

Исследование степени деформации многослойных пакетов при ударном нагружении полусферическим ударником с применением CAE систем

Национальный технический университет «ХПИ», Харьков

В связи с увеличением числа тонкостенных деталей в машиностроении возникает проблема необходимости повышения их ударной стойкости при одновременном снижении материалоемкости. Решение такой проблемы заключается в применении многослойных структур. Рассмотрены задачи численного моделирования деформирования пластин и пакетов, состоящих из титановых, алюминиевых, керамических пластин различной толщины. В пакете ANSYS, с применением метода конечных элементов, моделировалось ударное взаимодействие полусферического ударника с многослойными пластинами.

Ключевые слова: математическое моделирование, титан, алюминий, керамика, CAE системы.

Необходимость защиты авиационной и наземной техники от ударного воздействия обуславливает широкий интерес к исследованию особенностей взаимодействия ударников с преградами в условиях высокоскоростного соударения.

В настоящее время наметились следующие тенденции:

- применение комбинированных преград;
- переход от ручных методов расчета к применению наукоемких систем инженерного анализа для инженерной подготовки производства.

Развитие исследований стимулирует модификация существующих и создание новых материалов, применение комбинированных конструкций, включающих в себя материалы с существенно различными свойствами. Значительное внимание исследователей привлекает проблема взаимодействия ударника с комбинированными преградами конечной толщины. В классическом варианте они состоят из трех слоев – лицевого, тыльного, и промежуточного рабочего. Комбинации материалов этих слоев мало изучена. Кроме того, полученные пакеты пластин могут обладать характеристиками, отличающимися от характеристик исходных материалов.

В представленной работе рассмотрены многослойные пакеты, которые состоят из плоских пластин титана, алюминия и керамики переменной толщины, так как именно эти перечисленные материалы являются в основном применимыми в авиастроении. Исследования велись с учетом высокоскоростного воздействия стального полусферического ударника на набор материалов. При таком воздействии мы учитывали изменение прочностных характеристик материала, наличие больших пластических деформаций, нагрев. При исследовании учитывали конструктивные особенности пластины, форму, геометрию и величину скорости ударника. Целью работы было определение допустимой величины деформации пакета, при которых отсутствует его катастрофическое разрушение.

Для решения задачи определения степени деформации многослойных пластин при высокоскоростном воздействии на него ударника решено использовать компьютерное проектирование и моделирование образов исследуемых объектов на базе вычислительных логических алгоритмов с применением метода конечных элементов в среде CAE-модуля ANSYS.

Движение сплошной среды описывали, используя закон сохранения массы, закон сохранения импульса, закон сохранения энергии, модель материала, начальных условий и граничных условий.

Математическая модель движения сплошной среды, описываемая на основе перечисленных выше уравнений, численно решается в ANSYS путем использования явного интегрирования по времени, а также различных методик решения.

Для лагранжевых формулировок плотность в любой момент может быть определена из текущего объема зоны и ее первоначальной массы.

Частные дифференциальные уравнения, которые выражают закон сохранения импульса, связывают ускорение и тензор напряжений σ_{ij} :

$$\begin{aligned} p\ddot{x} &= b_x + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z}; \\ p\ddot{y} &= b_y + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z}; \\ p\ddot{z} &= b_z + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z}. \end{aligned} \quad (1)$$

Сохранение энергии выражается уравнением:

$$\dot{e} = \frac{1}{\rho} \left(\sigma_{xx} \dot{\epsilon}_{xx} + \sigma_{yy} \dot{\epsilon}_{yy} + \sigma_{zz} \dot{\epsilon}_{zz} + 2\sigma_{xy} \dot{\epsilon}_{xy} + 2\sigma_{yz} \dot{\epsilon}_{yz} + 2\sigma_{zx} \dot{\epsilon}_{zx} \right), \quad (2)$$

которое решают в явном виде для каждого элемента модели, основанной на входных значениях в конце предыдущего шага по времени. Для обеспечения стабильности и точности решения использовалось малое время приращения. В корректном моделировании масса, импульс и энергия сохранялись.

При интегрировании применяли метод центральных разностей. Ускорения оценивают для t :

$$\{a_t\} = [M]^{-1} \left([F_t^{ext}] - [F_t^{int}] \right), \quad (3)$$

где $\{a_t\}$ – вектор ускорения; $[M]$ – матрица масс; $[F_t^{ext}]$ – вектор приложенных внешних сил; $[F_t^{int}]$ – вектор внутренних сил:

$$F_t^{int} = \sum \left(\int_{\Omega} B^T \sigma_n d\Omega + F^{hg} \right) + F^{contact}, \quad (4)$$

где F^{hg} – сила hourglass-сопротивления, $F^{contact}$ – сила контакта.

