

УДК 621.001.5; 621.001.57

А.Л. Галиновский, канд. техн. наук, проф., В.И. Колпаков, канд. техн. наук, доц.,
С.Г. Муляр, асп., Р.Р. Сайфутдинов, асп.,
Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана, Россия
ЗАО НПП "КЛАСС", г. Москва, Россия
Тел. +7(916)8491907; E-mail: m_sergey@inbox.ru

МЕТОДИКА РАСЧЁТА ПУЛЕСТОЙКОСТИ СРЕДСТВ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ БРОНЕЗАЩИТЫ

В работе приведены основные этапы методики расчёта пулестойкости средств индивидуальной защиты. Показаны результаты исследования пулестойкости бронезащиты класса ба на основе применения конечно-элементных моделей в среде Ansys AutoDYN. В ходе расчётов были применены модели, предложенные авторами с целью упрощения верификации результатов расчётов на основе экспериментальных данных. Также в работе рассмотрено применение методики диагностики качества бронематериалов на основе применения метода ультразвуковой диагностики.

Ключевые слова: пулестойкость, бронекерамика, AutoDYN, диагностика, бронези-лет.

Введение

В настоящее время в нашей стране и за рубежом производится большая номенклатура средств индивидуальной бронезащиты (в дальнейшем - СИБ) различного конструкторско-технологического и эргономического исполнения, ориентированного на самый широкий спектр областей возможного применения [1]. В данной работе рассматривается методика анализа пулестойкости средств бронезащиты класса ба, (ГОСТ Р 50744-95, бронебойно-зажигательная пуля Б-32, скорость взаимодействия 800-830 м/с).

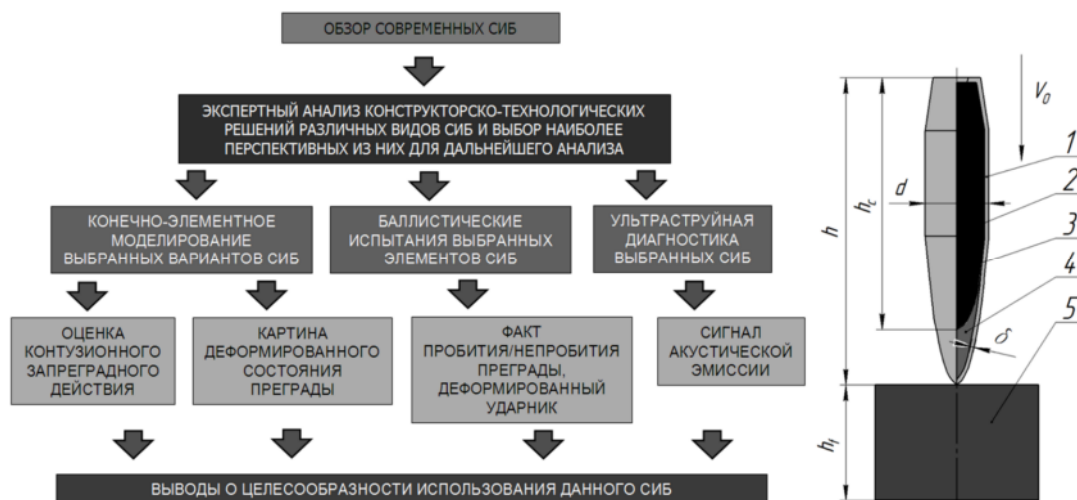


Рис. 1. Справа: методический план выполнения работы, слева - схема ударного взаимодействия пули с преградой

Обозначения: 1 – латунная оболочка пули; 2 – сердечник из стали У12; 3 – свинцовая оболочка сердечника; 4 – зажигательный состав; 5 – преграда.

Методический план работы и схема ударного взаимодействия, рассматриваемая в ходе математического моделирования показана на рис. 1.

На первом этапе производится обзор существующих на текущий момент разработок в области СИБ класса ба, делаются необходимые выводы.

На втором этапе производится анализ ряда конструктивных исполнений СИБ с привлечением экспертной комиссии состоящей из 5-10 человек, производится оценка согласованности их мнений и строится график оценок. Для дальнейшего исследования выбираются варианты, получившие наибольшие оценки экспертов.

