

УДК 621.039.56

С.С. ДОБРОТВОРСКИЙ, С.С. ГНУЧИХ, Л.Г. ДОБРОВОЛЬСКАЯ

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УДАРНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПЛАСТИН ПОЛУСФЕРИЧЕСКИМ УДАРНИКОМ

Проведено компьютерное моделирование процесса ударного деформирования пластин, состоящих из материалов различной толщины, полусферическим ударником. В связи с повышением скоростей обработки деталей машин, защитные конструкции в станкостроении нуждаются в повышении ударной стойкости, при одновременном снижении материалоемкости. Рассматривалась задача контактного динамического деформирования пластины при больших скоростях протекания процесса. Для высокоскоростного процесса деформирования учитывалась зависимость физико-механических свойств материала от уровня скоростей деформации. Компьютерное моделирование процесса проводилось специализированным программным комплексом ANSYS в модуле "Explicit Dynamics" основанным на применении метода конечных элементов в условиях высоких скоростей. Анализ полученных данных показал преимущества применения многослойных пластин с керамическим слоем.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, метод конечных элементов, многослойные пластины.

**Введение.** В современном машиностроении при повышении скоростей обработки, возникает необходимость повышения прочности и ударной стойкости средств защиты, при одновременном снижении материалоемкости. Внимание исследователей привлекает проблема, моделирование процесса взаимодействия деформируемых, многослойных пластин конечной толщины с деформируемым ударником. Такие пластины могут применяться в деталях машин, средствах защиты. Комбинации таких пластин из различных по свойствам материалов мало изучены и могут дать неожиданные результаты. Исследование сочетаний этих материалов на опытных образцах дорогое и непродуктивное занятие, поэтому в противовес ему предлагается использование современных инженерных программ.

**Анализ последних исследований и литературы.** Из обзора работ зарубежных и отечественных авторов установлено [1], что мировые тенденции повышения производительности и качества инженерных работ состоят в уходе от опытного, ручного труда к программному моделированию систем и процессов протекающих в них.

Разработка имитационного подхода к моделированию процесса ударного деформирования пластин дает возможность оптимизировать и улучшить характеристики проектируемой детали. Несмотря на большое внимание к данной проблеме и имеющиеся в литературе работы в этой области как экспериментального, так и теоретического плана, проблема далека от полного решения.

**Целью** данной статьи является изучение методов и результатов математического моделирования процесса ударного деформирования пластин конечной толщины полусферическим ударником, исследование закономерностей разрушения комбинированных слоистых преград при высокоскоростном ударе деформируемыми ударниками. Нахождение оптимального сочетания материала и толщины этих пластин.

**Постановка проблемы.** В настоящей работе мы рассматривали задачи моделирования процессов высокоскоростного деформирования тонкостенной изотропной пластины и пакетов пластин, которые имеют

однородную структуру, под действием ударного нагружения ударником с полусферической формой рабочей части. Для определения деформированного состояния таких пластин решается динамическая вязкопластическая контактная задача с граничными и начальными условиями. При таком воздействии мы учитывали изменение прочностных характеристик материала, наличие больших пластических деформаций, нагрев. При исследовании учитывали конструктивные особенности пластины, форму, геометрию, величину, скорости и материал ударника. Для этого было использовано компьютерное проектирование и моделирование образов исследуемых объектов на базе вычислительных логических алгоритмов CAE-модуля ANSYS.

**Материалы исследований.** Движение сплошной среды описываем используя: закон сохранения массы, закон сохранения импульса, закон сохранения энергии, модель материала, начальных условий, граничных условий.

