

И.Ф. Кобылкин, В.В. Селиванов

Материалы и структуры легкой бронезащиты

Допущено

*Учебно-методическим объединением вузов
по университетскому политехническому образованию
в качестве учебника для студентов высших учебных
заведений, обучающихся по направлению подготовки
«Машиностроение»*



Москва

ИЗДАТЕЛЬСТВО
МГТУ им. Н. Э. Баумана

2 0 1 4

УДК 623.445
ББК 68.512
К55

Рецензенты:

доктор физико-математических наук, профессор *Ю.И. Димитриенко*;
доктор технических наук, профессор *Г.О. Котиев*

Кобылкин, И.Ф.

К55 Материалы и структуры легкой бронезащиты : учебник / И. Ф. Кобылкин, В. В. Селиванов. — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. — 191, [1] с. : ил.

ISBN 978-5-7038-4001-6

Рассмотрен комплекс вопросов, связанных с баллистической стойкостью материалов и защитных структур, предназначенных для индивидуальной и локальной бронезащиты от воздействия высокоскоростных пуль и осколков. Приведены физические и математические модели процессов высокоскоростного взаимодействия пуль и осколков с различными типами бронепреград. Изложены современные представления о механизмах заброневого действия баллистического удара пуль.

Для студентов и аспирантов технических университетов и машиностроительных вузов. Может быть полезна научным работникам, инженерам и военным специалистам, которые занимаются разработкой средств индивидуальной и локальной бронезащиты.

УДК 623.445
ББК 68.512

Оглавление

Предисловие	5
Список основных сокращений	8
Глава 1. Основные понятия и определения	9
1.1. Пули стрелкового оружия	9
1.2. Стандарты на средства индивидуальной бронезащиты	10
1.3. Средства индивидуальной бронезащиты	18
1.4. Локальная бронезащита автомобильной и авиационной военной техники	23
1.5. Методы оценки уровней защищенности легкобронированных боевых машин	25
Глава 2. Текстильная броня	29
2.1. Материалы текстильной брони	29
2.2. Волокна, нити и ткани. Метрология волокнистых материалов	32
Глава 3. Механизмы взаимодействия пули с текстильной броней	40
3.1. Начальная стадия взаимодействия пули с текстильной броней	41
3.2. Стадии проникания и торможения пули	45
3.3. Энергетический анализ процесса взаимодействия пули с текстильной броней	59
3.4. Методы расчета предельной скорости пробития текстильного бронепакета	61
3.5. Баллистическая энергоемкость текстильных бронепакетов	69
3.6. Влияние влажности текстильного бронепакета на его баллистическую стойкость	70
3.7. Влияние свойств материала подложки на баллистическую стойкость текстильных бронепакетов	74
3.8. Влияние поперечных размеров текстильных бронепакетов на их противоосколочную стойкость	76
3.9. Влияние угла воздействия пуль и осколков на баллистическую стойкость текстильных бронепакетов	78
Глава 4. Полимерная композитная броня	86
4.1. Композиционные материалы	86
4.2. Органопластики	86
4.3. Баллистическая стойкость органопластиков	89
4.4. Особенности пробивания органопластиковой преграды	97
4.5. Влияние кривизны оболочки бронешлема на его баллистическую стойкость	100
Глава 5. Металлическая броня	105
5.1. Стальная броня	105
5.2. Механика процесса пробивания металлического бронезащитного элемента	112

5.3. Определение запреградной скорости	118
5.4. Металлическая броня на основе сплавов алюминия и титана	121
Глава 6. Керамическая броня	127
6.1. Керамические бронематериалы	127
6.2. Баллистическая стойкость керамической брони	128
6.3. Поведение керамической брони при ударном воздействии пуль	133
Глава 7. Противопульная стойкость многослойных преград с внешним керамическим слоем	141
7.1. Комбинированная многослойная броня	141
7.2. Инженерная методика расчета противопульной стойкости многослойной защитной структуры с внешним керамическим слоем	144
7.3. Примеры использования инженерной методики для анализа защитающей способности двухслойных и трехслойных защитных структур	149
7.4. Методы повышения живучести многослойных защитных структур с внешним керамическим слоем	156
Глава 8. Прозрачная броня	161
8.1. Прозрачные бронематериалы	161
8.2. Баллистическая стойкость многослойных прозрачных преград	168
Глава 9. Использование наноматериалов в бронезащите: возможности и перспективы	171
9.1. Прочностные свойства наноструктурированных металлов и сплавов	171
9.2. Баллистическая стойкость текстильной брони, пропитанной густеющей при быстром сдвиге жидкостью	173
Глава 10. Заброневое действие высокоскоростного удара пуль при непробитии бронезащиты	178
10.1. Общая характеристика заброневого действия	178
10.2. Особенности заброневого действия	180
10.3. Анализ физических процессов, сопровождающих заброневое действие	181

Предисловие

Для индивидуальной и локальной бронезащиты от воздействия высокоскоростных пуль и осколков используется широкий круг защитных противопульных и противоосколочных броневых структур с поверхностной плотностью, не превышающей 50... 80 кг/м². Такую броневую защиту называют легкой броней, ее применяют в средствах индивидуальной бронезащиты — бронезилетах, бронешитах и бронешлемах, для локального бронирования автомобилей, самолетов и вертолетов.

Требование минимальности массы защиты приводит к использованию в качестве брони необычных материалов. Так, для защиты от низкоэнергетических средств поражения — револьверных и пистолетных пуль — широко используют текстильную броню из высокомолекулярных и высокопрочных полиарамидных или полиэтиленовых волокон. Эффективная защита от высокоэнергетических средств поражения с высокой проникающей способностью — бронебойных винтовочных пуль — термоупрочненными сердечниками — невозможна без применения в качестве элемента защитной структуры керамики — высокотвердого, но очень хрупкого материала, что, казалось бы, полностью исключает его применение для защиты от ударно-проникающего действия.

В данном учебнике в систематизированном виде изложен комплекс вопросов, связанных с баллистической стойкостью легкой брони. Подробно рассмотрены основные типы легкой брони: текстильная, органопластиковая, металлическая, керамическая, комбинированная многослойная и прозрачная. Представлены физические и математические модели процессов высокоскоростного взаимодействия пуль и осколков с различными типами бронеэлементов, приведены количественные зависимости и расчетные методики для оценки их баллистической стойкости. Изложены современные представления о механизмах заброневоего действия баллистического удара пуль при непробитии бронезащиты.

Для расширения кругозора читателей в книге содержится раздел об использовании наноматериалов в изготовлении легкой брони. Многие ведущие научно-исследовательские лаборатории мира имеют далекие перспективы и хорошо финансируемые программы разработки новых бронематериалов на основе использования достижений нанотехнологий.

В ближайшее десятилетие можно ожидать появления принципиально новых материалов для баллистической защиты, однако комбинированные многослойные преграды с керамическим или металлическим слоями и тогда сохранят свое преимущество в защите от бронебойных пуль, обладающих максимальной проникающей способностью в ряду других боеприпасов стрелкового оружия.

Несмотря на то что разработка и производство средств локальной и индивидуальной легкой бронезащиты во многом определяет боевые качества военной техники, бронезилетов, шлемов и т. п., учебника, содержащего систематизированные сведения по обсуждаемой проблеме, нет. Настоящая книга призвана восполнить существующий пробел.

Учебник написан на основе лекций по дисциплине «Защита от действия взрыва и баллистического удара», читаемых в МГТУ им. Н. Э. Баумана одним из авторов книги более 15 лет. Первоначально излагаемый в книге материал частично был включен в монографию «Материалы и защитные структуры для локального и индивидуального бронирования», написанную И. Ф. Кобылкиным, В. А. Григоряном, В. М. Марининым и Е. Н. Чистяковым. Настоящая книга написана совместно с В. В. Селивановым практически заново. Материалов, принадлежащих В. А. Григоряну, В. М. Маринину и Е. Н. Чистякову, не осталось.

Учебник состоит из 10 глав. Главы 1—4, 8—10 написаны И. Ф. Кобылкиным; главы 5—7 — И. Ф. Кобылкиным и В. В. Селивановым.

В главе 1 представлены характеристики пуль стрелкового оружия, даны основные понятия отечественного стандарта на бронеодежду, сравнение его с наиболее популярными зарубежными стандартами, приведены сведения об устройстве бронежилетов, бронешлемов и бронежилетов, а также примеры локального бронирования военной техники и методы оценки уровней защищенности легкобронированных боевых машин.

В главе 2 рассмотрены основные полимерные материалы, из которых изготавливается текстильная броня, а также свойства волокон, нитей и тканей — основных элементов дискретной структуры текстильной брони.

Глава 3 посвящена подробному анализу механизмов взаимодействия пуль с текстильной броней. Изложение материала начинается с анализа ударно-волновых процессов уплотнения текстильного бронепакета на начальной стадии взаимодействия пули с бронепакетом. Далее, на примере классических задач о поперечном ударе по упругим нитям объяснены механизмы торможения пули и разрушения текстильных бронепакетов. На основе энергетического анализа процесса взаимодействия пули с текстильной броней разработан подход к определению ее баллистической стойкости, позволяющий получить аналитическую зависимость предельной скорости пробития бронепакета от его конструктивных характеристик и физико-механических свойств ткани. Дан критерий выбора оптимальных тканей, объяснено влияние влажности бронепакета на его баллистическую стойкость. Значительный интерес могут представить экспериментальные данные по баллистической стойкости бронепакетов различных поперечных размеров.

В главе 4, посвященной полимерной композиционной броне, рассмотрены особенности строения броневых органопластиков, проанализирована их баллистическая стойкость, приведена аналитическая зависимость для определения предельной скорости пробития. Особое внимание уделено анализу влияния кривизны оболочки бронешлема на его баллистическую стойкость, получена аналитическая зависимость для расчета предельной скорости непробития.

В главе 5 приведены основные сведения о броневых сталях, высокопрочных титановых и алюминиевых сплавах, проанализированы механизмы пробития металлических бронееlementов, рассмотрены аналитические зависимости для оценки их баллистической стойкости.

В главе 6 изложены концептуальные вопросы баллистической стойкости керамической брони. Даны сведения об основных керамических материалах,

используемых в легкой броне, выполнен подробный анализ процесса взаимодействия пуль с керамическими бронезащитами, на основании которого выявлены механизмы, обеспечивающие их высокую баллистическую стойкость.

В главе 7, посвященной анализу баллистической стойкости многослойной комбинированной брони с внешним керамическим слоем, синтезированы знания о различных типах брони, рассмотренных в предыдущих главах. Подробно описана инженерная методика расчета противоположной стойкости многослойной комбинированной брони с внешним керамическим слоем и следующими за ним текстильным или органопластиковым и металлическим слоями, соединенными между собой. Приведены примеры использования этой методики для анализа баллистической стойкости двух- и трехслойной комбинированной брони.

В главе 8 рассмотрены основные прозрачные материалы — стекла, керамики, полимеры и способы их компоновки в многослойные защитные структуры — триплексы, обеспечивающие защиту от воздействия пуль и осколков.

