

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УДАРНИКА И СТАЛЬНОЙ ПЛАСТИНЫ

<sup>1</sup> Пилипчук А.П., <sup>1</sup> Мишин А.А., <sup>1</sup> Исак В.Г.

<sup>1</sup> Военная академия Республики Беларусь, Минск

### Введение

Основной задачей при проектировании средств защиты личного состава и техники Вооруженных Сил является минимизация их массы при заданном стандартами уровне запреградного воздействия [1,2], а также при ограничениях на площадь защиты. Современные средства защиты высокого класса, как правило, представляют собой двухслойную структуру, состоящей из пробиваемой металлической пластины (бронепанель) и многослойного пакета баллистических тканей за ней [3]. Бронепанель должна поглотить максимум кинетической энергии пули при ударе, чтобы снизить запреградную энергию, передаваемую защищаемому объекту. Проверка качества средств индивидуальной защиты не находящегося в контакте с защищаемым объектом проводится с определением баллистического предела. В случае контакта с защищаемым объектом (тело человека), сравнение бронежилетов различных классов осуществляется по критерию тупой травмы (рис. 1) [4].



*1 - многослойная тканевая преграда (бронежилет);  
2 - регистрирующая среда; W - фактический прогиб.  
Рис. 1. Сертификационные испытания бронежилетов*

При разработке средств защиты актуальной задачей является определение толщин металлической пластины и пакета арамидных тканей. Для РБ данная задача имеет значение в связи с разработкой стрелкового оружия и наличием производства средств индивидуальной бронезащиты [5,6]. Решение сформулированной задачи возможно в результате применения экспериментальных, аналитических и численных методов. Результаты экспериментальных исследований удара имеют определяющее значение для принятия решения о соответствии брони требованиям заказчика. Однако результаты испытаний зависят от большого количества параметров: скорости и формы ударника, относительной твердости и массы соударяющихся тел, граничных условий, характеристик материалов и т.д. Вследствие этого разработка средств защиты требует большого количества трудоемких экспериментов [1]. В настоящее время не существует аналитических моделей, учитывающих все параметры процесса ударного

взаимодействия и, очевидно, их получение невозможно из-за сложности явлений, происходящих при ударном взаимодействии пули как с металлической пластиной, так и с тканевым пакетом. В связи с чем возрастает роль методов численного исследования, применение которых позволяет значительно сократить объем экспериментов. Численные методы позволяют проводить анализ процесса ударного взаимодействия при минимуме допущений.

По мнению авторов, для выполнения расчетной оценки эффективности средств защиты, имеющих двухслойную структуру, целесообразно использовать подход, сформулированный в работе [7]. Данный подход предполагает последовательное выполнение двух этапов: сначала расчет пробоя металлической пластины, а затем расчет взаимодействия индентора с формой носка, массой и начальной скоростью, полученными по результатам первого этапа расчета, и тканевого пакета, лежащего на пластилиновом блоке. Такое разделение оправдано, поскольку в реальных конструкциях бронежилетов не обеспечивается постоянный поджим стальной пластины к тканевому пакету.

В настоящее время существует ряд программных пакетов, предназначенных для решения задач механики деформируемого твердого тела методом конечных элементов. Анализ работ, посвященных исследованию процесса пробивания показал, что одним из наиболее часто используемых пакетов для решения задач пробоя является LS-DYNA [1, 4,7-9]. Это вызвано возможностью решения геометрически нелинейных задач с большими деформациями и разрушением, использованием явного алгоритма интегрирования по времени. LS-DYNA - многоцелевая программа, использующая явную формулировку метода конечных элементов (*explicit finite element method*) - предназначена для анализа нелинейного динамического отклика трехмерных неупругих структур. Первая версия программы LS-DYNA была выпущена в 1976 г. LS-DYNA была и до сих пор является частью оборонной программы США. Программа была первой в своей области и послужила основой для всех современных пакетов высоконелинейного анализа, оставаясь на лидирующих позициях до сегодняшнего дня. Математический аппарат включает порядка 30 алгоритмов контактного взаимодействия, около 150 уравнений состояния (в зависимости от версии). Данные аналитические инструменты позволяют моделировать широкий круг задач на этапе проектирования технических средств. Сюда можно отнести задачи анализа динамической прочности автомобильных комплектующих, сопротивляемости элементов конструкции транспортных средств (*crash-test, drop-test,*) процессов металлообработки (штамповка, волочение, сверхпластическое формование, резка), воздействия взрывной нагрузки на изделия и пробивания преград. С 1996 г. решатель LS-DYNA встроен в пакет программ ANSYS, где используется для решения задач динамического анализа. Такая реализация решателя LS-DYNA в составе ANSYS существенно расширила применимость программы на небольших фирмах и повысила ее доступность [10-12].

