

УДК 539.3

*Л.В. АВТОНОМОВА, С.В. БОНДАРЬ, А.В. СТЕПУК, В.Л.ХАВИН***ОСОБЕННОСТИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ТОНКОЙ ПЛАСТИНЫ С ВЫСОКОПРОЧНЫМ ПОКРЫТИЕМ**

Проведено компьютерное моделирование процесса высокоскоростного деформирования тонкой пластины из алюминиевого сплава с корундовым покрытием при ударе пробойником. Рассматривается динамическая контактная вязко-упругопластическая задача при больших деформациях с учетом изменения свойств материала от скоростей деформаций. Анализ полей деформаций и напряжений показал, что наличие высокопрочного тонкого покрытия дает перераспределение поля эквивалентных напряжений и приводит к разрушению нижнего покрытия.

**Ключевые слова:** защитная пластина, покрытие, пробойник, контактная задача, большие деформации, метод конечного элемента.

**Введение.** Разработка и исследование защитных пластин представляет собой актуальную задачу для обороноспособности Украины. На современном этапе в мировой практике при изготовлении различных конструкций таких пластин широко используется как традиционная металлическая броня, так и высокомолекулярный полиэтилен, керамика, которые характеризуются высокой противоударной стойкостью.

Существенным недостатком современных защитных пластин из новых композитных материалов в сравнении с пластинами из стали, титана или алюминия является значительно худший показатель по возможному запреградному действию, которое может быть оценено по величине прогиба пластины при ударе пробойником (пулей) с неполным ее разрушением (нет сквозного проникновения). Также следует отметить высокую стоимость облегченных композиционных защитных пластин на основе керамики и броневых высокомолекулярного полиэтилена.

Использование для защитных пластин алюминиевых сплавов с высокопрочными покрытиями, когда вес броневой защиты не является критическим параметром, позволяет существенно снизить их стоимость.

Изучение высокоскоростного деформирования пробойником тонких пластин из алюминиевого сплава с высокопрочным покрытием с учетом протекающих физических явлений возможно на основе численного моделирования и дальнейшего анализа напряженно-деформированного состояния. С этой целью необходимо решать динамическую контактную вязкопластическую краевую задачу, эффективное численное решение которой можно получить методом конечного элемента [1,2].

**Анализ последних исследований и литературы.** В последние годы появилось много работ, посвященных исследованиям различных защитных пластин. В частности, можно выделить следующие направления исследований:

- анализ ударного воздействия на композиты и керамику с привлечением диссипативных энергетических моделей [3];
- создание эмпирико-экспериментальных моделей с приближенной оценкой разрушающих параметров [4];
- математическое моделирование с целью опре-

деления оптимальной геометрии и баллистических коэффициентов различных видов пробойников по различным стандартам;

- экспериментальные исследования разрушения композитных защитных пластин при ударных воздействиях [5];

- расчеты баллистических пределов и результатов сравнительных испытаний для малых проникающих объектов [6];

- создание приближенных аналитических методов и моделей для исследования проникновения в слоистые структуры [7];

- численное решение различных вязкоупругих контактных задач при ударном воздействии, методом конечного элемента для исследования прочностных характеристик различных керамических покрытий [8];

- анализ прочности защитных пластин из алюминиевых сплавов при ударном воздействии [9].

Численное моделирование процесса высокоскоростного деформирования тонких пластин пробойником с учетом связанности физических полей в последние годы стало возможным после появления специализированных конечно-элементных программных комплексов ANSYS, ABAQUS / Explicit, Deform 3D. Многие публикации посвящены изучению волновых эффектов, зарождения и распространения микроповреждений и макроповреждений, нагрева, процессов появления вторичной пластичности и релаксации напряжений при ударном воздействии. Выбору прочностных характеристик материала, влиянию геометрии, формы и скорости пробойника на характер распространения больших пластических деформаций при высокоскоростном деформировании тонких пластин посвящены работы [10,11].

Однако, корректное решение в полной мере трехмерной краевой динамической контактной задачи с учетом всех физических явлений и конструктивных особенностей неоднородных пластин с помощью современных вычислительных программных комплексов без допущений не представляется возможным.

**Целью** данной статьи является численное моделирование процесса высокоскоростного деформирования тонкой пластины при ударном воздействии на нее пробойником и исследование влияния высокопрочного покрытия на ее напряженно-деформированное состояние.

### Постановка задачи и численная реализация.

При моделировании процесса высокоскоростного деформирования тонкой пластины с высокопрочным покрытием при ударном воздействии стальным пробойником с полусферической формой рабочей части необходимо решать динамическую вязкопластическую контактную задачу с соответствующими граничными и начальными условиями [12].