Глава 9 содержит обзор информации о возможностях и перспективах использования наноматериалов для изготовления легкой брони.

В главе 10 с позиций инженера-механика подробно изложены современные представления о механизмах заброневого действия баллистического удара пуль при непробитии бронезащиты. В гидродинамическом приближении выполнен анализ физических процессов, сопровождающих заброневое действие, получено аналитическое выражение для максимального радиуса пульсирующей полости.

С использованием энергетического подхода разработан количественный критерий недопущения заброневого травмирования выше II степени тяжести. В одномерном приближении выполнен математический анализ ответной реакции грудной клетки на удар бронепластины, ускоренной ударом пули. Проанализировано ударно-волновое нагружение мягких тканей, создаваемое ударом деформационного купола текстильного бронепакета.

Поскольку одной из целей, поставленных перед собой авторами учебника, является его использование при выполнении домашних заданий, при курсовом и дипломном проектировании, то в нем приведены не только инженерные методики расчета соответствующих характеристик защитных структур, но и необходимые количественные данные в виде таблиц и графических зависимостей. По этой же причине, а также потому, что материалы глав практически независимы друг от друга, список литературы разбит по главам. В списках литературы студенты могут найти интересующие их подробности. Литература, рекомендуемая в качестве основной для углубленного изучения отдельных разделов лекционного курса, отмечена звездочкой.

Авторы надеются, что настоящий учебник не только окажет существенную помощь студентам и аспирантам в изучении материалов и структур легкой бронезащиты и механики ее функционирования, но и станет полезным пособием в их дальнейшей практической работе.

Список основных сокращений

АБТ	—	алюминиевый броневой сплав
АКМ	—	автомат Калашникова модернизированный
АПС	—	автоматический пистолет Стечкина
БЖ	—	бронезилет
БЗ	—	бронепойно-зажигательная
БЭ	—	бронезлемент
ВВ	—	взрывчатое вещество
ВДП	—	вакуумно-дуговой переплав
ВИП	—	вакуумно-индукционный переплав
ГПУ	—	гексагональная плотно упакованная (решетка)
ГЦК	—	гранцентрированная кубическая (решетка)
ЖВО	—	жизненно важные органы
КАП	—	климатический амортизационный подпор
КК	—	кислородный конвертор
КМ	—	композиционный материалы
ЛПС	—	легкая пуля стальная
ОЦК	—	объемно-центрированная кубическая (решетка)
ПКБ	—	поликарбонат
ПМ	—	пистолет Макарова
ПММ	—	пистолет Макарова модернизированный
ППЭ	—	пенополиэтилен
ПСМ	—	пистолет специальный малокалиберный
ПЭ	—	поражающий элемент
СВД	—	снайперская винтовка Драгунова
СВМ	—	сверхвысокомодульный материал
СИБ	—	средства индивидуальной бронезащиты
ТМО	—	термомеханическая обработка
ТТ	—	пистолет Тульский Токарева
ТУС	—	термоупрочненный сердечник
УБЖ	—	универсальный бронезилет
ЭДП	—	электродуговой переплав
ЭШП	—	электрошлаковый переплав
АСР	—	автоматический пистолет Кольта
АР	—	бронепойная пуля
FMJ	—	свинцовая пуля в сплошной металлической оболочке
JHP	—	полуоболочечная пуля
JSP	—	пуля в оболочке с мягким наконечником
LRN	—	пуля с закругленной головной частью
S&W	—	американская компания, производитель огнестрельного оружия Smith & Wesson

Глава 1

Основные понятия и определения

1.1. Пули стрелкового оружия

Наиболее опасными поражающими факторами на поле боя для военнослужащих являются пули, осколки и ударные волны от близких взрывов зарядов взрывчатых веществ (ВВ). В современных условиях те же поражающие факторы несут угрозу жизни сотрудникам правоохранительных органов при проведении ими специальных операций. Элементы боевой экипировки, обеспечивающие защиту от указанных поражающих факторов, называют *средствами индивидуальной бронезащиты (СИБ)*. В состав СИБ входят бронеодежда, шлем и щит. В последнее время разработаны взрывозащитные комплекты для разминирования различных взрывных устройств.

Пули современного стрелкового оружия весьма разнообразны (рис. 1.1) и обладают различной пробивной способностью. Основные конструктивные характеристики наиболее распространенных патронов и пуль приведены в [1, 2]. Пули состоят из сердечника, свинцовой рубашки и биметаллической (стальной, плакированной томпаком) оболочки. Пули, у которых оболочка не полностью покрывает сердечник, называют полуболочечными. Сердечник пули может быть свинцовым (иногда для увеличения твердости добавляют сурьму) или стальным, помещенным в свинцовую рубашку. Пробивное действие пули зависит от ее конструкции, общей и удельной кинетической энергии, массы, прочности материала, из которого она изготовлена, а также от прочности преграды. Максимальной пробивной способностью обладают так называемые бронебойные пули, имеющие высокотвердый термоупрочненный сердечник (ТУС) из высокоуглеродистой стали. Известны также бронебойные пули с твердосплавными сердечниками из карбида вольфрама (например, пуля 7Н24), обладающие повышенной пробивной способностью.

Бронебойные пули выстреливаются из длинноствольного оружия и обладают высокой начальной скоростью. В последнее время бронебойные пули начали разрабатывать и для короткоствольного оружия, в частности для пистолетов (например, пуля 7Н21 для пистолета Ярыгина).

Деформируемые низкоскоростные пули со свинцовыми сердечниками обладают значительно меньшей проникающей способностью по сравнению с пулями со стальными сердечниками. В большинстве случаев такие пули используют в полицейском короткоствольном оружии. Основное назначение этих пуль состоит не столько в пробивном, сколько в «останавливающем» действии.

Литература

1. *Концептуальные основы создания средств индивидуальной защиты. Ч. 1. Бронезилеты. Под общ. ред. В. Г. Михеева. М.: Межакадемическое издание «Вооружение. Политика. Конверсия», 2003.
2. *Материалы и защитные структуры для локального и индивидуального бронирования / В. А. Григорян, И. Ф. Кобылкин, В. М. Маринин, Е. Н. Чистяков. М.: Изд-во РадиоСофт, 2008.
3. *ГОСТ Р 50744–95 «Бронеодежда. Классификация и общие технические требования».
4. Стандарт США NIJ Standart-0101.04 «Баллистические характеристики средств индивидуальной защиты» («Ballistic Resistance of Personal Body Armor», редакция 2000 г.).
5. Средства индивидуальной бронезащиты (Руководство службы). М.: Братишка, 2004.
6. *Сильников М. В., Химичев В. А.* Средства индивидуальной бронезащиты: Учеб. пособие. СПб.: Фонд «Университет», 2000.
7. Частные вопросы конечной баллистики / В. А. Григорян, А. Н. Белобородько, И. Ф. Кобылкин, Н. С. Дорохов. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006.

Контрольные вопросы

1. Какая существует классификация пуль стрелкового оружия?
2. Почему большинство пистолетных и револьверных пуль имеют свинцовые сердечники?
3. Чем отличаются бронебойные пули от небронебойных?
4. Какие вы знаете модели осколков, используемые для определения противоосколочной стойкости защитных структур бронеодежды?
5. Какой Российский стандарт регламентирует средства индивидуальной бронезащиты?
6. Какие новые средства поражения включены в новую редакцию российского стандарта на бронеодежду?
7. Какие существуют классы защитных структур по российскому стандарту на бронеодежду?
8. Сравните российский и зарубежные стандарты на бронеодежду.
9. Как устроены бронезилеты, бронешлемы и бронешиты?
10. Какие типы брони используют для локальной защиты автомобильной и авиационной техники?
11. Какие уровни бронезащиты легкой бронетехники и методы ее оценки вам известны?

Глава 2

Текстильная броня

2.1. Материалы текстильной брони

Основой текстильной брони являются высокопрочные высокомодульные синтетические волокна. Полимеры, из которых получают такие волокна, делятся на жестко- и гибкоцепные. Примеры жесткоцепных — ароматические полиамиды: полипарафенилентерефталамид (Кевлар, США; Тварон, Голландия), полиамидобензимидазол на основе гетероциклического парадиамина и терефталоилхлорида (СВМ, Русар, Армос, Россия) и др. Волокна Русар и Армос имеют самые высокие механические свойства среди всего семейства параарамидных волокон. Прочные ковалентные связи, соединяющие с помощью амидных групп —CO—HN— ароматические кольца как в продольном, так и в поперечном направлениях (рис. 2.1), придают длинномерным макромолекулам жесткость.

Средние физико-механические характеристики параарамидных волокон [1]: плотность $\rho_m = 1,45 \dots 1,47 \text{ г/см}^3$; модуль упругости (динамический) $E = 100 \dots 150 \text{ ГПа}$; прочность на растяжение $\sigma_p \cong 3,5 \text{ ГПа}$; удлинение при разрыве $\epsilon_p \cong 3,5 \%$. Точные значения соответствующих характеристик для различных параарамидных волокон приведены в табл. 2.1.

Сочетание высокого модуля упругости и относительно низкой плотности полимера приводит к очень высоким значениям продольной скорости упругих волн в волокнах $c = \sqrt{E/\rho_m} = 9 \dots 10 \text{ км/с}$, обеспечивающей быстрое превращение кинетической энергии пули в работу деформирования достаточно большого объема защитного материала, что наряду с исключительно высокой прочностью волокон на растяжение определяет эффективность текстильной брони.

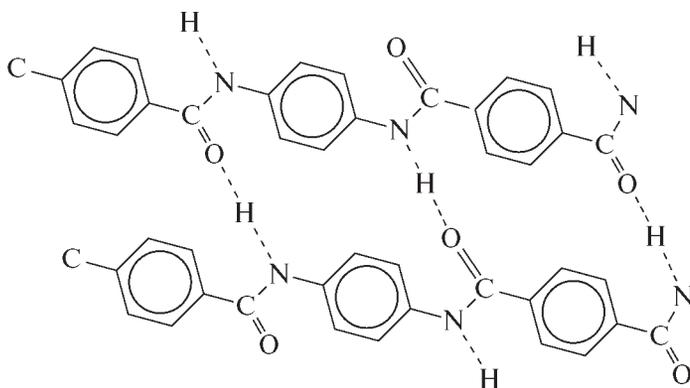


Рис. 2.1. Структура параарамидной макромолекулы

Литература

1. **Перепелкин К. Е.* Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты. СПб.: Научные основы и технологии, 2009.
2. **Легкие баллистические композиты / Под ред. А. Бхатнагара.* М.: Изд-во Техносфера, 2011.
3. **Папков С. П.* Полимерные волокнистые материалы. М.: Химия, 1986.
4. **Концептуальные основы создания средств индивидуальной защиты. Ч. I. Бронезилеты / Под общ. ред. В. Г. Михеева.* М.: Межакадемическое издательство «Вооружение. Политика. Конверсия», 2003.
5. *Бузов Б. А., Алыменкова Н. Д.* Материаловедение в производстве изделий легкой промышленности (швейное производство). М.: Издательский центр «Академия», 2004.
6. *Рыбин А. А., Летников А. Ю., Сидоров И. И.* Экспериментальный анализ механического поведения полимерных нитей в исходном состоянии и в составе тканей при импульсных нагрузках // Вопросы оборонной техники. Сер. 15. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. 2001. Вып. 3(125) — 4(126).
7. *Григорян В. А., Дашевская О. Б., Чухин Б. Д., Хромушин В. А.* Перспективы совершенствования тканевой защиты для создания средств индивидуальной бронезащиты // Актуальные проблемы защиты и безопасности: труды 3-ей Всероссийской научно-практической конференции: В 2 т. Т. 2. СПб, 2000.
8. *Ha-Minh C., Boussu F., Kanit T., Crepin D.* Effect of Friction on the Ballistic of 3D Warp Interlock Fabric: Numerical Analysis // 26-th Intern. Symp. on Ballistics. Miami. USA. 2011.
9. *Egress R., Carbajal L., Deacyne C.* Non-orthogonal Kevlar Fabric Architectures for Body Armor Application. Miami. USA. 2011.

