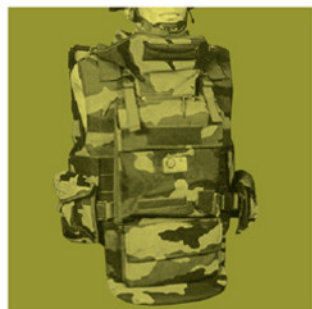


Материалов и технологий

ПОД РЕДАКЦИЕЙ
А. БХАТНАГАРА

Легкие
баллистические
материалы



ТЕХНОСФЕРА



МИР материалов и технологий

Легкие баллистические материалы

Редактор
оригинального издания
Ашок Бхатнагар

Перевод с английского
под общей редакцией
д.ф.-м.н. С.Л. Баженова

ТЕХНОСФЕРА
Москва
2011

УДК 623.445

ББК 68.512

Л 38

Л 38 Легкие баллистические материалы

Под ред. А. Бхатнагара

Москва:

Техносфера, 2011. – 392 с.

ISBN 978-5-94836-163-5

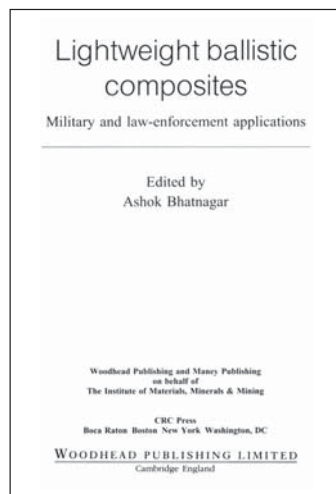
В книге рассмотрен новый класс материалов, из которых делают легкую броню. Производство таких изделий в последнее время выделилось в самостоятельную индустрию. Показаны требования, предъявляемые к легким баллистическим материалам, методы их испытания и сферы применения. Представлены облегченные волокнистые материалы, из которых делают средства индивидуальной защиты – бронежилеты, каски и броню транспортных средств.

Книга состоит из введения и двух основных частей, написанных разными авторами и собранными в единое издание под редакцией А. Бхатнагара. Впервые сделана попытка собрать наиболее полную информацию по данной теме.

Издание поможет специалистам лучше разобраться в новейших легких бронематериалах и взаимозависимости их технических характеристик.

УДК 623.445

ББК 68.512



Original English language edition published by Woodhead Publishing Ltd.

© 2006, Woodhead Publishing Limited.

All Rights Reserved Woodhead Publishing Limited

© 2011, ЗАО «РИЦ «Техносфера», перевод на русский язык,

оригинал-макет, оформление

ISBN 978-5-94836-163-5

ISBN 978-1-85573-941-3 (англ.)

Содержание

Глава 1. Введение (А.П. Мосиava)	15
1.1. История	15
1.2. Волокна	16
1.2.1. Арамидные волокна	17
1.2.2. Сверхвысокомолекулярные полиэтиленовые волокна	18
1.2.3. Волокна ПБО	18
1.3. Волокнистая броня	18
1.4. Бронематериалы на основе ткани	19
1.5. Легкие нетканые бронематериалы	20
1.6. Препреги и пленки	21
1.7. Жесткая и гибкая броня	22
1.7.1. Гибкая броня	22
1.7.2. Жесткая броня	24
1.7.3. Классификация брони	24
1.7.4. Продолжительность эксплуатации жесткой и мягкой брони	24
1.8. Композитная броня с внешним керамическим слоем	25
1.9. Производство	26
1.10. Испытания противобаллистических материалов	27
1.11. Баллистическая угроза	28
1.11.1. Огнестрельное оружие и пули	28
1.11.2. Деформирование ударника	29
1.12. Конструкция противобаллистических изделий	29
1.13. Спецификации и стандарты	30
1.14. Численное моделирование поведения брони	30
1.15. Области применения	31
1.15.1. Мягкие бронежилеты	32
1.15.2. Жесткие нагрудные пластины	33
1.15.3. Противобаллистические каски	33
1.16. Бронезащита транспортных средств	34
1.17. Будущее волокнистой брони	35
1.18. Партнерство поставщиков сырья и производителей брони	35
1.19. Рост объемов производства бронематериалов	35
1.20. Интеграция и слияние отраслей производства бронематериалов	36
1.21. Литература	37
ЧАСТЬ I. ТРЕБОВАНИЯ К МАТЕРИАЛАМ И МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЯ	39
Глава 2. Пули и осколки (А.П. Мосиava)	40
2.1. Введение	40
2.2. Пистолеты и винтовки	40
2.3. Пистолетные и револьверные пули	42
2.4. Осколки	44
2.4.1. Конструкция имитатора осколка	44
2.4.2. Твердость осколка	45

2.4.3. Вес осколка	45
2.4.4. Цилиндрические имитаторы осколка	45
2.4.5. Твердость цилиндрических имитаторов осколка	46
2.5. Пистолетные пули	46
2.5.1. Советский пистолетный боеприпас 7,62 × 25 мм	47
2.5.2. Боеприпас 7,62 × 39 мм советской автоматической винтовки АК 47	48
2.5.3. Боеприпас НАТО калибра 7,62 мм	49
2.5.4. Боеприпас калибра 0.22 дюйма	50
2.5.5. Боеприпас Мосина-Нагана 7,62 × 54R	51
2.5.6. Боеприпас Магнум 0.357	51
2.5.7. Боеприпас Спрингилд 0.30-06	52
2.5.8. Боеприпас парабеллума 9 г 19 мм	53
2.5.9. Боеприпас 5,56 × 45 мм НАТО	54
2.5.10. Боеприпас 5,56 × 45 мм M193	56
2.5.11. Трассирующая пуля	59
2.6. Стрельба различными снарядами	59
2.7. Время выстрела	60
2.8. Факторы, влияющие на потери личного состава	60
2.9. Пробивающая сила и деформация пуль и осколков	61
2.10. Деформация пуль при ударе по броне	62
2.10.1. Тип пули	62
2.10.2. Пули с оболочкой	63
2.10.3. Конструкция пули	65
2.10.4. Нагрузки на пулю	65
2.10.5. Вес пули	66
2.10.6. Скорость пули	66
2.10.7. Нарезной ствол	66
2.10.8. Лобовое сопротивление	67
2.10.9. Кинетическая энергия пули	68
2.10.10. Угол падения пули	68
2.10.11. Длина ствола	68
2.10.12. Нарезной канал ствола	69
2.10.13. Расстояние от среза ствола	69
2.10.14. Бронематериалы	69
2.10.15. Противобаллистические волокна	70
2.10.16. Прочность волокон	70
2.10.17. Скорость продольной волны	71
2.10.18. Трение между волокнами	72
2.10.19. Вязкоупругие свойства волокон	72
2.10.20. Нанесение покрытий на волокна	73
2.10.21. Ориентация волокон	74
2.10.22. Деформирование снаряда	74
2.10.23. Простегивание	75
2.10.24. Влияние линейной плотности нитей	76

2.10.25. Влияние толщины нити	77
2.10.26. Гибридные материалы	78
2.10.27. Тип, качество и толщина слоя пластилина	78
2.10.28. Пластилин	78
2.11. Литература	79
Глава 3. Поведение материалов при баллистическом ударе (А.П. Мосиав)	80
3.1. Введение	80
3.2. Глобальные процессы	81
3.2.1. Упругость	84
3.2.2. Диссипация энергии	84
3.3. Локальные механизмы диссипации энергии	86
3.3.1. Растрескивание матрицы	86
3.3.2. Разрыв волокон и образование лепестка разрыва	88
3.3.3. Срез	88
3.3.4. Раздвигание нитей	89
3.3.5. Трение на границе отверстия	90
3.4. Влияние других параметров	90
3.4.1. Свойства материала	90
3.4.2. Параметры мишени	96
3.4.3. Граничные условия	97
3.4.4. Свойства снаряда	98
3.5. Литература	102
Глава 4. Моделирование баллистического удара (д. ф.-м. н. С.Л. Баженов)	108
4.1. Введение	108
4.2. Особенности вычислительных методов	109
4.2.1. Пространственная сетка	110
4.2.2. Методы интегрирования по времени	112
4.2.3. Описание проблемы	113
4.2.4. Переопределение узлов сетки	115
4.2.5. Выбор сетки и граничные условия	116
4.2.6. Моделирование поведения материала	116
4.3. Численное моделирование баллистического удара	117
4.4. Заключение и тенденции развития	125
4.5. Литература	126
Глава 5. Стандарты и спецификации легких бронезащитных материалов (д. ф.-м. н. С.Л. Баженов)	131
5.1. Введение	131
СТАНДАРТЫ	132
5.2. Военный стандарт MIL-STD-662F. Баллистический предел V_{50}	132
5.2.1. Назначение	132
5.2.2. Определения	132
5.2.3. Требования	136
5.2.4. Отчет о баллистических испытаниях	137
5.2.5. Принятие к производству или отклонение	138

5.3. Стандарт NIJ 0101.04	138
5.3.1. Выбор бронежилетов для испытания и сертификации	138
5.3.2. Материалы поддержки брони	139
5.3.3. Метод испытания и измерение запреградной деформации	139
5.3.4. Определение пробития и измерение запреградной деформации	139
5.3.5. Вес	141
5.3.6. Измерение скорости	141
5.3.7. Условия испытаний	141
5.3.8. Подготовка поддерживающего материала	141
5.3.9. Испытания бронежилета	141
5.3.10. Вычисление баллистического предела	142
5.3.11. Отчет	142
5.4. PSDV стандарт испытания бронежилетов	142
5.4.1. Общие требования	142
5.4.2. Другие требования	143
5.5. Соглашение НАТО STANAG 2920 для баллистических испытаний индивидуальной брони	144
5.5.1. Цель	144
5.5.2. Общее	144
5.5.3. Испытательное оборудование	144
5.5.4. Методы испытания	145
5.5.5. Отчет	145
5.6. Международный стандарт ISO/FDIS 14876. Бронезащита тела	146
5.6.1. Введение	146
5.6.2. Предмет	146
5.6.3. Классы бронежилетов	146
5.6.4. Размеры	147
5.6.5. Ограничения	147
5.6.6. Эргономические требования	147
5.6.7. Методы испытаний	147
5.6.8. Уровни защиты	148
5.6.9. Крепление испытываемых образцов	148
5.6.10. Поддерживающий материал	148
5.6.11. Восстановление поддерживающего материала	148
5.6.12. Точки удара	149
5.6.13. Испытания во влажных условиях	149
5.6.14. Отчет	149
5.7. Стандарт испытаний касок NIJ 0106.01	150
5.7.1. Уровни защиты	150
5.7.2. Выборка и метод испытания	150
5.7.3. Манекен головы	150
5.7.4. Испытания на пробитие	151
5.8. Бронезащита транспортных средств	152
5.9. Стандарт испытания брони NIJ 0108	152
5.9.1. Классификация	153
5.9.2. Баллистические испытания	153

СПЕЦИФИКАЦИИ	154
5.10. Бронезащита тела «Перехватчик»	154
5.10.1. Компоненты	154
5.10.2. Размеры	154
5.10.3. Особенности	154
5.10.4. Площадь защиты и вес	155
5.10.5. Внешние условия	155
5.11. Вставки	156
5.11.1. Конструкция защитных вставок	156
5.11.2. Процесс формования защитных вставок	156
5.11.3. Вес	156
5.11.4. Толщина	157
5.12. Нагрудные пластины, используемые в странах Тихоокеанского кольца	157
5.12.1. Форма нагрудных бронепластин	157
5.12.2. Размеры пластин	157
5.12.3. Толщина пластин	157
5.12.4. Вес пластины	157
5.12.5. Баллистическая стойкость	157
5.12.6. Образцы	157
5.12.7. Баллистические испытания	157
5.13. Европейский бронезилет	158
5.13.1. Типы военных бронезилетов	158
5.13.2. Размеры бронезилетов	158
5.13.3. Внешний слой бронезилета	158
5.13.4. Баллистическая стойкость	158
5.13.5. Слои	158
5.13.6. Количество бронепластин	158
5.13.7. Размеры жестких бронепластин	158
5.13.8. Поверхностная плотность бронеконспекта	159
5.13.9. Толщина	159
5.13.10. Баллистическая стойкость	159
5.13.11. Маркировка	159
5.14. Азиатский бронезилет	159
5.14.1. Баллистические испытания нагрудных пластин	160
5.14.2. Размеры пластины	160
5.14.3. Количество пластин	160
5.14.4. Материал пластин	160
5.14.5. Вес бронепластин	160
5.14.6. Площадь защиты	160
5.14.7. Размеры	160
5.14.8. Внешний слой гибкого бронезилета	160
5.14.9. Материал гибкого бронезилета	160
5.14.10. Испытания	160
5.14.11. Травмозащитный материал	160
5.14.12. Запреградная деформация	161

5.14.13. Общий вес гибкой и жесткой брони	161
5.14.14. Другие особенности	161
5.15. Спецификации касок	161
5.15.1. Размеры касок	161
5.15.2. Корпус каски	161
5.15.3. Отделка каски	162
5.15.4. Испытания	162
5.16. MIL-L-62474В. Многослойный органопластик на основе арамидной ткани	163
5.16.1. Классификация	163
5.16.2. Требования	163
5.16.3. Изготовление	164
5.16.4. Вариация толщины	164
5.16.5. Вес	164
5.16.6. Процесс формования ламината	164
5.16.7. Окончательная обработка ламинатов	165
5.16.8. Характеристики ламината	165
5.17. Литература	166
Глава 6. Испытание легких противобаллистических материалов (С.С. Евстифоров)	167
6.1. Введение	167
6.2. Пробитие брони	167
6.3. Броня	168
6.4. Испытание брони	168
6.5. Баллистическая угроза	168
6.6. Методы испытаний	169
6.7. Баллистическая стойкость	170
6.8. Измерение баллистического предела V_{50}	171
6.8.1. Метод Пробита	171
6.8.2. Метод Лэнгли	171
6.8.3. Метод OSTR	172
6.8.4. Метод Брюстона	172
6.9. Методика определения стойкости к удару острым предметом	174
6.10. Сравнение композитной и монолитной брони	175
6.11. Дополнительные проблемы	175
6.11.1. Определение скорости пули	175
6.11.2. Энергия	175
6.11.3. Расстояние до цели	176
6.11.4. Испытания касок	176
6.11.5. Испытания светопрозрачного щитка шлема	177
6.11.6. Испытания бронезилетов	177
6.11.7. Испытания вставных бронепластин	178
6.11.8. Испытания брони транспортных средств и конструкционной брони	178
6.11.9. Защита от фрагментов	178

6.11.10. Методы испытания бронежилетов	179
6.11.11. Сравнение новой и бывшей в эксплуатации брони	181
ЧАСТЬ II. МАТЕРИАЛЫ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ	183
Глава 7. Противобаллистические волокна (С.С. Евстифоров)	184
7.1. Введение	184
7.2. Традиционные высокопрочные волокна	184
7.2.1. Стекланные волокна	184
7.2.2. Углеродные волокна	184
7.3. Жесткоцепные ароматические волокна	184
7.4. Термостойкие волокна	186
7.4.1. ПБИ волокно	186
7.4.2. ПБО волокна	187
7.5. Высокопрочные термопластичные волокна	187
7.5.1. Жидкокристаллические полимеры	187
7.5.2. СВМПЭ	188
7.6. Сравнение физических свойств	188
7.7. Требования к высокопрочным волокнам	188
7.8. Арамидные волокна	190
7.8.1. Формование арамидных волокон	191
7.8.2. Структура и морфология арамидных волокон	193
7.8.3. Морфология и ориентация арамидных волокон	194
7.8.4. Складчатые структуры	195
7.8.5. Кристаллическая структура	196
7.9. Гельформование СВМПЭ волокон	196
7.9.1. Морфология СВМПЭ волокна	198
7.10. ПБО волокна	200
7.10.1. Полимеризация и формование	200
7.10.2. Микрофибриллы и поры	201
7.10.3. Структура и физические свойства волокон	201
7.11. Дополнительная литература	203
7.12. Литература	203
Глава 8. Ткани и композиционные материалы для индивидуальной противобаллистической защиты (С.С. Евстифоров)	204
8.1. Введение	204
8.1.1. Волокна	204
8.1.2. Структура ткани	206
8.1.3. Матрицы	209
8.1.4. Броня из волокнистых композитов	211
8.2. Ударные испытания	213
8.3. Механизмы разрушения брони	213
8.3.1. Тканые бронепакеты	214
8.3.2. Броня из волокнистых композитов	216
8.4. Аналитические модели	221
8.5. Литература	226