На третьем этапе производится математическое моделирование взаимодействия ударника с преградой, по которому можно судить о деформации ударника и преграды в ходе взаимодействия. Параллельно с этим проводится эксперимент, в ходе которого отстреливаются выбранные варианты бронезащитных элементов. На третьем этапе проводится ультразвуковая диагностика выбранных СИБ, в ходе которой оценивается качество структуры выбранных элементов защиты. Также оценивается контузионное действие от пули Б-32 при использовании данного элемента бронезащиты.

В конце работы делается вывод о возможности использования данного типа бронезащиты исходя из комплекса исследованных параметров.

Применение метода экспертных оценок

Метод экспертных оценок (МЭО), проводимый в работе, основан на оценке каждого из вариантов конструктивного исполнения СИБ и оценивается по критериям:

КФ – функциональный критерий, связанный с эксплуатационными характеристиками СИБ;

КТ – критерий технологической реализации;

КН – критерий надёжности;

КД – критерий дополнительных параметров СИБ, например возможности модернизации;

КП – прямые затраты на выпуск данного варианта СИБ;

КО – затраты на освоение выпуска;

КЭ – затраты на эксплуатацию.

МЭО состоит из трёх основных пунктов:

1) Расчёт минимального количества экспертов исходя из разброса значений оценок по каждому из критериев. В работе получено значение, равное 7.

2) Оценка согласованности экспертов с использованием коэффициента согласованности. Значение этого коэффициента при хорошей согласованности экспертов должно быть более 0,7. В данной работе получено значение, равное 0,75 [2].

3) Построение столбчатой диаграммы, по которой выбираются варианты СИБ для проведения дальнейшего анализа.

Конструкции преград, используемые в работе по результатам МЭО - слоистые металло-керамические структуры, в частности - с подложкой из кевлара.

Математическая модель задачи

В общем случае, материалы имеют довольно сложный отклик на динамическое воздействие, и, в следствии этого, возникает необходимость задания параметров, для моделирования таких физических явлений, как фазовые переходы, вязкое разрушение, термо-, деформационное и другие виды упрочнения. Для моделирования такого разнообразия физических процессов, происходящих в материале в ходе динамического воз-

действия, вводится разбиение общей модели материала на три основных группы параметров [3]:

1. Уравнение состояния - основное уравнение, описывающее поведение модели при воздействии динамической нагрузки. Оно является ключевым для описания моделей газов и жидкостей, в которых могут не учитываться сдвиговые деформации.

Для твёрдых тел материалы (модель ударника и преграды рассмотрены в данной работе), претерпевающих в ходе высокоскоростного взаимодействия большие деформации и напряжения, значительно превышающие предел текучести данного материала, уравнение состояния также является важным параметром.

В общем виде уравнение состояния описывает зависимость напряжений от деформации и внутренней энергии (температуры). Уравнение состояния может быть задано исходя из данных о термодинамических свойствах материала. В подавляющем большинстве случаев уравнение состояния для расчёта формируется на основании экспериментальных данных и представляет собой линейную аппроксимацию реального уравнения состояния на основе тщательно проведённых экспериментов и представляет собой многочлен с некоторым количеством эмпирических констант.

2. Модель прочности - описывает поведение материала в зависимости от уровня напряжений, которые в большинстве случаев превышают предел текучести для данного материала, однако могут находиться и в пределах упругости. Модель прочности выбирается в зависимости от рассматриваемого материала (жидкий, хрупкий, вязкий и т.д.).

3. Модель разрушения - описывает поведения материала в момент разрушения в зоне, где превышен параметр, задаваемый в модели разрушения. Само разрушение может быть как хрупким, выражающимся в растрескивании (в случае керамики, например), так и вязким, сопровождающимся разрывом материала (в случае металлов).