Контрольные вопросы

1. Дайте общую характеристику сверхвысокопрочных и сверхвысокомодульных полимерных материалов текстильной брони.
2. Каковы технология получения и свойства параарамидных волокон и нитей?
3. Какова технология получения и свойства волокон из сверхвысокомолекулярного полиэтилена?
4. Какие наиболее распространенные отечественные и зарубежные текстильные бронематериалы вам известны, дайте их сравнительную характеристику.
5. Какие новые сверхвысокопрочные и сверхвысокомодульные полимерные материалы вы знаете?
6. Метрология и прочность волокнистых материалов.
7. Назовите типы переплетений нитей в баллистических тканях и дайте их сравнительную характеристику.
8. Каковы прочностные характеристики баллистических тканей как ортотропных материалов?
9. Зависит ли баллистическая стойкость текстильных бронепакетов от типа переплетения нитей и их подвижности в слоях ткани?
10. Почему большинство отечественных баллистических тканей для бронезилетов имеют саржевое переплетение?
11. Нетканые одномерные материалы, применяемые в мягкой бронезащите. Чем различаются технологии «Шилд» и «Дайнема» производства таких материалов?

3.1. Начальная стадия взаимодействия пули с текстильной броней

Как преграда текстильная броня представляет собой сложную дискретную структуру с внутренними степенями свободы, поскольку нити, из которых состоит текстильный бронепакет, обладают способностью к смещению как в направлении воздействия пули, так и в плоскости ткани. Именно способность нитей ткани испытывать смещение при ударно-проникающем воздействии пули обеспечивает возможность преобразования кинетической энергии пули в энергию упругого растяжения нитей ткани.

Анализ экспериментов позволяет выделить следующие стадии взаимодействия пули с многослойным текстильным бронепакетом [1].

1. Начальная стадия взаимодействия — уплотнение ткани в лицевых слоях пакета, сжатие и ускорение материала в направлении движения пули. Разрушение нитей ткани на этой стадии, иногда называемое раздавливанием,

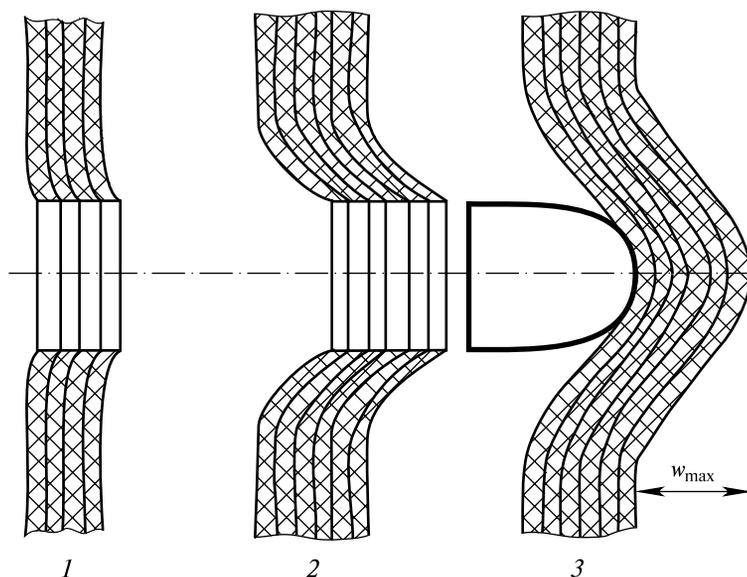


Рис. 3.1. Структура текстильного бронепакета после торможения пули:

1 — лицевые слои бронепакета; 2 — срединные слои бронепакета; 3 — тыльные слои бронепакета

Таблица 3.6

Пределы пробития v_{50} и стандартные отклонения σ_{v50} для многослойных пакетов из СВМПЭ Дайнема UD-SB31

Количество листов/угол воздействия	Пуля M882		Стальной цилиндр	
	v_{50}	σ_{v50}	v_{50}	σ_{v50}
10 слоев/ 0°	371	15,9	294	24,4
10 слоев/ 45°	262	12,7	283	18,4
20 слоев/ 0°	474	4,7	420	12
20 слоев/ 45°	564	35,4	364	25,1
30 слоев/ 0°	577	2,9	496	8,7
30 слоев/ 45°	637	27,4	458	46,2

Таким образом, влияние угла воздействия неоднозначно и не всегда возможно предсказать приведет ли отклонение направления обстрела от нормали к увеличению или к уменьшению баллистической стойкости бронепакетов.

Литература

1. Харченко Е. Ф. Новые представления о механизме взаимодействия текстильных материалов с пулями и осколками при проектировании высокоэффективных бронематериалов // Вопросы оборонной техники. Сер. 15. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. 2004. Вып. 3(136) — 4(137).
2. Панков С. П. Полимерные волокнистые материалы. М.: Химия, 1986.
3. Прочность и разрушение при кратковременных нагрузках / Х.А. Рахматулин, Е.И. Шемякин, Ю.А. Демьянов: учеб. пособие. М.: Университетская книга; Логос, 2008.
4. Сагомонян А. Я. Волны напряжения в сплошных средах. М.: Изд-во МГТУ, 1985.
5. Walker J. D. Constitutive Model for Fabrics with Explicit Static Solution and Ballistic Limit // Proceedings of the Eighteenth International Symposium on Ballistics. San Antonio, USA. 1999.
6. Walker J. D. Ballistic Limit of Fabrics with Resin // Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Ballistics. Interlaken, Switzerland. 2001.
7. Porval P. K., Phoenix S. L. Modeling System Effects in Ballistic Impact into multi-Layered Fibrous Materials for Soft Body armor // Intern. Journal of Fracture. 2005. № 10.
8. Тимошенко С. П., Войновский-Кригер С. Пластины и оболочки. М.: Наука, 1966.
9. Бова В. Г., Тихонова А. И., Ржевцева Ю. И. Взаимодействие групп нитей с тканями разных текстильных переплетений // Вопросы оборонной техники. Сер. 15. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. 2005. Вып. 3(140) — 4(141).
10. Bazhenov S. L. Dissipation of energy by bulletproof aramid fabric // Journal of Material Science. 1997. Vol. 32, pp. 4167—4173.
11. Ahmad M. R., Ahmad W. Y., Saleh J., Samsury A. Performance of Natural Rubber Coated Fabrics under Ballistic Impact // Malaysian Polymer Journal. 2007. Vol. 2. № 1.
12. Lee Y. S., Wetzel E. D Wagner N. J. The Ballistic Impact Characteristics of Kevlar Woven Fabrics Impregnated with Colloidal Shear Thickening Fluid // Journal of Material Science. 2003. Vol. 38, pp. 2825—2833.

13. Protective fabrics utilizing shear thickening fluids (STFs) // The 4-th Conference on Safety and Protective Fabrics. USA. Pittsburg. 2004.

14. US patent 5776839. USA. Dilatant Powder Coated Fabric and Containment Articles Formed Therefrom / Dishler L., Moer T. T., Henson J. B. 1998.

15. Харченко Е. Ф., Зеленов Н. А. О разложении энергии пули на составляющие при взаимодействии с текстильными бронематериалами // Вопросы оборонной техники. Сер. 15. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. 2005. Вып. 3 (140) — 4 (141).

16. Ломов С. В. Расчетное прогнозирование защищающей способности СИВ: Тр. Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы защиты и безопасности». СПб.: НПО СМ. 1999.

17. Bonong Gu. Ballistic Penetration of Conically Cylindrical Steel Projectile into Plain-woven Fabric Target — A Finite Element Simulation // Journal of Composite Materials. 2004. Vol. 38. № 22.

18. Yen C., Scott B., Cheeseman B. A Comparison between Experiment and Numerical Simulation of Fabric Ballistic Impact // Proceedings of the Twenty Third International Symposium on Ballistics. Tarragona. Spain. 2007.

19. Сапожников С. Б., Долганина Н. Ю., Сахаров С. А. Моделирование динамики взаимодействия ударника и многослойного тканевого пакета // Вопросы оборонной техники. Сер. 15. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. 2005. Вып. 3 (140) — 4 (141).

20. Григорян В. А., Кобылкин И. Ф., Маринин В. М. Энергетический подход к определению предельной скорости пробития текстильных бронепакетов // Девятая Международная научно-практическая конференция «Новейшие тенденции в области конструирования и применения баллистических материалов и средств защиты». М.: НИИ стали, 2007.

21. Vespalov I. A., Grigoryan V. A., Kobylkin I. F. Comparative evaluation of ballistic resistance of textile armor treated packages against steel and lead bullets // Techniczne wyroby wókiennicze. 2009. № 2—3, pp. 58—63.

22. Rupert N. L. 9-mm Baseline Data Set for the Calibration of Fabric Penetration Models // Proceedings of the Twentieth International Symposium on Ballistics. Orlando. USA. 2002.

23. Cunniff P. M. A Design Tool for the Development of Fragmentation Protective Body Armor // Proceedings of the Eighteenth International Symposium on Ballistics. San Antonio. USA. 1999.

24. Маринин В. М., Хромушин В. А. Определение характеристик энергоемкости защитных конструкций на основе текстильной брони при баллистическом ударе // Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны: Тр. Международной конференции «VII Харитоновские тематические научные чтения». Саров: РФЯЦ—ВНИИЭФ, 2005.

25. Bourget D., Pageau G. The Effective Ballistic Resistance Concept, a New Approach for Assessing the Average Energy Absorption Capability of Armor Materials // Proceedings of the Eighteenth International Symposium on Ballistics. San Antonio. USA. 1999.

26. Сильников М. В., Химичев В. А. Средства индивидуальной бронезащиты: Учеб. пособие. СПб.: Фонд «Университет», 2000.

27. Концептуальные основы создания средств индивидуальной защиты. Часть I. Бронжилеты. Под общ. ред. В. Г. Михеева. М.: Межакадемическое издательство: «Вооружение. Политика. Конверсия», 2003.

