

## ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В КОНСТРУКЦИИ БРОНЕЖИЛЕТА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ БРОНЕЭЛЕМЕНТОВ МОЗАИЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ

А.В. Понькин, П.В. Кочнев

Рассматривается возможность создания сборного противопульного металлического бронезлемента в виде мозаики из фрагментов конечного размера, позволяющего реализовать совместную работу бронезлемента и высокопрочного тканевого пакета в составе противопульной защиты бронезилета. С помощью программного пакета LS-DYNA проведен ряд расчетов, результаты которых позволяют положительно оценить перспективу создания такого бронезлемента.

*Ключевые слова: противопульная защита, бронезлемент, мозаичная конструкция, метод конечных элементов.*

### Введение

Среди используемых в настоящее время в правоохранительных органах и в войсках моделей бронезилетов наиболее распространены такие, основу конструкции которых, помимо наружного чехла, составляют многослойный тканевый пакет из высокопрочных арамидных нитей и металлический (чаще всего - стальной) бронезлемент, располагаемый с ударной стороны, толщина которого определяется классом защиты бронезилета (рис. 1). С тыльной стороны в качестве амортизатора может использоваться дополнительный слой из легкого пористого материала, например пенополиэтилена.

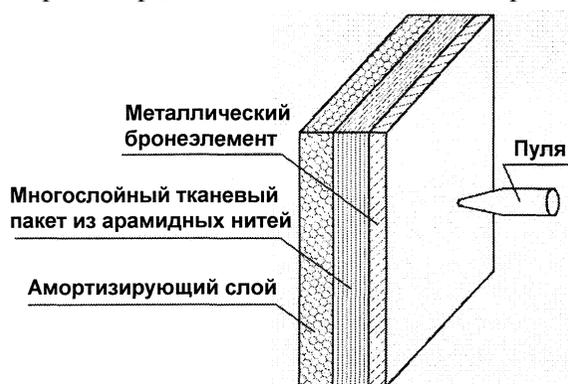


Рис. 1. Конструкция противопульной защиты бронезилета

тканевый пакет просто не способен при таких малых прогибах оказать существенного сопротивления движению пули. Если же, напротив, металлический бронезлемент пробивается, то чаще всего расположенный за ним тканевый пакет также пробивается навывлет сердечником пули.

Исходной предпосылкой для проведения данной работы послужило намерение добиться совместной работы металлического бронезлемента и тканевого пакета на всем этапе торможения пули, и, как следствие, снижения веса противопульной защиты.

Совместная работа металлического бронезлемента и тканевого пакета может быть достигнута за счет отделения от бронезлемента при ударе пули фрагмента небольшой массы,двигающегося далее вместе с пулей и останавливаемого тканевым пакетом. Это позволяет получить двойной положительный результат: во-первых, снижение скорости пули за счет увеличения массы движущихся тел и, во-вторых, увеличение площади воздействия на тканевый пакет.

Возможны несколько вариантов решения этой задачи.

- Откол фрагмента с тыльной стороны бронезлемента. Это явление хорошо известно [2, 3] и, в частности, наблюдается в некоторых экспериментах при ударах пуль в стальные бронепласти-

ны. Однако откалывающийся фрагмент имеет небольшую толщину (при исходной толщине бронепластины 5–6 мм толщина отколовшегося фрагмента не превышает 2 мм) и, как правило, ломается сердечником пули. Кроме того, пока не удалось добиться стабильности отколов при каждом попадании пули.

- Откол части бронэлемента можно реализовать, фрагментировав его с помощью нанесения сетки тонких разрезов, глубина которых меньше толщины пластины. Такое решение представляется достаточно сложным с точки зрения технической реализации.

- Создание сборного бронэлемента в виде мозаики из фрагментов конечного размера. Подобные конструкции бронэлементов с керамическими фрагментами сферической и цилиндрической формы известны [4, 5]. При ударе в керамический фрагмент пуля деформируется, частично разрушается и теряет значительную часть своей кинетической энергии, что позволяет расположенному далее тканевому пакету из арамидных нитей эффективно тормозить ее на заключительном участке траектории. Однако при этом разрушается и сам керамический фрагмент, дробясь на многочисленные осколки. Говорить о совместной работе керамического фрагмента и тканевого пакета, по-видимому, можно лишь на начальном участке торможения пули. Кроме того, керамические бронэлементы имеют существенный разброс свойств и намного дороже металлических. Поэтому представляет интерес создание сборного бронэлемента из металла. Совместная работа металлического бронэлемента и ткани будет обеспечена, если составляющие его фрагменты сами не будут пробиваться пулей насквозь, но приходить в движение и двигаться совместно с пулей, воздействуя на тканевый пакет.