В базе данных программы Ansys AutoDYN существует большое количество различных материалов для применения в широком спектре расчётов. Однако, ввиду большого количества эмпирических констант, которые описывают поведение этих материалов при высокоскоростном взаимодействии, авторами были предложены упрощённые модели, на основании которых были проведены исследовательские расчёты. Упрощение вводилось с целью более удобной верификации моделей вновь вводимых материалов, таких, как, например, оксидная керамика с упрочняющим мелкодисперсным включением в её структуру. Модели позволяют быстро отредактировать прочностные свойства керамики, обеспечивая при этом приемлемый уровень точности расчётов. В ходе исследований были предложены модели таких материалов, как керамика, углеродистая сталь 12У, медь, свинец.

Модели были апробированы как в лагранжевой сетке (сетка движется вместе с материалом), так и в эйлеровской (материал движется через фиксированную в пространстве сетку). Пример результатов конечно-элементного моделирования в эйлеровской сетке показан на рис. 2. Показаны начальное положение преграды и ударника, деформированное состояние в момент остановки счёта и график изменения скорости характерных точек, расположенных вдоль оси ударника. По величине этой скорости можно судить об останавливающем действии преграды.

Определение контузионного действия ударника и ультраструйная диагностика керамики

Оценка контузионного действия пули Б-32 производится на основании вязкоупругой модели грудной клетки Лобделла [4], показанной на рис. 3:

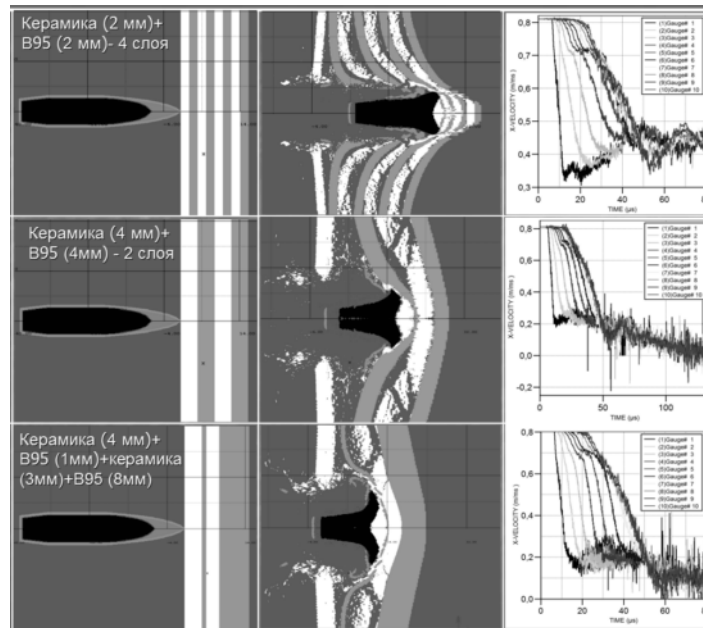


Рис. 2. Взаимодействие ударника с металлокерамическими преградами

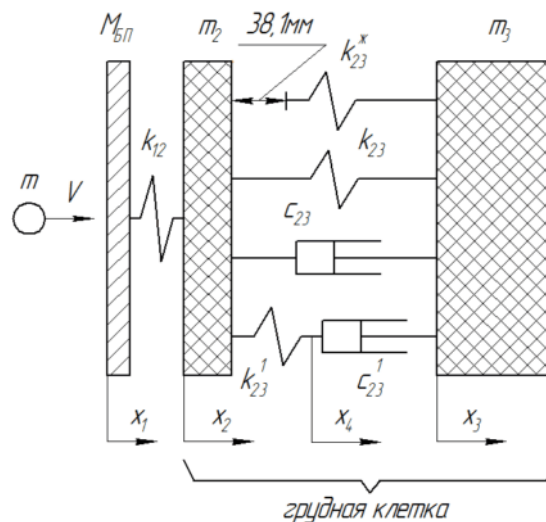


Рис. 3. Вязкоупругая модель грудной клетки Лобделла

Система дифференциальных уравнений, описывающих движение приведенной на рисунке 4 механической системы представлена формулой (1)

$$\begin{aligned}
 M_{\text{БП}} x_1'' &= -k_{12} (x_1 - x_2) \\
 m_2 x_2'' &= x_1 k_{12} - x_2 (k_{12} + k_{23} + k_{23}^*) + x_3 k_{23} - x_2' c_{23} + x_3' c_{23} \\
 m_3 x_3'' &= k_{23} (x_2 - x_3) + c_{23}^1 (x_4' - x_3') + c_{23} (x_2' - x_3') \\
 c_{23}^1 (x_4' - x_3') &= k_{23}^* (x_2 - x_4)
 \end{aligned} \tag{1}$$