28. Сивухин Д. В. Термодинамика и молекулярная физика. Т. 2. Общий курс физики. М.: Наука, 1990.

29. Бузов Б. А., Алыменкова Н. Д. Материаловедение в производстве изделий легкой промышленности (швейное производство). М.: Изд. центр «Академия», 2004.

30. Григорян В. А., Буланова М. Е., Дашевская О. Б., Маринин В. М., Хромушин В. А. Влияние некоторых факторов на противоосколочную стойкость текстильной брони из основных арамидных тканей // Вопросы оборонной техники. Сер. 15. Компози-

ционные неметаллические материалы в машиностроении. 2005. Вып. 3 (140)—4 (141).

31. *Кобылкин И. Ф., Маринин В. М., Беспалов И. А.* Влияние поперечных размеров текстильных бронепакетов на их противоосколочную стойкость // Оборонная техника. 2010. № 1/2. С. 19—23.

32. *Cork. C.* The effect of boundary conditions on the ballistic performance of textile fabrics // Proceedings of the Twenty second international symposium on ballistics. Vancouver. 2005.

33. *Беспалов И. А.* Особенности взаимодействия имитатора осколков с текстильными бронепакетами под углом от нормали // Актуальные проблемы защиты и безопасности: Тр. 14-й Всероссийская научно-практическая конференция Т.1: Технические средства противодействия терроризму. СПб.: Изд-во НПО СМ, 2011. С. 102—106.

34. *Rupert N. L., Blethen W. C.* Dyneema Fabric Data for the Calibration of Fabric Penetration Models // Proceedings of the Twenty five international symposium on ballistics. Beijing. China. 2010.

Контрольные вопросы

1. Каковы механизм взаимодействия пули с текстильной броней, начальная стадия взаимодействия, стадии торможения и проникновения?

2. В чем заключаются начальная стадия взаимодействия пули с текстильным бронепакетом, ударная адиабата текстильного бронепакета, оценка возникающего давления?

3. Как выглядит линейная задача об ударе по отдельной нити, уравнение торможения пули? Ограниченность линейной модели взаимодействия пули с нитью.

4. В чем суть нелинейной задачи об ударе по отдельной нити, продольных и поперечных волнах в нитях? Как выглядит схема формирования силы торможения пули, приближенные соотношения Рахматуллина?

5. Как выглядит схема деформирования единичного слоя ткани, эквивалентные нити. Выведите формулу для силы торможения пули?

6. Как происходит обрыв нитей при поперечном ударе? Какой есть критерий выбора оптимальных характеристик нитей?

7. Как взаимодействует пуля с текстильным бронепакетом конечных поперечных размеров? Чем отличается торможение пули текстильным бронепакетом от торможения спортсмена, выполняющего прыжки на батуте?

8. Проведите энергетический анализ процесса взаимодействия пули с текстильной броней. Как выглядит энергетическая диаграмма взаимодействия.

9. Как рассчитывается предельная скорость пробития текстильного бронепакета недеформируемыми пулями?

10. Каковы соотношения подобия в механике баллистического пробития текстильных бронепакетов?

11. Как рассчитывается предельная скорость пробития текстильного бронепакета деформируемыми пулями?

12. Баллистическая энергоемкость текстильных бронематериалов и критерий выбора оптимальных характеристик баллистических тканей.

13. Как влажность влияет на текстильные бронепакеты и их баллистическую стойкость?

14. Как свойства материала подложки влияют на баллистическую стойкость текстильных бронепакетов?

15. Как поперечные размеры текстильных бронепакетов влияют на их противоосколочную стойкость?

16. Как угол воздействия пули и осколков влияет на баллистическую стойкость текстильных бронепакетов?

Глава 4

Полимерная композитная броня

4.1. Композиционные материалы

Композиционные материалы (КМ) — многокомпонентные материалы, состоящие из сплошной основы (матрицы, связующего) и дискретного армирующего материала. Путем подбора состава и свойств армирующего материала и связующего получают композиционные материалы с необходимым сочетанием физико-механических, эксплуатационных и технологических свойств. Обычно армирующий материал определяет прочностные свойства КМ, а матрица обеспечивает монолитность материала и его сдвиговую прочность, превращает дискретный армирующий материал в единую механическую систему, способствует равномерному распределению напряжений. По структуре композиционные материалы делятся на несколько основных классов: волокнистые (армированы волокнами, нитями, нитевидными кристаллами), слоистые (армированы слоями ткани, пленками, пластинками и другими слоистыми материалами), дисперсно-упрочненные (армированы материалами в виде дисперсных частиц с размерами 0,1... 100 мкм) и нанокompозиты (в их состав входят наночастицы размерами 10... 100 нм).

В защитных структурах СИБ применяют все перечисленные классы КМ. Но наибольшее распространение получили КМ, у которых в качестве связующего используются полимерные материалы, а в качестве армирующего материала — нити, жгуты, ткани или нетканые слоистые структуры из синтетических высокомодульных высокопрочных параарамидных или полиэтиленовых волокон. Такие КМ относятся к группе волокнистых или слоистых КМ, сокращенно их называют органопластиками. Органопластики применяются для изготовления шлемов и энергоемких жестких подложек комбинированной, например, керамико-органопластиковой многослойной брони.

4.2. Органопластики

Общая характеристика армирующих материалов органопластиков — синтетических высокомодульных высокопрочных параарамидных или полиэтиленовых волокон и изготовленных из них нитей и тканей была дана в главе 2. Поэтому здесь коротко остановимся на свойствах связующих материалов, во многом определяющих не только технологию изготовления соответствующих защитных структур, но и их баллистическую стойкость.

Полимерные связующие материалы делятся на два основных класса: терморективные и термопластичные [1, 2]. Первые представляют собой вязкие жидкости (при температуре переработки), которые после пропитки армиру-

непробития (4.5) выпуклой оболочки получаем многопараметрическое неравенство [20], связывающее конструктивные характеристики оболочки шлема — R , b , $m_{т.п}$; физико-механические характеристики нитей текстильной основы — c , ϵ_p ; изгибный модуль упругости органопластика E и состав органопластика — ξ с характеристиками средства поражения — m , d_p , $w_{доп}$:

$$\frac{Kc\epsilon_p^{оп}}{\sqrt{1+K\xi}} \left(\frac{m_{т.п}d_p^2}{m} \right)^{1/3} \geq 2\sqrt{\frac{\pi\eta Eb^{5/2}w_{доп}^{3/2}}{mR}}. \quad (4.7)$$

В практических расчетах изгибный модуль упругости E в первом приближении можно определить с помощью смесевой формулы (4.1).

В качестве критерия оптимальности конструкции бронешлема следует использовать условие минимальности его массы, о которой можно судить по поверхностной плотности оболочки $m_{об} = m_{т.п}(1 + \xi)$.

Литература

1. Композиционные материалы: справочник / В. В. Васильев, В. Д. Протасов, В. В. Болотин; Под общ. ред. В. В. Васильева, Ю. М. Тарнопольского. М.: Машиностроение, 1990.
2. Зеленский Э. С., Куперман А. М., Горбаткина Ю. А., Иванова-Мумжиева В. Г., Берлин А. А. Армированные пластики — современные конструкционные материалы // Российский химический журнал (Журнал Российского химического общества им. Д.И. Менделеева). 2001. Т. XLV. № 2.
3. Харченко Е. Ф. Исследование технологии композитных бронешлемов и перспективы ее совершенствования // Вопросы оборонной техники. Сер. 15. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении, 2002. Вып. 1—2.
4. Walker J. D. Ballistic Limit of Fabric with Resin // Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Ballistics. Interlaken. Switzerland. 2001.
5. Концептуальные основы создания средств индивидуальной защиты. Ч. I. Бронезилеты/ Под общ. ред. В. Г. Михеева. М.: Межакадемическое издательство «Вооружение. Политика. Конверсия», 2003.
6. Харченко Е. Ф. Актуальные проблемы оптимизации существующих и разработки новых структур волоконно-композитных бронематериалов // Вопросы оборонной техники. Сер. 15. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении, 2003. Вып. 1—2.
7. Беспалов И. А., Григорян В. А., Смирнов В. П. Особенности взаимодействия остроконечных пуль с защитными структурами из прессованного сверхвысокомолекулярного полиэтилена // Вопросы оборонной техники. Сер. 15. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. 2013. Вып. 3—4.
8. Scott B. R., Cheesman B. The Mechanics of Projectile Arrest for Compliant Arrest Plyed Unidirectional Laminates // 24 Intern. Symp. on Ballistics. New Orleans. 2008.
9. Scott B. R. Unusual Transverse Compression Response on Woven Ballistic Laminates // 26-th Intern. Symp. on Ballistics. Miami. USA. 2011.
10. Баженов С. Л. О роли трения в диссипации энергии при поперечном баллистическом ударе по ткани // Высокомолекулярные соединения. Сер. Б. 2006. Т. 48. № 10. С. 1916—1920.
11. Кобылкин И. Ф. Механизмы достижения предельных состояний в текстильной и органопластиковой броне при воздействии пуль и осколков: Тез. докладов XII Международной научно-практической конференции «Новейшие тенденции в области

конструирования и применения баллистических материалов и средств защиты». М.: НИИ стали, 2012. С. 81–83.

12. *Кобылкин И. Ф.* Предельные возможности текстильной и органопластиковой брони // Вопросы оборонной техники. Сер. 16. Технические средства противодействия терроризму. 2012. Вып. 9–10.

13. *Van Gorp E. H. M., Van der Loo L. L. H., Van Dingenen J. L. J.* A Model for HPPE Lightweight Add-on Armour // Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Ballistics. Quebec. Canada. 1993.

14. Легкие баллистические материалы/ Под ред. А. Бхатнагара. М.: Техносфера, 2011.

15. *Борисов В. А., Калгин А. Н., Богданов В. В.* Проектирование комбинированного бронешлема // Вопросы оборонной техники. Сер. 15. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. 2003. Вып. 1–2.

16. *Van Hoof J., Cronin D. S., Worswick M. J., Williams K. V., Nandalla D.* Numerical Head and Composite Helmet Models to Predict Blunt Trauma // Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Ballistics. Interlaken. Switzerland. 2001.

17. *Грещук Л. Б.* Разрушение композитных материалов при ударах с малыми скоростями // Динамика удара/ Под ред. С. С. Григоряна. М.: Мир, 1985.

18. *Тимошенко С. П., Войновский–Кригер С.* Пластины и оболочки. М.: Наука, 1966.

19. *Погорелов А. В.* Геометрические методы в нелинейной теории упругих оболочек. М.: Наука, 1967.

20. *Кобылкин И. Ф.* Баллистическая стойкость текстильной и органопластиковой брони // Оборонная техника, 2008. Вып. 1–2.

Контрольные вопросы

1. Что такое полимерная композитная броня, баллистические органопластики и каковы технологии их изготовления?

2. Чем отличается броневой органопластик от используемого, например, в ракетно-космической технике?