Полная система уравнений, которая описывает поведение защитной пластины с покрытием, в общем случае включает в себя: уравнения неразрывности, движения и энергии; уравнение Прандтля–Рейса, которое описывает упругопластическое состояние материала; физические соотношения, записанные в терминах скоростей деформаций; уравнение учета влияния скорости деформирования, по модели Купера–Симонда; уравнение для накопления повреждений и предельной деформации, оценка наступления вязкопластического разрушения по модели Джонсона–Кука; уравнение Грюнайзена учитывающее изменение гидростатического давления для сжимаемых материалов, условия хрупкого разрушения для корунда по гипотезе Мора.

Решение методом конечного элемента (МКЭ) на основе независимого подхода Лагранжа–Эйлера нестационарной краевой контактной вязко-упругопластической задачи с учетом больших деформаций позволяет определить распределение полей напряжений и деформаций на всем временном промежутке деформирования пластины при ударе пробойником. Суть подхода Лагранжа–Эйлера состоит в том, что с целью оптимизации вычислительного процесса (сокращение вычислительного времени) движение сетки задается независимо и определяется процессом деформирования материала. Расчет напряженно-деформированного состояния защитной пластины при ударном воздействии был выполнен при помощи специализированного программного комплекса ANSYS.

В работе рассматривается задача влияния двустороннего высокопрочного корундового покрытия на поведение прямоугольной защитной пластины (30x30x6 мм), изготовленной из двух слоев алюминиевого сплава, каждый 3мм толщины, при ударном нагружении. Расчетная схема представлена на рис. 1.

Пластина взаимодействует с цилиндрическим ударником с рабочей частью полусферической формы из стали марки Ст3. Начальная скорость нормального удара составляет 400м/с. Толщина нижнего и верхнего слоя высокопрочного корундового покрытия – 300 мкм. Конечно-элементная модель защитной пластины состоит из 8837 элементов. Модель материала представляется собой таблично заданное семейство кривых деформирования полученных экспериментально в широком диапазоне скоростей деформаций.

При конечно-элементном моделировании использовались следующие допущения: нормальные напряжения на свободных поверхностях пробойника и пластины равны нулю, на контактных поверхностях между пластинами выполняются условия скольжения с трением (коэффициент трения 0,1).

**Обсуждение результатов.** При решении поставленной задачи были получены параметры напряженно-деформированного состояния в прямоугольной защитной пластине алюминиевого сплава с двусторонним высокопрочным корундовым покрытием. На рисунке 2 представлено распределение перемещений в конце ударного процесса.

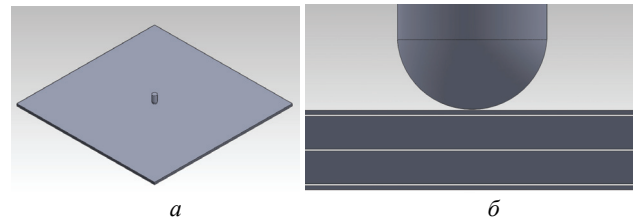


Рисунок 1 – Расчетная схема пластины при ударном воздействии: а – общий вид; б – структура защитной двухслойной пластины с покрытиями

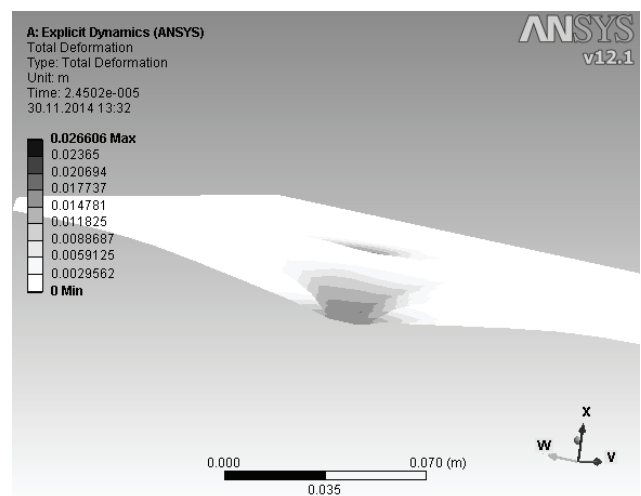


Рисунок 2 – Распределение перемещений защитной пластины при ударном воздействии

В четырехслойной композиции материалов (корунд – двухслойный алюминиевый сплав – корунд) защитной пластины слой из корунда имеет разные значения пределов прочности на растяжение и сжатие.