Оценка контузионного действия производится на основе численного решения данной системы уравнений. По графикам можно судить о степени сжатия грудной клетки от удара и скорости движения грудного сегмента. Графики - в соответствии с рис. 4.

При создании керамических

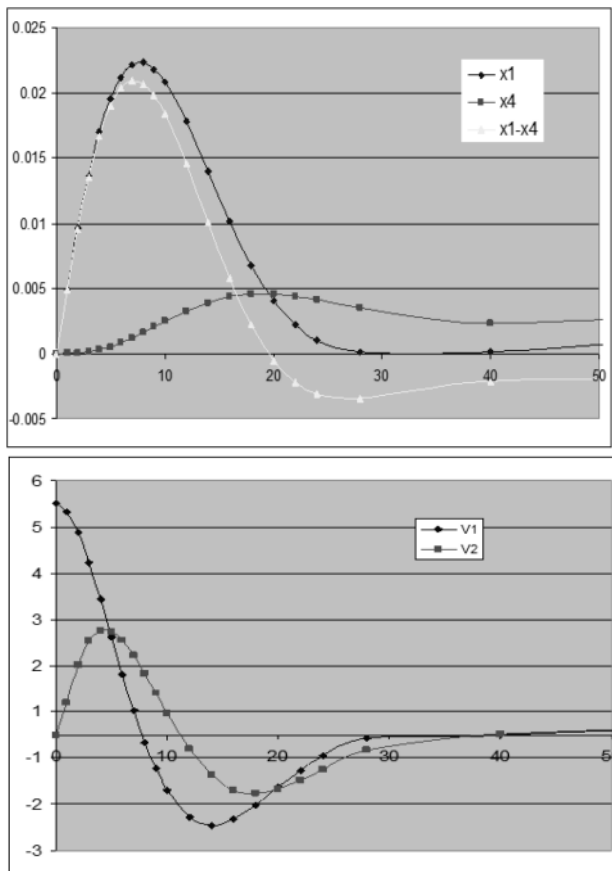


Рис. 4. Графики движения механической системы

пластин бронезащитных элементов производилась диагностика их качества путём применения ультразвуковой гибридной технологии. В работе были продиагностированы образцы керамики Al_2O_3 с металлическими включениями, которые влияют на зернистость керамики, и, в конечном счёте, на её прочностные качества (чем мельче зерно, тем выше ударная вязкость). Т.е. появляется возможность диагностировать керамику до этапа отстрела. Кроме того, для верификации могут быть использованы результаты баллистических испытаний по методу остаточной длины сердечника [5].

Согласно этой методике, каждый образец, будучи подключённым к регистрирующему устройству, подвергается воздействию струи воды высокого давления. Регистрирующее устройство фиксирует сиг-