Глава 9. Нетканые противобаллистические композиты (С.С. Евстифоров)	231
9.1. Введение	231
9.1.1. Современная броня	232
9.1.2. Начало научных исследований поведения брони	232
9.2. Требования к защитным материалам и изделиям	237
9.2.1. Традиционные подходы	237
9.2.2. Комплексные нити	238
9.2.3. Нетканые материалы	238
9.3. Выбор волокон	239
9.3.1. Арамиды	239
9.3.2. Линейный сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ)	240
9.3.3. ПБО волокна	241
9.3.4. Жидкокристаллические полимеры	241
9.3.5. Волокна М5	241
9.4. Непрерывные и рубленые волокна	242
9.4.1. Методы получения нетканых материалов	243
9.4.2. Волокна	244
9.4.3. Штапельные волокна	245
9.5. Многослойные композиты	250
9.5.1. Использование гибкой волокнистой брони	252
9.5.2. Многослойная броня III уровня защиты	252
9.6. История использования нетканой брони	252
9.6.1. Результаты испытаний центра Natick армии США	253
9.6.2. Результаты британских исследователей	253
9.6.3. Результаты различных независимых фирм	253
9.7. Использование нетканых противобаллистических материалов	254
9.7.1. Чисто волокнистые материалы	254
9.7.2. Многослойные материалы из волокон различного типа	254
9.7.3. Материалы из смеси волокон	254
9.7.4. Защита от осколков	255
9.7.5. Испытания американской армии	256
9.7.6. Комбинирование нетканых и обычных материалов	256
9.8. Перспектива развития нетканых материалов в будущем	258
9.9. Литература	258
Глава 10. Противобаллистические композиты на основе препрегов (д. ф.-м. н. С.Л. Баженов)	259
10.1. Введение	259
10.2. Гибкая броня	261
10.3. Жесткая броня	261
10.4. Препреги на основе термопластичных матриц	262
10.5. Препреги для формования жесткой брони	263
10.6. Поверхностные свойства противобаллистических материалов	265
10.6.1. Поверхностная обработка волокон	266
10.7. Контроль механического натяжения препрега	269
10.8. Сравнение препрегов противобаллистического и конструкционного назначения	269

10.9. Технология производства препрегов	269
10.9.1. Мокрая пропитка и сушка	269
10.9.2. Нанесение матрицы с помощью ножа	271
10.9.3. Нанесение матрицы с помощью острого лезвия	271
10.9.4. Валковое нанесение матрицы	272
10.9.5. Нанесение периодических полос матрицы	272
10.9.6. Нанесение матрицы реверсивными барабанами	272
10.9.7. Препреги с пленочной матрицей	273
10.9.8. Нанесение нескольких слоев матрицы	274
10.10. Термореактивные матрицы	275
10.10.1. Препреги на основе фенольной смолы	275
10.10.2. Винилэфирные матрицы	276
10.10.3. Полиэфирные смолы	277
10.10.4. Эпоксидные смолы	278
10.11. Термопластичные матрицы	279
10.11.1. Акриловые матрицы	279
10.11.2. Полиуретановые матрицы	280
10.12. Смесевые термопластично-термореактивные матрицы	280
10.13. Другие методы производства препрегов	280
10.14. Добавки в термопластичные и термореактивные смолы	281
10.15. Качество препрегов	281
10.15.1. Визуальный осмотр	281
10.15.2. Вес препрега	281
10.15.3. Содержание матрицы	281
10.15.4. Содержание летучих веществ	282
10.15.5. Плотность	282
10.15.6. Измерение вязкости	282
10.15.7. Дифференциально-сканирующая калориметрия (ДСК)	283
10.15.8. Инфракрасное излучение	283
10.15.9. Механические испытания	283
10.15.10. Растровая электронная микроскопия (РЭМ)	284
10.15.11. Баллистические испытания	284
10.16. Хранение препрегов	285
10.17. Перевозка препрегов	285
10.18. Вторичная переработка препрегов	285
10.19. Утилизация препрегов	286
10.20. Литература	286
10.21. Адреса поставщиков противобаллистических препрегов	286
Глава 11. Технология производства противобаллистических	
материалов (к. х. н. Г.П. Гончарук)	287
11.1. Введение	287
11.1.1. Матрицы	287
11.1.2. Волокна	288
11.2. Композиты противобаллистического назначения	288
11.2.1. Волокна	288
11.2.2. Структура	291

11.2.3. Матрица	291
11.3. Пресс-формы	292
11.3.1. Небольшие пресс-формы	293
11.3.2. Крупные пресс-формы высокого давления	293
11.3.3. Крупные пресс-формы низкого давления	293
11.4. Нагревание и охлаждение пресс-форм	293
11.5. Извлечение детали	294
11.6. Адгезия	294
11.7. Выбор клея	295
11.8. Подготовка материала к формованию	295
11.9. Подготовка пресс-формы	296
11.9.1. Ручная выкладка	296
11.10. Противобаллистические структуры	297
11.11. Технология производства композитов	298
11.12. Методы производства	298
11.12.1. Ручная выкладка	298
11.12.2. Формование в мешке	300
11.12.3. Формование в вакуумном мешке	301
11.12.4. Формование в мешке давления	302
11.12.5. Влияние давления прессования	303
11.12.6. Прессформование	303
11.13. Пресс	305
11.14. Сравнение формования в автоклаве и прессе высокого давления	306
11.15. Влияние давления формования	306
11.16. Формование противобаллистических изделий	307
11.16.1. Формование касок	307
11.17. Переносные полицейские щиты	310
11.17.1. Изготовление щитов	310
11.18. Формование противобаллистических усиливающих вставок	310
11.18.1. Одиночные нагрудные пластины	310
11.19. Нагрудные пластины с передним керамическим слоем	311
11.19.1. Композитные нагрудные пластины с передним керамическим слоем	311
11.20. Механическая обработка композитов	313
11.20.1. Резание	313
11.20.2. Сверление	313
11.20.3. Окончательная обработка	314
11.20.4. Полировка	314
11.20.5. Покраска	314
11.21. Заключение	315
11.22. Литература	315
Глава 12. Новые материалы и изделия противобаллистического назначения (А.П. Мосиав)	316
12.1. Введение	316
12.2. Волокна	317



12.2.1. Неорганические волокна	319
12.2.2. Органические волокна	323
12.3. Сравнение тканых и нетканых материалов	326
12.4. Противобаллистические матрицы и препреги	329
12.5. Керамические и другие облицовочные материалы	331
12.6. Технология производства	334
12.7. Новые противобаллистические материалы	335
12.7.1. Бронезащита транспортных средств	336
12.7.2. Системы бронезащиты личного состава	337
12.7.3. Применение в строительстве	339
12.8. Прогноз развития волокнистых бронематериалов	340
12.9. Литература	341

Глава 13. Применение легких противобаллистических материалов (к. х. н. Г.П. Гончарук)	344
13.1. Введение	344
13.2. Армия США	345
13.2.1. Каски	345
13.2.2. Бронежилет Interceptor	346
13.2.3. Защитная вставка SAPI	347
13.2.4. Бронежилет и каска SPEAR	349
13.3. Европейский военный бронежилет	351
13.3.1. Каски	351
13.3.2. Европейский гибкий бронежилет военнослужащих	352
13.3.3. Европейские противобаллистические жилеты и усиливающие вставки	352
13.4. Войска азиатских стран	354
13.4.1. Каски войск стран Южной Азии	354
13.4.2. Бронежилеты войск стран Южной Азии	354
13.4.3. Каски стран Южной Азии	355
13.4.4. Жилеты стран Южной Азии	355
13.5. Баллистическая защита полиции	356
13.5.1. Каски для полицейских	356
13.5.2. Бронежилеты правоохранительных органов и полиции	357
13.5.3. Малогабаритные щиты	358
13.5.4. Взрывозащитные покрывала	359
13.5.5. Устройства для уничтожения бомб цилиндрической формы	360
13.6. Бронированные транспортные средства	360
13.7. Бронированные наземные и воздушные транспортные средства	361
13.7.1. Боевая машина пехоты «Страйкер»	361
13.7.2. Быстроходное многоцелевое колесное транспортное средство	362
13.7.3. Боевые системы будущего	363
13.7.4. Экспедиционные боевые транспортные средства	364
13.7.5. Корпуса транспортных средств	364
13.7.6. Бронированные вертолеты	365

13.7.7. Бронированные сидения вертолета	367
13.7.8. Вертолет «Пума»	369
13.7.9. Грузовой самолет С 130	369
13.7.10. Бронекомплекты самолета	371
13.7.11. Бронированные транспортные средства	372
13.7.12. Наземные судна на воздушной подушке	373
13.7.13. Броня судов на воздушной подушке	374
13.8. Адреса по Интернету	374
Глава 14. Формованная броня с внешним керамическим слоем (А.П. Мосиав)	375
14.1. Введение	375
14.2. Типы керамики	376
14.2.1. Окись алюминия	376
14.2.2. Карбид и нитрид кремния	377
14.2.3. Карбид бора	378
14.3. Форма изделий из керамики	378
14.3.1. Плоские пластины	378
14.3.2. Керамика особой геометрической формы	379
14.4. Подложка из облегченных композиционных материалов	380
14.4.1. Стекланные волокна	381
14.4.2. Органопластики на основе арамидных тканей	381
14.4.3. СВМПЭ ткани	382
14.4.4. Многослойные СВМПЭ композиты	382
14.4.5. Многослойные органопластики на основе арамидных волокон типа gold shield	383
14.5. Технология производства брони с керамическим лицевым слоем	383
14.5.1. Средства индивидуальной бронезащиты личного состава	384
14.5.2. Бронезащита транспортных средств	386
14.6. Испытания брони с керамической облицовкой	388
14.6.1. Винтовочные пули	388
14.6.2. Бронебойные пули	389
14.6.3. Стандарты испытаний	389
14.6.4. Метрология	391
14.7. Баллистические характеристики материалов с передним керамическим слоем	392

ГЛАВА 1

ВВЕДЕНИЕ

Л. Вагнер, Honeywell International Inc., США

1.1. История

Изобретение взрывчатых веществ привело к изменению характера боевых действий. В период между Гражданской войной в Америке и современной войной против терроризма человечество столкнулось с воздействием различных летящих с высокой скоростью снарядов и тел: пистолетных и винтовочных пуль, осколков из упрочненной стали, разлетающихся при взрыве ручных гранат, мощных артиллерийских снарядов и самодельных бомб. Во время Первой и Второй мировых войн для защиты личного состава применялась лишь сталь. Однако из-за тяжести и недостаточной степени приспособляемости стальную броню использовали только для защиты транспортных средств.

Первая попытка использования каски была предпринята во французской армии в годы Первой мировой войны. Каску делали из металла, и она служила для защиты солдат от ранений в голову. Несколько позднее она была принята на вооружение в других странах. Во время Первой мировой войны Германия приступила к использованию тяжелых нагрудников, Великобритания — более легких нагрудников, а итальянская армия — бронированных жилетов.

Бронежилеты начали использовать для защиты личного состава в период вьетнамской войны. Они были тяжелыми и громоздкими и защищали от высокоскоростных пуль и осколков лишь до определенной степени.

За последние два-три десятилетия ученые и инженеры, работающие в различных отраслях промышленности, университетах и государственных лабораториях, вели интенсивные разработки бронематериалов и исследовали их поведение при взаимодействии с высокоскоростными пулями. Большая часть этих исследований публиковалась с расчетом на аудиторию, имеющую ограниченные познания в данной области. Информация о поведении материалов при баллистическом воздействии опубликована в виде брошюр, описывающих опыт использования этих материалов, а также стандартов военных и правоохранительных ведомств.

Мы надеемся, что данная книга осветит некоторые новейшие достижения в области баллистической защиты. В книге описана броня на основе легких высокопрочных волокон, тканей и нетканых материалов. Отдельные главы посвящены спецификациям видов брони, применяемых в разных странах мира. Затрагиваются также такие темы, как описание пуль и осколков, деформация пуль, методы баллистических испытаний, моделирование поведения бронематериалов, применение бронематериалов для индивидуальной

защиты и защиты транспортных средств и, наконец, перспективы использования легкой брони из волокнистых материалов. В последней главе книги описываются новые легкие бронематериалы, находящиеся в стадии разработки.

Мы надеемся, что наша книга поможет широкому кругу читателей лучше разобраться в поведении новейших легких бронематериалов, взаимозависимости их технических характеристик, стоимости и доступности.

1.2. Волокна

Новейшие высокопрочные синтетические волокна обладают уникальными свойствами, отличающими их от стандартных синтетических волокон. Их модуль упругости и прочность при растяжении значительно выше, а удлинение при разрыве волокна ниже. Из этих волокон гораздо легче делать ткани, чем из хрупких стеклянных и углеродных волокон. Противобаллистическим волокнам присуща стойкость к воздействию химических веществ, растворителей и смазочных материалов, применяемых в автомобильной и авиакосмической промышленности.

Уникальные свойства высокопрочных противобаллистических волокон обусловлены особенностями полимеров, из которых они изготовлены, а также методами их прядения. Свойства волокон определяются ориентацией полимерных молекул вдоль оси волокна. Процесс их производства определяет микроскопическую структуру и ориентацию полимерной цепи вдоль оси волокна. Другим немаловажным моментом является себестоимость волокон. Могут производиться волокна с не самыми высокими характеристиками, но имеющие и не слишком высокую стоимость. Добиться компромисса между качеством и стоимостью непросто, но после нескольких лет производства и сбыта волокон фирмы-изготовители приобрели опыт, позволяющий успешно производить и продавать высокопрочные волокна.

Популярность легкой брони на основе волокнистых материалов возникла не в одночасье, и первые разработки в этой области относятся к началу 1970-х гг. На протяжении первых пятнадцати лет дело ограничивалось лишь несколькими видами волокон и немногочисленными типами их переплетений. Они позволили обеспечить удовлетворительный уровень баллистической защиты, который повысился после появления технологии формования под давлением при повышенной температуре. Поскольку конкуренции в данной отрасли практически не было, стимулы для совершенствования почти отсутствовали. Когда лабораторная работа с легкими волокнистыми материалами сменились их крупномасштабным производством, конкуренция обострилась, и заказчики стали требовать дальнейшего снижения веса изделий и повышения степени защиты.

В табл. 1.1 приводится сравнение свойств высокопрочных противобаллистических волокон. Волокна из высокомодульного полиэтилена были внедрены в середине 1980-х гг., а волокна ПБО – в конце 1990-х гг.

Таблица 1.1. Свойства высокопрочных противобаллистических волокон

	СВМПЭ		Арамидные		ПБО	
	900	1000	НМ	ВМ	AS	ВМ
Прочность (г/денье)	30	35	22	26	42	42
Модуль упругости (г/денье)	1400	2000	488	976	1300	2000
Удлинение (%)	3,5	2,7	3,6	2,8	3,5	2,5
Плотность (г/см ³)	0,97	0,97	1,44	1,44	1,54	1,56

Примечание: НМ – низкомолекулярные, ВМ – высокомолекулярные.