Затем вычислялись скорости и перемещения по формулам:

$$\begin{aligned} \{v_{t+\Delta t/2}\} &= \{v_{t-\Delta t/2}\} + \{a_t\} \Delta t_i; \\ \{u_{t+\Delta t}\} &= \{u_t\} + \{v_{t+\Delta t/2}\} \Delta t_{i+\Delta t/2}; \\ \Delta t_{i+\Delta t/2} &= 0.5(\Delta t_t + \Delta t_{t+\Delta t}); \\ \Delta t_{i-\Delta t/2} &= 0.5(\Delta t_t - \Delta t_{t+\Delta t}). \end{aligned} \quad (5)$$

Геометрия обновлялась добавлением приращений перемещений к исходной геометрии $\{x_0\}$:

$$\{x_{t+\Delta t}\} = \{x_0\} + \{u_{t+\Delta t}\}. \quad (6)$$

Для упрощения обращения матриц используем диагональную матрицу масс. Уравнения становятся несвязанными и могут решаться напрямую (явно).

Для исследования деформирования хрупких материалов мы использовали модель Johnson-Holmquist [2]. В этой модели предел прочности хрупкого материала в процессе его разрушения меняется от предела прочности исходного неповрежденного материала σ_0 до предела прочности полностью разрушенного (измельченного) материала σ_p . Соответствующее уравнение имеет вид:

$$\sigma = \sigma_0 - D(\sigma_0 - \sigma_p), \tag{7}$$

где D – поврежденность ($0 \leq D \leq 1$).

Пределы прочности неповрежденного и полностью разрушенного материалов зависят от текущих давления и скорости деформации:

$$\sigma_0 = A(P + T_p)^N \left(1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right); \tag{8}$$

$$\sigma_p = BP^M \left(1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right).$$

где A, N, C, B, M – постоянные, $\dot{\epsilon}_0 = 1.0 \text{ с}^{-1}$.

Эффективный предел прочности разрушенной керамики $\sigma_{кр}$ может быть описан эмпирическим соотношением [3]:

$$\sigma_{кр} = 0.2\sigma_{к0} \left\{ 1 - \exp \left[\frac{-\lambda\sigma_{\epsilon}}{0.2\sigma_{к0}} \left(\frac{\delta_n}{h} \right)^2 \right] \right\}, \tag{9}$$

где $\sigma_{к0}$ и σ_{ϵ} – пределы прочности неповрежденной керамики и материала подложки соответственно; δ_n – толщина подложки; $\lambda \approx 1$ – подгоночный коэффициент; h – текущая толщина керамического слоя между проникающим ударником и границей раздела с подложкой.

Поиск области существования оптимальных деформаций многослойных пластин осуществляли с помощью многочисленных экспериментов с изменением толщины пластин, мм, сравнивая их с поведением одинарных пластин. На рис. 1 представлены результаты моделирования деформации листового алюминия при разных толщинах пластин, на рис. 2 – результаты моделирования деформации листового титана. Эти результаты показывают, что алюминий в большей степени подвержен деформации по сравнению с титаном.