#### **Экспериментальные исследования**

Для проведения эксперимента на основе анализа испытательных устройств [13], была выбрана схема маятникового копра. Скорость движения маятника в момент прохождения нижней точки определяется аналитическим методом по формуле [14]:

$$V = \sqrt{2gl(1 - \cos \varphi)}$$

где  $V$  — скорость движения маятника, м/с;

$g$  — ускорение силы тяжести при свободном падении, м/с<sup>2</sup>;

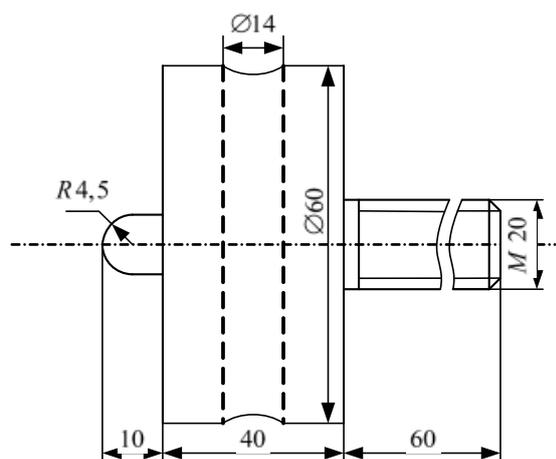
$l$  — расстояние от оси качания до оси ударника, м;

$\varphi$  — угол зарядки маятника, град.

Основанием для сборки всех составных частей копра является корпус, который по своей массе обеспечивает проведение испытаний. На опорных поверхностях

специальными винтами крепят опоры для установки образца для испытания. При данных габаритах установки ( $l=1,4$  м) скорость движения маятника при прохождении нижней точки составила  $\approx 5,5$  м/с.

Основная деталь данного устройства – ударник, изготовленный из стали ШХ 15 и закаленный до твердости 40 – 45 HRC (рис. 2). Особенностью данной конструкции является наличие резьбового хвостовика, предназначенного для установки и фиксации дополнительных грузов. Данная опция позволяет при неизменной скорости получать различные значения энергии. В работе моделировался удар пули пистолета ПМ с дульной энергией 330 Дж на разных дистанциях, что достигалось установкой грузов от 15 до 20 кг.



а  
б  
Рис. 2. Экспериментальная установка маятникового типа  
а - эскиз ударника, б – внешний вид установки

### Моделирование процесса взаимодействия ударника и пластины

В работе представлены результаты компьютерного моделирования процесса взаимодействия ударника и стальной пластины. Моделирование выполнено в программном продукте ANSYS/LS-DYNA. Подготовка модели и постпроцессорная обработка и представление результатов выполнены с использованием свободно распространяемого программного продукта LS-PrePost. Конечно-элементная модель процесса представлена на рис. 3. Результаты моделирования представлены на рис. 4.