Математическая модель движения сплошной среды, описываемая с использованием 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  $\sigma_{ij}$  [3]:

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

Сохранение энергии выражается через:

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

Эти уравнения решались 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 оцениваются для  $t$ :

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

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

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

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

Затем вычислялись скорости и перемещения:

$$\begin{aligned} \{v_{t+\Delta t/2}\} &= \{v_{t-\Delta t/2}\} + \{a_t\} \Delta t; \\ \{u_{t+\Delta t}\} &= \{u_t\} + \{v_{t+\Delta t/2}\} \Delta t; \\ \Delta t_{t+\Delta t/2} &= 0,5(\Delta t_t + \Delta t_{t+\Delta t}); \\ \Delta t_{t-\Delta t/2} &= 0,5(\Delta t_t - \Delta t_{t+\Delta t}). \end{aligned} \quad (5)$$

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  $\sigma_0$  до предела прочности полностью разрушенного (измельченного) материала  $\sigma_p$ . Соответствующее уравнение имеет вид:

$$\sigma = \sigma_0 - D(\sigma_0 - \sigma_p), \quad (7)$$

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

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

$$\begin{aligned} \sigma_0 &= A(P + T_p)^N \left( 1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right); \\ \sigma_p &= B P^M \left( 1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right), \end{aligned} \quad (8)$$

где  $A, N, C, B, M$  – постоянные,  $\dot{\epsilon}_0 = 1,0 \text{ с}^{-1}$ .

Численные значения, постоянных коэффициентов данной модели, для корундовой, карбидокремневой керамики и натрийсиликатного стекла [8] приведены в таблице 1.

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

$$\sigma_{кр} = 0,2 \sigma_{кр0} \left\{ 1 - \exp \left[ \frac{-\lambda \sigma_{кр} (\frac{\delta_n}{h})^2}{0,2 \sigma_{кр0}} \right] \right\}, \quad (9)$$

где  $\sigma_{кр0}$  и  $\sigma_{кр}$  – пределы прочности неповрежденной керамики и материала подложки соответственно;  
 $\delta_n$  – толщина подложки;  
 $\lambda \approx 1$  – подгоночный коэффициент;  
 $h$  – текущая толщина керамического слоя между проникающим ударником и границей раздела с подложкой.

Таблица 1 – Численные значения постоянных модели Джонсона-Холмквиста.

Постоянные	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiC	B <sub>4</sub> C
$\rho_0$	3,91г/см <sup>3</sup>	3,16г/см <sup>3</sup>	2,51г/см <sup>3</sup>
Модуль Юнга, ГПа	379	423	233
Модуль сдвига, ГПа	153	183	197
$\gamma$ , ГПа	3,76	5,9	2,33
$T_p$ , ГПа	0,16	0,16	0,16
A	0,98	0,96	0,987
B	0,35	0,35	0,5
C	0	0	0,027
M	1	1	1
N	0,39	0,65	0,77
D <sub>1</sub>	0,007	0,0048	0,1
D <sub>2</sub>	1,24	0,48	1
g	1,4	0,48	0,15
$e_{пл}^p$ (p=0), %	0,1	0,1	0,1

**Результаты исследования.** Расчетная схема процесса ударного деформирования пластин полусферическим ударником, созданная в CAD – системе. На рис. 1 представлена конечно-элементная трехмерная модель.

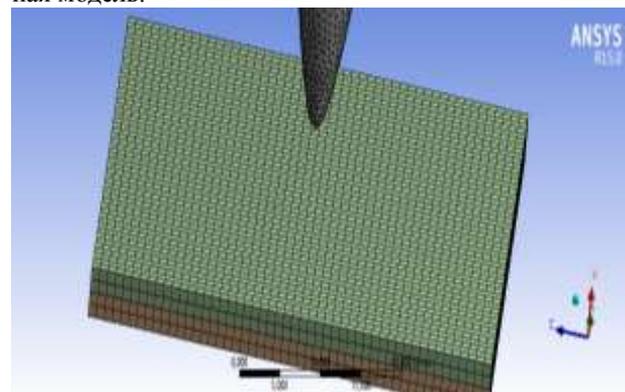


Рис. 1 – Расчётная схема

В каждом конкретном случае назначалась адекватная расчетная сетка, обеспечивающая сходимость решения. Конечно-элементная модель состоит из 2000-50000 параллелепипедов и гексаэдральных элементов. Модель материалов вносилась в базу данных ANSYS представляя собой таблично заданные параметры характеризующие данный материал (таб. 2). Для хрупких материалов задавались коэффициенты Johnson-Holmquista [2] приведенный в таблица 1.