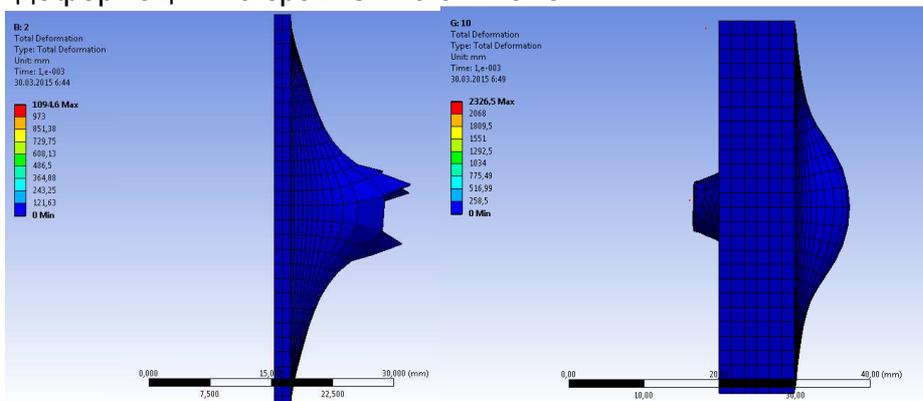


Рис. 1. Деформация алюминия при толщине 2 и 10 мм

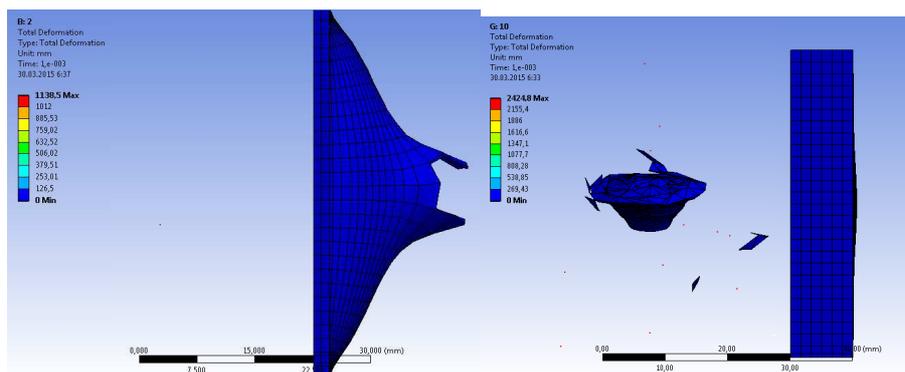


Рис. 2. Деформация титана при толщине 2 и 10 мм

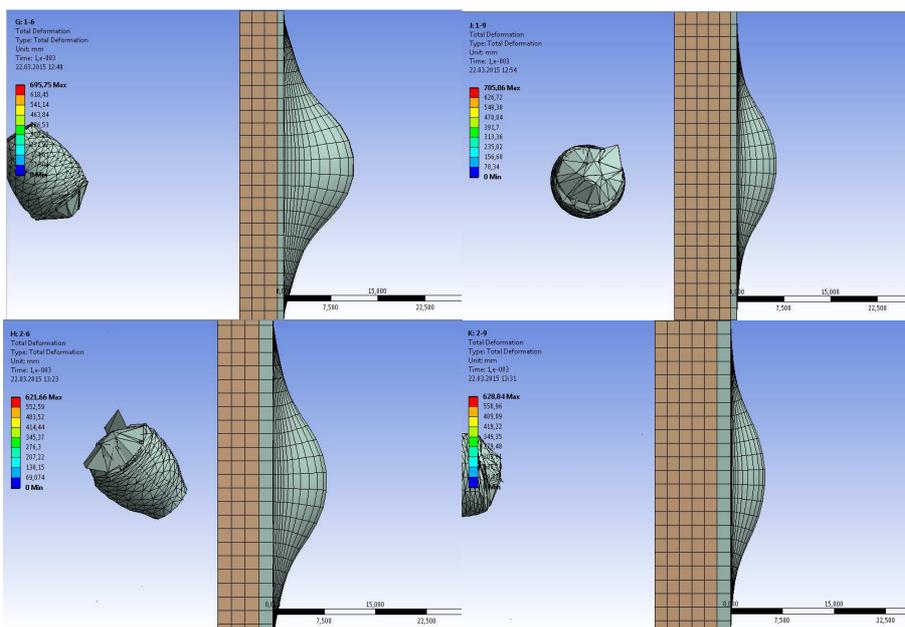


Рис. 3. Деформация многослойных пластин

На рис. 3 представлены исследования многослойных пакетов алюминий – титан толщиной 1...6 мм, 1...9 мм, 2...6 мм и 2...9 мм. На рис. 4 показаны результаты моделирования разрушения многослойной панели керамика/титан с внешним керамическим слоем. В первом случае толщиной титана была 2 мм, керамики – 1 мм, ударник разрушил керамику и деформировал подложку. Во втором случае толщина титана была 5 мм, керамики – 5 мм, ударник деформировался при столкновении и не пробил пластину.

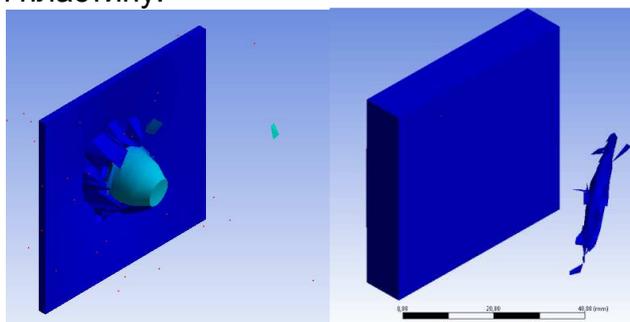
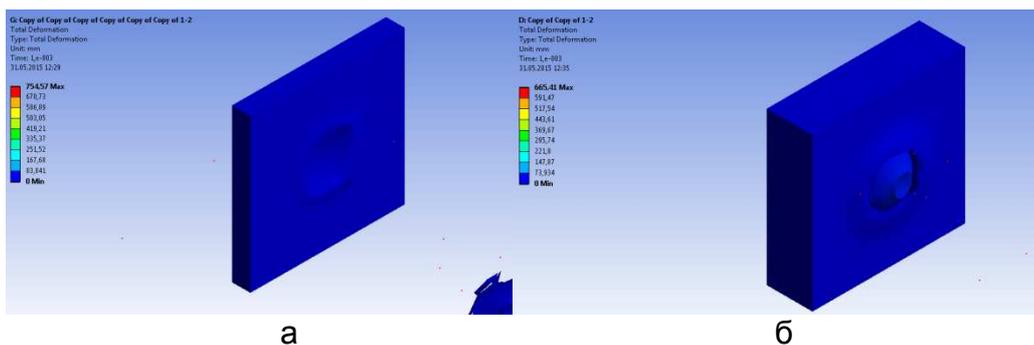