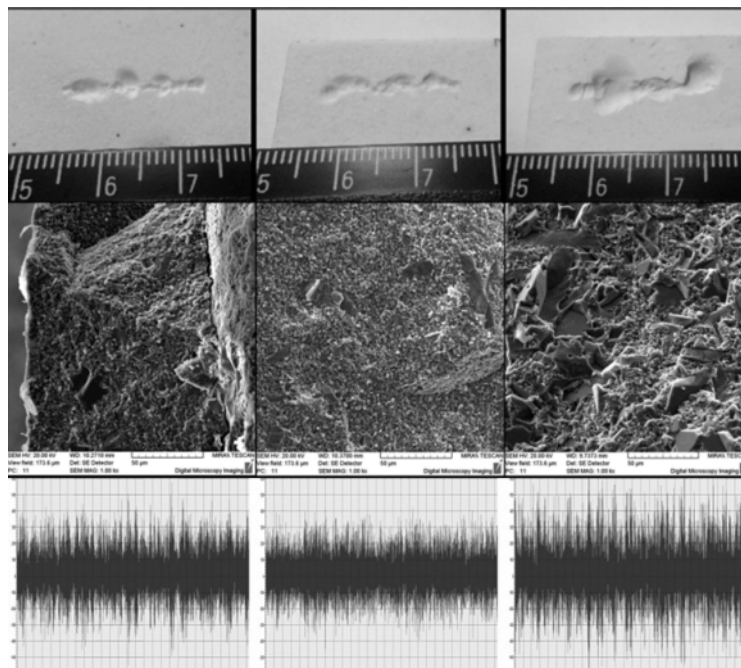


Рис. 5. Каверны от воздействия ультразвуку, микроструктуры образцов керамики и уровень сигнала акустической эмиссии для трёх типов керамики на основе Al_2O_3

нал, по амплитуде которого можно сделать заключение о структуре керамики, наличии в ней трещин и неоднородностей. Также проводится анализ структуры микрошлифа каждого из образцов с помощью микроскопа. Кроме того, о качестве керамики можно судить по количеству унесённого материала в результате ультразвукового взаимодействия. Результаты исследования трёх образцов керамики с различными примесями - в соответствии с рис. 5.

Список литературы:

1. Семькин В.В. Средства индивидуальной бронезащиты: учебное пособие / В.В. Семькин. - М.: Московский университет МВД России, 2008. - 66 с.
2. Павлов А.Н. Методы обработки экспериментальной информации: учебно-метод. пособие / А.Н. Павлов, Б.В. Соколов / ГУАП. - СПб., 2005.
3. Численные методы в задачах физики быстропротекающих процессов: [учебник для втузов] / [А.В. Бабкин, В.И. Колпаков, В.Н. Охотин, В.В. Селиванов]. - [2-е изд. испр.]. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. - 520 с.
4. Григорян В.А. Материалы и защитные структуры для локального и индивидуального бронирования / В.А. Григорян. - М.:Изд. РадиоСофт, 2008. - 406 с.
5. Беспалов И.А. Экспериментальное определение времени задержки проникновения высокоскоростных ударников в керамическую броню / И.А. Беспалов, В.А. Григорян, И.Ф. Кобылкин // Труды 14-й всероссийской научно-практической конференции [«Актуальные проблемы защиты и безопасности»]. - СПб.: НПО СМ, 2011. - Т.1: Технические средства противодействия терроризму. - 2011.

Надійшла до редакції 31.01.2013.

**А.Л. Галиновський, В.И. Колпаков,
С.Г. Муляр, Р.Р. Сайфутдинов**
**МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ
КУЛЕСТІЙКОСТІ ЗАСОБІВ**

ІНДИВІДУАЛЬНОГО БРОНЕЗАХИСТУ

У роботі приведені основні етапи методики розрахунку кулестійкості засобів індивідуального захисту. Показані результати дослідження кулестійкості бронезахисту класу 6а на основі застосування звичайно-елементних моделей в середовищі Ansys AutoDYN. В ході розрахунків були застосовані моделі, запропоновані авторами з метою спрощення верифікації результатів розрахунків на основі експериментальних даних. Також в роботі розглянуто застосування методики діагностики якості бронематеріалів на основі застосування методу ультразвукової діагностики.

Ключові слова: кулестійкість, бронекераміка, AutoDYN, діагностика, бронезилет.

**A.L. Galinovskiy, V.I. Kolpakov,
S.G. Mulyar, R.R. Saifutdinov**
**ARMOR BULLETPROOF CALCULATION ME-
THODOLOGY**

In this work the general stages of individual armor bulletproofness calculation methods are represented. Results of studying bulletproofness of 6a protection class and armor diagnostic methodology on the basis of finite-element analysis complex Ansys AutoDYN are shown.

The models offered by the authors with the purpose of calculating the results of simplification or verification on the basis of experimental data were applied. Also application of armor quality diagnostics methodology with ultra-jet diagnostics applying is represented.

Keywords: bulletproofness, ceramic armor, AutoDYN, diagnostics, body-armor.