Таблица 2 – Исходные данные материала

	Aluminum	Titanium	BK8	Steel
Плотность (кг/м <sup>3</sup> )	2770	4620	14870	7850
Модуль Юнга (Па)	7,1 E+10	9,6E+10	5E+11	2E+11
Коэффициент Пуассона	0,33	0,36	0.2	0,3
Модуль объемной упругости (Па)	6,96 E+11	1,14E+11	3,32E+11	1,66E+11
Модуль сдвига (Па)	2,66 E+10	3,5E+10	2,49E+11	7,69E+10

Поиск области существования оптимальных деформации многослойных пластин осуществляли с помощью многочисленных экспериментов с изменением толщины пластин (мм), сравнивая их с поведением одинарных пластин. На рисунках 2, 3 представлены полученные зависимости величины запреградного прогиба от толщины пластины титана и алюминия. Пробитие титановой пластины происходит при толщине 2,5 мм и меньше. Тильный прогиб пластин в промежутке её толщины от 3 до 5 мм считаем опти-

мальным. Пробитие алюминиевой пластины происходит при толщине 7 мм и меньше. Тильный прогиб пластин в промежутке её толщины от 8 до 10 мм считаем оптимальным.

На рисунке 3 представлены зависимости полученные при моделировании деформации многослойных пакетов при разных толщинах. Результаты моделирования показывают что ударная прочность изделий из чистого листового материала меньше чем многослойных пакетов с аналогичными параметра.

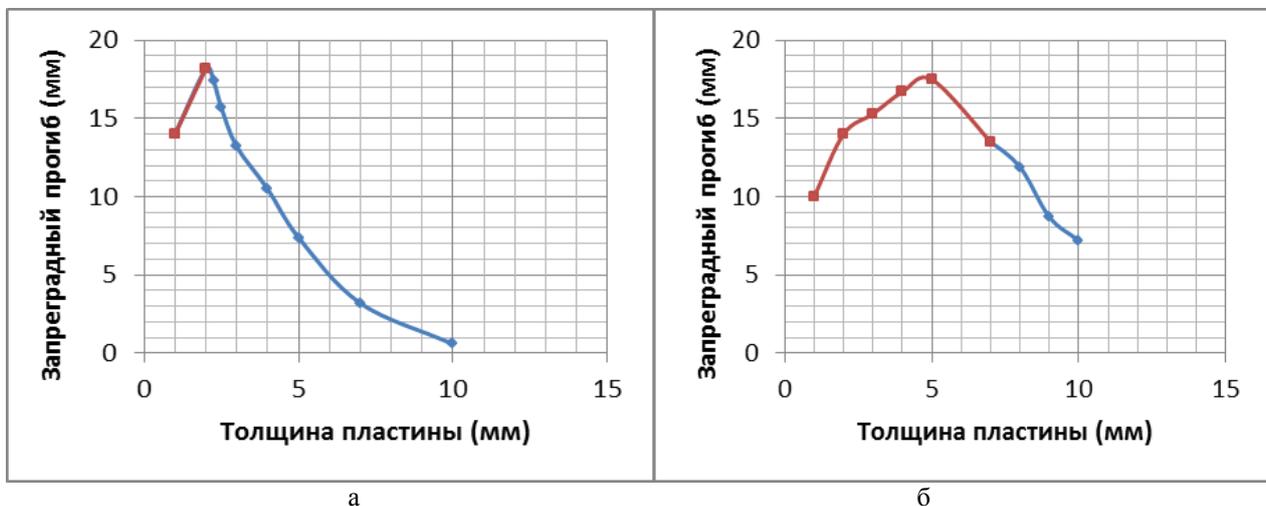


Рис. 2 – Зависимость величины прогиба от толщины пластины: а – титана; б – алюминия