3. Как баллистическая стойкость органопластиковой брони зависит от содержания связующего компонента?

4. Механизм пробивания органопластиковой преграды с ограниченно подвижными нитями.

5. По какой схеме заостренные ударники проникают через органопластиковую преграду?

6. Механизмы баллистической стойкости стальных и органопластиковых бронешлемов.

7. Как влияет кривизна оболочки бронешлема на его баллистическую стойкость?

Глава 5

Металлическая броня

5.1. Стальная броня

Лучшие образцы текстильной и органопластиковой брони позволяют обеспечить защиту по второму классу ГОСТ Р 50744—95 при поверхностной плотности защитной структуры 6...8 кг/м². Для защиты от средств поражения, обладающих большей кинетической энергией (автоматные и винтовочные пули), необходимо использовать чисто металлические или комбинированные защитные структуры, включающие в себя металлические, композиционные или керамические бронезащитные элементы.

Металлическая броня как класс включает в себя броневые стали, высокопрочные алюминиевые и титановые сплавы. Наиболее широко используется стальная броня. С ее помощью можно обеспечить защиту вплоть до 5-го класса при толщине бронезащитного элемента 5,0...6,5 мм, что соответствует поверхностной плотности 39...51 кг/м². Большие толщины стальных бронезащитных элементов в индивидуальной бронезащите недопустимы из-за их чрезмерно большого веса.

Броневая сталь представляет собой среднеуглеродистую, среднелегированную сталь мартенситного класса. Высокие прочностные характеристики броневых сталей для СИБ достигаются в результате термообработки, включающей в себя закалку на мартенсит и низкий отпуск. Для того чтобы получить представление о свойствах и структуре броневых сталей, коротко рассмотрим их состав и основные превращения, происходящие при термообработке [1].

Как известно, основой стали является сплав железа Fe с углеродом C. Железо имеет две полиморфные модификации α и γ . Модификация Fe _{α} имеет объемно-центрированную кубическую (ОЦК) решетку и существует в двух интервалах значений температуры: до 911 °С и 1392...1539 °С. Модификация Fe _{γ} имеет гранецентрированную кубическую (ГЦК) решетку и существует в интервале значений температуры 911...1392 °С. ГЦК-решетка более компактна, чем ОЦК-решетка. В связи с этим при фазовом переходе $\alpha \rightarrow \gamma$ объем железа уменьшается приблизительно на 1 %. В составе стали железо и углерод присутствуют в виде растворов и химических соединений, представляющих собой следующие фазы: феррит, аустенит, цементит.

Феррит (Ф, α) — твердый раствор внедрения C в Fe _{α} , имеет ОЦК-решетку. Растворимость углерода в ОЦК-решетке очень низкая: в низкотемпературном феррите — 0,02 %, в высокотемпературном — 0,1 %. Значительная часть атомов углерода вынуждена размещаться на дефектах решетки — вакансиях и дислокациях. Феррит, кроме углерода, растворяет и другие элементы. Азот образует твердый раствор внедрения, а металлы, которыми легируют стали, образуют твердые растворы замещения. Феррит — мягкая пластичная фаза, имеет следующие механические свойства: $\sigma_b = 300$ МПа, $\delta = 40$ %, $\psi = 70$ %, НВ 80...100.

вых в 25 раз превышает стоимость листового проката из бронестали [24]. Титановая броня заметно легче равных по стойкости алюминиевой и стальной брони.

В табл. 5.5 по данным обзора [31] приведены результаты сравнительных оценок противопульной стойкости гомогенных и составных броневых преград при обстреле бронебойной пулей НАТО калибра 7,62 мм. В таблице показатель массовой эффективности E_m равен отношению поверхностной плотности стандартной гомогенной стальной брони к поверхностной плотности обсуждаемой броневой преграды. Из табл. 5.5 видно, что сочетание керамических плиток с алюминиевой броней может быть более эффективно по весу, чем их сочетание со стальной броней высокой твердости (HNS).

Литература

1. Гуляев А. П. Металловедение. М.: Металлургия, 1978.
2. Ван Флек Л. Теоретическое и прикладное материаловедение. М.: Атомиздат, 1975.
3. Кудрявцева Н. С., Легкодох А. М., Матевосян А. П., Фанасова Е. И. Подходы к созданию особо прочных сталей для противопульной брони: Тр. Третьей Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы защиты и безопасности». СПб.: НПО «Спецматериалы», 2000.
4. Концептуальные основы создания средств индивидуальной защиты. Ч. I. Бронезилеты/ Под общ. ред. В. Г. Михеева. М.: Межакадемическое издательство «Вооружение. Политика. Конверсия», 2003.
5. Гладышев С. А., Григорян В. А., Егоров А. И., Заря Н. В. Сверхвысокопрочная броневая сталь марки 44С // Девятая Международная научно-практическая конференция «Новейшие тенденции в области конструирования и применения баллистических материалов и средств защиты». М.: ОАО НИИ стали, 2007.
6. Частные вопросы конечной баллистики / Под ред. В. А. Григоряна. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006.
7. Технические условия ТУ 14-1-4305-96. Лист стальной броневой из стали марки Ц-85. М.: НТЦ ЦНИИ чермет, 1987.
8. Сильников М. В., Кузин А. Ю., Кочетова Н. С., Петров А. В. Тонколистовая броневая сталь марки СПС-43: Тр. Второй Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы защиты и безопасности». СПб, 1999
9. Nahme H., Lach E. Dynamic behavior of high strength armor steels// J. Phys. IV, vol. 7. Coll. C3. Suppl. J. Phys. III. 1997.
10. Steel armor of Swedish Steel Oxelosung Co// JANE's AFV Retrofit Systems 1992—1993 (5-th ed.). 1994.
11. Rapalski E., Frank K., Leavy R., Keele M. Armor steel hardness influence on kinetic energy penetration.// Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Ballistics. Jerusalem. Israel. 1995. Vol.1.
12. Зукас Дж. А., Николас Т., Свифт Х. Ф. и др. Динамика удара. М.: Мир, 1985.
13. Сагомоян А. Я. Динамика пробивания преград. М.: Изд-во МГУ, 1988.
14. Фомин В. М., Гулидов А. И., Сапожников Г. А. Высокоскоростное взаимодействие тел. Изд-во СО РАН, 1999.
15. Сторожев М. В., Попов Е. А. Теория обработки металлов давлением: Учебник для вузов. М.: Машиностроение, 1977.
16. Прочность, устойчивость, колебания: Справочник: В 3 т. Т. 1 / Под ред. И. А. Биргера и Я. Г. Пановко. М.: Машиностроение, 1968.

17. *Cimpoeru S.J.* Analytical modeling of the perforation of multi-layer metallic targets by fragment simulating projectiles // Proceedings of the Twentieth International Symposium on Ballistics. Orlando. USA. 2002.
18. *Гольдсмит В.* Удар. М.: Стройиздат, 1965.
19. Физика взрыва: В 2 т. Т.2. / Под ред. Л.П. Орленко. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002.
20. *Burkins M.* Ballistic performance of Thin Titanium Plates // Proceedings of the Twenty Third International Symposium on Ballistics. Tarragona. Spain. 2007.
21. *Петрова Э.Н., Яньков В.П.* Титановые сплавы как броневые материалы для средств индивидуальной бронезащиты // Девятая Международная научно-практическая конференция «Новейшие тенденции в области конструирования и применения материалов в средствах защиты». М.: ОАО НИИ стали, 2007.
22. *Аризуни А.А., Петрова Э.Н., Степанов Е.И. и др.* Алюминиевая броня для средств индивидуальной защиты // Вопросы оборонной техники. Сер. 15. «Композиционные неметаллические материалы в машиностроении». 2005. Вып. 3—4.
23. *Григорян В.А., Петрова Э.Н., Хромушин В.А., Яньков В.П.* Исследование возможности и путей создания перспективных материалов для средств индивидуальной защиты бойца // Вопросы оборонной техники. Сер. 16. 2003.
24. *Сильников М.В., Химичев В.А.* Средства индивидуальной бронезащиты: Учеб. пособие. СПб.: Фонд «Университет», 2000.
25. Armor plates families. General characteristics. Creusot-Loire Industrie, Division mecanique specialisee, Jan. 1985.
26. *Rolc S., Buchar J.* On the penetration process in steel laminates. // Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Ballistics. San Francisco. USA. 1996. Vol. 3.
27. National Defence. 1974. Vol. 51. № 325.
28. *Kula E. Azrin M.* Thermomechanical processing of ferrous alloys. // Adv. Deformation Process Proc 21-st Sagamore Army Materials Res. Conf. New York. 1974.
29. Patent № 3751307. USA. Thermal-mechanically processed low-alloy steel / *Briggs B.* 1972.
30. Patent № 3694174. USA. Dual property steel armor / *Briggs B.* 1971.
31. *Ogorkiewicz R. M.* Armor for light combat vechicles // Int. Defence Rev. 2002. Vol. 35. pp. 41—45.

Контрольные вопросы

1. Чем отличается броневая сталь от обычной конструкционной стали?
2. Как твердость и прочность броневой стали влияют на ее противоположную стойкость?
3. Какие основные марки отечественной и зарубежной броневой стали вам известны?
4. Механика пробивания металлических бронезащитных элементов.
5. Как рассчитываются предельные скорости пробития металлических бронезащитных элементов?
6. Что такое запреградная скорость? Какова роль текстильного подпора?
7. Титановая броня, составы и марки материалов и их свойства. Применение титановой брони.
8. Алюминиевая броня, составы и марки материалов и их свойства. Применение алюминиевой брони.

Глава 6

КЕРАМИЧЕСКАЯ БРОНЯ

6.1. Керамические бронематериалы

Эффективная защита от высокоэнергетических средств поражения с высокой проникающей способностью — бронебойных винтовочных пуль с термоупрочненными сердечниками (ТУС) (6-й и 6а классы защитных структур по ГОСТ Р 50744—95) — немыслима без использования в качестве элемента защитной структуры керамики — высокотвердого, но очень хрупкого материала.

К керамикам относят материалы, получаемые спеканием или горячим прессованием порошков минеральных веществ. Для изготовления бронеэлементов используют оксидную, карбидную, боридную, нитридную и смесевые керамики. Обычной технологией получения керамических изделий является спекание при высокой температуре предварительно отпрессованных заготовок. С помощью такой технологии получают, например, корундовую керамику (Al_2O_3). Если при спекании происходят химические превращения, то такую керамику называют реакционно-спеченной, например керамика на основе карбида кремния SiC. Спеченные керамики характеризуются небольшой пористостью, ухудшающей ее механические свойства. Малопористое состояние керамических изделий с высоким уровнем механических свойств может быть достигнуто путем горячего прессования исходных порошков при высокой температуре. Например, с помощью горячего прессования при $2200\text{ }^\circ\text{C}$ получают керамику на основе карбида бора B_4C .

Структурно керамика состоит из кристаллической и аморфной фаз, а также пор. Свойства этих фаз и пористость определяют механические свойства керамических бронеэлементов. Чем меньше размеры кристаллических частиц, чем меньше в керамике содержится аморфной фазы, и чем меньше пористость, тем выше прочность и твердость керамики.

