электронное научно-техническое издание
НАУКА и ОБРАЗОВАНИЕ
Эл № ФС 77 - 30569. Государственная регистрация №0421100025. ISSN 1994-0408

Анализ эффективности различных средств индивидуальной бронезащиты

77-30569/342101

03, март 2012

Галиновский А. Л., Колпаков В. И., Муляр С. Г.

УДК 53.072

МГТУ им. Н.Э. Баумана
galcomputer@mail.ru
kolpakov54@mail.ru
m_sergey@inbox.ru

1. ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ СРЕДСТВ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ

В настоящее время в нашей стране и за рубежом производится большая номенклатура средств индивидуальной бронезащиты различного конструкторско-технологического и эргономического исполнения, ориентированного на самый широкий спектр областей возможного применения. Анализ литературных источников [1 - 3] показал, что под понятием «средство индивидуальной бронезащиты» в целом понимается его способность защищать различные части тела человека от воздействия огнестрельного, холодного, режущего, колющего оружия, ударного и ударно-дробящего воздействий, а также обеспечение исключения или минимизации заброневой локальной контузионной травмы и механических повреждений. В ГОСТ Р 50744-95 представлено десять уровней угрозы, которым соответствуют различные по конструкции СИБ: легкие (1-2 классы), конструктивно выполненные в виде слоев тканевых пластин различной толщины, и комбинированные (3-6а классы), состоящих, чаще всего, из жестких металлических или керамических элементов и слоев баллистической ткани.

Современные СИБ постоянно совершенствуются в противовес развитию средств поражения и огнестрельного оружия. Особенно динамично развиваются и совершенствуются конструкции и бронеэлементы для бронежилетов (БЖ) как наиболее массового и популярного вида СИБ, используемого всеми силовыми ведомствами, охранными предприятиями, спецслужбами и т.д. Вместе с тем постоянно выдвигаются новые требования к БЖ, среди которых, прежде всего, отметим: необходимость использования новых бронематериалов с набором улучшенных защитных и эксплуатационных свойств направленных на повышение эффективности защиты, оптимизацию конструктивных решений, обеспечивающих повышение комфортности ношения [4].

Традиционно в процессе испытаний БЖ нагружение их бронеэлементов происходит ударником (пулей), отличающимся формами, калибром, материалами, а также баллистическими характеристиками: скоростью, углом между вектором скорости и нормалью к поверхности, местом точки удара и т.д. Все эти факторы способны оказывать существенное влияние на показатели по бронепробитию БЖ. В процессе соударения ударника с поверхностью бронеэлемента возникают сложные физические явления, сопровождающиеся интенсивным динамическим деформированием, прогибами, распространением волн различной природы [5], трещинообразованием и др. Представленная совокупность факторов существенно затрудняет теоретический анализ проблемы ударного взаимодействия пули с преградой, выполненной из того или иного бронематериала. Таким образом, при разработке новых видов бронеэлементов основным видом их испытаний является натурный эксперимент, отличающийся рядом недостатков, таких как высокая стоимость, увеличение времени и сроков проектирования, необходимость многократного проведения повторных экспериментов и т.д. [6].

Вместе с тем современный уровень развития средств компьютерного моделирования и вычислительной техники открыл широкие возможности для решения задач разрушения моно или многослойных бронепластин из различных материалов на предварительных этапах их создания на основе результатов имитационного моделирования, уточнения расчетных моделей и выдачи рекомендаций для конструкторско-технологической проработке СИБ. Все вышесказанное определяет общую актуальность и значимость работы по анализу эксплуатационных свойств проектируемых бронематериалов и композиций в процессе локального ударного воздействия путем применения математического моделирования различных конструктивных вариантов исполнения элементов СИБ, ускорения процесса анализа и отбора их наиболее рациональных вариантов, сведения к минимуму натурных экспериментов и их реализации лишь на заключительных этапах отработки перспективных изделий.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель проводимых исследований заключается в разработке расчетных моделей перспективных бронеэлементов различного конструкторско-технологического исполнения для численной оценки их баллистических характеристик с использованием средств компьютерно-математического моделирования и современной вычислительной техники.