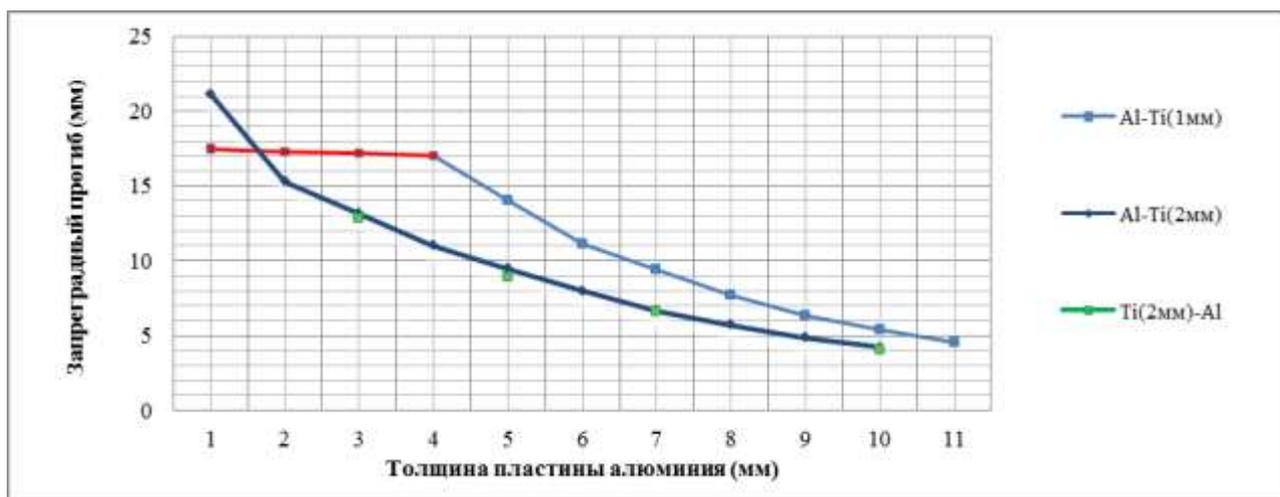


Рис. 3 – Зависимость величин прогиба многослойных пластин

На рисунке 4 представлены 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. На рисунке 5 представ-

лены результат моделирования разрушения многослойных панелей алюминий/керамика/титан. На рисунке 5 а. толщина титана 2мм, керамики 2мм, алюминия 2мм, ударник не пробивает пластину, а слой алюминия сдерживает разрушенную керамику. На

рисунке 5 б. толщина титана 10мм, керамики 2мм, алюминия 2мм, ударник не пробивает пластину, разрушает керамический и алюминиевые слои, ударник деформируется и останавливается.