Распространение напряжений сжатия – растяжения (разгрузки) в процессе деформирования для многослойной конструкции происходит неоднородно, и характер разрушения определяется направлением движения пробойника и его скоростью. В результате удара по периметру пробойника происходит разрушение наружного корундового покрытия и возникают интенсивные сдвиговые перемещения между основными несущими алюминиевыми слоями пластины.

Поле напряжений, распространяющиеся от поверхностей пробойника и пластины, вызывает зоны растяжения по толщине пластин, что приводит к глубокому пластическому деформированию материала слоев пластины и разрушению (отслоению) нижнего покрытия на площади, значительно превышающей размер зоны контакта ударника с пластиной.

При высокоскоростном ударном воздействии на защитную пластину верхнее высокопрочное корундовое покрытие тормозит развитие поверхностных тре-

щин в несущей пластине, в то время как отслоение и разрушение нижнего покрытия предотвращает распространение разрушения непосредственно по толщине многослойной пластины. Одновременно происходит уменьшение значений нормальных напряжений в направлении удара и соответствующее снижение его разрушающего действия.

**Выводы.** Результаты выполненного численного анализа позволяют лучше понять механизмы разрушения защитных многослойных пластин с покрытиями при проникновении в них высокоскоростного пробойника. Исследование показало, что помимо кинетической энергии пробойника, на разрушение и отслоение высокопрочного корундового покрытия оказывает влияние и характер развития процесса разрушения, в свою очередь зависящего от неоднородной структуры многослойной пластины.

Представленные результаты могут быть использованы для дальнейшего изучения многокомпонентных защитных конструкций, подвергающихся воздействию высокоскоростных ударных нагрузок.

**Список литературы:** 1. *Matti Loikkanen* Simulation of Ballistic Impact on Composite Panels / *Loikkanen Matti* // 1-th Int LS-DYNA Users Conf. – 2008. 2. *Sai Kiran Chelluru* Finite Element Simulations of Ballistic Impact on Metal and Composite Plates / *Sai Kiran Chelluru* // Andhra Uni. – 2004. 3. *Serge Abrate*. Ballistic Impact on Composites / *Serge Abrate* // Southern Illinois University. – Carbondale. – IL 62901-6603. – USA. – 16th Int. Conf. on Composite Materials. – July 2007. – Kyoto. – Japan. 4. *Pedro Cortes* The Dynamic Properties of Sandwich Structures based on Metal-Ceramic Foams / *Pedro Cortes* // Youngstown State Uni. – CTME Newsletter. – 2012. – Vol. 5, iss. 2. 5. *Hazell P. J.* Impact, penetration and perforation of a bonded CFRP composite panel by a high velocity steel sphere: an experimental study / *P.J. Hazell, G.J. Appleby-Thomas, G. Kister* // Cranfield Defence and Security, Cranfield University. – Journal of Strain Analysis for Engineering Design. – 2010. – Vol. 45 (6). – P. 439-450. 6. *Ferriter E.A.* Techniques Used to Estimate Limit Velocity in Ballistic Testing with Small Sample Sizes / *E.A. Ferriter Ian McCulloh, William deRosett* // 1998. 7. *Patel B.P.* Penetration of Projectiles in Composite Laminates / *B.P. Patel, S.K. Bholra, M. Ganapathi, D.P. Makhecha* // Institute of Armament Technology. – Pune-411 025. – Defence Science Journal. – Vol. 54, No. 2. – April 2004. – P. 151-159. 8. *Śliwa A.* Finite Element Method application for modeling of PVD coatings properties / *A. Śliwa, L.A. Dobrzański, W. Kwaśny, W. Sitek* // Institute of Engineering Materials and Biomaterials.

– Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – Vol. 27, iss. 2. – April 2008. 9. *Sudhakara I.* Enhancement of wear and ballistic resistance of armour grade AA7075 aluminium alloy using friction stir processing / *I. Sudhakara, V. Madhub et al* // Defence Technology. – November 2014. 10. *Kosciuczenko K.* Numerical Analysis of Ceramic / *K. Kosciuczenko, T. Niezgoda, W. Barnat, R. Panowicz* // Steel – Composite Shield Subjected to Ballistic Impact of the Fragment. – Journal of KONES Powertrain and Transport. – Vol. 18, No 1. – 2011. 11. *Sujith N. S.* Impact Analysis of Bullet on Different Bullet Proof Materials / *N. S. Sujith, K. Y. Chethan, M. D. Sandeep, M. S. Sanjay, Shaik Khader Basha, D. S. Sowmyashree* // International Journal of Mechanical and Industrial Technology April. – September 2015. – Vol. 3, iss. 1. – P. 303-310. 12. *Assie A.E.* Modeling of viscoelastic contact-impact problems / *A.E. Assie, M.A. Eltaher, F.F. Mahmoud* // Applied Mathematical Modelling. – Vol. 34, iss. 9. – September 2010. – P. 2336-2352.