В работе заключение об эффективности делается на основе анализа заброневого действия пули, которое при применении различных типов преград может быть различным: от почти свободного прохода пули через преграду до остановки пули на глубине менее 5 мм в объёме испытуемого образца и образованием незначительной зоны вздутия с обратной (прилегающей к телу человека) стороны рассматриваемого бронеэлемента.

В качестве ударника в работе рассматривается пуля АК-74 калибром 5,45 мм, которая в начальный момент взаимодействия с преградой имеет скорость V_0=800 м/с по нормали к поверхности преграды. Модель ударника представлена на рис. 1.

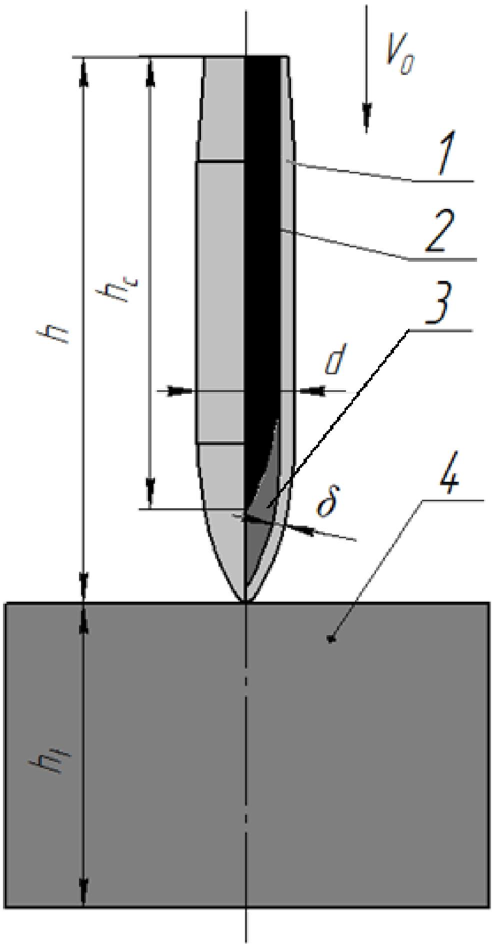


Рис. 1: Модель ударника

1 - медная оболочка; 2 - сердечник из стали-75, 3 - свинцовый наконечник; 4 – преграда;

h = 26.74 мм. - длина пули; h_c = 22.62 мм - длина сердечника; h_t - толщина преграды;

d = 5,45 мм - внешний диаметр.

В качестве преграды используются панели толщиной от 10 до 20 мм, изготовленные из различных материалов (в том числе составные) и закреплённые по краям на стальные опоры представлен. Моделирование производилось в программе Ansys AutoDYN 12.1., общая модель задачи в среде AutoDYN представлена на рисунке 2.

