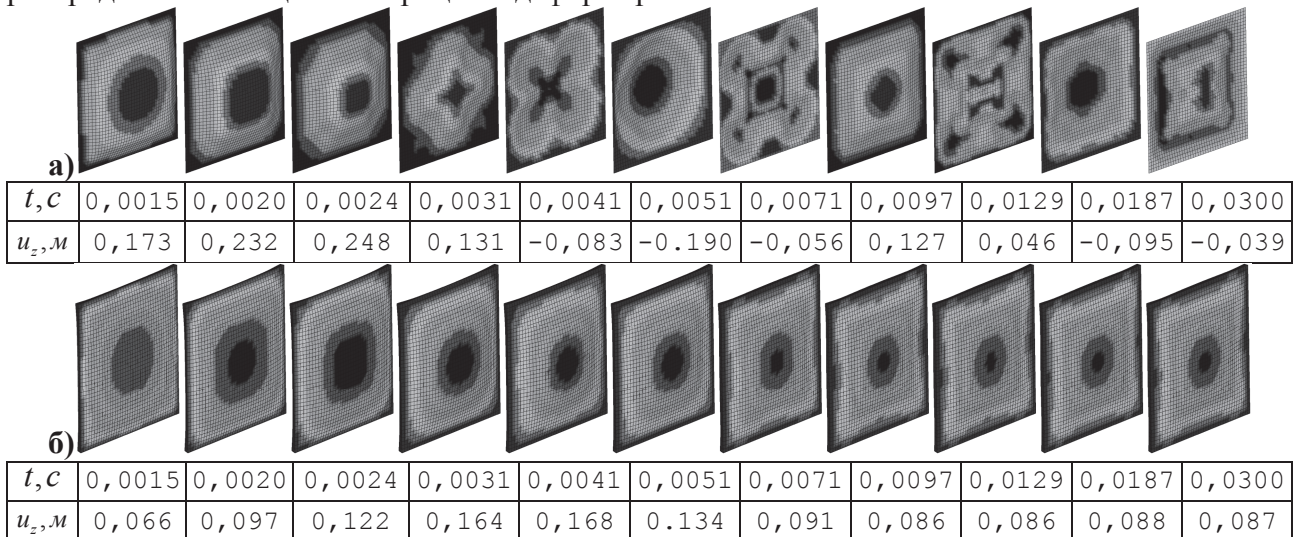


Рисунок 5. Распределение смещения в процессе деформирования для: а) пластины без защиты, б) пластины с защитным слоем

Зависимость смещения центральной точки пластины от времени для двух моделей показана на рисунке 6.

Зависимость скорости смещения центральной точки пластины от времени для двух моделей показана на рисунке 7.

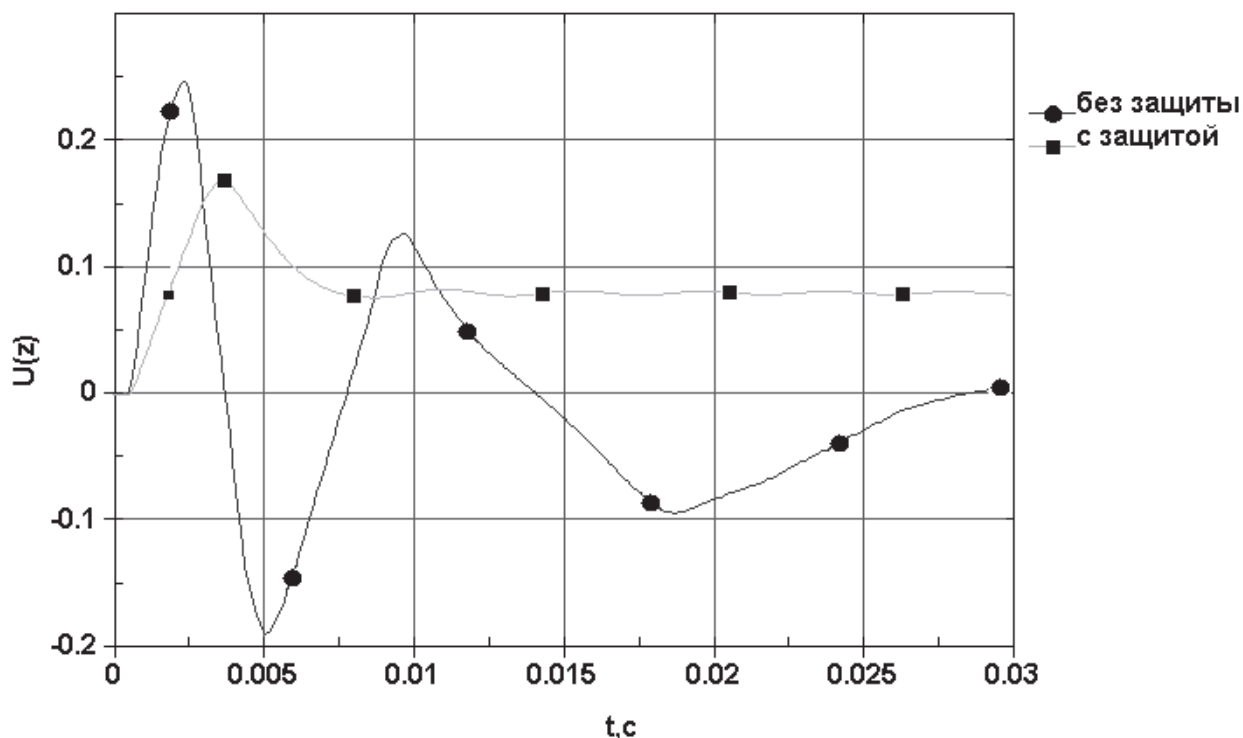


Рисунок 6. Зависимость смещения центральной точки пластины от времени для двух моделей