**Bibliography (transliterated):** 1. *Loikkanen Matti* Simulation of Ballistic Impact on Composite Panels. 1-th Int LS-DYNA Users Conf. (2008). Print. 2. *Chelluru Sai Kiran* Finite Element Simulations of Ballistic Impact on Metal and Composite Plates. Andhra Uni. (2004). Print. 3. *Abrate Serge* Ballistic Impact on Composites. Southern Illinois University, Carbondale, IL 62901-6603, USA, 16th Int. Conf. on Composite Materials, (July 2007), Kyoto, Japan. Print. 4. *Cortes Pedro* The Dynamic Properties of Sandwich Structures based on Metal-Ceramic Foams. Youngstown State Uni, CTME Newsletter. Vol. 5, iss. 2 (2012). Print. 5. *Hazell P.J., Appleby-Thomas G.J., Kister G.* Impact, Penetration and Perforation of a Bonded CFRP Composite Panel by a High Velocity Steel Sphere: an Experimental Study. Cranfield Defence and Security, Cranfield University, Journal of Strain Analysis for Engineering Design. Vol. 45 (6). (2010): 439-450. Print. 6. *E. A. Ferriter, Ian McCulloh and William de Rosett* Techniques Used to Estimate Limit Velocity in Ballistic Testing with Small Sample Sizes. (1998). Print. 7. *B.P. Patel, S.K. et al.* Penetration of Projectiles in Composite Laminates. Institute of Armament Technology, Pune-411 025, Defence Science Journal. Vol. 54, No. 2 (April 2004): 151-159. Print. 8. *Śliwa A. et al.* Finite Element Method Application for Modeling of PVD Coatings Properties. Institute of Engineering Materials and Biomaterials, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Vol 27, iss. 2 (April 2008). Print. 9. *Sudhakara I et al.* «Enhancement of Wear and Ballistic Resistance of Armour Grade AA7075 Aluminium Alloy Using Friction Stir Processing». Defence Technology November 2014. Print. 10. *Kosciuczenko K. et al.* Numerical Analysis of Ceramic – Steel – Composite Shield Subjected to Ballistic Impact of the Fragment. Journal of KONES Powertrain and Transport. Vol. 18, No 1 (2011). Print. 11. *Sujith N S. et al.* «Impact Analysis of Bullet on Different Bullet Proof Materials». International Journal of Mechanical and Industrial Technology, April 2015, Vol. 3, iss. 1: 303-310. Print. 12. *Assie A.E., Eltaher M.A. and Mahmoud F.F.* Modeling of Viscoelastic Contact-Impact Problems. Applied Mathematical Modelling. Vol. 34, iss. 9. September 2010: 2336-2352. Print.

Поступила (received) 15.12.2015

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Автономова Людмила Владимировна** – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник кафедры Соппротивление материалов, НТУ «ХПИ», тел.: (057)-70-761-78, e-mail: lavtonomova@gmail.com

**Avtonomova Lyudmila Vladimirovna** – Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher, Department of Strength of Materials, NTU «KhPI», tel.: (057)-70-761-78, e-mail: lavtonomova@gmail.com

**Бондарь Сергей Владимирович** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры Соппротивление материалов, НТУ «ХПИ», тел.: (057)-70-761-78, e-mail: serg\_xpi@mail.ru

**Bondar' Sergej Vladimirovich** – Candidate of Technical Sciences, Senior Research Officer, Department of Strength of Materials, NTU «KhPI», tel.: (057)-70-761-78, e-mail: serg\_xpi@mail.ru

**Стенук Александр Владимирович** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник кафедры Соппротивление материалов, НТУ «ХПИ», тел.: (057)-70-761-78, e-mail: abtop@yahoo.com

**Stepuk Aleksandr Vladimirovich** – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Research Officer, Department of Strength of Materials, NTU «KhPI», tel.: (057)-70-761-78, e-mail: abtop@yahoo.com

**Хавин Валерий Львович** – кандидат технических наук, заведующий кафедрой Соппротивление материалов, НТУ «ХПИ», тел.: (057)-70-761-78, e-mail: Vkhavin@kpi.kharkov.ua

**Khavin Valerij L'vovich** – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Strength of Materials, NTU «KhPI», tel.: (057)-70-761-78, e-mail: Vkhavin@kpi.kharkov.ua