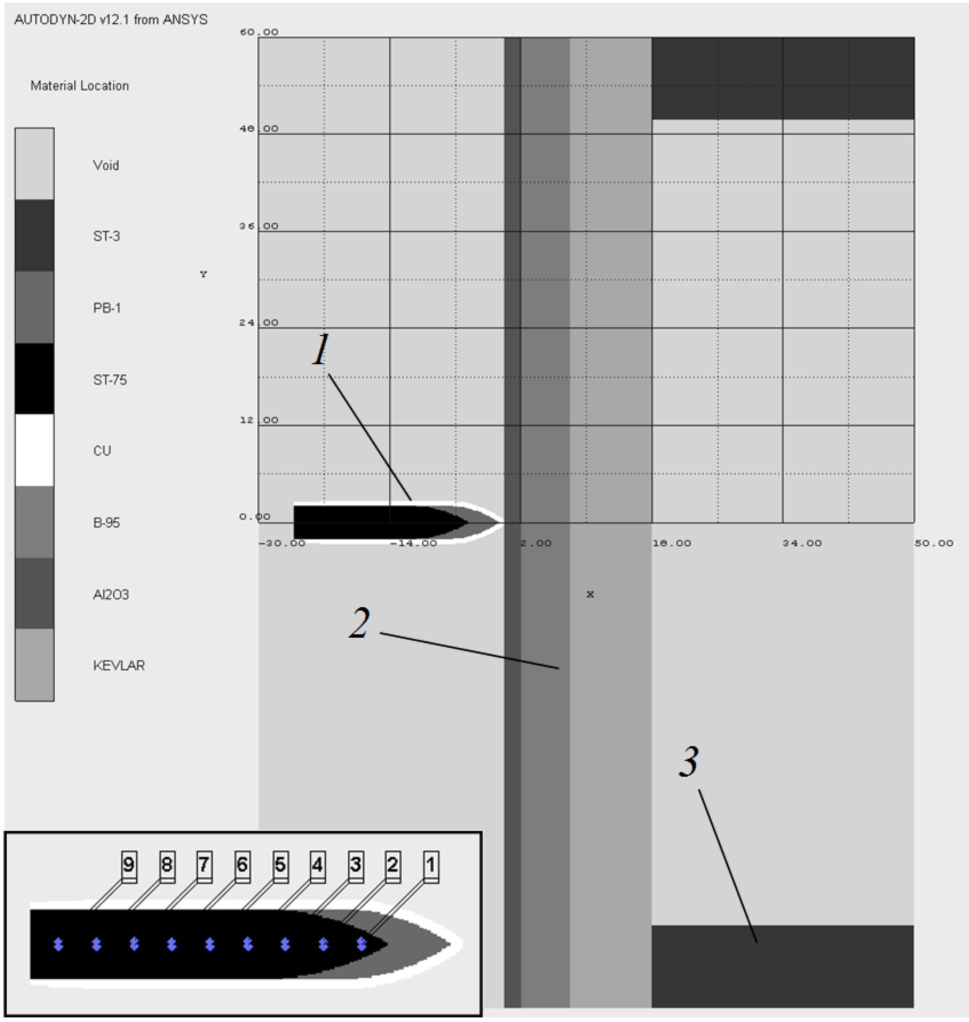


Рис. 2: Общая модель задачи
1 - ударник; 2 - преграда, в общем случае - слоистая; 3 - опоры из Стали-3,
внизу слева - расположение реперных точек, в которых измеряется скорость ударника.

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 воздействия, вводится разбиение общей модели материала на три основных группы параметров [7] - [14]:

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.

В данной работе для моделирования материалов ударника пи преграды были применены линейная (Linear) модель материла для имитации всех металлических материалов, модель мягкого материала (модель Puff) для имитации кевлара, а также модель ударной адиабаты (модель Shock) для компонентов из керамики.

Модель Linear - работает в упругой области при небольших объёмных деформациях. В этом состоянии могут находиться газы, жидкости и твёрдые тела. Для металлов линейный закон записывается в следующем виде (1):

$$p = K \cdot \mu, \tag{1}$$

где μ - степень сжатия среды.

$$\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1,$$

где ρ и ρ_0 - текущее и начальное значения плотности материала.

Модель Puff - использует уравнение состояния "мягкого" тела, описывающее поведение материала в широком диапазоне температур. В его основе лежит уравнение Ми-Грюнайзена (2), которое представляет собой математическую формулировку предположения о том, что тепловое давление p_t, равное разности между полным р и "холодным" p_X давлением прямо пропорционально разнице между полной E и "холодной" E_X энергиями, делённой на объём V:

$$p\text{-}p_x = \gamma \frac{(E - E_X)}{V}, \tag{2}$$

где $\gamma = \gamma(V)$ - коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом Грюнайзена, представляющий собой функцию, зависящий только от объёма.

Модель Shock - использует уравнение ударной адиабаты. Используется для моделирования взаимодействия жидкостей с каким-либо объектом скорость распространения ударной волны от этого взаимодействия превышает скорость распространения звука в жидкости на поправку, зависящую от массовой скорости частиц (3):

$$D = a + \lambda \cdot \nu, \tag{3}$$

где λ - коэффициент сжимаемости,

ν - массовая скорость частиц,

a - скорость звука в среде,

Уравнение изменения давления (4) в зависимости от изменения плотности:

$$p\text{-}p_0 = \frac{\rho_0 \cdot a^2 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_0}\right)}{\left(1 - \lambda\left(1 - \frac{\rho}{\rho_0}\right)\right)}, \tag{4}$$

где p и p_0 - текущее и начальное давление в жидкости.

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.), в данной работе для описания прочностных характеристик металлов была применена, в основном, модель Мизеса, которая описывает поведение большинство металлов с хорошей точностью.

