

УДК 539.37

А. В. Алиев, доктор физико-математических наук, профессор, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

А. А. Калинин, аспирант, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## ЭНЕРГОПОГЛОЩАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ТРЕХСЛОЙНОЙ ПЛАСТИНЫ В УСЛОВИЯХ ВЗРЫВА

Исследуется поведение зацементированной по контуру прямоугольной трехслойной пластины при нагружении ее давлением, создаваемым при взрыве заданной массы взрывчатого вещества. Поставленная задача решается численным методом конечных элементов. Показано влияние формы передней грани пластины на напряженно-деформированное состояние и кинематические параметры (перемещения, скорости и ускорения) характерных точек пластины. Приведены количественные данные по способности пластины поглощать энергию взрыва.

**Ключевые слова:** прямоугольная пластина, взрывное нагружение, метод конечных элементов, поглощение энергии.

**М**ногослойные сэндвич-пластины с промежуточным слоем из мягкого легко деформируемого материала (металлическая или полимерная пена, минеральная вата и т. п.) являются одним из вариантов средств защиты различных конструкций (например, автомобилей, самолетов, строительных конструкций и т. п.) от действия взрывной волны, которая образуется при возможном контакте объекта с самодельным взрывным устройством (СВУ) или грунтовой миной. Решение динамической задачи о взаимодействии взрывной волны с деформируемой конструкцией с целью анализа напряженно-деформированного состояния конструкции и оценки ее кинематических параметров (в частно-

сти, перемещений и ускорений характерных зон конструкции) является актуальным, но, к сожалению, трудно реализуемым в практических инженерных расчетах.

Ниже рассматриваются особенности расчета и поведения прямоугольной трехслойной пластины (длина  $L = 2,5$  м, ширина  $B = 1,5$  м, толщина верхнего слоя  $t_1 = 2$  мм, толщина нижнего слоя  $t_2 = 3$  мм, максимальная толщина среднего слоя  $H = 100$  мм) при нагружении ее давлением, возникающим при взрыве заданной массы взрывчатого вещества (рис. 1). Заряд взрывчатого вещества расположен внизу под центром пластины на расстоянии 0,2 м от нижней грани пластины.

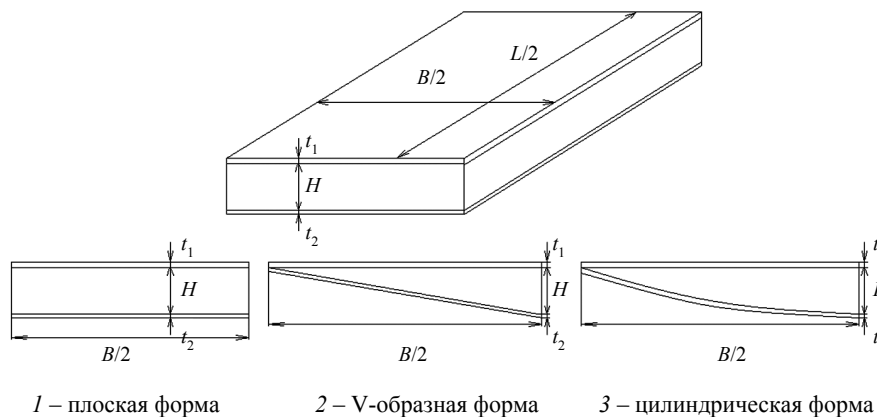


Рис. 1. Эскизы исследованных пластин

Для определения напряженно-деформированного состояния в отдельных слоях рассматриваемой пластины имеем следующую систему уравнений [1].

1. Уравнения равновесия:

$$\sigma_{ij,j}(\bar{x}) + \rho \cdot F_i(\bar{x}) = 0,$$

где  $\sigma_{ij}(\bar{x})$  – компоненты тензора напряжений;  $\bar{x}$  – радиус-вектор пространственного положения точки тела;  $\rho$  – плотность материала;  $\rho \cdot F_i(\bar{x})$  – компоненты вектора массовых сил (силы инерции).