Наряду с разработкой новых высокопрочных волокон развивалась и технология их использования. Одно из важнейших достижений состояло в разработке поперечно ориентированных материалов (0, 90°), в которых не используется традиционное скручивание нитей и получение ткани. Этот метод произвел революцию в создании легкой брони с повышенными динамическими свойствами. Гибкая броня стала легче и удобнее в применении, а жесткая формованная броня оказалась в состоянии защищать от винтовочных пуль, причем ее удельный вес стал меньше, чем у воды.

В некоторых европейских странах не только разрабатывали новые материалы, но и оснащали ими войска, участвующие в военных и миротворческих операциях.

Совершенствование новых и традиционных технологий приводит к дальнейшему повышению характеристик и уменьшению веса брони. Благодаря постоянному улучшению свойств волокон, технологии ткачества и изготовления поперечно ориентированных слоистых материалов вес легкой брони уменьшается каждые десять лет на 10–20%.

1.2.1. Арамидные волокна

В конце 1960-х гг. произошел технический прорыв в области полимеров. Ученые фирмы Dupont разработали семейство волокон, которые были в три раза прочнее нейлона и обладали намного более высоким модулем упругости. Волокна были столь тонкими, что из них можно было изготавливать очень гибкую и тонкую ткань. Новое волокно назвали PRD-49, а затем его стали поставлять на рынок под торговой маркой Kevlar 29. Эти волокна намного прочнее и легче стеклянных волокон. Они заменили нейлон в гибкой и жесткой броне, которая использовалась правоохранительными ведомствами и вооруженными силами. Каски и гибкие жилеты, изготовленные из арамидных волокон, защищают от осколков и пуль, обладая при этом намного меньшим весом, чем каски и жилеты из нейлона.

К сожалению, волокнистые композиты не способны защитить от мощного нарезного стрелкового оружия. Благодаря сочетанию керамических пластин и нижнего слоя из арамидного композита удалось создать легкий бронематериал, защищающий от винтовочных пуль, что не способна сделать керамика со слоем стеклопластика.

Правоохранительные ведомства проявили интерес к арамидному волокну, обеспечивающему защиту от пистолетных пуль. Бронежилет из арамидных волокон оказался намного легче аналогичного жилета из нейлона.

1.2.2. Сверхвысокомолекулярные полиэтиленовые волокна

После изобретения технологии производства волокон из сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) фирма Honeywell (Allied Fibers) выпустила на рынок волокна, которые оказались в 10 раз прочнее стали, но были легче воды и обладали нелинейными вязкоупругими свойствами. Благодаря своему химическому составу СВМПЭ волокна практически не поддаются воздействию разнообразных химических реагентов, с которыми могут столкнуться силы правопорядка и личный состав вооруженных сил в боевых условиях.

В конце 1990-х гг. фирма Honeywell разработала еще один принципиально новый материал. Разработка нетканых материалов, состоящих из поперечно уложенных однонаправленных слоев, позволила радикально улучшить защиту от воздействия высокоскоростных пуль. В этих материалах используются некрученные нити, которые укладывают в одном направлении и фиксируют с помощью полимерной матрицы.

Третий метод, разработанный в середине 1990-х гг., состоит в создании формованных материалов. Для повышения плотности упаковки волокон используют высокое давление прессования. Высокая плотность упаковки и вязкоупругие свойства СВМПЭ волокон позволяют создавать броню с поверхностной плотностью 15 кг/м², способную остановить пулю винтовки М80. Эта броня на 50% легче брони (защищающей от такой же пули), которая выпускалась до этого. Формованные продукты на 100% состоят из органопластика на основе СВМПЭ волокон и не имеют внешнего керамического слоя.

Впервые бронепластины из формованного СВМПЭ были применены французскими вооруженными силами в Боснии. Бронежилет состоял из четырех пластин, вставленных в гибкий жилет, закрывающий грудь, спину, пах и шею. С тех пор такие жилеты, защищающие от винтовочных высокоскоростных пуль, были приняты на вооружение в целом ряде европейских и азиатских стран.

1.2.3. Волокна ПБО

Волокна ПБО представляют собой сравнительно новый тип высокопрочных волокон. Хотя они весьма дороги и производятся в ограниченных количествах, их замечательные баллистические свойства способствовали существенному росту эффективности мягкой брони. На сегодняшний день имеются лишь ограниченные данные об их долговечности. Ряд фирм, производящих бронежилеты в США, выпустили на рынок жилеты из ПБО тканей и поперечно ориентированных композиций.

1.3. Волокнистая броня

Волокнистая броня – это общий термин, относящийся к группе родственных, хотя и различных материалов. Некоторые из этих материалов используют только ткани на основе высокопрочных волокон или же комбинацию высокопрочных волокон и склеивающей их матрицы, в результате чего получают композиты, со-

стоящие из поперечно ориентированных слоев. Такие материалы применяют для изготовления мягкой брони.

Другие материалы включают жесткие формованные бронедетали. Их изготавливают сочетанием относительно непрочной полимерной матрицы и высокопрочных противобаллистических волокон. Оптимальное соотношение долей матрицы и волокон обеспечивает более высокие баллистические свойства системы по сравнению с характеристиками отдельных материалов. Полученный композиционный материал, содержащий волокна и недоотвержденную матрицу, называют препрегом. Основой препрега может быть ткань или поперечно уложенные однонаправленные слои, содержащие определенное количество матрицы. Из препрегов можно делать изделия сложной формы, подвергая их прессованию при высокой температуре.

Волокнистая броня обладает достаточно универсальными свойствами, что позволяет существенно варьировать ее свойства для отражения баллистических угроз, с которыми сталкиваются полицейские и военнослужащие на поле боя. Целью создания облегченной бронесистемы является обеспечение защиты от различных баллистических угроз при удовлетворении другим специфическим требованиям. Поскольку легкие волокнистые композиты могут обеспечить защиту не только от низкоскоростных пистолетных пуль, но и от мощного нарезного оружия, их используют многие производители брони во всем мире. Из волокнистых материалов изготавливают разнообразные типы гибкой и формованной жесткой брони, которым свойственна экономичность, высокая эффективность и сложность структуры.

1.4. Бронематериалы на основе ткани

Делать полотно путем переплетения нитей начали еще на ранних стадиях цивилизации. Этот метод значительно усовершенствовался с появлением высокоскоростных автоматизированных ткацких станков. Благодаря различным приемам на каждой стадии контакта волокна с ткацким станком удалось свести к минимуму повреждение волокон. Несмотря на эти достижения, перед изготовлением ткани волокна обычно скручивают, и определенная доля волокон оказывается поврежденной.

Обычно волокна скручивают еще до получения ткани. Крутка нити уменьшает степень спутанности волокон, что позволяет сохранить их физические свойства. Однако в крученой нити уменьшается количество отдельных волокон, контактирующих с пулей.

Для некоторых видов брони требуется удаление с ткани грязи, образующейся при ткачестве. Этот процесс называют «отмывкой» ткани. После отмывки на ткань можно нанести водоотталкивающее покрытие. В случае арамидных волокон это имеет существенное значение, так как влага перестает проникать в волокна и защитные свойства ткани не снижаются. Инженеры-баллистики и текстильщики работают над повышением рабочих характеристик бронематериалов на основе тканей. Свойства тканого бронематериала могут быть улучшены путем использо-



Рис. 1.1. Структура типичной ткани, используемой для производства брони

вания более тонких нитей, ограничения или устранения их крутки, разработки новой ткани и сшиванием слоев ткани в бронепакете.

Структура простейшей ткани полотняного плетения представлена на рис. 1.1. Ткань состоит из нитей основы и перпендикулярных им нитей утка. Нити основы ориентированы по длине рулона ткани, а нити утка перпендикулярны основе.

Помимо тканей полотняного плетения бронематериалы можно делать и из тканей с другим способом плетения нитей утка и основы, например, саржевым или сатиновым. Баллистические характеристики тканого материала зависят от целого ряда факторов, например:

1. Физических свойств волокон.
2. Толщины (линейной плотности, измеряемой в тексах или денье) нитей в направлении основы и утка.
3. Степени кручения нитей.
4. Способа переплетения нитей в ткани.
5. Степени повреждения нитей в процессе ткачества.
6. Послеткацкой обработки.

Недавно были опробованы новые методы улучшения баллистических характеристик тканых материалов. Например, на них наносили небольшое количество покрытия, улучшающего взаимодействие «снаряд-ткань», каландрировали ткань, а также ламинировали ее введением тонкой пленки между соседними слоями ткани.

1.5. Легкие нетканые бронематериалы

Эволюция легких бронематериалов в течение последних 10–15 лет была обусловлена появлением более легких и прочных синтетических волокон, которым можно было придать единую ориентацию, избегая скручивания волокон и уменьшая их взаимный изгиб при ткачестве.

В настоящее время идет дальнейшая разработка бронематериалов на основе традиционных тканей, которые обрабатывают с целью увеличения взаимодействия ударника с материалом. Несмотря на это, легкие нетканые бронематериалы

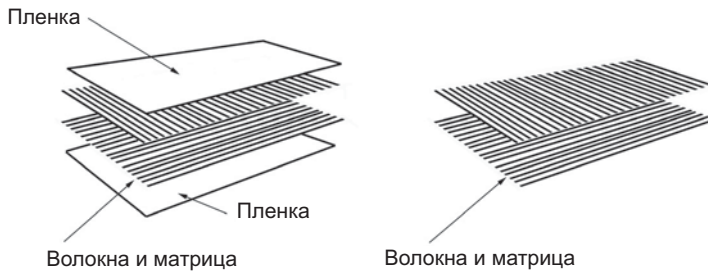


Рис. 1.2. Нетканые поперечно ориентированные бронематериалы

лы, выпускаемые по уникальной технологии фирмы Honeywell, обладают более высокими характеристиками, чем материалы на основе тканей.

Данный технологический процесс предусматривает параллельную укладку волокон, после чего для образования непрерывного материала к волокнам добавляют клеящее вещество, называемое связующим, или матрицей. Оно фиксирует волокна, что облегчает дальнейшую обработку материала. Затем на этот материал накладывают такой же слой под углом 90° (рис. 1.2), производят дальнейшую консолидацию слоев и получают непрерывный рулон поперечно ориентированного композита. По данной технологии можно получить материал из любых непрерывных волокон, например, СВМПЭ, арамидных или ПБО.

Для изготовления мягкой брони некоторые нетканые поперечно ориентированные композиты ламинируют тонкой полимерной пленкой.

Баллистические характеристики поперечно ориентированных композитов зависят от следующих параметров:

1. Физических свойств волокон.
2. Линейной плотности нитей.
3. Степени спутанности волокон в комплексной нити.
4. Распределения волокон на макроуровне.
5. Типа матрицы.
6. Количества матрицы.
7. Адгезии между матрицей и волокном.

Сегодня для защиты от баллистической угрозы можно создавать броню, на 100% состоящую из поперечно ориентированных материалов, тканей и комбинации различных материалов.

Другой тип нетканого бронематериала делается из пучков рубленых волокон и имеет структуру, напоминающую войлок. Разработка таких материалов и технологии их изготовления достигла больших успехов, и последние исследования дают основание надеяться на перспективность бронематериалов на основе войлоков.

1.6. Препреги и пленки

Прогресс технологии получения препрегов, покрытий, полимерных пленок, а также разработка новых полимерных смол привели к появлению новых противобаллистических материалов, которые очень однородны по составу и имеют

мало дефектов. Все это привело к росту производительности, снижению себестоимости и улучшению баллистических характеристик материала. Сегодня уровень качества, существовавший несколько лет назад, уже неприемлем, а в дальнейшем требования к качеству бронематериалов будут только возрастать. Экологические нормы также становятся строже, и теперь все большая доля исходного материала должна быть превращена в конечный продукт, а не в отходы, которые необходимо зарывать на свалке или сжигать на мусоросжигательном заводе.

Хотя препреги и ламинированные материалы со слоями полимерных пленок могут различаться по своему составу и технологии изготовления, основной принцип один и тот же. Многие дефекты в различных изделиях вызваны одинаковыми причинами и устраняются с помощью похожих методов. Принципы борьбы с пузырями газа в смолах низкой вязкости применимы и при нанесении смолы на тканые и нетканые бронематериалы.

Существует множество методов нанесения покрытия на ткань или однонаправленный волокнистый материал. Однако годятся лишь те из них, которые гарантируют отсутствие дефектов в широком диапазоне условий производства. Персонал, занятый нанесением покрытий, тратит значительную часть рабочего времени на предотвращение и устранение дефектов. Компании, выпускающие препреги, отмечают, что хотя производственные кадры могут хорошо владеть основами технологических процессов, они обычно плохо устраняют неполадки и плохо решают внезапно возникающие проблемы. Многие приемы и инструменты устранения неполадок и решения производственных проблем одинаковы для широкого круга дефектов.

1.7. Жесткая и гибкая броня

Полиция, другие правоохранительные органы и военные используют два типа индивидуальных средств защиты. Последние в широком смысле подразделяются на мягкую и жесткую броню. Гибкая броня для полиции и правоохранительных органов сравнительно гибка и может быть подогнана под контур тела конкретного человека.

Гибкая броня в целом рассчитана на защиту от пистолетных пуль и обычно не очень заметна. Гибкая броня, используемая военными и миротворческими частями, должна защищать также и от поражения осколками. Такие бронежилеты обычно имеют большие размеры и хорошо видны на теле.

Высокопрочную жесткую броню обычно изготавливают методом формования. Типичным примером жесткой брони служит защитная каска, находящаяся на вооружении армии и полиции.

1.7.1. Гибкая броня

Большинство сотрудников правоохранительных органов в США и других странах носят гибкий незаметный бронежилет, надеваемый под рубашку. Такие бронежилеты рассчитаны на защиту от поражения пистолетной пулей, но не за-

щищают от винтовочных пуль или удара холодным оружием с заостренным наконечником, например, ледорубом или ножом. Иногда эти бронежилеты называют «пуленепробиваемыми», однако они не в состоянии защитить от поражения любой пулей. Существует вероятность того, что пуля сможет пробить бронежилет, и поэтому их скорее можно охарактеризовать как «пулезащитные». Другое заблуждение состоит в том, что бронежилет обеспечивает защиту всей верхней части тела. В действительности же незаметный бронежилет защищает только жизненно важные органы, а кисти рук, шея, голова и ноги остаются незащищенными.

Первые промышленно выпускаемые гибкие бронежилеты изготавливались из высокопрочных арамидных волокон. Они были разработаны для полиции и использовались в конце 1970-х гг. Ранние модели этих бронежилетов были тяжелыми, громоздкими и неудобными. Часто полицейским управлениям приходилось настаивать на том, чтобы сотрудники действительно пользовались ими. Однако по мере развития арамидных волокон и появления в середине 1980-х гг. сверхвысокомолекулярного полиэтилена бронежилеты претерпели радикальные изменения. Нынешние бронежилеты тоньше, легче и имеют более удобную конструкцию. В них используются гибридные противобаллистические материалы, основанные на ряде запатентованных технологий.

Не существует единого метода испытания нового или бывшего в употреблении бронежилета. Фирмы-производители обязаны снабжать бронежилеты соответствующими этикетками, описывающими их характеристики. Эти характеристики основаны на результатах испытания в определенных баллистических условиях, которому подвергся аналогичный бронежилет. Такое испытание проводится по рекомендации местного департамента юстиции и является стандартным для полиции или правоохранительных органов. В стандарте определяется общая процедура испытаний, типы пуль и их скорости во время испытаний. Следует подчеркнуть, что данное испытание проводится при строго контролируемых условиях, которые могут быть отличны от реальной угрозы поражения в полевых условиях.

Последний стандарт испытаний, принятый Министерством юстиции США, — это NIJ 0101.04. Данный стандарт, как и стандарты стран Европы и других стран мира, является плодом негласного компромисса между требованиями простоты, экономии, воспроизводимости и степенью риска, которому подвергается носитель бронежилета.