Критерий Мизеса выражается формулировкой: «Поликристалл с беспорядочно ориентированными зёрнами будет обладать заметной пластичностью в том случае, если деформация в нём будет протекать, по крайней мере, по пяти независимым плоскостям скольжения». В аналитическом виде он представляет собой зависимость (5), основанную на значениях напряжений в трёх взаимно перпендикулярных плоскостях:

$$(\sigma_1 - \sigma_2) + (\sigma_2 - \sigma_3) + (\sigma_3 - \sigma_1) = 2 \cdot Y^2, \tag{5}$$

где Y - напряжение, соответствующее пределу текучести данного материала.

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).

Характерная особенность ударного нагружения заключается в формировании ударной волны в объёме исследуемого материала, за ударной волной всегда идёт область разрежения, в которой действуют большие растягивающие напряжения, которые могут вызвать разрыв материала в этой области. Напряжения разрушения при этом характеризуются величиной откольной прочности P_{MIN}, которая характеризует максимальное напряжение растяжения, при котором произойдёт разрыв материала.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТОВ ВЫБРАННЫХ ТИПОВ БРОНЕЭЛЕМЕНТОВ

В работе рассматриваются следующие типы бронеэлементов:

1. Стальная преграда конечной толщины (16 мм):
    - а) Сталь-3 (Результат стрельб рассмотрен в [6]);
    - б) Сталь-3 с двухсторонним азотированием на глубину 0.5 мм;
    - в) Сталь броневая $\sigma_т$=1500 МПа;
2. Бронеэлемент из металлорезины:
    - а) Преграда из металлорезины толщиной 16 мм;
    - б) Пакет: слой металлорезины (10 мм)+ слой кевлара (5мм);
    - в) Преграда из упрочнённой ($\sigma_т$=2000 МПа) металлорезины толщиной 16 мм;
3. Составной бронеэлемент кермика (Al_2O_3)+кевлар в исполнениях:
    - а) Керамика (5 мм)+кевлар (5 мм);
    - б) Керамика (5 мм)+ кевлар (10 мм);
    - в) Керамика (10 мм)+кевлар (5 мм);
4. Слоистые металло-керамические структуры:
    - а) Al_2O_3(2 мм)+сплав В95(6 мм)+кевлар(10 мм);
    - б) Al_2O_3(2 мм)+сплав В95(6 мм)+ Al_2O_3(2 мм);
    - в) [Al_2O_3(2 мм)+сплав В95(6 мм)+ Al_2O_3(2 мм)] – двойной слой;

Результаты расчёта для каждого из вариантов приведены в табл. 1-4 соответственно. Для каждого из вариантов приведено значение остаточной скорости пули $V_{ост}$ в конечный момент времени расчёта. Это значение позволяет судить о скорости движения участка внутреннего слоя бронеэлемента (прилегающего к телу человека), и делать выводы о травмоопасности при применении того или иного бронеэлемента.

Таблица 1

Стальная преграда конечной толщины (16 мм)

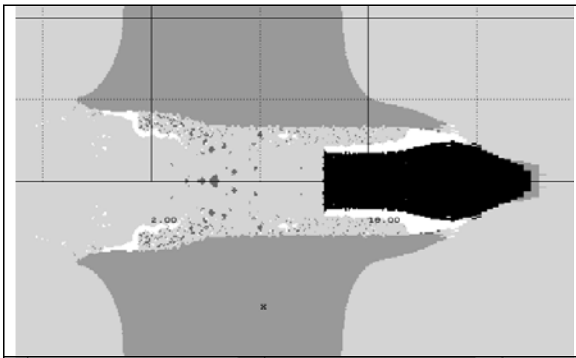
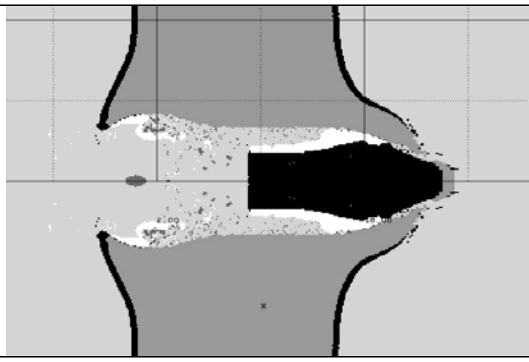
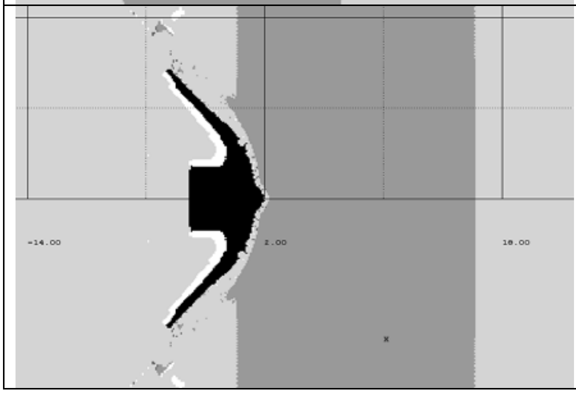
	