В вышеприведенном уравнении и далее в других похожих уравнениях запятая с индексом после нее означает частную производную по соответствующей координате  $x_i$ ; индексы при компонентах тензоров, набранные малыми латинскими буквами, принимают значения от 1 до 3.

2. Геометрические уравнения (соотношения Коши):

– для случая малых деформаций  $\varepsilon_{ij}(\bar{x})$ :

$$\varepsilon_{ij}(\bar{x}) = \frac{1}{2}(u_{i,j}(\bar{x}) + u_{j,i}(\bar{x})),$$

где  $u_i(\bar{x})$  – компоненты вектора перемещения;

– для случая больших перемещений или деформаций:

$$\varepsilon_{ij}(\bar{x}) = \frac{1}{2} (u_{i,j}(\bar{x}) + u_{j,i}(\bar{x}) + u_{k,i}(\bar{x})u_{k,j}(\bar{x})).$$

Физические (определяющие) уравнения:

– для случая линейной связи между напряжениями  $\sigma_{ij}$  и деформациями  $\varepsilon_{kl}$  (обобщенный закон Гука):

$$\sigma_{ij} = D_{ijkl} \cdot \varepsilon_{kl},$$

где  $D_{ijkl}$  – компоненты матрицы констант упругости материала;

– для случая нелинейной связи между напряжениями и деформациями:

$$\sigma_{ij} = D(\bar{x}) \varepsilon_{ij},$$

где  $D(\bar{x})$  – некоторая функция компонент тензоров  $\sigma_{ij}(\bar{x})$  и  $\varepsilon_{ij}(\bar{x})$ , вид которой определяется конкретной моделью нелинейности материала. Компоненты тензора полной деформации  $\varepsilon_{ij}(\bar{x})$  в случае упруго-пластического поведения материала пластины состоят из двух слагаемых: упругой деформации  $\varepsilon_{ij}^e(\bar{x})$  и пластической деформации  $\varepsilon_{ij}^p(\bar{x})$ , т. е.  $\varepsilon_{ij}(\bar{x}) = \varepsilon_{ij}^e(\bar{x}) + \varepsilon_{ij}^p(\bar{x})$ .

4. Граничные условия:

– в точках на торцевых поверхностях по контуру пластины запрещены все линейные и угловые перемещения:  $u_x = u_y = u_z = 0$ ,  $\theta_x = \theta_y = \theta_z = 0$ ;

– нижняя грань нагружена давлением волны взрыва:  $\sigma_z(x, y, t) = -p(t)$ ;

– остальные поверхности свободны от нагрузок:  $\sigma_{ij}(\bar{x}) \cdot n_j(\bar{x}) = 0$ ,

где  $n_j(\bar{x})$  – направляющие косинусы нормали к поверхности пластины.

Три слоя каждой пластины соединены друг с другом последовательно по соответствующим поверхностям (см. рис. 1) таким образом, что пластина представляет непрерывное тело, состоящее из трех разных материалов.

Для физически или геометрически нелинейной деформируемой конструкции при наличии в ней сил вязкого сопротивления (внутренних или внешних) решение приведенной выше системы уравнений методом конечных элементов (МКЭ) [2] сводится к решению следующей системы нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$[M] \cdot \{\ddot{u}\} + [C] \cdot \{\dot{u}\} + \{f_{int}(u)\} = \{P(t)\}, \quad (1)$$

где  $[M]$ ,  $[C]$  – соответственно, матрица масс и матрица демпфирования конструкции;  $\{f_{int}(u)\}$  – вектор внутренних узловых сил;  $\{P(t)\}$  – вектор внешних узловых сил;  $\{\ddot{u}\}$ ,  $\{\dot{u}\}$  и  $\{u\}$  – соответственно, вектора узловых ускорений, скоростей и перемещений.

При интегрировании уравнений (1) следует учитывать начальные условия в момент времени  $t = t_0$ :

$$\{u\}(t = t_0) = \{u\}_0, \quad \{\dot{u}\}(t = t_0) = \{\dot{u}\}_0.$$

Информация о методе численного решения системы уравнений (1) приведена в [1].