Для создания противопульной защиты с металлическим сборным бронэлементом необходимо решить, как минимум, две задачи.

1. Определить форму и максимальные размеры фрагментов, при которых не происходит их сквозного пробоя при заданных условиях воздействия.- это удары автоматных и винтовочных пуль как со свинцовым, так и со стальным термоупрочненным сердечником, движущихся со скоростью от 700 до 900 м/с.

2. Выбрать оптимальный материал для изготовления фрагментов.

### Построение расчетной модели

В рамках данной работы на ПЭВМ с помощью пакета метода конечных элементов LS-DYNA проведена расчетная оценка возможности решения этих задач. Рассмотрен вариант сборного бронэлемента с фрагментами квадратной формы, в качестве пули использован ударник в виде цилиндра (рис. 2). Материал ударника полагался абсолютно упругим и не разрушаемым (MAT ELASTIC) с плотностью  $7800 \text{ кг/м}^3$ , модулем упругости при растяжении  $2 \times 10^5 \text{ МПа}$  и модулем сдвига  $0,8 \times 10^5 \text{ МПа}$ . Диаметр ударника приблизительно соответствует калибру пули автомата АК-74 (5,45 мм) и диаметру стального сердечника пули автомата АКМ, длина ударника варьировалась в зависимости от условий решаемой задачи. Конечноэлементная модель ударника создана с помощью восьмиузловых шестигранных элементов SOLID 164 с размером грани 0,5 мм.

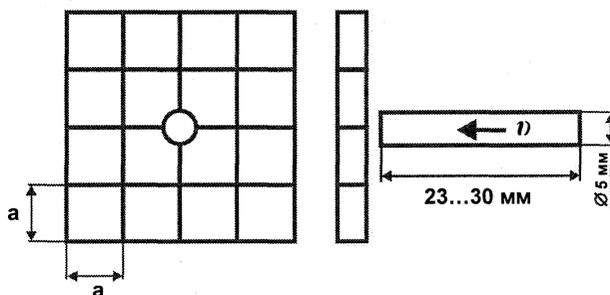


Рис. 2. Сборный бронэлемент и ударник

Материал бронэлемента - конструкционная Cr-Ni-Mo-V сталь (служебное обозначение - сталь 44) разработки НИИСтали, г. Москва [6]. Эта сталь используется для изготовления защитных элементов бронжилетов, ее основные физические и механические характеристики представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики стали 44

Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Модуль Юнга $E$ , МПа	Модуль сдвига $G$ , МПа	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа	Предел прочности $\sigma_B$ , МПа	Относительное остаточное удлинение $\delta$ , %	Относительное поперечное сужение $\psi$ , %
7900	$2,16 \times 10^5$	$0,83 \times 10^5$	1700	2200	10	40

Конечноэлементное моделирование бронезащитного элемента также выполнено с помощью элементов SOLID 164 с размером грани 0,5 мм, при этом использована модель материала с линейным деформационным упрочнением MAT PLASTIC KINEMATIC (соответствующая диаграмма растяжения представлена на рис. 3). Величина  $\sigma_T$  полагалась равной условному пределу текучести  $\sigma_{0,2}$ , модуль упрочнения рассчитывался по формуле  $E_t = \frac{\sigma_B - \sigma_{0,2}}{\delta}$ ; разрушающая (предельная) деформация  $e_{np} = \ln\left(\frac{1}{1-\psi}\right)$ . Свой-

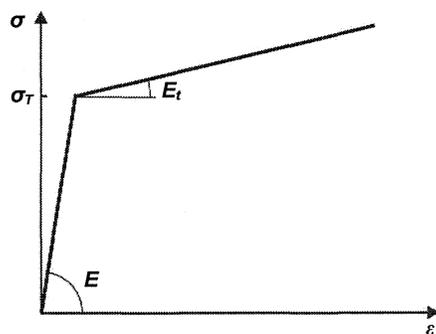


Рис. 3. Расчетная диаграмма деформирования материала бронезащитного элемента

ства материала бронезащитного элемента считались не зависящими от скорости нагружения. Критерием разрушения считалось достижение наибольшей главной логарифмической деформацией предельного значения, сама возможность разрушения при расчете учитывалась подключением дополнительной функции MAT ADD EROSION.