	Вверху слева: Сталь-3, $V_{ост}$=80 м/с, вверху справа: Сталь-3 с двухсторонним азотированием на глубину 0.5 мм, $V_{ост}$ =40 м/с, внизу слева: Сталь броневая, $V_{ост}$≈0.

Таблица 2

Бронеэлемент из металлорезины

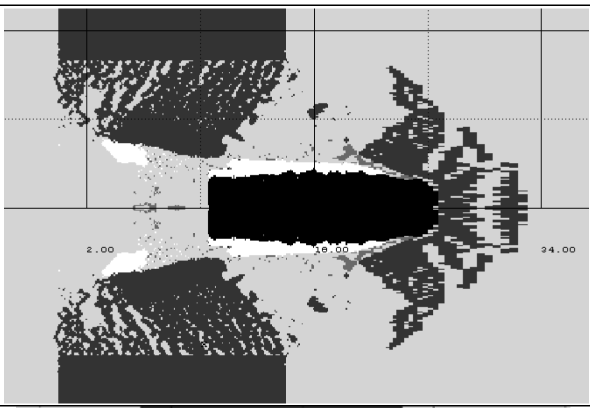
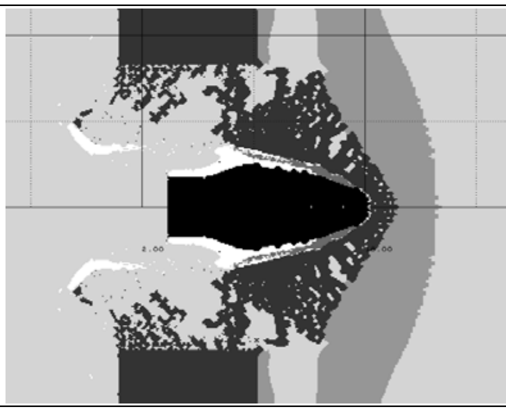
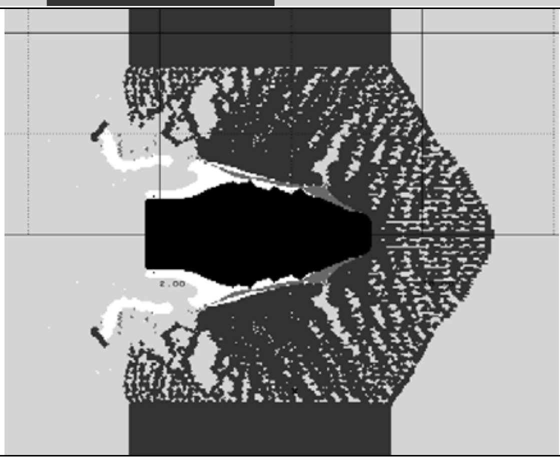
	
	Вверху слева: Металлорезина, $V_{ост}$ =180 м/с, вверху справа: Металлорезна+кевлар, $V_{ост}$ =90 м/с, внизу слева: Металлорезина упрочнённая, $V_{ост}$ =60 м/с.