Ниже представлена процедура решения рассматриваемой задачи методом конечных элементов с помощью программы LS-DYNA [3] для трех вариантов геометрии трехслойной пластины (см. рис. 1).

#### Создание модели пластины

1. Для создания модели прямоугольной пластины длиной  $L = 2,5$  м и шириной  $B = 1,5$  м используем возможности инструмента LS-PrePost программы LS-DYNA. С учетом симметрии геометрии и нагружения пластины далее рассматривается модель четвертой части пластины. На этом же этапе создания модели выполняем ее разделение на конечные элементы. Для решения рассматриваемой задачи используем объемный элемент Solid 164 с постоянным напряжением в нем.

2. В качестве материала нижней пластины выбран алюминий с массовой плотностью  $2700 \text{ кг/м}^3$ . Механические характеристики этого материала описываем моделью упруго-пластического материала с линейным упрочнением (\*MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC): модуль Юнга – 69 ГПа, коэффициент Пуассона – 0,3, предел текучести – 250 МПа и касательный модуль (модуль упрочнения) – 567 МПа.

Верхняя пластина сделана из стали с массовой плотностью  $7800 \text{ кг/м}^3$ . Механические характеристики этого материала описываем той же моделью материала (\*MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC) со следующими значениями параметров модели: модуль Юнга – 210 ГПа, коэффициент Пуассона – 0,27, предел текучести – 190 МПа и касательный модуль (модуль упрочнения) – 800 МПа.

Наполнитель из алюминиевой пены имеет массовую плотность  $250 \text{ кг/м}^3$ . Механические характеристики этого материала описываем моделью \*MAT\_HONEYCOMB (или MAT\_026) [3], которая используется для сотовых и пенных материалов с реальным анизотропным поведением. Эта модель позволяет задать нелинейное упругопластическое поведение таких материалов отдельно для всех компонент тензора напряжений. Ниже приведены некоторые основные параметры модели MAT\_026 для алюминиевой пены (в компактированном состоянии): модуль Юнга – 70 ГПа, коэффициент Пуассона – 0,33, предел текучести – 125 МПа, относительный объем, при котором алюминиевая пена становится полностью компактированным материалом, – 0,23.

#### Задание нагрузок и граничных условий

1. Давление волны взрыва задаем на поверхностных сегментах пластины, лежащих на ее нижней грани. Для задания нагрузки от взрыва заряда ВВ используем программу CONWEP [4]: задаем вес заряда для четверти пластины в тротиловом эквиваленте  $WGT = 0,25 \text{ кг}$  и координаты точки взрыва

$X = 0,75$  м;  $Y = 1,25$ ;  $Z = -0,2$  м. Таким образом, заряд ВВ находится вдоль нормали в центре пластины на расстоянии 0,2 м от ее нижней грани. Вводим 0,0001 в поле «time-zero of explosion (ТВО)». Используем вариант реализации взрыва в виде воздушного «ISURF» = 2.

2. Задаем кривую нагружения, т. е. значения времени и нагрузки в начале процесса нагружения (соответственно, 0 и 0) и в конце процесса нагружения (соответственно, 1 и 1).

3. Задаем условия закрепления пластины, т. е. геометрические граничные условия: используем защемление на внешнем контуре пластины, т. е. в этих узлах выполняется условие отсутствия всех линейных ( $UX = UY = UZ = 0$ ) и угловых перемещений ( $ROTX = ROTY = ROTZ = 0$ ). На плоскостях симметрии пластины задаем условия симметрии, т. е. отсутствие поступательных перемещений по нормали к плоскости симметрии и отсутствие касательных напряжений на плоскостях симметрии.

#### Задание параметров управления решением и выводом результатов расчета

1. Задаем время окончания динамического расчета 0,005 сек. Отметим, что время окончания расчета не должно превышать максимальное время на кривой нагружения, в противном случае нагрузка станет равной 0 после этого.