Рис. 4. Разрушения пластины титана с внешним керамическим слоем

Рис. 5. Разрушения пластины Al - В₄С- Ti

На рис. 5 показаны результаты моделирования разрушения многослойных панелей алюминий/керамика/титан. На рис. 5, а толщина титана была 2 мм, керамики – 2 мм, алюминия – 2 мм, ударник не пробивает пластину, а слой алюминия сдерживает разрушенную керамику. На рис. 5, б толщина титана – 10 мм, керамики – 2 мм, алюминия – 2 мм, ударник не пробивает пластину, разрушает керамический и алюминиевые слои, ударник деформируется и останавливается.

Выводы

Исследованы процессы высокоскоростного взаимодействия ударников с комбинированными многослойными преградами, получены зависимости деформирования и разрушения пластин при вариации толщин лицевого и тыльного слоев преграды, а также материала этих пластин, смоделирована динамика процесса внедрения и разрушения ударника. Получены величины прогиба пакетов при варьировании их толщины.

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректностью постановок задач, выбором в каждом конкретном случае адекватной расчетной сетки, обеспечивающей сходимость решения, контролем в процессе численного счета выполнения законов сохранения.

Результаты моделирования позволяют сделать заключение о том, что ударная прочность изделий из чистого листового материала меньше, чем многослойных пакетов. Применение керамики значительно увеличивает ударную прочность многослойных пластин, а использование керамики как промежуточного слоя повышает живучесть этих пластин и, как следствие, авиационной и наземной техники. Следовательно, исследование многослойных пакетов из различных по свойствам материалов является перспективным научным направлением, а также имеет практическую ценность, так как позволяет получить изделия с характеристиками, превышающими характеристики исходных материалов при меньшем весе и размере. Применение модели Johnson-Holmquist позволило нам моделировать хрупкий материал в пакете ANSYS.

Список литературы

1. Драгобецкий, В. В. Совершенствование свойств инструментальных материалов методами взрывной обработки / В. В. Драгобецкий, В. В. Пирогов, Е. А. Наумова // Вісник СевНТУ. Вип. 107: Машиноприладобудування та транспорт: зб. наук. пр. – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2010.

2. Johnson, G. R. An Improved computation constitutive model for brittle material / G. R. Johnson, T. J. Holmquist // High Pressure Science and Technology. – NY: AIP Press, 1994.

3. Ravid M. Penetration analysis of ceramic armor with composite material backing / M. Ravid, S. R. Bodner, I. S. Chochron // Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Ballistics. – Interlaken, Switzerland, 2001.

Поступила в редакцию 03.09.2015

Дослідження ступеня деформації багат шарових пакетів при ударному навантаженні напівсферичним ударником із застосуванням CAE систем

У зв'язку зі збільшенням числа тонкостінних деталей у машинобудуванні виникла проблема необхідності підвищення їх ударної стійкості при одночасному зниженні матеріаломісткості. Вирішення такої проблеми полягає в застосуванні багат шарових структур. Розглянуто задачі числового моделювання деформування пластин і пакетів, що складаються з титанових, алюмінієвих, керамічних пластин різної товщини. Моделювані пластини піддавалися ударному впливу напівсферичного ударника в пакеті ANSYS із застосуванням методу скінченних елементів.

Ключові слова: математичне моделювання, титан, алюміній, кераміка, CAE системи.

Research degree of deformation of multilayer packages with impact loading hemispherical drummer with per-application of CAE systems

With the increase in number of thin parts, engineering problem need to improve their shock resistance, while reducing material consumption. The solution to this problem, we see use of multilayer structures. The tasks of numerical modeling of deformation of plates and packages consisting of titanium, aluminum ceramic plates of different thicknesses. Simulated wafer subjected to impact shock hemispherical drummer, in a package using ANSYS finite element method.

Keywords: mathematical modeling, titanium, aluminum, ceramics, CAE system.