Таблица 3

Составной бронеэлемент: кермика (Al_2O_3)+кевлар

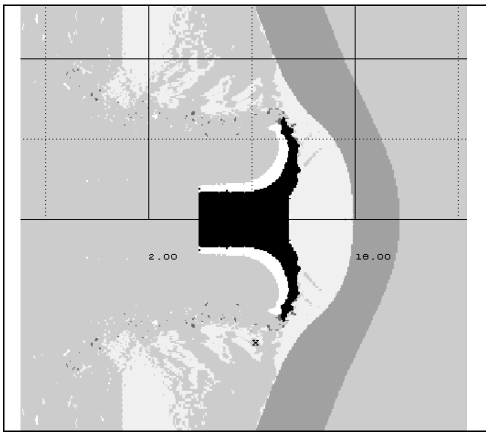
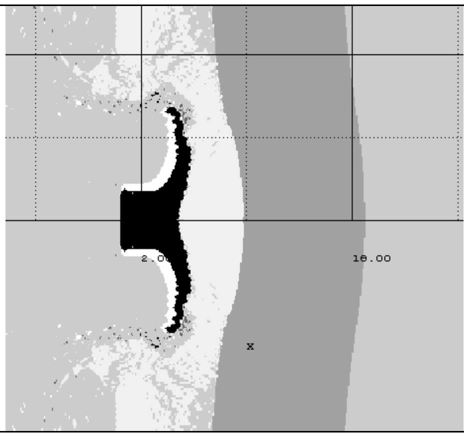
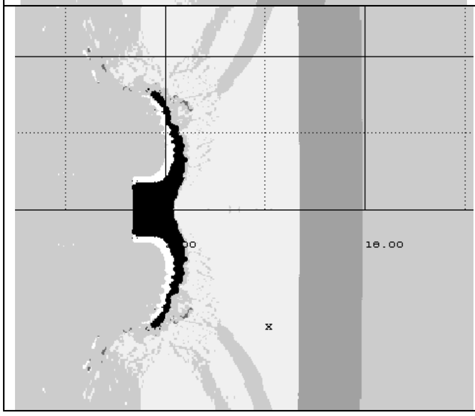
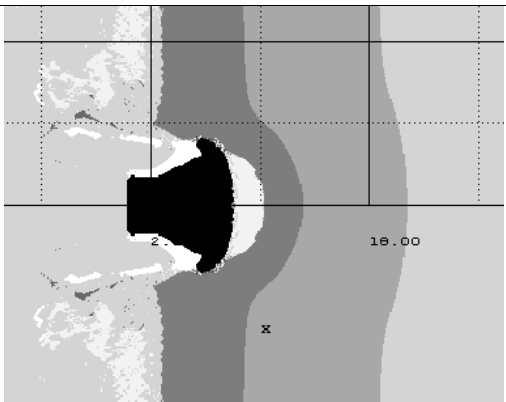
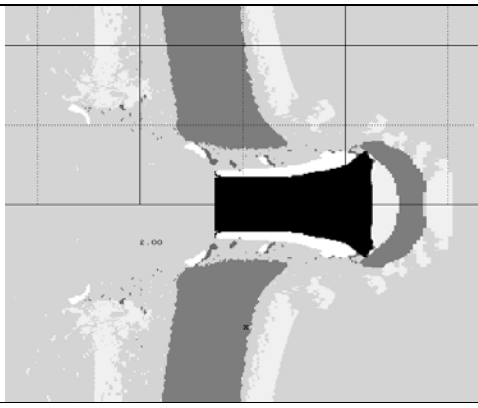
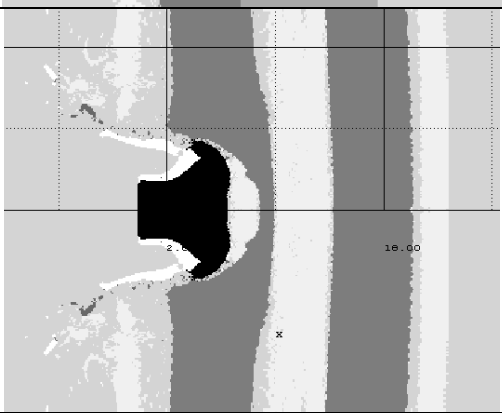
	
	Вверху слева: Керамика+кевлар (5+5), $V_{ост}$ =200 м/с, вверху справа: Керамика+кевлар (5+10), $V_{ост}$ =40 м/с, внизу слева: : Керамика+кевлар (10+5), $V_{ост}$ =10 м/с.