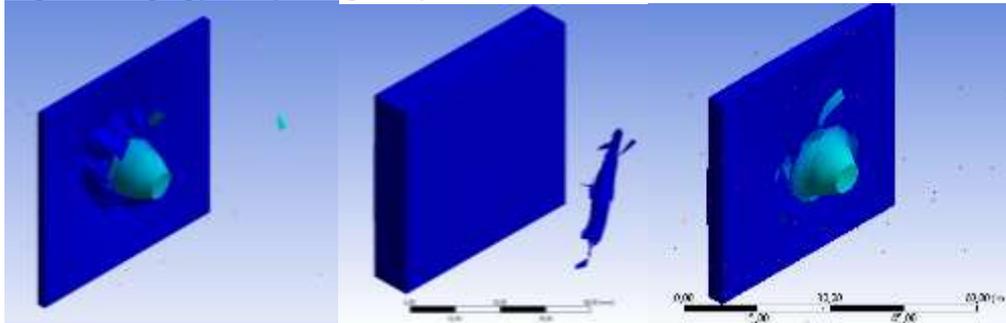


Рис. – 4 Разрушения пластины титана с внешним керамическим слоем

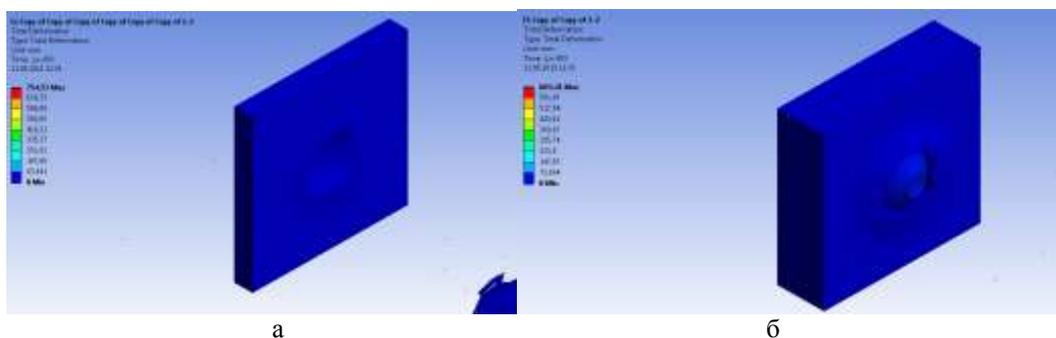


Рис. – 5 Разрушения пластины Al - B<sub>4</sub>C- Ti

**Выводы.** Установлено соотношение толщин лицевых и тыльных пластин в комбинированных многослойных преградах, обеспечивающее снижение проникающей способности ударника. 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 толщин.

Применение керамики значительно увеличивает ударную прочность многослойных пластин. А применение керамики как промежуточного слоя повышает живучесть этих пластин и как следствие деталей машин.

**Список литературы:** 1. Доброворский С.С. Повышение конкурентоспособности отечественного машиностроительного производства в современных условиях // С.С. Доброворский, Е.В. Басова, Л.Г. Добровольская, А.К. Мялица // Сборник научных трудов "Вестник

НТУ "ХПИ" : Технологии в машиностроении. Х.: НТУ «ХПИ», 2014. – Вып.42. – С. 25-31. 2. Johnson G.R., Holmquist T.J. An Improved Computation Constitutive Model for Brittle Material // *High Pressure Science and Technology*. – NY: AIP Press, 1994. 3. Ravid M., Bodner P.R., Chochron I.P. Penetration analysis of ceramic armor with composite material backing // *Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Ballistic P.* – Interlaken, Switzerland, 2001.

**Bibliography (transliterated):** 1. Dobrovorskiy P.P., Basova E.V., Dobrovol'skaja L.G., Mjalica A.K. Povyshenie konkurentosposobnosti otechestvennogo mashinostroitel'nogo proizvo-dstva v sovremennykh usloviyakh. Kharkov: NTU «KhPI», 2014. Print. 2. Dragobetskiy V.V. Sovershenstvovaniye svoystv instrumental'nykh materialov metodami vzyryvnoy obrabotki / Dragobetskiy V.V. Pirogov V.V. Naumova Ye.A. // *Visnik SevNTU. ViP. 107: Mashinoprikladobuduvannya ta transport: zb. nauk. pr.* – Sevastopol: Vid-vo SevNTU, 2010. 3. Petrov E.V. Vozdeystviye na stali potoka tugoplavkikh chastits, Razognannykh energiyey vzyryva: avtoferat ... kandidata tekhnicheskikh nauk: 02.02.11 / Petrov Yevgeniy Vladimirovich. – Chernogolovka, 2011.– 21 p.

Поступила (received) 05.10.2015

**Доброворский Сергей Семенович** – док. техн. наук, проф., НТУ «ХПИ», тел.: (057)-720-66-25, e-mail: [sdobro@mail.ru](mailto:sdobro@mail.ru);

**Dobrovorskiy Serhei Semenovych** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», tel.: (057)-720-66-25, e-mail: [sdobro@mail.ru](mailto:sdobro@mail.ru);

**Гнучих Сергей Сергеевич** – аспирант НТУ «ХПИ» тел.: (057)-720-66-25 e-mail: [gny4ix@mail.ru](mailto:gny4ix@mail.ru);

**Нпучых Сергей Сергеевич** – graduate student, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», tel.: (057)-720-66-25, e-mail: [gny4ix@mail.ru](mailto:gny4ix@mail.ru);

**Добровольская Людмила Георгиевна** – канд. техн. наук, доцент НТУ «ХПИ» тел.: (057)-720-66-25;

**Dobrovol'skaia Liudmyla Heorhyevna** – Candidate of Technical Sciences, Docent, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», tel.: (057)-720-66-25.