Основные механические характеристики керамических материалов, наиболее часто применяемых в многослойных защитных структурах СИБ, приведены в табл. 6.1.

В этой же таблице для сравнения приведены данные для сталей, из которых изготавливают сердечники стальных пуль (сталь 10), ТУС (сталь У12) и среднеуглеродистой среднелегированной стали 45Х. Данные взяты из [1—4]. В отличие от стали, керамика имеет в 2—3 раза меньшую плотность и в среднем в 2 раза больший модуль упругости, что приводит к высоким значениям скорости распространения продольных упругих волн (10... 12) км/с.

Обращает на себя внимание чрезвычайно высокая твердость в сочетании с низкой ударной вязкостью. Именно высокая твердость керамик определяет защищающую способность керамической брони. Для того чтобы понять это, проанализируем силовое взаимодействие деформируемых или разрушающихся (срабатывающих) ударников с высокотвердой преградой.

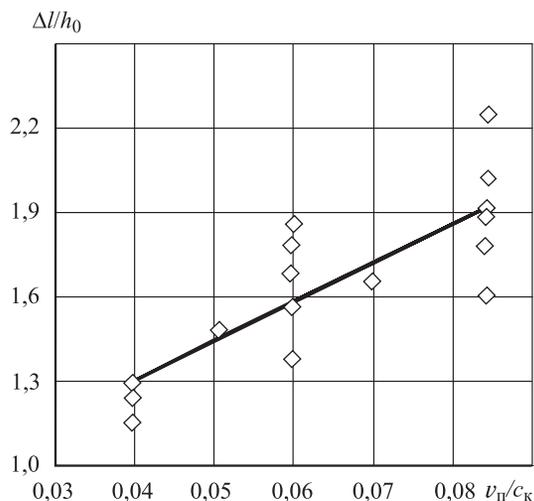


Рис. 6.6. Зависимость величины относительного укорочения сердечников пули Б-32 от их относительной скорости при взаимодействии с преградами из керамики на основе Al_2O_3 и SiC различной толщины [14, 15]: \diamond — экспериментальные точки

части ударника (при прочих равных условиях для заостренных ударников (пуль) оно больше), а также прочностью и акустической жесткостью материала подложки. Интересно отметить, что данное обстоятельство соответствует хорошо известному экспериментальному факту [25] — заостренные сердечники по сравнению с сердечниками с плоским торцом или затупленной головной частью обладают меньшей проникающей способностью при воздействии на многослойные преграды с внешним керамическим слоем.

Литература

1. Частные вопросы конечной баллистики / Под ред. В.А. Григоряна. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006.
2. Добринский Ю. И., Келина И. Ю., Варавва С. Н. Метод исследования баллистических характеристик керамической брони // Вопросы оборонной техники. Сер. 15. 1998. Вып. 1(113)—2(114).
3. Марочник сталей и сплавов / Под ред. В.Г. Сорокина. М.: Машиностроение, 1989.
4. Синани А. Б., Пугачев В. С., Емельянов Ю. А. Использование высокотвердых материалов в легкой бронезащите // Вопросы оборонной техники. Сер. 15. 1996. Вып. 1(113)—2(114).
5. Канель Г. И., Разоренов С. В., Уткин А. В., Фортвов В. Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. М.: «Янус—К», 1996.
6. Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях / Под ред. Н.А. Златина и Г.И. Мишина. М.: Наука, 1974. 344 с.
7. Reijer P. C., Usselstein R. R. A novel flash X-ray technique to determine projectile ceramic armour interaction / Proceedings of the Twelfth International Symposium on Ballistics. San Antonio. USA. 1990.
8. Никифоровский В. С., Шемякин Е. И. Динамическое разрушение твердых тел. Новосибирск: Наука, 1979.

9. Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения. М.: Наука, 1974.
10. Эванс А. Г., Лэнгдон Т. Г. Конструкционная керамика. М.: Металлургия, 1980.
11. Скляр Н. М., Машинская Г. П., Александрова Л. Б. и др. Факторы стойкости броневых комбинированных преград // Вопросы оборонной техники. Сер. 15. 1996. Вып. 3 (115)—4 (116).
12. Гриневич А. В., Ярош В. В. Анализ разработки керамических материалов для лицевого слоя комбинированной защиты // Вопросы оборонной техники. Сер. 15. 1999. Вып. 1—2.
13. Гриневич А. В., Ярош В. В. Особенности разрушения керамики при ударном воздействии // Вопросы оборонной техники. Сер. 15. 1999. Вып. 1—2.
14. Гриневич А. В., Ярош В. В. Дробящий эффект керамического слоя комбинированной брони // Вопросы оборонной техники. Сер. 15. 1999. Вып. 1—2.
15. Елисеев В. С., Кравченко А. Д., Ярош В. В. Исследование баллистической эффективности высокотвердых материалов // Вопросы оборонной техники. Сер. 15. 2001. Вып. 3—4.
16. Galvez F., Cendon D., Sanchez-Galvez V. Experimental and numerical comparison of failure of ceramic tiles impacted by FSP's // Proceedings of the Twenty First International Symposium on Ballistics. Adelaide, Australia. 2004.
17. Высокоскоростное взаимодействие тел / В. М. Фомин, А. И. Гулидов, Г. А. Сапожников. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999.
18. Johnson G.R., Holmquist T.J. An Improved Computational Constitutive Model for Brittle Materials // High Pressure Science and Technology. NY: AIP Press, 1994.
19. Holmquist T.J., Johnson G.R., Grady D.E. High Strain Rate Properties and Constitutive Modeling of Glass // Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Ballistics. Jerusalem. Israel. 1995.
20. Ravid M., Bodner S.R., Chochron I.S. Penetration analysis of ceramic armor with composite material backing // Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Ballistics. Interlaken. Switzerland. 2001.
21. Walker J.D., Anderson Ch.E. An analytical model for ceramic-faced light armors // Proceedings of the Seventeenth International Symposium on Ballistics. Midrand. South Africa. 1998.
22. Гаршин А. П., Гропянов В. М., Зайцев Г. П., Семенов С. С. Керамика для машиностроения. М.: Научтехлитиздат, 2003.
23. Кременчугский М. В., Савкин Г. Г., Малинов В. И. Разработка противопульной керамической брони: В 2 т. Т. 2. Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения. Саров: РФЯЦ — ВНИИЭФ, 2006.
24. Разрушение разномасштабных объектов при взрыве / Под общ. ред. А. Г. Иванова. Саров: РФЯЦ—ВНИИЭФ, 2001.
25. Концептуальные основы создания средств индивидуальной защиты. Ч. I. Бронезилеты / Под общ. ред. В. Г. Михеева. М.: Межакадемическое издательство «Вооружение. Политика. Конверсия», 2003.

Контрольные вопросы

1. Какие керамические бронематериалы вы знаете? Каковы их свойства?
2. Чем определяется баллистическая стойкость керамической брони?
3. Как контактное давление и твердость керамической брони зависят от времени в процессе проникания пули в керамическую преграду?
4. Как ведет себя керамическая броня при ударном воздействии пуль? Механизмы обеспечения высокой противопульной стойкости керамической брони.
5. Энергетический анализ процесса пробивания керамической преграды.
6. Как определить время задержки проникания бронебойных пуль в керамическую преграду по экспериментальным данным укорочения пуль?

Глава 7

Противопульная стойкость многослойных преград с внешним керамическим слоем

7.1. Комбинированная многослойная броня

Защищающая способность преграды по отношению к действию ударно-проникающих средств поражения, например пуль стрелкового оружия, обычно характеризуют ее толщиной или поверхностной плотностью, при которых обеспечивается кондиционный характер поражения преграды. Кондиционному поражению соответствуют не только непробитие преграды, но и отсутствие в ней сквозных трещин. Наиболее эффективными считаются преграды, которые при заданном уровне воздействия средств поражения обеспечивают кондиционное поражение при минимальных массовых и габаритных характеристиках.

Основной проблемой при разработке защитных структур СИБ является обеспечение необходимого уровня их противопульной стойкости при минимальной массе и допустимом тыльном прогибе. Именно требование минимальной массы защиты приводит к использованию в СИБ в качестве брони несколько необычных материалов. Так для защиты от низкоэнергетических средств поражения — револьверных и пистолетных пуль — широко используется текстильная броня из высококомодульных и высокопрочных полиарамидных или полиэтиленовых нитей (1-й и 2-й классы защитных структур по ГОСТ Р 50744—95 [1]). Эффективная защита от высокоэнергетических средств поражения с высокой проникающей способностью — бронебойных винтовочных пуль с ТУС (класс ба защитных структур по ГОСТ Р 50744—95) — немыслима без использования в качестве элемента защитной структуры керамики — высокотвердого, но очень хрупкого материала.

В настоящее время ведутся исследования по созданию сверхпрочных металлических, керамических и композитных броневого материалов с применением нанотехнологий. В ближайшее десятилетие можно ожидать появления принципиально новых материалов для баллистической защиты. Однако комбинированные многослойные преграды с внешним керамическим слоем и тогда сохранят свое значение для защиты от бронебойных пуль, обладающих максимальной проникающей способностью, в ряду других боеприпасов стрелкового оружия.

Настоящий раздел посвящен расчетному анализу противопульной стойкости многослойных защитных структур СИБ с внешним керамическим слоем. В общем случае анализируемые защитные структуры состоят из керамического, текстильного или органопластикового и металлического слоев, соединенных между собой.

Защищающие способности керамической, текстильной, органопластиковой и металлической брони были рассмотрены ранее. Защитное действие внешнего керамического слоя (см. гл. 6) сводится к разрушению головной

преград как со сплошным, так и с дискретным лицевым керамическим слоем. Она описана в работе [16].

Механизмы взаимодействия бронебойных пуль с дискретной керамической броней достаточно сложны и многообразны. На основании численного моделирования, выполненного И. А. Беспаловым, удалось свести многообразие этих механизмов к следующим [17].

1. При попадании пули в центр цилиндра она разрушается примерно так же, как и при ударе о плоскую пластину: фрагменты сердечника и оболочки разлетаются в стороны. При этом керамический элемент приобретает существенную скорость в направлении движения пули (100 ... 200 м/с). Время задержки проникания в керамику линейно зависит от толщины керамического слоя (высоты цилиндров) и меньше, чем для плоского слоя такой же толщины.

2. При попадании пули в стык двух цилиндров она разрушается так же, как и при ударе в центр цилиндра, но имеет несколько большую запреградную скорость.

3. При смещении точки попадания пули от центра цилиндра она разрушается так же, как при ударе в центр, но сердечник приобретает при этом некоторую угловую скорость поперечного вращения: за время взаимодействия он отклоняется от первоначальной траектории на $7 \dots 10^\circ$. Керамический элемент также приобретает небольшую угловую скорость поперечного вращения, разрушается он раньше, чем начинает воздействовать на соседние элементы за счет своего поворота.