### Проверка модели материала и определение размеров бронезащитного элемента

Из экспериментов известно, что пластина из стали 44 толщиной 6,5 мм выдерживает попадание под прямым углом пули автомата АКМ со стальным термоупрочненным сердечником (5 класс согласно [1]), и глубина кратера в точке удара не превышает 1/3 от толщины пластины. При этом основное поражающее действие на пластину оказывает сердечник пули. Для проверки адекватности модели материала бронезащитного элемента первоначально проведен расчет воздействия ударника длиной 30 мм и массой 4,6 г на закрепленную по контуру пластину из стали 44, имеющую размеры в плоскости 100x100 мм и толщину 6,5 мм. Скорость ударника в начальный момент времени 715 м/с, что соответствует скорости пули автомата АКМ. Масса ударника имеет промежуточное значение между массой стального сердечника (около 3 г) и полной массой пули (7,9 г). Результат расчета представлен на рис. 4.

Как видно из рисунка, глубина внедрения ударника в пластину составляет приблизительно 50 % ее толщины. Это несколько больше, чем наблюдается в экспериментах, но ошибка расчета идет в запас прочности бронезащитного элемента.

В качестве следующего шага была предпринята попытка уменьшить толщину стальной пластины до 5 мм и подобрать ее размеры в плоскости из условия непробиваемости при воздействии ударником массой 3,5 г (длина ударника 23 мм), с начальной скоростью 900 м/с, что соответствует массе и скорости пули автомата АК-74. Выбор ударника с такими характеристиками обусловлен тем, что в настоящее время именно этот автомат принят на вооружение в большинстве силовых подразделений России. При этом толщина пластины из стали 44, обеспечивающая защиту от этого вида оружия (4 класс согласно [1]), равна 5,5 мм.

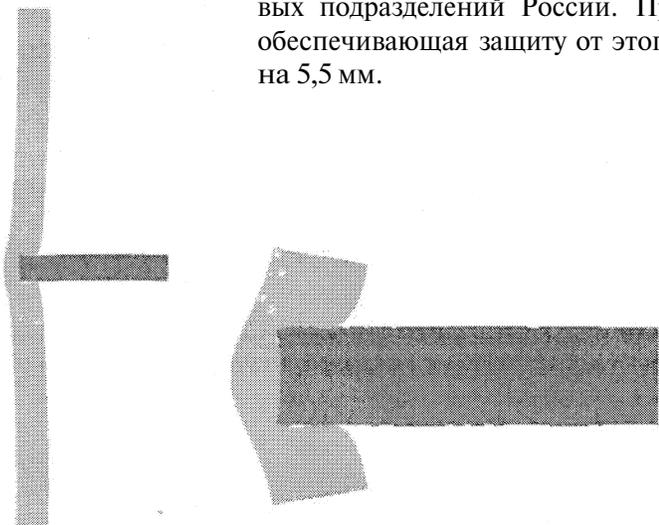


Рис. 4. Максимальное внедрение ударника в бронезащитный элемент

Рис. 5. Максимальное внедрение ударника в пластину размером в плоскости 12x12 мм при начальной скорости ударника 900 м/с