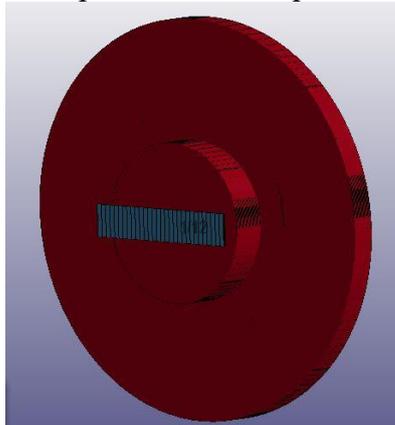


Рис.3. Конечно-элементная модель процесса

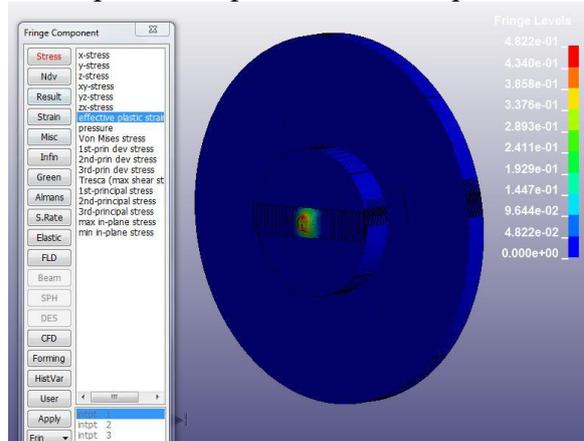


Рис.4. Результаты моделирования

Данная конечно-элементная модель включает в себя стальную пластину размерами 100x30 мм и толщиной от 1 до 3 мм и ударник с учетом дополнительных грузов. При моделировании процесса использовался элемент типа твёрдое тело, который в LS-DYNA определяется картой ELEMENT\_SOLID. Для задания свойств материалов и характеристик процесса была выбрана система единиц - СИ. Модель материала Bilinear Kinematic применялась для стальной пластины (в LS-DYNA это карта MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC), выполненные из стали 20 со следующими свойствами: плотность – 7800 кг/м<sup>3</sup>; модуль упругости – 2,0 10<sup>5</sup> МПа; коэффициент Пуассона – 0,3; предел текучести – 250 МПа. Модель материала ударника - абсолютно твердое тело Rigid Material (карта MAT\_RIGID). Свойства материала ударника соответствуют стали ШХ15: плотность - 7800 кг/м<sup>3</sup>; модуль упругости – 1,95 10<sup>5</sup> МПа; коэффициент Пуассона – 0,3 с пределом текучести 1200 МПа. Начальная скорость ударника *V* моделируется \*INITIAL\_VELOCITY\_GENERATION, а взаимодействие между пулей и мишенью моделируется \*CONTACT\_SURFACE TO SURFACE [10].

Выполнен анализ напряженно-деформированного состояния пластины в результате взаимодействия. Измерение действительных деформаций выполнялось при помощи штангенциркуля, для определения расчетных значений деформации использовалась функция Fcomp – Fringe Component – Ndv – z-displacement препроцессора LS-PrePost (рис. 6). Расчетные картины деформации образцов близки к экспериментальным.

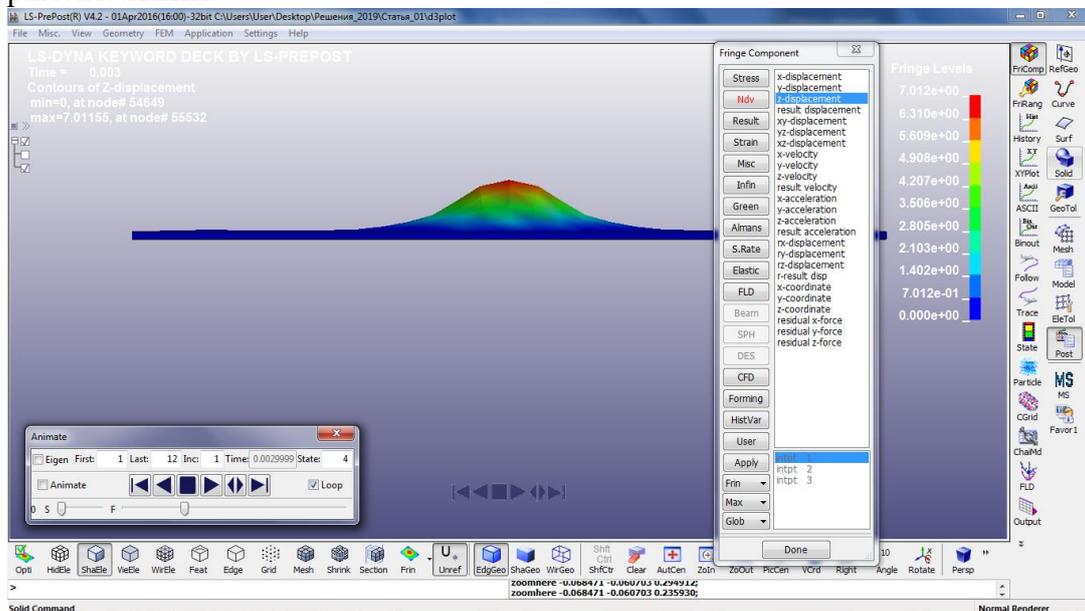


Рис. 5. Деформация пластины

На рис. 6, 7 представлены распределение деформаций по оси удара (слева) в сопоставлении с результатом эксперимента (справа) для двух вариантов сетки. Как и ожидалось, увеличение числа элементов сетки повышает адекватность модели. Для рассмотренных в работе пластин можно рекомендовать использовать конечно-элементные модели с числом элементов не менее 9000.

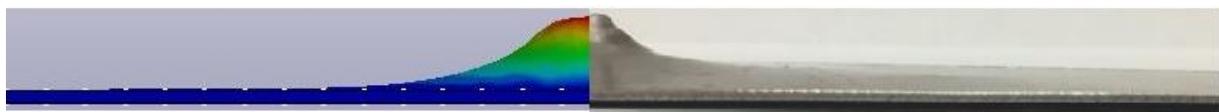


Рис. 6. Расчетная деформация пластины и экспериментальная (9375 элементов)

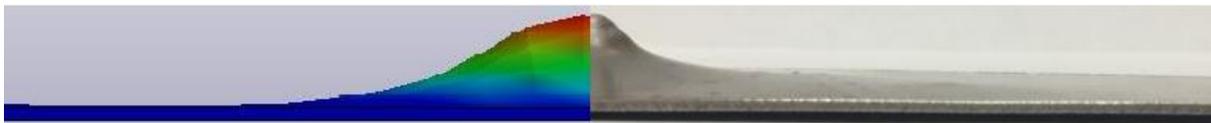


Рис. 7. Расчетная деформация пластины и экспериментальная (900 элементов)

### Выводы

Выполнено экспериментальное и численное исследование процесса взаимодействия ударника и стальной пластины с использованием разработанной экспериментальной установки маятникового типа и программного комплекса LS-DYNA. Представлены результаты экспериментальных исследований и численного моделирования.