4. При попадании пули между тремя цилиндрами разрушается ее головная часть, но ее фрагменты не разлетаются в стороны, а продолжают движение вперед приблизительно с той же начальной скоростью. Основная же часть сердечника разрушается слабо, но тормозится сильнее, чем при попадании в центр цилиндра. Это связано с тем, что сердечник вовлекает в движение большую массу керамики (три цилиндра), а воздействие на него самого сводится практически к всестороннему сжатию в плоскости бронепанели.

Литература

1. ГОСТ Р 50744—95. Бронеодежда. Классификация и общие технические требования. М.: Изд-во стандартов, 1995.
2. *Кобылкин И. Ф., Селиванов В. В., Новиков С. А.* Взрывные технологии. М.: Изд-во МГТУ им Н. Э. Баумана, 2008.
3. *Galvez F., Cendon D., Sanchez-Galvez V.* Experimental and numerical comparison of failure of ceramic tiles impacted by FSP's // Proceedings of the Twenty First International Symposium on Ballistics. Adelaide. Australia. 2004.
4. *Ravid M., Bodner S. R., Chochron I. S.* Penetration analysis of ceramic armor with composite material backing // Proceedings of the Nineteenth First International Symposium on Ballistics. Interlaken. Switzerland. 2001.
5. *Walker J. D., Anderson Ch. E.* An analytical model for ceramic-faced light armors // Proceedings of the Seventeenth First International Symposium on Ballistics. Midrand. South Africa. 1998.
6. *Chochron I. S., Sanchez-Galvez V., Walker J. D., Anderson C. E.* Analytical study and optimization of ceramic composite armours to a range of projectile threats // Proceedings of the Seventeenth First International Symposium on Ballistics. Midrand. South Africa. 1998.

7. *Chochron I. S., Sanchez-Galvez V.* An analytical model to design ceramic/composite armours // Proceedings of the Seventeenth First International Symposium on Ballistics. Midrand. South Africa. 1998.
8. *Zaera R., Galvez F., Rodriguez J.* Designe ceramic-metall armours against medium caliber projectiles // Proceedings of the Seventeenth First International Symposium on Ballistics. Midrand. South Africa. 1998.
9. *Сагомонян А. Я.* Проникание. М.: МГУ, 1974.
10. *Григорян В. А., Дашевская О. Б., Егоров А. И., Хромушин В. А.* Баллистические свойства органо-керамических панелей для использования в средствах индивидуальной защиты: Тр. 8-й Всероссийской конференции «Актуальные проблемы защиты и безопасности». Т. 1. СПб.: НПО СМ, 2005.
11. *Reijer P. C., Usselstein R. R.* A novel flash X-ray technique to determine projectile ceramic armour interaction // Proceedings of the Twelfth International Symposium on Ballistics. San Antonio. Texas. 1990.
12. *Ogorkiewicz R. M.* Armor for light combat vechicles // Int. Defence Rev. 2002. Vol. 35, pp. 41—45.
13. Концептуальные основы создания средств индивидуальной защиты. Ч. I. Бронезилеты / Под общ. ред. В. Г. Михеева. М.: Межакадемическое издательство «Вооружение. Политика. Конверсия», 2003.
14. *Голубева Н. А., Ленский В. В., Келина И. Ю., Чевыкалова Л. А.* Комбинированные бронепанели: Тр. XII Международной научно-практической конференции «Новейшие тенденции в области конструирования и применения материалов и средств защиты». М.: НИИ стали, 2012. С. 45—47.
15. Patent US 2007/0089597. F41H 5/02. Lightweight Composite Armor / Zheng-Dong Ma. 2007.
16. *Беспалов И. А., Кобылкин И. Ф.* Комплексная инженерная методика оценки пулестойкости многослойных защитных структур с лицевым керамическим слоем // Вопросы оборонной техники. Сер. 15. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. 2013. Вып. 3—4.
17. *Григорян В. А., Беспалов И. А., Кобылкин И. Ф.* Баллистическая стойкость многоэлементных керамических бронепанелей: Мат. XXXVII Всероссийской научно-технической конференции «Проектирование систем». М.: Изд-во ФГУП «НТИЦ «Информтехника», 2010. С. 310—313.

Контрольные вопросы

1. Чем определяется противопульная стойкость многослойных преград с внешним керамическим слоем?
2. Энергетический и силовой анализ процесса пробития многослойной защитной структуры.
3. В чем суть инженерной методики расчета противопульной стойкости многослойной защитной структуры с внешним керамическим слоем?
4. Опишите физический смысл дифференциальных уравнений, описывающих торможение пули на жесткой керамической преграде и проникание пули в разрушенную керамику.
5. Какие существуют методы повышения живучести керамических защитных структур? Что такое дискретная синтактная керамика?
6. Опишите механизмы взаимодействия пуль с дискретной керамической преградой.

Глава 8

Прозрачная броня

8.1. Прозрачные бронематериалы

Прозрачная противопульная и противоосколочная броня используется для изготовления пулезащитных окон автомобилей, самолетов и вертолетов, банков и офисов. В СИБ прозрачная броня применяется для изготовления забрал для шлемов и смотровых окон бронещитов.

Кроме противопульной стойкости прозрачная броня должна обладать необходимым уровнем прозрачности.

В качестве материалов для изготовления прозрачной брони наиболее широко используются неорганические стекла (в дальнейшем — стекла) и прозрачные полимеры, которые называют органическими стеклами. Более высокими защитными свойствами обладают высокотвердые прозрачные керамические материалы: сапфир — монокристалльный оксид алюминия Al_2O_3 , поликристаллический оксидонитрид алюминия $\text{Al}_{23}\text{O}_{27}\text{N}_5$, магнийалюминиевый шпинель MgAl_2O_4 [1]. Широкому применению этих материалов в СИБ препятствует их высокая стоимость.

Стекло — макроскопическое однородное аморфное вещество, получаемое при затвердевании сплава стеклообразующих оксидов: SiO_2 , Al_2O_3 , B_2O_3 , P_2O_5 и др. Для понижения температуры плавления к стеклообразующим оксидам добавляют оксиды щелочных металлов вида Me_2O и MeO (например, Na_2O , K_2O , CaO и др.). В зависимости от состава стекла подразделяют на силикатные, алюмосиликатные, боросиликатные, алюмоборосиликатные и т. д. Плотность обычных стекол изменяется в диапазоне 2,2... 3,0 г/см³. Кварцевое стекло имеет плотность 2,2 г/см³; щелочные силикатные стекла (оконные) — 2,5 г/см³; боросиликатное стекло (более легкое и более прочное) — 2,2 г/см³.

Силикатные стекла имеют очень сложную полимерно-кристаллитную структуру (рис. 8.1 [2]): основу образует пространственная сетка из однородных звеньев — полиэдров, а кристаллиты SiO_2 являются частью этой сетки. В такой структуре нельзя выделить направления скольжения, поэтому стекла являются очень хрупким, твердым и жестким материалом.

При деформации вплоть до момента разрушения стекло можно считать упругим материалом, подчиняющимся закону Гука. Теоретическая прочность стекла достигает 10 ГПа, но фактическая прочность на разрыв в 100 — 1000 раз ниже. Согласно теории Гриффитса, столь значительное различие между теоретической и фактической прочностью стекла обусловливается наличием микротрещин, образующихся как внутри, так и на поверхности образца. При растяжении образца стекла на краях микротрещин возникают большие перенапряжения (эффект концентрации напряжений), которые и вызывают

2) баллистическая стойкость преграды существенно возрастает при увеличении толщины керамического слоя до 4 мм, при дальнейшем ее увеличении до 8 мм прирост баллистической стойкости невелик;

3) полностью предотвратить проникание через прозрачную преграду с размерами 150 × 150 мм удается при толщине керамического слоя, большей 4 мм, и суммарной поверхностной плотности преграды 56... 59 кг/м².

Баллистическая стойкость многослойной прозрачной преграды с высокотвердым лицевым слоем зависит не только от его твердости, но и от жесткости следующих слоев, поперечных размеров преграды, длины сердечника и других параметров.

Литература

1. *Pallet P. J., Gilde G. A., Dehmer P. G.* Transparent Armor // The AMPTIC Newsletter. 2000. Vol. 4. № 3.

2. *Сингх Брар Н., Эспиноза Х.Д.* Обзор микрокинетики волн разрушения в силикатных стеклах // Химическая физика. 1998. № 7.

3. *Власов А. С., Зильбербранд Е. Л., Кожушко А. А.* Принципы прозрачной защиты от высокоскоростного удара: Тр. Международной конференции «VII Харитоновские научные чтения». Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны. Саров: РФЯЦ—ВНИИЭФ, 2005.

4. *Каннель Г. И., Разоренов С. В., Фортвов В. Е.* Волны разрушения в ударно-сжатом стекле: Мат. XIII симпозиума по горению и взрыву. Черноголовка. 2005.

5. *Галахов А. В., Зеленский В. А., Альмов М. И.* Проблемы создания прозрачной броневой керамики из оксинитрида алюминия: Мат. XII Международной научно-практической конференции «Новейшие тенденции в области конструирования и применения баллистических материалов и средств защиты». М.: НИИ стали. 2012. С. 27—30.

6. *Strassburger E.* Influence of Ceramic Thickness on the Ballistic Efficiency of Ceramic—Glass—Plastics Composites // Proceedings of the Twenty Third International Symposium on Ballistics. Tarragona. Spain. 2007.

Контрольные вопросы

1. Какие прозрачные бронематериалы вы знаете? Каковы их свойства?
2. Охарактеризуйте взаимосвязь микроструктуры стекла и его прочности и опишите способы его упрочнения.
3. Какие прозрачные керамические материалы вам известны и как их применяют в бронезащите.
4. Какие прозрачные полимеры вам известны и как их применяют в бронезащите?
5. Чем обеспечивается баллистическая стойкость многослойных прозрачных преград триплексов? Роль тыльного полимерного слоя.
6. Какие существуют перспективные материалы прозрачной брони? Какова баллистическая стойкость многослойной прозрачной преграды с высокотвердым лицевым слоем?

Глава 9

Использование наноматериалов в бронезащите: возможности и перспективы

9.1. Прочностные свойства наноструктурированных металлов и сплавов

Возможность применения того или иного материала для изготовления легкой брони определяется комплексом свойств, главными из которых являются прочностные характеристики (модуль упругости, твердость, пределы текучести и прочности), предельное удлинение и, конечно, плотность материала. Поскольку броня при интенсивном локализованном динамическом воздействии высокоскоростных пуль и осколков работает в экстремальных условиях, для ее изготовления обычно используют материалы с экстремально высокими прочностными характеристиками и по возможности низкой плотностью. К таким материалам относят рассмотренные выше синтетические высокомодульные материалы и изготавливаемые на их основе полимерные композиционные материалы, высокопрочные металлические сплавы: бронестали, титановые и алюминиевые броневые сплавы, высокотвердые керамики и стекла.