Таблица 4

Слоистые металло-керамические структуры

	
	Вверху слева Al_2O_3(2 мм)+сплав В95 (6 мм)+кевлар(10 мм), $V_{ост}$ =30 м/с, вверху справа: Al_2O_3(2 мм)+сплав В95(6 мм)+ Al_2O_3(2 мм), $V_{ост}$ =350 м/с, внизу слева: 2х[Al_2O_3(2 мм)+сплав В95(6 мм)+ Al_2O_3(2 мм)], $V_{ост} \approx 0$.

4. ВЫВОДЫ:

Разработанные математические модели и компьютерные методы оценки баллистических свойств бронематериалов и их композиций при локальном ударе в них ударника позволяют провести детальный оперативный анализ факторов, влияющих на бронепробитие и общую эффективность СИБ укомплектованных рассматриваемыми бронеэлементами.

В результате проведенных расчетов с использование вычислительных средств установлено, что применение стальных моно пластин оправдано только для сталей с большим значением предела текучести, однако данный вид брони имеет большую массу, а применение их поверхностного упрочнения также не даёт значительного улучшения экслуатационных свойств;

2. Применение бронеэлементов на основе металлорезины с тканевой подложкой (тыльная сторона) не подходит для применения в СИБ ввиду очевидно сильного запреградного травмирования человека;

3. Применение комбинированного бронеэлемента из пакета бронекерамики на основе оксида алюминия и тканевого материала (кевлар) оправдано для толщины керамики более 5 мм.;

4. В целом, применение комбинированных преград в качестве СИБ оправдано для случая, когда толщина слоя бронекерамики составляет более 2 мм;

5. Как показали данные математического моделирования оксидная бронекерамика обладает хорошим останавливающим или гасящим кинетическую энергию действием, что делает целесообразным применять ее с фронтальной стороны бронекомпозиции, например методом плазменного напыления на керамического слоя на металлическую подложку.

ЛИТЕРАТУРА

1. Средства индивидуальной бронезащиты (Руководство службы) М.: Братишка, 2004. -80 с.

2. Семыкин В.В. Средства индивидуальной бронезащиты: учебное пособие. -М.: Московский университет МВД России, 2008. -66 с.

3. Иванюк А.М, Зарецкий В.В., Специальные средства индивидуальной бронезащиты и активной обороны. Техника и тактика их применения.: Учебно-методическое пособие. -Калининград: Калининградский Юридический институт МВД России, 2009. – 52 с.

4. Сахарова Н.А. Разработка методологии проектирования эргономичных бронежилетов с использованием композиционных текстильных материалов. Автореферат на соиск. уч. степени канд. техн. наук 05.19.04. -Иваново, 2003.- 22 с.

5. Сильников М.В. Химичев В.А. Средства индивидуальной бронезащиты.-СПб.: фонд «Университет», 2000. -480 с.

6. Материалы и защитные структуры для локального и индивидуального бронирования /Под ред. В.А. Григоряна. – М.: Изд. РадиоСофт, 2008. – 406 с.

7. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов: Учеб. для вузов. - 13-е изд., стереотип. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 592 с.

8. Численные методы в задачах физики быстропротекающих процессов: Учебник для втузов./ А.В. Бабкин, В.И. Колпаков, В.Н. Охотин, В.В. Седиванов. 2-е изд., испр. - Т.№. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 520 с.

9. Физика взрыва / под ред. Л.П. Орленко. - Изд. 3-е, испр. - В 2т. Т.2 - М.: ФИЗМАТЛИТ. 2004. – 656 с.

10. Теоретические и экспериментальные исследования высокоскоростного взаимодействия тел / Под ред. А.В. Герасимова. - Томск: Изд-во Том. ун-та, 2007.

12. Акуличев В.А., Алексеев В.Н., Буланов В.А. Периодические фазовые превращения в жидкостях. - М.: Наука, 1986. -280 с.