Мягкую броню применяют и для обеспечения коллективной защиты нескольких человек. Например, для защиты военнослужащих или миротворцев, передвигающихся на каком-либо транспортном средстве. Мягкой броней покрывают пол и борта машины. В этом случае желательно иметь складную или скатываемую в рулон мягкую броню в форме покрывала. Подобным же образом устроена и гибкая броня, защищающая от осколков бомб и других взрывных устройств.

Другим примером использования мягкой брони является защита авиационных двигателей от удара отломившихся частей лопастей, летящих с большой скоростью.

1.7.2. Жесткая броня

Жесткая броня часто используется полицией и правоохранительными ведомствами в комбинации с мягким бронежилетом. Она предназначена для специальных операций, когда имеется риск поражения винтовочными пулями. Такая броня может быть незаметной, но обычно она хорошо видна. Жесткая броня включает в себя стальные или титановые панели, керамику в сочетании с материалами другого типа, а также литые пластины из поперечно ориентированных слоев СВМПЭ. Армейский бронежилет может иметь две вставки из жесткой брони, прикрывающие жизненно важные органы на груди и спине, а некоторые бронежилеты имеют до пяти вставок, прикрывающих также область шеи и паха.

Вставки из жесткой брони должны снабжаться ярлыками, описывающими пули, используемые при испытаниях совместно с поддерживающей мягкой броней или без нее. Данная информация должна описывать стандарт испытаний и тип винтовочных пуль, от которых защищает броня.

Жесткую броню используют в противобаллистических касках военнослужащих и полицейских, в армейских транспортных средствах, щитах для разгона демонстраций, военных вертолетах и грузовых самолетах, а также на гражданском транспорте. Подробно применение жесткой брони описано в главе 13.

1.7.3. Классификация брони

Спецификации и стандарты испытаний мягкой брони предусматривают, что все предусмотренные типы пуль должны быть полностью остановлены. Если все пули были остановлены, а деформация задней поверхности брони при различной температуре и влажности не превысила требуемой величины, броне присваивают сертификат качества. Аналогичным образом проходит испытания и жесткая броня, применяемая в вооруженных силах и правоохранительных органах.

Одним из основных методов классификации брони является определение баллистического предела V_{50} — скорости пули, при которой броня пробивается с вероятностью 50%. После определения V_{50} на основе массы осколка и веса испытываемой мишени рассчитывают удельное поглощение энергии. В настоящее время эту характеристику определяют лишь для определения стойкости к удару осколками.

1.7.4. Продолжительность эксплуатации жесткой и мягкой брони

Поскольку первые образцы брони изготавливали из стали, понятие срока эксплуатации отсутствовало. Современную легкую броню изготавливают из различных материалов, и некоторые из них с течением времени могут подвергаться старению. Как мягкие бронежилеты, так и жесткая броня изнашиваются по мере ежедневной эксплуатации. Однако ни полиция, ни вооруженные силы не имеют определенной системы краткосрочных или ускоренных испытаний на старение, которые позволили бы прогнозировать долгосрочные характеристики бронематериалов. Ограниченные данные о старении таких материалов получают с помо-

щью методов ускоренного старения, когда их намеренно эксплуатируют в условиях более жестких, чем полевые. При такой эксплуатации можно добиться старения материала за довольно короткое время. Однако трудно установить корреляцию между данными, полученными методом ускоренного старения, и старением в полевых условиях при нормальном ношении.

В последние несколько лет государственные органы, фирмы-производители бронежилетов, производители волокон и университеты начали изучать ускоренное старение брони на основе высокопрочных волокон. Их основой являются методы ускоренного старения, используемые в автомобильной промышленности. В этих тестах используют воздействие высокотемпературной и влажной среды. Ряд испытаний включает циклическое воздействие жары и холода, аналогичное эксплуатации в экстремальных полевых условиях.

Пройдет еще несколько лет, прежде чем результаты подобных испытаний будут обнародованы на научных симпозиумах и в журналах. Недостаток этой информации в сфере производства бронематериалов ощущается довольно остро, и поэтому фирмы-изготовители проявляют осторожность, делая запас толщины материала в новых изделиях, которые планируются выпускать в ближайшие годы. Для ограничения процесса старения брони в полевых условиях новые бронежилеты снабжают ярлыками с инструкциями о мерах предосторожности.

1.8. Композитная броня с внешним керамическим слоем

После окончания Второй мировой войны возник вопрос о разработке легких бронесистем для защиты от винтовочных пуль. Первоначально единственным имевшимся в наличии материалом была сталь. Однако по мере разработки стеклопластиков в начале 1960-х гг. появился бронематериал, который был легче стали. Он был создан путем сочетания внешнего жесткого керамического слоя на основе окиси алюминия и подложки из стеклопластика. Такой материал был сравнительно дешев и прост в изготовлении. Полная поверхностная плотность такого композитного материала превышала 60 кг/м^2 .

Технологический прогресс привел к разработке нового, более легкого керамического материала на основе карбида бора. Плотность керамики из карбида бора на 20% ниже, а твердость превосходит окись алюминия. Однако использованию карбида бора в военной области мешали два обстоятельства. Проблема заключалась в более высокой стоимости по сравнению с керамикой из окиси алюминия и в трудности поддержания нужного уровня качества керамики из карбида бора. Изменение состава и метода производства привело к созданию керамики горячего прессования из карбида бора. Оно повысило надежность и уменьшило себестоимость материала.

Известно, что керамические материалы тяжело обрабатывать, они хрупки, очень тверды, причем их прочность при сжатии выше, чем при растяжении. Подобные свойства весьма желательны, если требуется затупить или разрушить пулю,

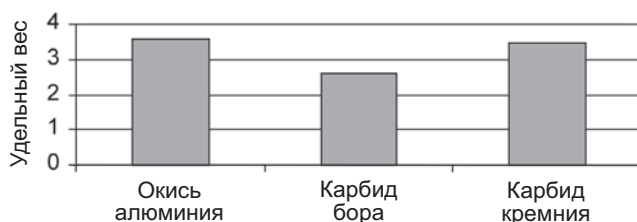


Рис. 1.3. Удельный вес керамических материалов

усиленную стальным или вольфрамовым наконечником, находящимся внутри пули. Однако керамические материалы сравнительно тяжелы. Легкие бронематериалы хорошо обрабатываются и не хрупки, имеют высокую прочность при растяжении, но невысокую прочность при сжатии. Сочетание керамической облицовки с подложкой из легкой волокнистой брони позволяет использовать лучшие качества обоих материалов для защиты от бронебойных пуль при сохранении минимального веса системы.

Оксид алюминия (удельный вес 3,43) была первым керамическим материалом, применявшимся для облицовки бронированных систем большого объема, защищавших от бронебойных винтовочных пуль (рис. 1.3). Другими высокопрочными керамическими материалами являются карбид кремния (удельный вес 3,20) и карбид бора (2,48).

1.9. Производство

Легкие бронематериалы делают только из высокопрочных волокон или из композита на основе волокон и полимерной матрицы. При этом образуется структура, обеспечивающая гибкость и максимальный уровень защиты при минимальном весе. Жесткая броня долговечна, тонка и устойчива к появлению вмятин. Она обеспечивает более высокую степень баллистической защиты.

Технология производства как мягкой, так и жесткой брони влияет на характеристики материала. В случае мягкой брони важнейшими параметрами, влияющими на характеристики бронезилетов, являются надежность ориентации волокон, надлежащая структура и последовательность укладки слоев.

В главе 11 описываются процессы создания жесткой брони, использующие формование при низком давлении в автоклаве и формование в прессе под высоким давлением. В этой главе приводятся некоторые детали производственных процессов и обсуждаются баллистические характеристики изделий, изготовленных этими методами. Баллистические характеристики зависят от температуры, оборудования и других факторов, определяющих химические, физические и механические свойства конечного продукта. Кроме того, на баллистические и иные свойства формованных бронекompозитов могут влиять условия складирования и транспортировки. Поэтому для оценки влияния параметров, связанных с производством, складированием и транспортировкой, необходимо проведение соответствующих испытаний.

1.10. Испытания противобаллистических материалов

Испытания проводят для определения возможности защиты от предполагаемой баллистической угрозы. Испытания гибкой и жесткой брони проводят согласно процедуре, определяемой заказчиком. В США методики испытания изделий, защищающих сотрудников правоохранительных органов от pistolетных и винтовочных пуль, регламентируется стандартом NIJ 0101.04. Тестирование осуществляется ударными воздействиями, перечисленными в этом стандарте. Аналогично, вооруженные силы закупают мягкую и жесткую броню, отвечающую спецификациям военного ведомства.

Баллистические испытания брони имеют особое значение, поскольку ее свойства и, соответственно, эксплуатационные характеристики в зависимости от параметров сырья, технологии обработки и конструкции могут варьироваться в широких пределах.

Стандартные и специальные испытания применяют при выборе материалов, разработке технологических процессов, конструировании и контроле качества конечного изделия. Бронематериалы испытывают как разрушающими, так и неразрушающими методами. Волокна испытывают путем их растяжения в лабораторных условиях. Неразрушающие испытания проводят в процессе ткачества, при поперечной укладке слоев, сборке, а также при формовании деталей бронезилета.

Контроль качества играет важную роль при производстве сырья и готовых изделий. Воспроизводимость и однородность свойств необходимы для обеспечения одинаковых характеристик всей партии изделий при испытаниях и при эксплуатации в полевых условиях. Для этого желательно максимально контролировать качество сырья, качество формования и сборки изделия. Для этого необходимо также проводить оценку качества готового продукта.

Для гарантии краткосрочных и долгосрочных баллистических характеристик изделия важно иметь информацию о варьировании свойств в партии изделий и о возможном изменении качества в процессе формования и сборки. Чтобы избежать любых неожиданностей, приходится оценивать качество материала и проводить приемные испытания отдельных партий. Квалификация материалов военного применения обычно включает весьма длительную серию испытаний, подтверждающих соответствие параметров изделий жестким полевым условиям на протяжении длительного периода времени. Приемка может включать некоторые контрольные баллистические испытания, выбранные из полного набора испытаний.

Для принятия в производство изделие должно пройти многочисленные разрушающие и неразрушающие испытания. Часто подобные испытания необходимы для определения поведения изделия при предполагаемых баллистических воздействиях и условиях окружающей среды еще на стадии разработки. В этом случае в зависимости от результатов в конструкцию изделия можно вносить соответствующие изменения.

Испытания гарантируют соответствие характеристик конечного продукта предъявляемым требованиям и обеспечивают его способность выдержать

предусмотренные условия эксплуатации. После прохождения квалификационных испытаний часть производимых деталей проверяют на соответствие качества и воспроизводимость свойств. Если квалификационные испытания могут быть весьма разнообразны, при приемке тестирование ограничивается одним или несколькими испытаниями в соответствии с ограничениями, налагаемыми производственным графиком и требованиями поддержания определенного уровня себестоимости продукции. В некоторых случаях небольшое количество единиц продукции из данной партии подвергают разрушающим баллистическим испытаниям. Часто наряду с конечным продуктом готовят пробные панели, которые можно испытать как немедленно, так и по прошествии времени, если характеристики продукции в полевых условиях не оправдывают ожиданий.

Главными причинами пробития брони, находящейся на вооружении правоохранительных органов и вооруженных сил, являются:

1. Неправильная оценка баллистической угрозы, неправильное крепление изделия на испытательном стенде, а также плохое состояние пластилинового подслоя.
2. Отсутствие учета разброса баллистических свойств материала.
3. Недостаточный контроль качества материала.
4. Недостаточный контроль качества волокон и процесса ткачества или поперечной укладки слоев.
5. Неправильное применение бронематериалов.

1.11. Баллистическая угроза

Баллистическую угрозу представляют собой пули и осколки снарядов. Пули могут иметь самую разнообразную конструкцию, форму и материал. Некоторые пули состоят целиком из свинца. Другие имеют медную оболочку или стальной сердечник. Осколки могут иметь всевозможную форму и размер, а также скорость разлета. При лабораторных испытаниях используют так называемые «имитаторы осколков» и цилиндрические стержни из упрочненной стали.

1.11.1. Огнестрельное оружие и пули

Информация об огнестрельном оружии и пулях (а также осколках) и о деформировании пуль важна для успешной разработки бронематериалов при минимальном собственном весе. Однако исследование взаимодействия пули и противобаллистического материала может быть крайне сложным делом. Весь процесс выстрела и последующей остановки ударника броней занимает лишь долю секунды. На этот процесс влияет так много факторов, что без включения эмпирических результатов испытаний какие-либо формулы почти неприменимы.

В главе 2 описывается структура и приводятся фотографии некоторых пуль и имитаторов осколков. Пули и имитаторы осколков характеризуются весом, размером, формой и начальной скоростью полета. В этой же главе обсуждаются факторы, определяющие деформирование пули, например, физические свойства во-

локон, их ориентация, свойства тканых и нетканых бронематериалов, влияние покрытий, структуры ламинатов и т.д.

1.11.2. Деформирование ударника

Деформирование снаряда, сталкивающегося с высокопрочной волокнистой броней (мягкой и жесткой формованной), представляет собой сложное явление. Знания о деформации снаряда важны для разработки конструкции брони, обеспечивающей защиту от данного ударника. Пуля с цельнометаллической оболочкой обладает большей проникающей способностью, но меньше травмирует носителя брони. С другой стороны, свинцовая пуля с неполной или отсутствующей металлической оболочкой имеет меньшую проникающую способность, но вызывает большую запреградную деформацию с внутренней стороны брони. Деформирование pistolетных и некоторых винтовочных пуль начинается с момента их проникновения в первый слой волокнистой брони. Размер и твердость стального сердечника, а также скорость пули оказывают решающее влияние на характер деформирования пули с упрочняющим сердечником.

Деформация осколков ограничивается их передней частью, и во многих случаях она столь мала, что без помощи увеличительного стекла или микроскопа ее трудно обнаружить.

Имеется ряд других факторов, влияющих на деформацию снарядов при ударе по легкой волокнистой броне. Они взаимосвязаны, и влияние каждого фактора в отдельности определить трудно. Однако некоторые из факторов имеют важнейшее значение. К ним относятся тип волокон, их ориентация по отношению к соседним слоям волокна и оси пули, механическая связь между волокнами, количество слоев в бронепакете и плотность слоев. Эти факторы рассмотрены в главе 2.

1.12. Конструкция противобаллистических изделий

Конструирование изделий из облегченной волокнистой брони в силу ряда причин является сложным процессом. Вот некоторые из них:

1. Готовые противобаллистические изделия состоят из нескольких слоев, ориентированных в определенном направлении.
2. Поведение материалов зависит от типа ударника.
3. Информация о деформировании снаряда при его проникновении в броню является ограниченной.
4. Разработка математических моделей, описывающих поведение вязкоупругих нелинейных материалов, пока еще находится на начальной стадии.
5. В композитных материалах трудно определить роль каждого материала в обеспечении защитных свойств.
6. Деформация пули является сложным процессом, не все детали которого полностью понятны.
7. Характер крепления изделия влияет на его баллистические характеристики.
8. Неизвестно влияние, оказываемое на броню пластилиновой подложкой.

Вследствие всех этих факторов при конструировании бронежилетов обычно исходят из следующих знаний:

1. Предыдущего опыта конструирования бронежилетов.
2. Информации о разбросе характеристик бронематериалов.
3. Данных о поведении материала при испытаниях.
4. Метода проб и ошибок, особенно при использовании нового материала.
5. Знаний о воздействии влаги, ультрафиолетового излучения и температуры на бронематериалы.

1.13. Спецификации и стандарты

Спецификации – это документы, устанавливающие характеристики брони, удовлетворяющие заказчика. Спецификации могут касаться только единовременного специального заказа или же быть общим документом, содержащим широкий набор требований к бронематериалам и изделиям из них. Начиная с конца 1980-х гг. Военное ведомство США перешло от спецификаций, базирующихся на конкретном продукте, к спецификациям, базирующимся на качественных характеристиках. Такой переход позволил улучшить характеристики бронежилетов, касок и нагрудных пластин. Аналогичные меры военного ведомства Франции и других европейских стран помогли расширить зону защиты тела от поражения, одновременно снизив вес и стоимость армейских касок и нагрудных пластин.