2. Задаем режим вычисления энергетических параметров пластины при ее нагружении волной взрыва.

3. Задаем шаг по времени 0,0001 сек. для записи выводимой базы данных.

4. Задаем время окончания 0,005 сек. вывода результатов расчета в зависимости от времени в файл BINARY\_D3THDT.

5. Задаем параметры, определяющие номенклатуру выводимых данных: «BNDOUT», «GLSTAT», «MATSUM» и «SPCFORC» и вводим интервал вывода по времени 0,005 сек. для каждого из них.

6. Сохраняем созданный файл ключевых слов для последующего его использования на этапе получения решения задачи.

Аналогично выполняем два других варианта моделирования, в которых меняем форму нижнего слоя пластины (см. рис. 1). Во втором варианте нижняя

пластина имеет V-образную форму, а в третьем варианте – цилиндрическую форму.

Результаты, полученные с помощью МКЭ для пластин, показанных на рис. 1, просматриваем с помощью инструмента LS-PrePost. В частности, на рис. 2–6 приведены для пластины № 3 изображения формы изогнутой пластины в нужный момент времени (рис. 2), контурные изображения распределения эквивалентных напряжений по Мизесу в пластине (рис. 3), графики изменения во времени кинематических параметров двух центральных узлов пластины, т. е. перемещения (рис. 4) и ускорения (рис. 5), график изменения внутренней энергии пластины во времени (рис. 6).

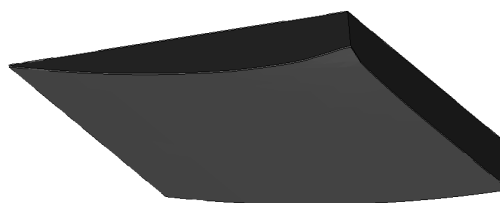


Рис. 2. Форма изогнутой пластины № 3

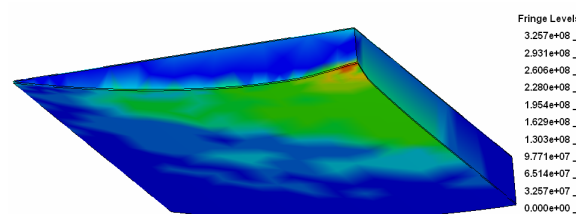


Рис. 3. Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в пластине № 3

*Примечание.* Изображения на рис. 2 и 3 соответствуют моменту времени, при котором прогиб пластины в ее центре является максимальным.

В табл. 1 приведена сводка полученных результатов по всем трем вариантам рассмотренных пластин с указанием характерных параметров работоспособности пластин при взрывном нагружении и максимальных энергетических затрат (кинетическая энергия  $K$  и внутренняя энергия  $U$ ) на деформирование пластин.

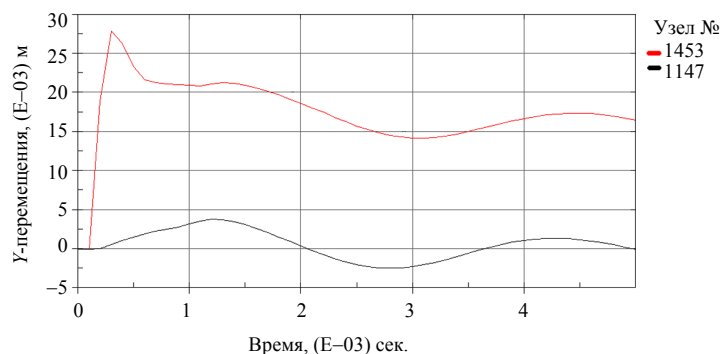


Рис. 4. Изменение перемещения нижнего (узел № 1453) и верхнего (узел № 1147) центральных узлов пластины № 3 во времени