Необходимость снижения массы защитных структур СИБ при сохранении или даже увеличении их защищающей способности приводит к разработке новых материалов с новыми химическим и фазовым составами и структурами. В конце XX в. возникло новое направление кардинального улучшения функциональных свойств конструкционных материалов за счет формирования субмикроструктурной структуры с размером зерен 100...1000 нм и нанокристаллической структуры, для которой размер зерен не превышает 100 нм. Для получения объемных наноматериалов, например бронепластин, можно использовать порошковые технологии — компактирование нанопорошков, кристаллизацию из аморфного состояния и интенсивную пластическую деформацию [1, 2].

Механические свойства поликристаллических материалов существенно зависят от размера зерен δ . В общем случае связь между пределом текучести и размером зерна описывается соотношением Холла — Петча: $\sigma_{\tau} = \sigma_{\tau_0} + \frac{k}{\sqrt{\delta}}$, с различным значением постоянной k для субмикроструктурных и нанокристаллических материалов. Для материалов с субмикроструктурной структурой рост прочности и твердости с уменьшением размера зерен обусловлен увеличением площади границ раздела, которые являются препятствием для движения дислокаций. Высокая прочность нанокристаллических материалов обусловлена низкой плотностью существующих в наночастицах дислокаций и трудностью их размножения. Качественная зависимость пре-

В то же время при пропитывании ткани STF из-за увеличения линейной плотности нитей уменьшается скорость распространения в них продольных волн и, как следствие, уменьшается деформируемый объем пропитанного бронепакета, а следовательно, уменьшается доля энергии пули, преобразуемая в энергию упругого растяжения нитей. В связи с этим предельная скорость пробития многослойного текстильного бронепакета, пропитанного STF, уменьшается.

В плане практического применения текстильной брони, пропитанной твердеющей при быстром сдвиге наносупензией, наиболее перспективным является ее использование для защиты от холодного оружия прокалывающего действия и в составе комбинированных противоосколочных и противопульных текстильных бронепакетов в качестве тыльных слоев, уменьшающих высоту тыльного деформационного купола.

Совершенно другой путь конструирования брони из наноматериалов состоит в использовании так называемых нанотрубок — однослойных и многослойных. Наиболее исследованы углеродные нанотрубки. Углеродную нанотрубку можно представить себе как лист графита из одного или нескольких атомных слоев, свернутый в цилиндр. Однослойная углеродная нанотрубка может иметь диаметр 2 нм и длину 100 мкм, что делает ее квазиодномерной структурой. Углеродные нанотрубки характеризуются высоким модулем упругости — около 1,0 ТПа (у стали 0,21 ТПа) и пределом прочности — до 45 ГПа [9]. Понятно, что использование таких материалов для изготовления или хотя бы упрочнения текстильной или композитной брони способно совершить революцию в разработке защитных структур СИБ.

В [10] сообщается о разработке прозрачной пленки толщиной 50 нм, состоящей из множества многослойных нанотрубок длиной 245 мкм и диаметром 10 нм и имеющей плотность 0,5 г/см³. Пленка обладает высокой прочностью и может быть использована для производства прозрачной брони.

Многие ведущие научно-исследовательские лаборатории мира имеют весьма обширные планы и хорошо финансируемые программы разработки новых бронематериалов на основе использования достижений нанотехнологий [10]. Но сегодня наноматериалы еще весьма дороги, хотя интенсивные поиски новых материалов и технологий производства быстро ведут к их удешевлению [2, 10 — 12].

Литература

1. *Лякишев Н. П., Альмов М. И.* Наноматериалы конструкционного назначения // Российские нанотехнологии. 2006. Т. 1. № 1.
2. *Пул Ч., Оуэнс Ф.* Нанотехнологии. М.: Техносфера, 2005.
3. *Косицин И. И., Сагарадзе В. В., Копылов В. И.* Формирование высокопрочного и высокопластичного состояния в метастабильных аустенитных сталях методом равноканально-углового прессования // ФММ. 1999. т. 88. № 5.
4. *Кайбышев О. А., Утяшев Ф. З.* Сверхпластичность, измельчение структуры и обработка труднодеформируемых сплавов. М.: Наука, 2002.
5. *Шевченко В. Я., Баринов С. М.* Прочность технической керамики. М.: Наука, 1999.
6. *Wagner N. J., Wetzel E. D.* Protective fabrics utilizing shear thickening fluids (STFs) // The 4-th Conference on Safety and Protective Fabrics. USA. Pittsburg. 2004.
7. *Egres R., Decker M. J., Lee Y. S., Wetzel E., Wagner N. and etc.* Stab Resistance of Shear Thickening Fluid (STF) — Kevlar Composites for Body Armor Application / Proceed. of the 24-th Army Science Conf. Orlando. Florida. 2004.

8. Кобылкин И. Ф., Беспалов И. А., Маринин В. М. «Жидкая броня» — миф или реальность. Баллистическая стойкость текстильной брони, пропитанной при быстром сдвиге жидкостью // Оборонная техника. 2009. № 1 — 2.
9. Елецкий А. В. Механические свойства углеродных наноструктур и материалов на их основе // Успехи физических наук. 2007. Т. 177. № 3.
10. Body Armor — Technological Issues // Military Technology. 2006. № 4.
11. Наноматериалы. Нанотехнология. Наносистемная техника. Мировые достижения за 2005 год / Под ред. П.П. Мальцева. М.: Техносфера, 2006.
12. Альтман Ю. Военные нанотехнологии. М.: Техносфера, 2006.

Контрольные вопросы

1. Какие наноматериалы используют для изготовления брони; их физико-механические свойства?
2. Возможности и перспективы использования наноматериалов и нанотехнологий для создания легкой брони.
3. Реология наносuspензий и их применение для увеличения баллистической стойкости текстильной брони.

Глава 10

Заброневое действие высокоскоростного удара пуль при непробитии бронезащиты

10.1. Общая характеристика заброневого действия

Механическая взаимосвязь элементов бронезащиты СИБ с телом человека обуславливает передачу ему части импульса и энергии пули или осколочного поражающего элемента. И, несмотря на то что современные бронежилеты весьма эффективно предотвращают проникание в заброневое пространство пуль и осколков, очень часто их заброневое действие при непробитии бронезащиты приводит к так называемой тупой контузионной травме, локализованной в области воздействия.

Механизмы заброневого действия так или иначе связаны со смещением бронезащиты и проявляются в виде:

- 1) волнового нагружения тела человека ударными волнами, переходящими из бронезащиты в контактирующие с ним мягкие ткани;
- 2) локального ударного нагружения тела человека смещающимся бронезащитой или образующимся в нем деформационным куполом — выпучиной;
- 3) ускорения тела или его части за счет передачи механического импульса бронезащитой, приведенного в движение ударным воздействием пули или осколка.

Тяжесть заброневого контузионного повреждения определяется амплитудными значениями, временем действия и местом локализации нагрузок, действующих на тело человека. Всего степеней тяжести травмы четыре — от I легкой до IV крайне тяжелой (летальной). ГОСТ 50744–95 на защитную бронеодежду допускает заброневое повреждение не выше II (средней) степени тяжести. Общими признаками такой травмы являются: ушибленные раны, очаговые внутримышечные кровоизлияния, единичные очаговые кровоизлияния в брыжейку кишечника, множественные субплевральные кровоизлияния. Вследствие кратковременного болевого шока возможна утрата боеспособности на 3...5 мин. Ограниченная боеспособность наблюдается до 10 сут., полное восстановление наступает через 15...20 сут. Травма III степени тяжести (тяжелая травма), сопровождающаяся закрытыми и открытыми переломами ребер и отростков позвонков, разрывами плевры, кровоизлияниями в паренхиму легких, сердца и другими серьезными повреждениями внутренних органов, не допускается.

Однако для разработчиков бронежилетов требование недопустимости заброневого повреждения выше II степени тяжести мало о чем говорит. Это требование необходимо перевести на язык, понятный инженерам, например: ввести ограничение на амплитуду волны сжатия, нагружающей ткани и внутренние органы некоторой пороговой величиной; ввести допустимые вели-

давления, воздействие которого приводит к повреждениям капиллярной кровеносной системы и биологических тканей на клеточном уровне. В качестве критерия ударно-волнового поражения тканей и органов следует использовать критическое давление, определенное в специальных экспериментах с использованием образцов биологических тканей или желатиновых блоков с добавлением эритроцитарной массы (метод, разработанный ЦНИИТО и Институтом проблем химической физики (Черноголовка)). Повреждающее действие ударной волны определяется по объему разрушения эритроцитов.

Литература

1. Концептуальные основы создания средств индивидуальной защиты. Ч. I. Бронезилеты / Под общ. ред. В. Г. Михеева. М.: Межакадемическое издательство «Вооружение. Политика. Конверсия», 2003.
2. Кочин Н. Е., Кибель И. А., Розе Н. В. Теоретическая гидромеханика: В 2 ч. Ч. 1. М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1963.
3. Grimal Q., Naili S., Watzky A. A. High-frequency Lung Injury Mechanism in Blunt Thoracic Impact // Journal of Biomechanics. 2005. Vol. 38, pp. 1247—1254.
4. Проблемы прочности в биомеханике / Под ред. И. Ф. Образцова. М.: Высшая школа, 1988.
5. Herlaar K., Van Bree J. L., Smerenburg C. Optical Pressure Measurements in Behind Amour Blunt Trauma Experiments // Proceedings of the Twenty First International Symposium on Ballistics. Adelaide. Australia. 2004.

Контрольные вопросы

1. Опишите заброневое действие высокоскоростного удара пуль при непробитии бронезащиты, дайте общую характеристику забронеовой контузионной травмы.
2. Какие методы изучения забронеовой контузионной травмы и допустимые показатели травмирования по глубине кратеров в пластилиновых имитаторах вам известны?
3. Что такое временная полость и как она формируется?
4. Гидродинамическая модель временной полости и динамика ее развития.
5. Ударно-волновое нагружение объекта защиты, оценка давления нагружения при непробитии текстильной брони.
6. Критерий недопущения заброневого травмирования выше второй степени тяжести при непробитии текстильной брони.
7. Как выглядит одномерная биомеханическая модель грудной клетки?
8. Физико-математическая модель заброневого действия в области грудной клетки при непробитии защитных металлических бронеэлементов.

Учебное издание

Кобылкин Иван Федорович
Селиванов Виктор Валентинович

Материалы и структуры легкой бронезащиты

Редактор *К.А. Осипова*
Технический редактор *Э.А. Кулакова*
Художник *А.К. Ездовой*
Корректор *О.В. Калашникова*
Компьютерная верстка *Т.А. Клименко*

В оформлении использованы шрифты Студии Артемия Лебедева.

Оригинал-макет подготовлен в Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Сертификат соответствия № РОСС RU. АЕ51. Н 16228 от 18.06.2012

Подписано в печать 15.09.2014. Формат 70 × 100 1/16.
Усл. печ. л. 15,6. Тираж 500 экз. Заказ №

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
press@bmstu.ru
www.baumanpress.ru

Отпечатано в типографии МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
baumanprint@gmail.com