Стандарты, например, NIJ 0101.04, – это технические документы, устанавливающие требования к мягкой и жесткой формованной броне. Стандарт должен точно и подробно описывать метод испытаний. Испытания на соответствие требованиям стандарта проводятся в независимой лаборатории, но иногда это соответствие может гарантироваться фирмой-продавцом. Индивидуальная защитная броня, описываемая данным стандартом, подразделяется на уровни защиты в зависимости от их баллистических характеристик. Сертифицированная броня должна отвечать минимальным эксплуатационным характеристикам защиты от баллистической угрозы, указанной в стандарте.

Помимо США стандарты NIJ были приняты в ряде других стран. Некоторые страны приняли стандарт NIJ без изменений, другие модифицировали его, а некоторые разработали собственные совершенно новые стандарты, учитывающие характер местных баллистических угроз и потребности военных и полицейских ведомств.

1.14. Численное моделирование поведения брони

Численные методы прогнозирования характеристик легких волокнистых композиций на протяжении многих лет вызывают интерес государственных ведомств и коммерческих организаций. Теоретическое и численное моделирование являются экономичными методами оценки баллистических свойств. Хорошая модель, способная прогнозировать баллистические характеристики легкой брони, позволяет сократить сроки разработки и затраты на производство материала и испытания.

При высокой скорости снаряда баллистические характеристики и поглощение энергии бронематериалов зависят от ряда факторов. Некоторые из этих факторов можно определить количественно, но другие с трудом поддаются измерению или прогнозу.

Характеристики материала (его тип, способ переплетения ткани, поверхностная плотность, форма снаряда), особенности деформирования снаряда и скорость снаряда установить сравнительно легко.

Ранние численные модели прогнозирования характеристик брони основывались на эмпирическом и полуэмпирическом подходе к формулировке определяющего уравнения бронематериала, а позднее для прогнозирования баллистических свойств начали применять метод конечных элементов. В этом методе каждому конечному элементу придаются механические свойства ткани, учитывающие их зависимость от скорости деформации. В ряде таких моделей использовались статические свойства материала, что ограничивало их надежность.

В других моделях свойства волокон предполагались линейно-упругими вплоть до момента их разрушения под действием ударной нагрузки. При этом использовали динамический модуль упругости и деформацию разрушения волокон, вводя в модель корректирующий фактор для расчета скорости распространения волны, позволяющий учитывать увеличение эффективной плотности в местах пересечения нитей.

Примером модели, учитывающей зависимость упругопластичных характеристик материала от скорости деформации, служит программа DYNA3D. Она дает возможность представить модуль упругости, разрушающее напряжение и напряжение текучести в зависимости от скорости деформации и вида кривых «напряжение–деформация». Зависимости модуля упругости и разрушающей нагрузки от скорости деформации, в сущности, учитывают вязкоупругое поведение материала.

В одной из новейших моделей брони рассматривается как набор мембранных элементов. Были получены некоторые данные о воздействии сферического снаряда на сравнительно небольшой образец бронематериала. Были созданы модели материала и сферического снаряда, имитирующие распространение волны напряжений от точки удара. Для формулировки определяющего уравнения арамидных волокон использовался полуэмпирический подход. При моделировании вязкоупругих свойств бронематериала использовали систему из двух упругих пружин и вязкого демпфера. Данная модель позволяет предсказывать свойства материала, исходя из весьма упрощенных предпосылок.

В главе 4 настоящей книги приведены примеры численного анализа и эмпирического моделирования брони и дана оценка преимуществ и недостатков этих методов.

1.15. Области применения

В прошедшем десятилетии происходил быстрый прогресс в сфере разработки и производства легких высокопрочных волокнистых бронематериалов. Высокопрочную броню начали использовать вооруженные силы во всем мире. По-

лиция и правоохранительные органы США и других стран в больших количествах закупают маскируемые бронежилеты для своих сотрудников. В США финансирование федеральных программ позволило полицейским управлениям приобретать новейшие, более эффективные мягкие бронежилеты, которые на 20–30% легче прежних жилетов с аналогичными защитными характеристиками.

Ниже приводятся наиболее распространенные области применения легкой брони:

- Средства индивидуальной защиты
 - (а) мягкие гибкие бронежилеты;
 - (б) жесткие литые нагрудные пластины (с керамической облицовкой или без нее);
 - (в) противобалистические каски.
- Бронезащита транспортных средств
 - (а) наземного транспорта;
 - (б) морских судов;
 - (в) самолетов и вертолетов.

1.15.1. Мягкие бронежилеты

За последние пятнадцать лет резко возросли популярность и коммерческий спрос на мягкие бронежилеты, что объясняется рядом причин:

- Появлением новых, более тонких и высокопрочных арамидных волокон.
- Внедрением СВМПЭ волокон.
- Созданием нетканых поперечно ориентированных бронематериалов на основе арамидных, СВМПЭ и ПБО волокон.
- Стремлением к созданию более тонких, легких и гибких бронежилетов.
- Финансированием со стороны правительства США в рамках закона о государственном партнерстве.

Совместное действие всех перечисленных факторов позволило резко уменьшить вес (рис.1.4) и повысить гибкость бронежилетов, находящихся на оснащении полиции и вооруженных сил.

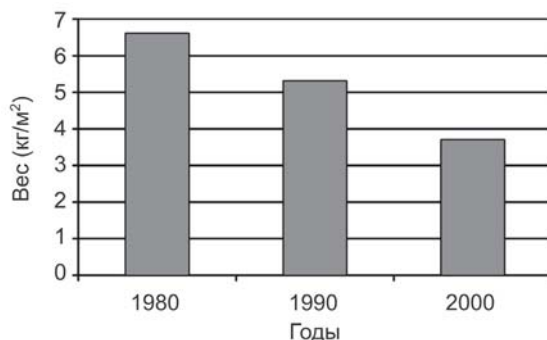


Рис. 1.4. Технический прогресс в области разработки мягких бронежилетов

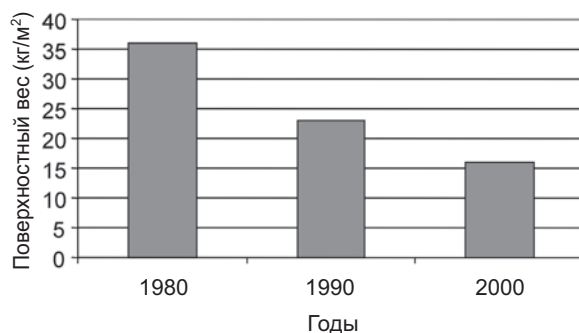


Рис. 1.5. Технический прогресс в области нагрудных пластин, обеспечивающих защиту от пули М80

1.15.2. Жесткие нагрудные пластины

Жесткие формованные нагрудные пластины являются важнейшей частью бронежилетов воинских частей и сил специального назначения, выполняющих боевые задачи, в ходе которых существует опасность поражения высокоскоростными винтовочными пулями. Всего лишь десять лет назад композитные нагрудники из керамики с подложкой из формованных слоев арамидного препрега имели весьма большой вес. Такие пластины изготавливали формованием в автоклавах, а производственный брак был велик. Это объяснялось рядом факторов, включающих низкое качество керамики и наличие промежутков между керамическими пластинами из-за их смещения при формовании в автоклаве.

Радикальные изменения технологии производства и характеристик нагрудных пластин наступили с внедрением СВМПЭ волокон и поперечно ориентированных материалов. Поперечно ориентированный СВМПЭ формируют при высоком давлении и повышенной температуре очень быстро. Полученные пластины оказываются почти вдвое легче и обеспечивают защиту от различных видов высокоскоростных пуль. При этом резко снижается процент брака, а долговечность существенно возрастает. Рис. 1.5 показывает темпы снижения веса нагрудных пластин за последнее время.

1.15.3. Противобаллистические каски

На протяжении долгого времени защитные каски были важнейшим элементом оснащения войск. Во время Первой и Второй мировых войн каски использовали все стороны конфликта. Они обеспечивали защиту лишь от низкоскоростных баллистических ударов. Во время вьетнамской войны армия США экспериментировала с арамидными вставками, помещаемыми внутрь стальных касок. Они позволили повысить предельную скорость пули, от которой защищает каска, с менее чем 300 до почти 450 м/с. Опытные-конструкторские работы, проводившиеся Военным ведомством США, привели к внедрению в начале 1980-х гг. первой армейской каски, изготовленной целиком из композитов. Эту каску делали из препрега на базе арамидной ткани, а уровень защиты увеличился до 600 м/с. Вне-

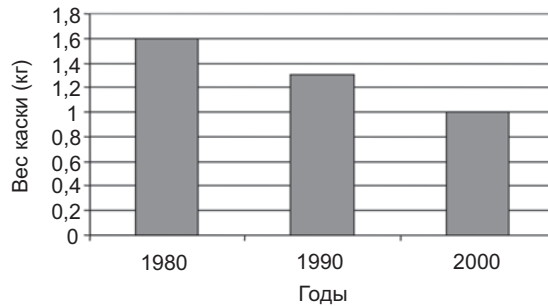


Рис. 1.6. Прогресс в области развития армейских касок

дрение СВМПЭ волокон позволило уменьшить вес касок еще на 20% (рис. 1.6). После возникновения технологий, позволяющих получать нетканый композит на основе практически любых волокон, вес касок уменьшился еще на 10%.

В настоящее время американская армия планирует закупку касок нового поколения, которые обеспечивают защиту от различных угроз, включая осколки и пули FMG калибром 9 мм, при значительно меньшем весе, чем у существующих касок.

1.16. Бронезащита транспортных средств

Над решением задачи снижения веса брони военных транспортных средств совместно работают ученые целого ряда стран. В настоящее время обычно используют броню из высокопрочной стали. Она весьма дешева и доступна в практически неограниченных количествах. Ее недостаток состоит в большом весе. Существует ряд более легких и более прочных металлов, однако их использование не позволяет добиться существенного снижения веса брони.

В результате одной из первых попыток создания боевой машины пехоты из композитов удалось значительно снизить вес брони. Корпус получали ручной выкладкой слоев препрега на основе стеклянных S-2 и E-волокон и полиэфирной смолы. При этом удалось сократить количество деталей брони.

Большим шагом вперед в деле разработки более легких, эффективных и живучих машин стал созданный в 2002 г. опытный образец, получивший название «демонстратор передовых технологий композитных бронемашин». Этот автомобиль оснащен броней из слоев керамики и волокнистого композита с поверхностной плотностью около $5,5 \text{ кг/м}^2$, а экономия веса по сравнению с традиционной металлической броней составила 35%. В настоящее время ставится задача добиться снижения этого показателя до 2 кг/м^2 для брони, защищающей от снарядов AP 50 калибра.

В воздушных транспортных средствах (вертолетах и грузовых самолетах) используют новейшую керамику из карбида бора и карбида кремния с подложкой из композитов на основе СВМПЭ или арамидных волокон, что обеспечивает защиту от менее мощных пуль, таких как пули AP 30 калибра и имитаторов осколков 50 калибра. Применение облегченной брони описано в главе 13.

1.17. Будущее волокнистой брони

История развития брони состояла в развитии противобаллистических материалов, а также формы и конструкции брони. Анализ развития брони, которая на протяжении тысячелетий изготавливалась из нескольких видов материалов, может быть весьма полезен для генерирования новых идей в этой области. Теперь спектр бронематериалов стал намного шире. Кроме того, выявляется определенная цикличность обращения к гибким материалам, таким как ткани и войлок, которые использовались много лет назад, а теперь вновь обрели популярность.

Основой легких бронематериалов в настоящее время являются высокопрочные волокна. Эти синтетические волокна созданы в результате широкомасштабных НИОКР, на которые затрачены многие миллионы долларов. Два общеизвестных вида противобаллистических волокон, упоминаемых в настоящей книге, — это арамиды и сверхвысокомолекулярный полиэтилен. Чаще всего для получения легких противобаллистических композитов применяют термопластичные (полиуретан, синтетический каучук и полиэтилен) и термореактивные смолы (фенольные и виниэфирные).

Новым противобаллистическим волокном является ПБО. Однако широкому использованию этих волокон препятствуют ограниченные объемы производства и недостаток данных об изменении их свойств при длительной эксплуатации. Появилось также волокно М5, о котором на сегодняшний день имеются только теоретические данные.

1.18. Партнерство поставщиков сырья и производителей брони

Фирмы-поставщики сырья и производители противобаллистических композитов обладают мощной технологической базой, которая обеспечивает их необходимой информацией, позволяющей добиваться рентабельности как текущего производства, так и, что еще более важно, новых видов продукции. Уровень этой технологии и ее востребованность завистят от типа бизнеса и конкурентного положения фирмы.

Задача успешного производства рентабельной высокопрочной противобаллистической продукции достаточно сложна и поэтому требует единого управления. Здесь требуются знания технологии и различных наук, включающих физику и материаловедение. Представляется, что дальнейший прогресс бронематериалов будет связан с созданием новых высокопрочных волокон. Что же касается жесткой брони, то и матрицы еще не достигли уровня, позволяющего добиться полного использования потенциальных свойств волокон.

1.19. Рост объемов производства бронематериалов

Если говорить о современных тенденциях в области легких бронематериалов, то очевидно, что быстрыми темпами будет расти производство композитов. Общий темп роста всего промышленного производства составлял в последнее время ме-

нее 5% в год. В области композитов он достигал 10%, а в производстве бронематериалов начиная с 2000 г. – более 25%.

Потребность в повышении эффективности при сохранении низкого уровня стоимости материала продолжает расти по мере неизбежного внедрения новых материалов в массивные транспортные средства. При этом особое значение приобретает износостойкость в различных условиях окружающей среды. В дальнейшем с ростом знаний и доверия к противобаллистическим продуктам они будут находить все более широкое применение.

Применение легкой брони растет в авиации, особенно на летательных аппаратах, используемых в зонах военных конфликтов. Наибольшую прибыль это приносит компаниям, занятым оснащением броней грузовых самолетов типа С 130, ряда вертолетов и беспилотных самолетов. Потенциал использования подобной брони ограничивается лишь нехваткой высокопрочных волокон. Главными недостатками легкой брони являются сравнительно высокая себестоимость, недостаток данных о возможностях ремонта в полевых условиях и о длительной эксплуатации в экстремальных условиях, а также затруднительность повторного использования отдельных компонентов брони.

1.20. Интеграция и слияние отраслей производства бронематериалов

В последние годы производство легких композитных бронематериалов, подобно промышленности конструкционных композитных материалов в конце «холодной войны» (середина 1980-х гг.), вошло в полосу интеграции, слияний и перегруппировки. Представляется, что в мировом масштабе этот процесс будет только усиливаться. В некоторых областях, особенно среди производителей крупномасштабных противобаллистических изделий, интеграция позволяет более эффективно увеличить объем производства. Поглощение других фирм способствовало процветанию многих компаний, позволяя им наладить внутреннее производство весьма специализированных волокон и препрегов. Фирмы, с самого начала правильно оценившие огромные возможности бронематериалов и должным образом подготовившиеся к расширению производства, продолжают бурно развиваться.

На пути нынешнего взрывного роста производства брони имеется много потенциальных препятствий. Они должны быть преодолены, прежде чем новые бронематериалы получат всеобщее признание и в широких масштабах смогут заменить стальную броню в военных транспортных средствах. Недоверие у конструкторов транспортных средств вызывают высокая стоимость и надежность характеристик новых материалов. Надежность характеристик продукта и процесса его формирования зависят от контроля качества, особенно в ходе полевых испытаний.