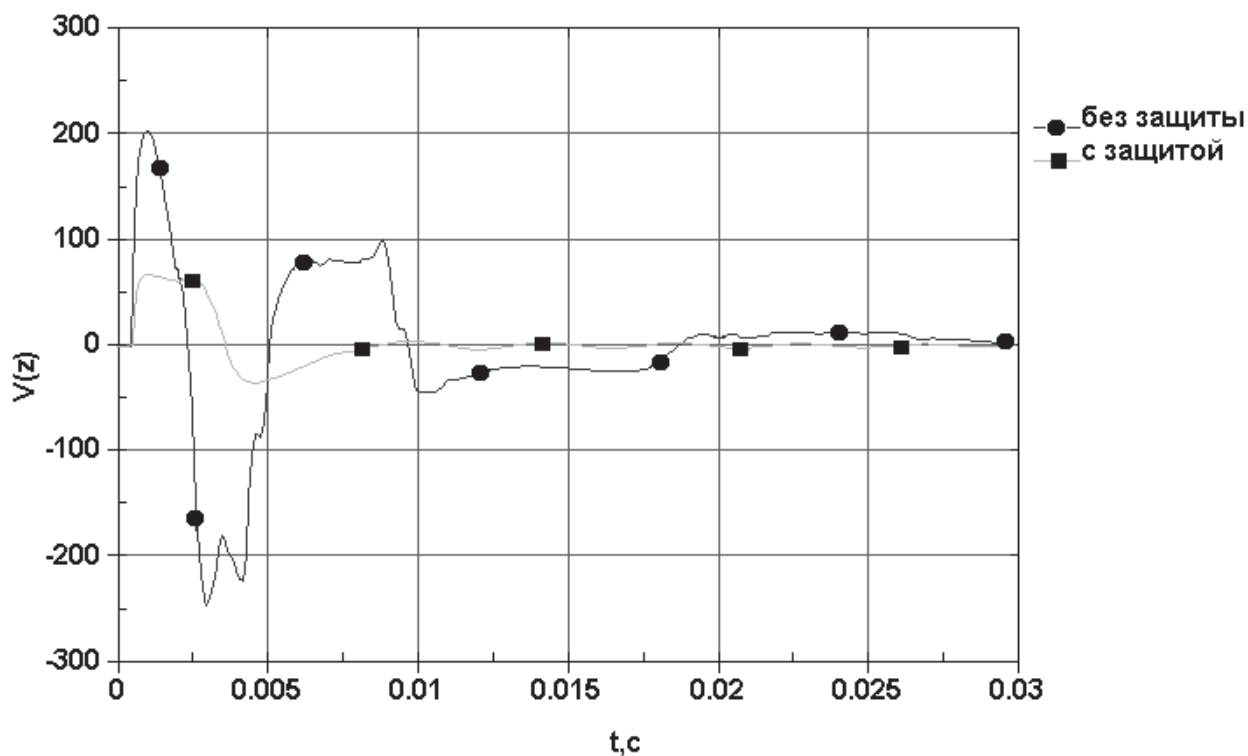


Рисунок 7. Зависимость скорости смещения центральной точки пластины от времени для двух моделей

Заключение

Проведено сравнительное исследование влияния взрывных волн различной интенсивности на стальную пластину без защиты и защищенную слоем пеноалюминия. Показано, что

уровень пластических деформаций для пластины с защитой в 2–2.5 раза ниже, чем для пластины без защиты, испытанной в тех же самых условиях. Из этого можно сделать вывод о том, что пеноалюминий гасит воздействие ударной волны за счет поглощения определенного количества энергии этой волны. Следовательно, такую систему с пеноалюминием можно использовать для защиты различных технических объектов от ударных нагрузок, что достаточно актуально для ряда современных конструкций.

Литература

1. Rajan Sriram, Uday K. Vaidya, Blast impact on aluminium foam composite sandwich panels- 8th International LS-DYNA Users Conference, 14:29-38.
2. Randers-Pehrson, G., and Bannister, K.A., «Airblast loading model for DYNA2D and DYNA3D», ARLT-TR-1310, Army Research Laboratory, Aberdeen proving ground (1997).
3. Kingery, C.N., and Bulmash, G., «Air-blast parameters from TNT spherical air burst and hemispherical surface blast», ARBRL-TR-02555, U.S. Army Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, (1984).