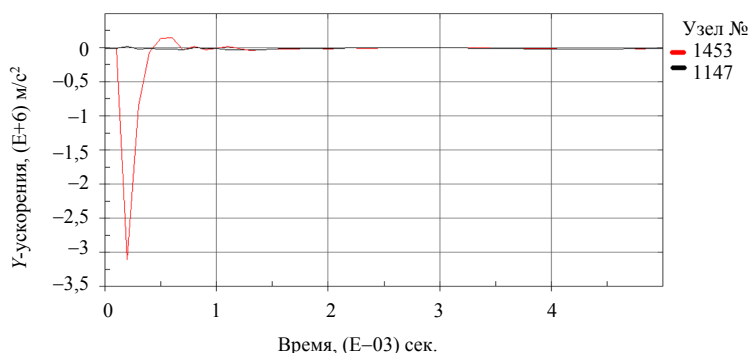


Рис. 5. Изменение ускорения нижнего (узел 1453) и верхнего (узел 1147) центральных узлов пластины № 3 во времени

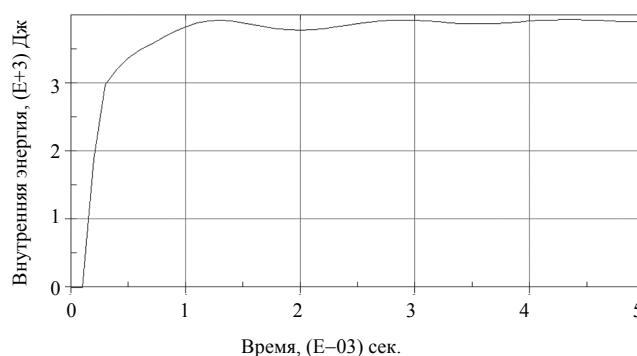


Рис. 6. Изменение внутренней энергии пластины № 3 во времени

Таблица 1. Сводка результатов расчета

Тип пластины	Макс. прогиб, мм		Макс. скорость, м/сек.		Макс. ускорение, $\times (10^6)$ , м/сек. <sup>2</sup>		Макс. энергия в пластине, Дж		
	Узел		Узел		Узел		Внутренняя, $U$	Кинетическая, $K$	Полная, $U + K$
	нижний	верхний	нижний	верхний	нижний	верхний			
1	47	15	200	18	-0,9	0,1	3800	1900	3800
2	33	14	205	10	-1,9	0,05	3800	1600	3800
3	28	3,5	215	5	-3,1	$\sim 0$	3900	1450	3900

Примечание: верхний узел находится в центре верхней поверхности, а нижний узел – в центре нижней поверхности пластины.

Анализ полученных результатов позволяет, в частности, сделать вывод, что в случае трехслойной цилиндрической пластины с промежуточным слоем из алюминиевой пены максимальное значение ускорения верхнего центрального узла пластины практически отсутствует, а максимальное перемещение этого узла составляет всего 3,5 мм. Это свидетельствует о том, что такую пластину можно использовать в качестве эффективного конструкционного средства для защиты соответствующих объектов (оборудование, приборы, экипаж автомобиля или другого транспорта и т. п.) от действия взрывной волны.

#### Библиографические ссылки

1. Алиев А. В., Калинин А. А. Напряженно-деформированное состояние, энергопоглощающая способность и разрушение круговой пластины в условиях взрыва // Вестник ИжГТУ. – 2013. – № 2(58). – С. 150–154.
2. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 541 с.
3. LS-DYNA Keyword User's Manual. Version 970. LSTC.
4. Randers-Pehrson G., Bannister K. Airblast loading model for DYNA2D and DYNA3D, ARL-TR-1310. – MD, USA: Army Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, 1997.

A. V. Aliev, DSc (Physics and Mathematics), Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University  
A. A. Kalinnikov, Post-graduate, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

#### Energy Absorption Capability of Rectangular Three-Layer Plate Under Blast Loading

Deformation of rectangular three-layer plate under blast loading is considered. Solution of this problem is performed by finite element method. Results are represented for displacements, velocities, acceleration and energy absorption of plate for different shapes of bottom layer of plate.

**Key words:** rectangular plate, blast loading, finite element method, energy absorption.