Некоторые конструкторы имеют дело только с металлом и просто не владеют информацией о легких композитах, вероятно, вследствие нехватки времени на исследования в области применений последних. Однако по мере расширения сферы использования легких бронематериалов данные о них станут появляться в

справочниках, стандартах и в интернете. Пока же государственные ведомства, фирмы-производители, всевозможные общества и ассоциации последовательно прилагают усилия по совершенствованию и разработке новых стандартов, спецификаций и методов испытаний.

Данные о характеристиках нынешних и ранее выпускавшихся материалов, равно как и современные НИОКР, лежат в основе развития промышленности легких противобаллистических материалов. Эффективное использование новых возможностей — это ключ к широкомасштабному выходу на рынок и высокой прибыльности всей отрасли.

Как гибкая, так и жесткая броня должны все шире использоваться для защиты личного состава правоохранительных органов, вооруженных сил и служб безопасности. Хотя радикальный технологический прорыв в ближайшие 5–10 лет здесь вряд ли возможен, развитие будет постепенным, но неуклонным, причем ограничивающим фактором будут экономические соображения, а не технология. Настоящий переворот может произойти лишь в применении легкой брони в более эффективных и легких средствах индивидуальной защиты и на транспорте. Прогресс в области фундаментальных знаний о механизмах взаимодействия снаряда с легкими противобаллистическими композитами в скором времени должен открыть новые возможности их применения. Использование волокон с повышенной прочностью и более высоким модулем упругости в сочетании с соответствующей матрицей позволит значительно снизить вес брони. Как и всегда, запросы военных и правоохранительных ведомств будут стимулом для НИОКР, в результате чего появятся новые материалы, которые в конце концов найдут и гражданское применение.

Разработка более легкой и более эффективной брони вызвана стремлением уменьшить потери личного состава в ходе боевых действий, миротворческих и полицейских операций. Другие важные факторы — это необходимость снижения веса средств индивидуальной защиты и необходимость создания более удобных бронесистем, не мешающих движению. Снижение веса позволит уменьшить тепловую нагрузку, испытываемую человеком, что снизит потоотделение и создаст более комфортные условия для выполнения боевой задачи.

1.21. Литература

- Adams, D.F., Zimmerman, R.S. and Chang, H.W., «Properties of a Polymer-Matrix Composite Incorporating Allied A-900 Polyethylene Fiber», *SAMPE Journal*, Vol.21, No. 5, 1985, 44–48.
- Bhatnagar, A., Cordova, D.C. and Lin, L.C., «Extended Shelf Life Prepreg Articles and Methods», US Patent Number 5,165,989, November 1992.
- Cunniff, P.M. «An analysis of the system effect in woven fabrics under ballistic impact», *Textile Research Journal*, Vol. 62, 1992, 495– 509.
- Eldin, S.H., «Fiber Composite Prepreg Coated with two Different Resins», US Patent Number 4,486,497, December 1984.
- «Future Combat System Vehicle Prototypes Unveiled by United Defense», *Advanced Materials & Composite News*, Vol. 24, No. 21, November 2002.

- Hearle, J.W.S., *High Performance Fibers*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England, 2001.
- Laible, R.C., *Ballistic Materials and Penetration Mechanism*, Elsevier Scientific Publishing Company, 1980.
- Lee, B.E., Song, J.W. and Ward J.E., «Failure of SPECTRA Polyethylene Fiber-Reinforced Composites under Ballistic Impact Loading», *J. of Composite Materials*, Vol. 28, No. 13, 1994, 1202–1226.
- Li, H.L., Prevorsek, D.C., Harpell, G.A. and Kwon Y.D., «Ballistic-Resistant Composites», US Patent Number 4,916,000, April 1990.
- Lim, C.T., Shim, V.P.W. and Ng, Y.H., «Finite-element modeling of ballistic impact of fabric armor», *International J. of Impact Engineering*, 28, 2003, 13–31.
- Lin, L.C., Bhatnagar, A. and Chang, H.W., «Ballistic Energy Absorption of Composites», *Proc. of the 22nd SAMPE Intl Tech. Conf.*, 1990, 1–13.
- Lubin, G., *Handbook of Composites*, Van Nostrand Reinhold Company, 1982.
- Mohr, J.G., Oleesky, S.S., Shook, D.G. and Meyer, S.L., *SPI Handbook of Technology and Engineering of Reinforced Plastics/Composites*, 2nd edn, Robert Krieger Publishing Company, New York, 1981.
- Parga-Landa, B. and Hernandez-Olivares, F. «An analytic model to predict behavior of soft armor», *Int. J. Impact Engineering*, Vol. 16, 1995, 455–466.
- Pervorsek, D.C., Chin, H.B. and Murthy, S., «Origins of Damage Tolerance in Ultrastrong Polyethylene Fibers and Composites», *J. of Polymer Science: Polymer Symposium* Vol. 75, 1993, 81–104.
- «Police Body Armor Standards and Testing», Volume 1: Report, Congress of the United Office of Technology Assessment. August 1992.
- Pushpa, Bajaj and Sriram, «Ballistic Protective clothing: An overview», *Indian Journal of Fibers & Textile Research*, Vol. 22, December 1997, 274–291.
- Riewald, P.G., Folger, K., Yang, H.H. and Shanghtessay, «Lightweight Helmets from New Aramid Fiber», *Proc. of the 22nd SAMPE Intl Tech. Conf.*, 1990, 684–695.
- Rinker, A. Robert, *Understanding Firearm Ballistic*, 4th edn, «Mulberry House Publication, Arizona, 1999.
- Segal, C.L., «High Performance Organic Fibers, Fabrics and Composites for Soft and HARD Armor Applications», *Proc. of the 23rd SAMPE Intl Tech. Conf.*, 1991, 651–660.
- Slone, Forrest and Nguyen, «Mechanical Characterization of Extended-Chain Polyethylene (ECPE) Fiber-Reinforced Composites», *J. of Composite Materials*, Vol. 29, No. 16, 1995, 2092–2107.
- Thomas T.S., «Facets of a Lightweight Armor System Design», *Proc. of the 22nd SAMPE Intl Tech. Conf.*, 1990, 304–311.
- «U.S puts new armored carrier into military service in Iraq», *Advanced Materials & Composite News*, Vol. 26, No. 23, February 2004.
- Walter, Williams and Scott, Brian R., «High Velocity Penetration of Kevlar Reinforced Laminates», *Proc. of the 22nd SAMPE Intl Tech. Conf.*, 1990, 1078–1091.
- Weeden, G.C and Tam, T.Y., «Properties and Application of Extended Chain Polyethelene», *UMIST Symp. on High Perf. Fibers, Textile and Composites*, 1985.

ЧАСТЬ I

ТРЕБОВАНИЯ К МАТЕРИАЛАМ И МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЯ

ГЛАВА 2

ПУЛИ И ОСКОЛКИ

А. Бхатнагар, Honeywell International Inc., США

2.1. Введение

На протяжении столетий люди подвергались воздействию пуль и осколков, возникающих при взрывах бомб и артиллерийских снарядов. По мере технического прогресса в области взрывчатых веществ, боеприпасов, пистолетов и винтовок, а также появления высокоэффективных систем доставки бомб уровень баллистической угрозы постепенно возрастал. В некоторых районах мира винтовки и патроны к ним можно весьма дешево приобрести на открытом рынке. С баллистическими угрозами сталкиваются как полицейские и сотрудники других правоохранительных органов, так и военные (включая миротворцев), причем как при учениях, так и во время выполнения реальных задач.

Дать полное описание всех типов пуль, которые можно приобрести легально и нелегально, и тех, которые доступны террористам, — дело затруднительное. Поэтому в данной главе приводятся данные только о широко распространенных пулях, которые хорошо известны полиции и военным, включая международные агентства, занятые вопросами обеспечения безопасности полиции и других правоохранительных ведомств. В настоящей главе будет также уделено внимание типам осколков, используемым при лабораторных испытаниях в США и других странах мира.

В этой главе не затрагиваются процессы внутренней баллистики, происходящие внутри огнестрельного оружия, таких как горение пороха, трение внутри ствола и изменение давления в стволе в процессе выстрела. Мы не будем касаться также внешней баллистики, т.е. полета пули. Однако в завершающей части главы мы коротко остановимся на вопросах разрушения, возникающего при взаимодействии снаряда и волокнистых композитов противобаллистического назначения. Во второй части главы мы затронем деформацию пуль и осколков при взаимодействии с легкими бронематериалами. Хотя деформация снаряда, проникающего в мягкую или жесткую формованную броню, является сложным явлением, мы укажем на основные факторы, определяющие его деформирование при столкновении с волокнистым композиционным материалом.

2.2. Пистолеты и винтовки

Пистолеты (или револьверы) и винтовки используются как правоохранительными органами, миротворцами и военными, так и группами лиц, противостоящи-



ми этим ведомствам. Пистолеты и винтовки классифицируют в зависимости от длины ствола как короткоствольные (пистолеты и револьверы) и длинноствольные (винтовки и охотничьи ружья).

Калибром называется внутренний диаметр ствола. Таким образом, пистолет (или винтовка) 22 калибра имеет внутренний диаметр ствола, равный 0,22 дюйма, а калибра 9 мм – диаметр ствола, равный 9 мм. Исключение составляет калибр .38 Special, имеющий тот же внутренний диаметр ствола, что и револьвер .357 калибра, а именно 0,357 дюйма. В то время как .38 Special не может использовать более длинные боеприпасы «магнум» .357 калибра, револьвер .357 калибра может использовать патроны для .38 Special. Обозначение «.380» применяется для автоматического оружия, использующего пули .38 калибра, снабженные особыми патронами.

По типу действия стрелковое оружие часто подразделяют на «полностью автоматическое», «автоматическое», «самозарядное», «самовзводное», «простого действия», «со скользящим затвором», «рычажного действия» или «помповое». Эти термины обозначают, что необходимо сделать для повторного выстрела. «Полностью автоматическое» оружие при нажатом спусковом крючке будет вести непрерывный огонь вплоть до опорожнения магазина с патронами. «Полуавтоматическое», «самовзводное» и «самозарядное» оружие требует для произведения каждого выстрела отдельного нажатия на спусковой крючок. Оружие «простого действия» требует взвода курка между выстрелами. Винтовки и пистолеты со «скользящим затвором», «рычажного действия» и «помповые» требуют действия затвора, рычага или помпы между отдельными выстрелами.

Термины «автоматический» и «полуавтоматический» иногда используются и понимаются неправильно. Когда дело касается пистолетов и револьверов, термин «автоматический» используется как противоположность термину «револьвер». Пистолет Кольт .45 M1911 a1 (на протяжении десятилетий служивший личным оружием американских военных) – «автоматический», в то время как Кольт .45 Писмэйкер (знаменитое оружие ковбоев) – это револьвер. «Автоматические» пистолеты стреляют в режиме, который для других видов огнестрельного оружия называется «полуавтоматическим»: выстрелы можно производить в быстрой последовательности путем повторного нажатия на спусковой крючок, без приведения в действие затвора или помпы. Такое оружие продолжает стрелять, если спусковой крючок находится в нажатом состоянии. Напротив, термин «автоматический» по определению уместен лишь для «полностью автоматического» оружия, т.е. пулеметов, которые при нажатом спусковом крючке ведут непрерывный огонь. Большинство таких видов оружия имеет переключатель, позволяющий стрелку выбирать между «автоматическим» и «полуавтоматическим» режимом действия.

Автоматом называется пулемет, использующий пистолетные боеприпасы. Карабин – это компактная винтовка, а «штурмовая винтовка» отличается от других полуавтоматических карабинов в основном внешним видом, а не принципом действия.

2.3. Пистолетные и револьверные пули

Пистолетные боеприпасы характеризуются диаметром пули, длиной гильзы патрона, формой и конструкцией пули. Охотничье оружие характеризуют диаметром ствола, из которого выстреливается одиночная пулеподобная болванка, а в случае дробового ружья – размерами дроби.

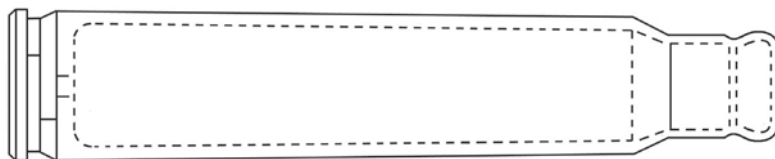


Рис. 2.1. Гильза боеприпаса

Диаметры пуль соответствуют внутреннему диаметру стволов, из которых ведется стрельба. Длина патрона непосредственно влияет на количество содержащегося в нем пороха и, следовательно, на начальную скорость пули. Патроны типа «Магнум» длиннее стандартных патронов, так что они могут содержать больше пороха. Аналогичным образом казенная часть многих пистолетов рассчитана на патроны типа .22 Long Rifle, содержащие больше пороха, чем «короткие» патроны 22 калибра (.22 «короткие») (рис. 2.1).

Пули различаются по форме, конструкции и конструкции. Все пули имеют аэродинамическую форму, которая помогает сохранять скорость полета при стрельбе с большого расстояния. Хотя воздух оказывает существенное лобовое сопротивление, замедляющее полет пули, вследствие аэродинамичности ее формы потеря скорости оказывается не слишком значительной (рис. 2.2).

По форме пули варьируются от заостренных «стреловидных», которые при испытаниях средств индивидуальной защиты теперь не используются, до цилиндрических тупоконечных пуль, создающих круглые отверстия на бумажных мишенях. Форма «полутупоконечной» пули является промежуточной между «тупоконечной» и типичной аэродинамической формой пули (рис. 2.3).

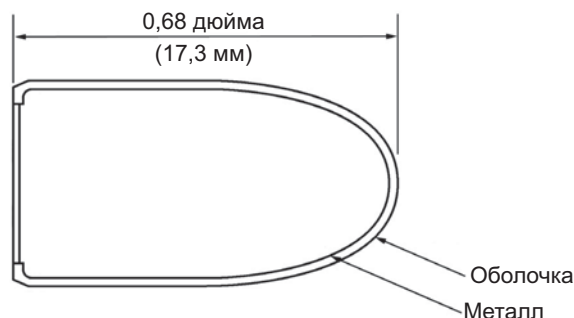


Рис. 2.2. Аэродинамическая форма свинцовой пули с тонкой металлической оболочкой

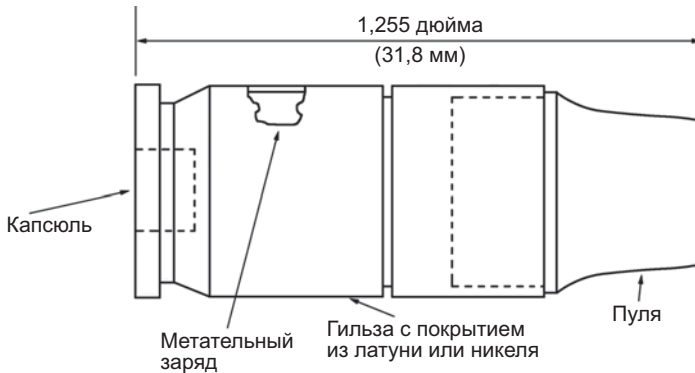


Рис. 2.3. Патрон с тупоконечной пулей

Пули с полым наконечником имеют небольшую полость в передней части, что вызывает ее расплющивание при попадании в цель. Существуют некоторые разногласия относительно того, существенно ли влияют на пробитие разных видов брони некоторые различия формы номинально идентичных пуль. Пули могут быть полностью или частично покрыты металлической оболочкой. Частичная оболочка типична для пуль с полым наконечником, в которых переднюю часть пули оставляют открытой. Оболочку обычно изготавливают из меди, обладающей достаточной прочностью и долговечностью и в то же время почти не повреждающей ствол пистолета или винтовки при выстрелах. У основания пули имеется медный щиток, предотвращающий плавление пули горящим порохом внутри ствола.