13. Физические величины: Справочник /А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мелихова. - М., Энергоатомиздат, 1991

14. McQueen R.G., et al. // High velocity impact Phenomena / Ed. Kinslow R. Academic Press, 1970.

electronic scientific and technical periodical
SCIENCE and EDUCATION
EL № FS 77 - 30569. №0421100025. ISSN 1994-0408

Analysis of effectiveness of various personal body armor

77-30569/342101

03, March 2012
Galinovsky A. L., Kolpakov V.I., Mulyar S.G.

Bauman Moscow State Technical University
galcomputer@mail.ru
kolpakov54@mail.ru
m_sergey@inbox.ru

The authors consider the problem which describes high-speed interaction of an inert compact striker with various kinds of obstacles, including combined type barriers. The purpose of the study is, with the aid of mathematical modeling, to find out, what types of obstacles are capable of withstanding high-speed blow. They can be used as armor elements in personal body armor. Mathematical modeling of the process was done in Ansys 12.1 IDE. During the modeling of a high-speed interaction process a continuum mechanics device in two-dimensional axisymmetric setting was used. The authors developed and tested the mathematical model and drew conclusions concerning applicability of the armor elements.

Publications with keywords: protection, impact, AUTODYN, bullet, high-speed
Publications with words: protection, impact, AUTODYN, bullet, high-speed

References

1. Kurenkov A.V., ed. *Sredstva individual'noi bronezashchity* (Rukovodstvo sluzhby) [Individual body armor (Service manual)]. Moscow, Bratishka Publ., 2004. 80 p.

2. Semykin V.V. *Sredstva individual'noi bronezashchity* [Individual body armor]. Moscow, Moscow Univ. of the Rus. MIA Publ., 2008. 66p.

3. Ivaniuk A.M, Zaretskii V.V. *Spetsial'nye sredstva individual'noi bronezashchity i aktivnoi oborony. Tekhnika i taktika ikh primeneniia* [Special means of body armor and active defense. Technique and tactics of their use]. Kaliningrad, Law Inst. of the Rus. MIA Publ., 2009. 52 p.

4. Sakharova N.A. *Razrabotka metodologii proektirovaniia ergonomichnykh bronezhiletov s ispol'zovaniem kompozitsionnykh tekstil'nykh materialov. Kand. tekhn. nauk diss. Aftoref.* [Development of methodology for designing ergonomic body armor using composite textile materials. Cand. tech. sci. diss. Synop.]. Ivanovo, 2003. 22 p.

5. Sil'nikov M.V., Khimichev V.A. *Sredstva individual'noi bronezashchity* [Individual body armor]. St. Petersburg, Fund "Universitet" Publ., 2000. 480 p.

6. Grigorian V.A., ed. *Materialy i zashchitnye struktury dlia lokal'nogo i individual'nogo bronirovaniia* [Materials and protective structures for the local and individual armor]. Moscow, RadioSoft Publ., 2008. 406 p.

7. Feodos'ev V.I. *Soprotivlenie materialov. 13-e izd*. [Strength of materials. 13th ed.]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2004. 592 p.

8. Babkin A.V., Kolpakov V.I., Okhotin V.N., Sedivanov V.V. *Chislennye metody v zadachakh fiziki bystroprotekaiushchikh protsessov. 2-e izd*. [Numerical methods in the problems of physics of fast processes. 2nd ed.]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2006. 520 p.

9. Andreev S.G., Babkin A.V., Baum F.A., e.a. *Fizika vzryva* [Physics of explosion]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2004, vol. 2. 656 p.

10. Gerasimov A.V., ed. *Teoreticheskie i eksperimental'nye issledovaniia vysokoskorostnogo vzaimodeistviia tel* [Theoretical and experimental studies of high-speed interaction of bodies]. Tomsk, Tomsk Univ. Publ., 2007. 572 p.

12. Akulichev V.A., Alekseev V.N., Bulanov V.A. *Periodicheskie fazovye prevrashcheniia v zhidkostiakh* [Periodic phase transitions in liquids]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 280 p.

13. Babichev A.P., Babushkina N.A., Bratkovskii A.M., e.a. *Fizicheskie velichiny: Spravochnik* [Physical quantities: A handbook]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 1232 p.

14. McQueen R.G., Marsh S.P., Taylor J.W., Fritz J.N., Carter W.J. The equation of state of solids from shock wave studies. *High-velocity impact phenomena*. New York, Acad. Press, 1970, pp. 293-417.