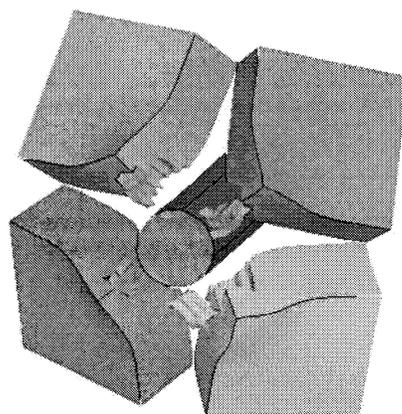


Рис. 6. Удар в угол, образованный четырьмя фрагментами

Проведен ряд расчетов удара под прямым углом в центр свободной от закреплений пластины в форме квадрата со стороной  $a$  (см. рис. 2) от 10 до 20 мм. Уверенное непробитие пластины получено при максимальном ее размере в плоскости 12x12 мм (рис. 5). Ударник внедряется в пластину приблизительно на 60 % ее толщины, а скорость их совместного движения в этот момент времени составляет около 340 м/с. Это обнадеживающий результат, однако при создании сборного бронезащитного элемента из фрагментов квадратной формы необходимо учитывать возможность попадания пули в стык между двумя фрагментами или, что еще хуже, в угол, образованный четырьмя фрагментами. Результаты соответствующего расчета представлены на рис. 6 (в этом и последующих расчетах все ударяемые фрагменты считались свободными от закреплений). Как видно из рисунка, при таком ударе фрагменты изгибаются и сильно разворачиваются, и ударник достаточно легко проникает за их тыльную поверхность. При этом остаточная скорость ударника 480 м/с, что может привести к сквозному пробою тканевого пакета из арамидных нитей.

Уменьшить изгиб и разворот пластин можно, если существенно увеличить их толщину, однако при этом не должен измениться общий вес бронезащитного элемента. Для этого материал бронезащитного элемента был заменен на более легкий алюминиевый сплав Д16Т, плотность которого примерно втрое меньше плотности стали. Это позволило увеличить расчетную толщину бронезащитного элемента до 14 мм, при этом размеры каждого фрагмента в плоскости бронезащитного элемента оставлены 12x12 мм. Основные физические и механические характеристики алюминиевого сплава Д16Т представлены в табл. 2.

Таблица 2

Основные характеристики алюминиевого сплава Д16Т по данным [7]

Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Модуль Юнга $E$ , МПа	Модуль сдвига $G$ , МПа	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа	Предел прочности $\sigma_B$ , МПа	Относительное остаточное удлинение $\delta$ , %	Относительное поперечное сужение $\psi$ , %
2800	$0,7 \times 10^5$	$0,27 \times 10^5$	400	540	11	50

В расчетах методом конечных элементов для бронезащитного элемента из алюминиевого сплава также использована модель материала с линейным деформационным упрочнением (см. рис. 3) с аналогичным критерием разрушения.

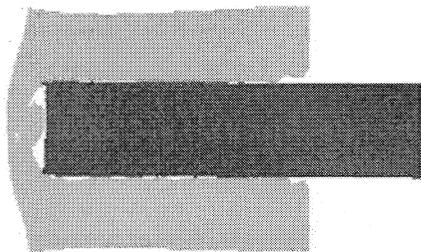


Рис. 7. Максимальное внедрение ударника в элемент из алюминиевого сплава Д16Т при начальной скорости ударника 900 м/с

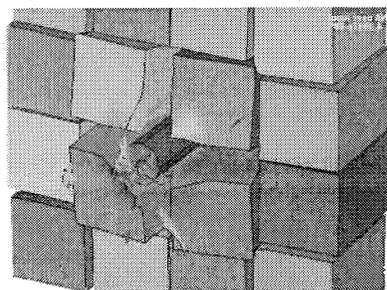


Рис. 8. Удар в угол, образованный четырьмя фрагментами из алюминиевого сплава Д16Т

Результат расчета удара в центр фрагмента из Д16Т представлен на рис. 7. Глубина внедрения ударника составляет около 80 % толщины фрагмента, скорость их совместного движения в этот момент времени равна приблизительно 350 м/с.

Проведен также расчет удара в угол, образованный четырьмя смежными фрагментами (рис. 8). Как видно из рисунка, разворота фрагментов практически не наблюдается, но имеет место их смещение в стороны. Это смещение, по-видимому, будет тем меньше, чем большее количество фрагментов располагается вокруг взаимодействующих с пулей. Кроме того, можно предложить различные варианты крепления фрагментов в бронезащитном элементе, препятствующего их боковому смещению. Ударник пробивает бронезащитный элемент, и его остаточная скорость составляет около 380 м/с, что на 100 м/с меньше в сравнении с ударом в смежный угол стальных фрагментов (см. рис. 6).

#### Выводы

Изготовление сборного бронезащитного элемента в виде мозаики из фрагментов небольшого размера выглядит принципиально возможным, но перед практической реализацией нужно дополнительно решить следующие задачи.