Обычные пули состоят из свинца. Свинец является весьма мягким металлом и легко деформируется при попадании в тело человека. Эта деформация может вызвать серьезные повреждения. Твердость свинцового сплава зависит от того, какие количества других металлов входят в его состав.

Некоторые пули содержат более твердые металлы, иногда в виде включения из мягкой стали, заостренной иглы или сердечника из высокопрочной стали или вольфрама. Эти пули называются «броневойными». Редко встречающиеся пули с тефлоновым покрытием, изготовленные из стали, латуни или вольфрама, получили печальную известность, которая, однако, совершенно не соответствует их малой распространенности. Эти пули способны пробивать мягкие бронежилеты. Отметим, что сам по себе тефлон не обладает особыми бронебойными свойствами, а наносится просто для снижения износа ствола при стрельбе пулями из очень жестких материалов.

Заряды для охотничьих ружей варьируют от сотен мелких дробинок при охоте на птицу вплоть до одиночных пулеобразных дробинок. Средним между этими крайностями является крупная дробь, при этом патрон заряжают примерно десятью дробишками. Чтобы компенсировать отсутствие нарезки у большинства охотничьих ружей, на боковые стороны отдельных дробинок при отливке обычно наносят наклонные бороздки, придающие дроби аэродинамическое вращение, необходимое для устойчивости полета.

2.4. Осколки

Осколки возникают при взрывах бомб, гранат или артиллерийских снарядов. Поскольку указанные взрывные устройства изготавливают из упрочненной стали, при взрыве осколки приобретают всевозможные формы и размеры и, соответственно, разлетаются с различной скоростью. Поскольку испытания со всеми возможными формами и размерами осколков, движущихся с разной скоростью, произвести невозможно, Военное ведомство США рекомендовало использовать имитаторы осколков пяти размеров, которые позволяют имитировать разнообразие их форм и видов.

Согласно военной спецификации США MIL-P-4659A имитаторы осколков классифицируют следующим образом:

- калибр .22 типа 1 (применяется при испытаниях бронепанелей),
- калибр .22 типа 2 (применяется при испытаниях индивидуальной брони),
- калибр .30,
- калибр .50,
- 20 мм.

2.4.1. Конструкция имитатора осколка

Как явствует из названия, имитатор осколка моделирует свойства реальных осколков, а именно: форму, размер, режущую и пробивающую способность крупных, средних и мелких осколков, возникающих при взрыве снаряда в упрочненной стальной оболочке. Плоская передняя часть осколка с острыми гранями имитирует режущее и проникающее действие, а задний выступ имитирует разрезающее действие (рис. 2.4).

Следующие осколки изготавливают из отпущенной холоднокатаной стали марок 4337Н и 4340Н:

- калибр .22 типа 1,
- калибр .22 типа 2,
- калибр .30,
- калибр .50,
- 20 мм.

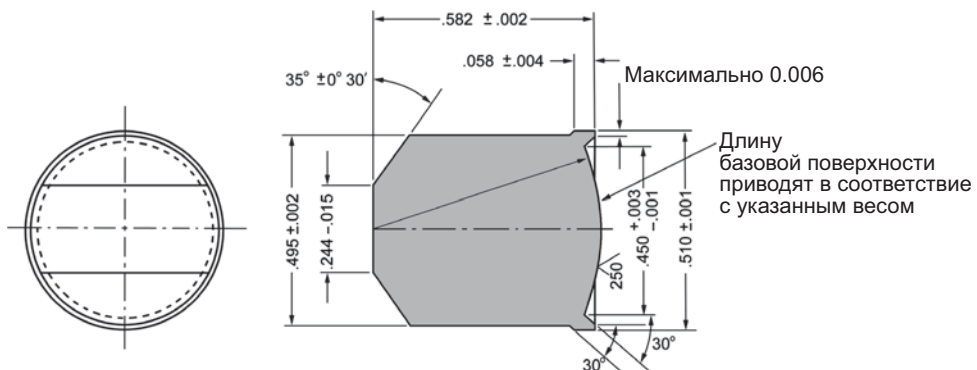


Рис. 2.4. Форма имитатора осколка

Таблица 2.1. Твердость имитаторов осколка

Осколок	Твердость по Роквеллу
Калибр .22 типа 1	30 ± 1
Калибр .22 типа 2	27 ± 1
Калибр .30	30 ± 1
Калибр .50	30 ± 1
20 мм	30 ± 1

Осколок 22 калибра типа 2 может состоять из той же стали, что и другие осколки, указанные в табл. 2.1.

2.4.2. Твердость осколка

Осколок закаливают и отпускают вплоть до достижения значений твердости, указанных в табл. 2.1.

2.4.3. Вес осколка

Вес осколка указан в табл. 2.2. Отделка и размеры осколков описаны в спецификации MIL-P-46593A (рис. 2.5).

Таблица 2.2. Вес имитаторов осколка

Осколок	Вес в гранах
Калибр .22 типа 1	$17,0 \pm 0,5$
Калибр .22 типа 2	$17,0 \pm 0,5$
Калибр .30	$44,0 \pm 0,5$
Калибр .50	$207,0 \pm 0,5$
20 мм	$830,0 \pm 0,5$

**Рис. 2.5.** Имитаторы осколка 50, 30 и 22 калибра

2.4.4. Цилиндрические имитаторы осколка

Следующие имитаторы осколков изготавливают из холоднокатаной отпущенной стали марок 4337Н и 4340Н:

- осколок весом 2 грана,
- осколок весом 4 грана,

осколок весом 16 гран,
осколок весом 64 грана,
осколок весом 128 гран.

Указанные осколки могут делаться из той же стали, что и другие осколки, описанные в табл. 2.3.

Таблица 2.3. Твердость цилиндрических имитаторов осколка весом 2, 4, 16, 64 и 128 гран

Осколок	Твердость по Роквеллу
Вес 2 грана	30 ± 1
Вес 4 грана	30 ± 1
Вес 16 гран	30 ± 1
Вес 64 грана	30 ± 1
Вес 128 гран	30 ± 1

2.4.5. Твердость цилиндрических имитаторов осколка

Цилиндрические имитаторы осколка подвергаются закалке и отпуску вплоть до достижения значений твердости по Роквеллу, приведенных в табл. 2.3 (рис 2.6).

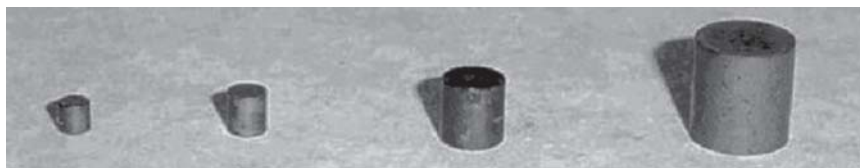


Рис. 2.6. Цилиндрические имитаторы осколка весом 2, 4, 16 и 64 грана; отношение длины к диаметру равно 1

2.5. Пистолетные пули

Пули для легкого стрелкового оружия имеют разный калибр, форму и состоят из различных материалов. Некоторые пули состоят целиком из свинца, другие в свинце имеют упрочняющий стальной сердечник и покрыты оболочкой. Оболочка может быть из меди, тонкого слоя стали, стали, покрытой медью или из другого металла. Некоторые находящиеся на вооружении хрупкие пули калибра .30 и 7,62 мм формуются из порошкообразного свинца и хрупкого пластика, которые при попадании в мишень превращаются в пыль. Обычная пуля состоит из свинца и более твердой металлической оболочки. Пули калибра .50 и 7,62 мм M59 имеют сердечник из мягкой стали.

По мере увеличения дистанции стрельбы пули постепенно теряют скорость и энергию; для поражения цели необходимы оба этих фактора. Если при ударе о мишень пуля не расплющивается, более эффективны крупные калибры, поскольку они пробивают более широкое отверстие. Если мишень находится на расстоянии более 300 м, желательны больший вес и скорость пули. При стрельбе по удаленным мишеням преимущество имеют пули калибром 30-06 и 7 мм. При ударе о

мишень высокоскоростные пули расплющиваются сильнее, чем низкоскоростные пули, но их проникающая способность ниже. Скорость и вес имеют значение для плоской траектории полета пули и при стрельбе по удаленным мишеням. Если мишень не столь удалена, характер траектории не столь важен. Для многих видов стрелкового оружия пули с плоской траекторией полета при стрельбе по удаленным мишеням теряют слишком много энергии.

Вес, скорость и способность пули к расплющиванию должны возрастать при увеличении дистанции стрельбы, размера мишени и ее стойкости к пробитию. Для пробития легкой брони требуются пули с высокой пробивающей способностью и меньшей способностью к расплющиванию. Для поражения такой цели предпочтение имеют тяжелые низкоскоростные пули. Увеличение скорости пули может привести (а может и не привести) к увеличению бронестойкости мишени.

При стрельбе на большую дистанцию небольшая ошибка в оценке расстояния до цели (всего лишь в 10%) почти гарантирует промах. На меньших дистанциях стрельбы, например, 200 м, ошибка в 20% при стрельбе пулей, принятой в армиях НАТО (M80), может привести к промаху, но при стрельбе пулей 30-06 таких проблем обычно не возникает. Сила тяжести притягивает пулю к земле на одну и ту же величину за одинаковое время полета. Поэтому для стрелкового оружия время полета пули имеет важное значение, равно как дистанция стрельбы и скорость пули. Рекомендуемая максимальная дистанция стрельбы по малым целям составляет около пятисот метров. При холодной погоде плотность воздуха, а, следовательно, и лобовое сопротивление возрастают. Холодная погода приводит также к замедлению воспламенения пороха, но эта величина столь незначительна, что ею обычно можно пренебречь. Стрельба в условиях моросящего дождя также не меняет дела, хотя при дожде атмосферное давление обычно понижено, но это не приводит к заметным помехам.

Качество боеприпасов вопреки ожиданиям не ухудшается на протяжении срока их хранения. Патроны сохраняют свои характеристики даже по истечении десятилетнего срока хранения. Ниже приводится описание наиболее распространенных пуль, находящихся на вооружении армии и полиции.

2.5.1. Советский пистолетный боеприпас 7,62 × 25 мм

Синонимы

Боеприпас пистолета Токарева 7,62 мм

История создания

Патрон первоначально был разработан для автоматического пистолета фирмы «Маузер» калибром 7,63 мм. Русская армия использовала его с начала 1900-х гг. Для удобства производства ствол пистолета Токарева имел калибр 7,62 мм, поэтому в советское время этот патрон стали называть не «Маузер», а Токарев 7,62 мм. Этот боеприпас выпускают также в Китае и странах бывшего Варшавского до-

говора по советским спецификациям. Китайцы начали выпускать этот боеприпас для автоматических пистолетов типа 54, типа 80, а также для легкого автомата типа 79.

Спецификация

Пуля типа Р
Длина боеприпаса 34,55 мм
Вес патрона 10,65 г
Длина гильзы 25,14 мм
Диаметр обода 9,91 мм
Диаметр пули 7,82 мм
Вес пули 5,57 г
Начальная скорость пули 505 м/с
Начальная энергия 709 Дж.

2.5.2. Боеприпас 7,62 × 39 мм советской автоматической винтовки АК 47

Синонимы

7,62 × 39 мм; Калашников 7,62 мм; 7,62 мм образца 1943 г.

История создания

Советские разработки винтовочного патрона были начаты в конце 1930-х гг., одновременно с аналогичными разработками в Финляндии, Германии и Швейцарии, но были остановлены в 1939 г. В 1943 г. работы были возобновлены. Конструкция, приписываемая Н.М. Елизарову и Б.В. Семину, получила одобрение в конце 1943 г. и была опробована на экспериментальном карабине Симонова, который в дальнейшем получил название СКС. Основное распространение боеприпас получил после появления автоматической винтовки Калашникова АК 47, после чего он стал стандартным боеприпасом для винтовок и легких пулеметов армий Варшавского договора и широко использовался в странах, получавших оружие из Советского Союза.

Спецификация

Пуля 57N231
Длина боеприпаса 8 мм
Длина гильзы 38,65 мм
Диаметр обода 7,9 мм
Диаметр пули 7,9 мм
Вес пули 7,97 г
Номинальный заряд — 1,6 г пороха SSNF 50
Начальная скорость 710 м/с
Начальная энергия 2010 Дж (рис. 2.7).

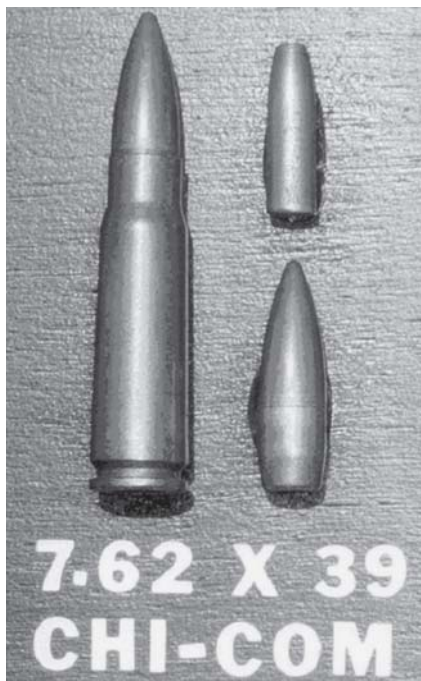


Рис. 2.7. Патрон и пуля АК 47 с сердечником из мягкой стали

2.5.3. Боеприпас НАТО калибра 7,62 мм

Синонимы

7,62 × 51 мм

История создания

Боеприпас 7,62 × 51 мм был разработан в начале 1950-х гг. в качестве компромиссного варианта между полноразмерным 30-06 и предлагавшимся британским 7 мм патроном. Он очень похож на 30-06, но имеет укороченную гильзу. Широкое распространение получил после принятия на вооружение НАТО в январе 1954 г. В разное время он производился более чем в 50 странах и изготавливался даже для спортивной стрельбы.

Спецификация

М80 США

Длина боеприпаса 69,85 мм

Длина гильзы 51,05 мм

Диаметр обода 11,94 мм

Диаметр пули 7,79 мм

Вес пули 9,65 г

Начальная скорость 854 м/с

Начальная энергия 3519 Дж (рис. 2.8).

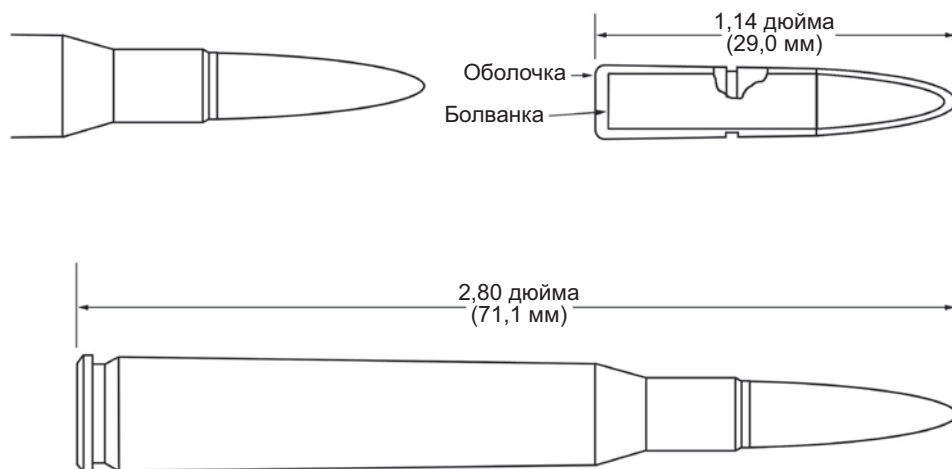


Рис. 2.8. Боеприпас M80

2.5.4. Боеприпас калибра 0.22 дюйма

Оружие

Все винтовки и пистолетов калибра .22, кроме специально предназначенных для коротких патронов .22 Short.