Установлено, что экспериментальные и расчетные данные хорошо согласуются между собой. Предложено использовать при моделировании процесса взаимодействия ударника и стальной пластины конечно-элементные модели с числом элементов не менее 9000.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Бхатнагара, А. Мир материалов и технологий. Легкие баллистические материалы / А. Бхатнагара. — Москва: Техносфера, 2011. — 18 с.
2. Защита броневая автомобилей. Общие технические требования (с Изменениями N 1,2,3,4): ГОСТ Р 50963-96. — Введ. 01.09.13. — Москва: Акционерное общество Научно-исследовательский институт стали: Госстандарт России, 1996. — 33 с.
3. Материалы и защитные структуры для локального и индивидуального бронирования / В.А. Григорян, И.Ф. Кобылкин, В.М. Маринин, Е.Н. Чистяков. Под ред В.А. Григоряна. - М.: Изд. РадиоСофт, 2008. - 406 с.: ил 123 ISBN 978-5-93274-013-2
4. Моделирование ударных процессов в тканевых бронежилетах и теле человека на вычислительном кластере «СКИФ Урал» / Н.Ю. Долганина, С.Б. Сапожников, А.А. Маричева – Вычислительные методы и программирование 2010 Т. 11 Вып. 1 С. 117-126
5. Пистолет белорусской разработки представлен на MILEX-2017 // БЕЛТА [Электронный ресурс]. 2018. — Режим доступа: <https://www.belta.by/society/view/pistolet-belorussoj-razrabotki-predstavlen-na-milex-2017-248445-2017/>. — Дата доступа: 21.12.2018.
6. Научно-производственный центр "ТЕХНОМАГ" ФТИ НАН Беларуси // Военно-промышленный комплекс [Электронный ресурс]. 2018. — Режим доступа: [http://www.vpk.gov.by/catalog/defense\\_sector/](http://www.vpk.gov.by/catalog/defense_sector/). — Дата доступа: 21.12.2018.
7. Форенталь, М.В. Динамика локального деформирования и разрушения металлической пластины / М.В. Форенталь // Вестник ЮУрГУ, № 33, 2009 С.4-11
8. Муйземнек, А. Ю. Математическое моделирование процессов удара и взрыва в программе LS-DYNA : учебное пособие / А. Ю. Муйземнек, А. А. Богач. - Пенза : Информационно- издательский центр ПГУ, 2005. - 106 с.
9. Шаш, Н.Численное моделирование проникания пуль стрелкового оружия в пластины из алюминиевых сплавов с использованием модифицированной модели Джонсона-Кука / Н. Шаш, В.Н. Зузов // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон, журн. 2017. № 01. С. 1-19. DOI: 10.7463/0117.0000922
10. Илюшкин, М.В. Моделирование процессов обработки металлов давлением в программе LS-DYNA. Теория и семинары. Материалы для подготовки курса лекций для повышения квалификации специалистов по моделированию процессов ОМД / М.В. Илюшкин. – Ульяновск, 2017 г -125 с.

11. *Лекции по ANSYS/LS-DYNA и основам LS-PREPOST с примерами решения задач [Электронный ресурс]: курс лекций для студ. мех.-мат. фак. обучающихся по специальное и 1-31 03 02 «Механика (по направлениям)». В 3 ч. Ч. 1. ANSYS/LS-DYNA. Общая характеристика интерфейса и средств создания твердотельной модели детали. Использование моделей материалов и типов конечных элементов LS- DYNA / А. С. Кравчук, А. И. Кравчук. - Электрон, текстовые дан. - Минск : БГУ, 2013. - 161 с. : ил. - Библиогр.: с. 158-159. - Загл. с тит. экрана. - № 001918062013. Деу. в БГУ 18.06.2013.*
12. *ANSYS LS-DYNA // CADFEM [Электронный ресурс]. 2018. – Режим доступа: <http://www.cadfer-cis.ni/products/ansys/simulation/structural/explicit-dynamics/ls-dyna/>. – Дата доступа: 21.12.2018.*
13. *Динамика удара: Пер. с англ./ Дж. А. Зукас [и др]. – М.: Мир, 1985.-296 с.*
14. *Копер маятниковый 2083 КМ-0,4 Паспорт Г62. 774. 030 ПС – М.: Точприбор, 1985.— 36 с.*