1. Заменить в расчетах цилиндрический ударник на более точную модель пули с учетом возможности ее разрушения.

2. В качестве материала бронеэлемента в расчетах использовать специальные алюминиевые высокопрочные сплавы системы Al-Zn-Mg, например, АБТ-101 (другое обозначение - марка 1901) или АБТ-102 (марка 1903), разработанные в НИИСтали [8]. Эти алюминиевые сплавы применяются для изготовления противопульной и противоснарядной брони.

3. Уточнить форму и размеры фрагментов. Например, замена фрагментов квадратного поперечного сечения на шестигранные позволяет добиться того, что при попадании в сборный бронеэлемент пуля может одновременно войти в контакт не более чем с тремя фрагментами (в случае квадратного сечения их может быть четыре). Это уменьшает вовлекаемую в движение массу бронеэлементов и, тем самым, снижает вероятность их сквозного пробоя. Той же цели может служить уменьшение размеров фрагментов в плоскости бронеэлемента. Эти меры способствуют обеспечению совместного движения пули и фрагментов бронеэлемента и, тем самым, повышению эффективности их торможения многослойным тканевым пакетом из высокопрочных арамидных нитей.

### Литература

1. ГОСТ Р 50744-95 Бронеодежда. Классификация и общие технические требования. - М.: Издательство стандартов, 1995.

2. Куликов, Д.В. Физическая природа разрушений / Д.В. Куликов, Н.В. Мекалова, М.М. Закирничная; под общ. ред. И.П. Кузеева. <http://rusnauka.narod.ru/lib/phisic/destroy/-glava7.htm> (дата обращения 18.10.2009).

3. Хорев И.Е. Ударно-откольная асимметрия в проблеме высокоскоростного соударения твердых тел // Письма в «Журнал технической физики». - 2005. - Т. 31. - Вып. 4. - С. 71-75. URL: <http://www.ioffe.rssi.ru/journals/pjtf/2005/04/p71-75.pdf> (дата обращения 18.03.2009).

4. Composite armor plates and panel. United States Patent 6289781. URL: <http://www.freepatentsonline.com/6289781.pdf> (дата обращения 11.10.2009).

5. Ballistic armor panel. United States Patent 6892623. URL: <http://www.freepatentsonline.com/6892623.html> (дата обращения 11.10.2009).

6. Бронеовые стали марки 44 и 56 для средств индивидуальной бронезащиты. Механические свойства, [http://www.niistali.ru/pr\\_secure/material.htm](http://www.niistali.ru/pr_secure/material.htm) (дата обращения: 23.10.2009).

7. Гуляев А.П. Металловедение / А.П. Гуляев. - М.: Металлургия, 1977. - 648 с.

8. Алюминиевая броня. URL: [http://www.niistali.ru/science/legk\\_bron.htm#1](http://www.niistali.ru/science/legk_bron.htm#1) (дата обращения 26.10.2009).

*Поступила в редакцию 31 октября 2009 г.*

## EVALUATION OF AVAILABILITY OF METAL ARMOUR ELEMENTS OF TESSELLATION CONSTRUCTION IN BULLETPROOF VEST DESIGN

In this paper the possibility of making prefabricated bullet-proof metal armour elements in the form of small tessellation parts which allow to implement joint work of both armour element and high-strength fabric package in the structure of the bullet-proof armour vest was examined. With the help of the finite-element package LS-DYNA a series of calculations were carried out results of which allow to take a favorable view of perspective of making this armour element.

*Keywords: bullet-proof, armour element, tessellation construction, finite-element method.*

**Ponkin Aleksandr Viktorovich** - Associate Professor, Cand.Sc.(Engineering), Applied Mechanics, Dynamics and Machine Strength Department, Physics Faculty, South Ural State University.

**Понькин Александр Викторович** - доцент, кандидат технических наук, кафедра прикладной механики, динамики и прочности машин, физический факультет, Южно-Уральский государственный университет.

e-mail: [avjponkin@74.ru](mailto:avjponkin@74.ru)

**Konchev Pavel Valentinovich** - student, Physics Faculty, Group 687, South Ural State University.

**Кочнев Павел Валентинович** - студент, физический факультет, группа 687, Южно-Уральский государственный университет.