История создания

В 1887 г. американская фирма J. Stevens Arms & Tool Company разработала патрон калибра .22 для длинноствольного оружия, взяв за основу имевшийся патрон .22 Long и снабдив его пороховым зарядом весом 0,324 г и свинцовой пулей весом 2,59 г вместо обычной 1,88 г пули (рис. 2.9). Вероятно, первой фирмой, наладившей в 1888 г. промышленное производство этого боеприпаса, была Union Metallic Cartridge Company. Фирма «Ремингтон» в 1930 г. впервые оснастила этот патрон зарядом, придающим пуле высокую скорость. С течением времени данный патрон стал самым совершенным, обеспечивающим наивысшую точность стрельбы. Обычно он снабжается цельносвинцовыми пулями весом 2,59 г или пулями с полым наконечником весом 2,4 г, хотя существуют и другие модификации. Вооруженные силы обычно используют такие боеприпасы для тренировочных целей, однако они применялись и в боевых действиях, особенно в случаях, когда требовались скрытность стрельбы и точность попадания.

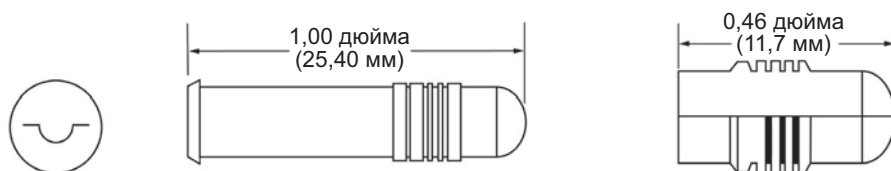


Рис. 2.9. Патрон и пуля .22 калибра

Спецификация

Длина боеприпаса 24,76 мм
Длина гильзы 15,11 мм
Диаметр обода 6,98 мм
Диаметр пули 5,66 мм
Вес пули 2,6 г
Начальная скорость 348 м/с
Начальная энергия 157 Дж.

2.5.5. Боеприпас Мосина-Нагана 7,62 × 54R

Синонимы

7,62 × 54R; советский с ободом 7,63 мм; 7,62 мм образца 1891 г.

История создания

Поступил на вооружение русской армии в 1891 г. вместе с винтовкой Мосина-Нагана («трехлинейкой») и является старейшим патроном, все еще находящимся на вооружении боевых частей. Первоначально был снабжен пулей с закругленным наконечником. Этот патрон использовался в качестве боеприпаса для пулеметов и снайперских винтовок, поскольку обладает превосходными для этого калибра характеристиками при стрельбе на большую дистанцию. Он встречается в странах, находившихся под советским влиянием, а также в странах, использующих советское оружие, например, в Китае и Финляндии.

Спецификация

Тяжелая пуля D
Длина боеприпаса 77,16 мм
Длина гильзы 53,6 мм
Диаметр обода 14,48 мм
Диаметр пули 7,87 мм
Длина пули 31,3 мм
Вес пули 11,98 г
Начальная скорость 818 м/с
Начальная энергия 4008 Дж.

2.5.6. Боеприпас Магнум 0.357

Синонимы

0.357 Магнум Смита и Вессона

История создания

Этот боеприпас был разработан фирмой Smith&Wesson в 1935 г. и стал стандартным боеприпасом, принятым на вооружение правоохранительных органов США. Его калибр совпадает с калибром нормального боеприпаса .38 калибра, но, что-

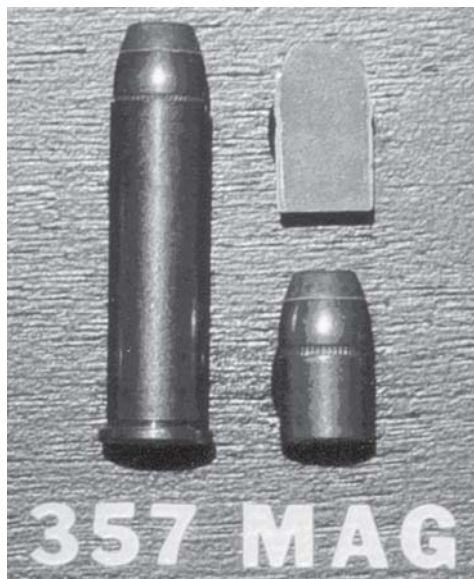


Рис. 2.10. Боеприпас Магнума .357

бы подчеркнуть его повышенную мощность, маркировка была изменена на .357. Гильза этого боеприпаса на 2,5 мм длинее гильзы боеприпаса .38 калибра, что исключает его использование в револьверах старой конструкции, которые не могут выдержать высокое давление пороховых газов.

Спецификация

Длина боеприпаса 38,5 мм (зависит от типа пули)

Длина гильзы 32,76 мм

Диаметр обода 11,17 мм

Диаметр пули 9,07 мм

Вес пули 10,23 г

Начальная скорость 436 м/с (при стволе длиной 4 дюйма)

Начальная энергия 972 Дж (рис. 2.10).

2.5.7. Боеприпас Спрингфилд 0.30-06

Синонимы

7,63 × 63 мм; 0.30 US Service; 0.30 Браунинг

История создания

Боеприпас калибра 0.30-06 появился в 1906 г., он имел остроконечную форму и заменил более ранний боеприпас 0.30-03 с закругленной передней частью в качестве штатного боеприпаса для винтовки M1903 Springfield. Первоначально пуля весом 9,72 г имела плоскую головку, однако недостаточная дальность стрельбы, проявившаяся в ходе Первой мировой войны, привела в 1926 г. к принятию пули

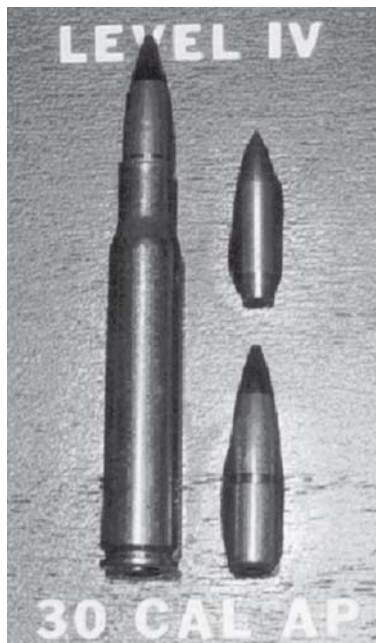


Рис. 2.11. Бронебойная пуля 30 калибра

М1 весом 11,2 г с обтекаемой формой. К 1936 г. накопилось много жалоб о необходимости чрезмерно широкой зоны безопасности при тренировочной стрельбе и о недостатках функционирования новой автоматической винтовки Garand М1. Это привело к внедрению в 1938 г. пули М2 с плоской вершиной и весом 9,72 г, которая остается стандартной вплоть до настоящего времени.

Спецификация

Длина патрона 84,8 мм

Длина гильзы 63,2 мм

Диаметр обода 12 мм

Диаметр пули 7,82 мм

Вес пули 9,72 г (рис. 2.11).

2.5.8. Боеприпас парабеллума 9 × 19 мм

Синонимы

9 мм парабеллума; 9 × 19 мм; 9 мм Лагера; 9 мм патрон '08

История создания

Патрон был разработан Георгом Лагером с целью увеличения боевой мощи пистолета собственной конструкции. Стремясь удовлетворить запросы германской армии, Лагер расширил переднюю часть гильзы от пистолета «парабеллум» калибра 7,62 мм и вставил в нее пули калибра 9 мм. При использовании данного



Рис. 2.12. 9 мм пуля с металлической оболочкой. На поперечном сечении видны свинцовая пуля и металлическая оболочка

патрона в ранней модели автоматической винтовки наблюдалась тенденция к его заклиниванию, поскольку первоначально боеприпас оснащали пулей конической формы с плоским передним концом. В 1917 г. она была заменена на пулю овальной формы, которая с тех пор осталась стандартной для вооруженных сил. Пули первоначальной формы поставляются на рынок до сих пор. Патроны парабеллум 9×19 производились во многих странах мира.

Спецификация

Британский боеприпас Mk 2Z

Длина 29,28 мм

Длина гильзы 19,35 мм

Диаметр обода 9,94 мм

Диаметр пули 9 мм

Вес пули 7,45 мм

Начальная скорость 396 м/с

Начальная энергия 584 Дж (рис. 2.12–2.16).

2.5.9. Боеприпас 5,56 × 45 мм НАТО

Синонимы

5,56 мм SS109

История создания

В 1977–79 гг. страны НАТО провели серию испытаний боеприпасов нового поколения для стрелкового оружия, в результате которых данный боеприпас был

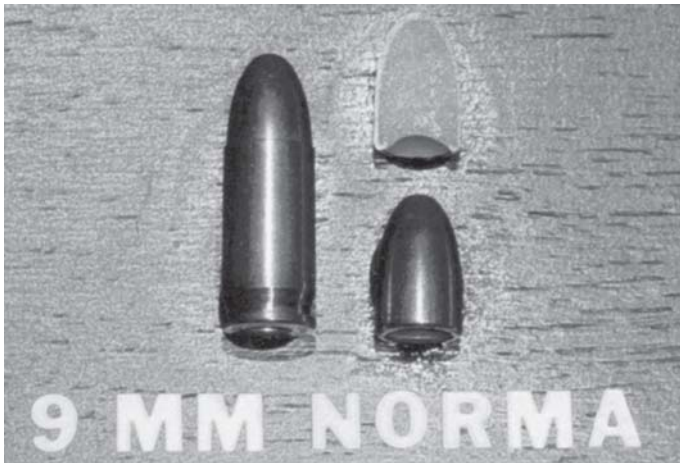


Рис. 2.13. 9 мм пуля пистолета Норма



Рис. 2.14. 9 мм пуля УЗИ

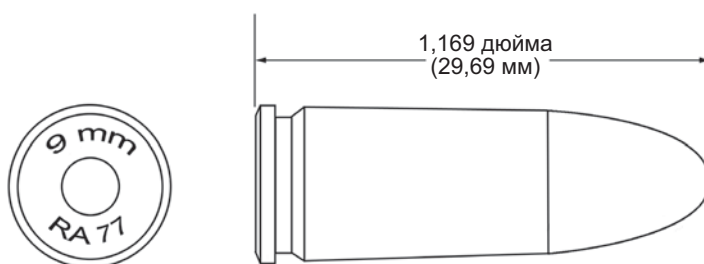


Рис. 2.15. Патрон с 9 мм пулей



Рис. 2.16. 9 мм боеприпас и пуля

принят в качестве стандартного для армий НАТО. Новая, более тяжелая пуля, разработанная фирмой Fabrique Nationale de Liege, обычно оснащается гильзой M193. Испытания показали, что эта пуля позволяет добиться большей точности стрельбы и имеет более высокую поражающую способность, хотя для повышения эффективности она требует большего угла нарежки оружейного ствола.

Спецификация

Длина боеприпаса 57,4 мм

Вес патрона 12,5 гран

Длина гильзы 44,7 мм

Диаметр патрона 9,6 мм

Диаметр пули 5,66 мм

Вес пули 4 г

Начальная скорость 987 м/с

Начальная энергия 1813 Дж (рис. 2.17 и 2.18).

2.5.10. Боеприпас 5,56 × 45 мм M193

Синонимы

0.2333 Armalite; 0.223 Ремингтон Special

История создания

Первоначально разработан на основе боеприпаса 0.222 Ремингтон, однако вследствие чрезмерного давления пороховых газов пришлось сконструировать новую гильзу несколько большего объема, которая получила название 0.223 Магнум. Этот патрон оказался чересчур длинным, поэтому был разработан более короткий патрон 0.223 Armalite. В 1964 г. он был принят на вооружение армии США под названием «Картридж 5,56 мм M193».



Рис. 2.17. Пуля M855 со стальным сердечником

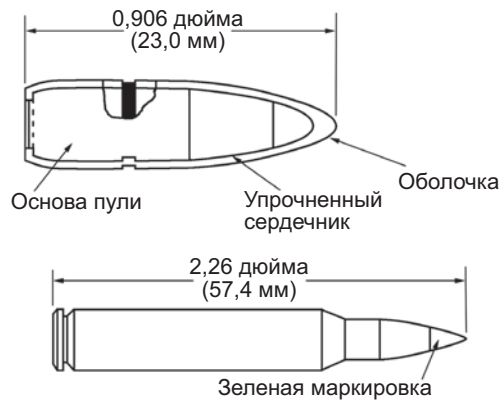


Рис. 2.18. Пуля M855

Спецификация

Длина боеприпаса 57,3 мм

Длина гильзы 44,5 мм

Диаметр обода 9,5 мм

Диаметр головки 9,5 мм

Диаметр пули 5,66 мм

Вес пули 3,56 г

Диаметр шейки гильзы 6,42 мм (рис. 2.19 и 2.20).



Рис. 2.19. Форма патрона и строение пули M193

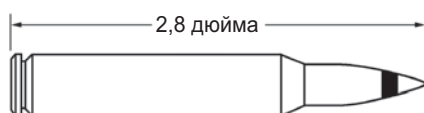


Рис. 2.20. Бронебойная пуля M193 калибра 7,62 мм

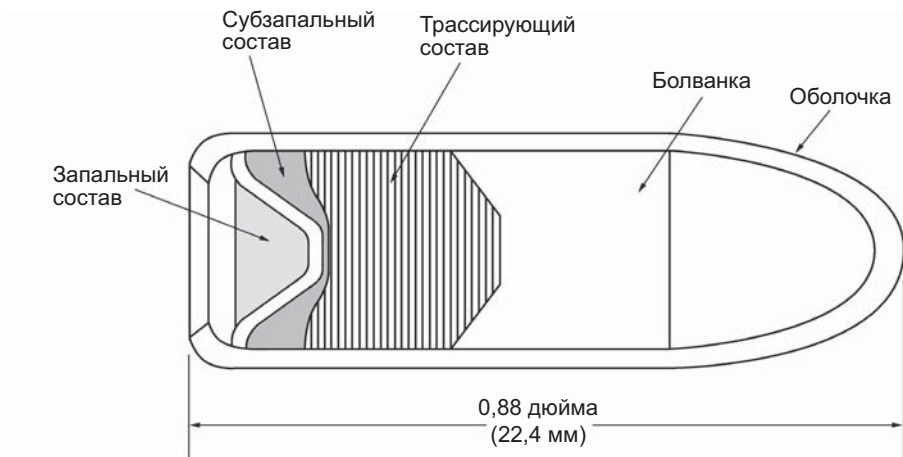


Рис. 2.21. Трассирующая пуля

2.5.11. Трассирующая пуля

В полете такая пуля оставляет яркий трассирующий след в интервале расстояний от 90 до 370 м от дульного отверстия. Поперечный разрез трассирующей пули показан на рис. 2.21.

2.6. Стрельба различными снарядами

Практически все боеприпасы для винтовок, карабинов, пистолетов и револьверов и боеприпасы имитаторов осколков для лабораторных испытаний состоят из четырех компонентов:

- 1) гильзы,
- 2) капсюля (запала),
- 3) пороха,
- 4) снаряда.

Стрельба из огнестрельного оружия или лабораторной пушки происходит в следующей последовательности:

1. Осуществляется легкое нажатие на спусковой крючок.
2. Боек ударяет о капсюль патрона.
3. Взрывается запал.
4. Запал поджигает метательный заряд в гильзе.
5. Происходит химическая реакция, превращающая порох в газы.
6. Сильнейшее давление газов выталкивает с большой скоростью снаряд из ствола.

Патронные гильзы часто изготавливают из латуни. Этот материал мягок и упруг. По мере горения пороха газы расширяются, и гильза прижимается к внутренней поверхности казенной части ствола, за счет чего достигается хороший уровень герметизации. Герметизация необходима для более эффективного ускорения снаряда. Запал представляет собой миниатюрную бомбу в мягком металлическом капсюле.

Капсюль содержит взрывоопасную химическую смесь, легко взрывающуюся при ударе. Возникающая вспышка приводит к воспламенению пороха. При сгорании порох выделяет большое количество газов, но не взрывается. При сгорании давление газов в гильзе столь велико, что снаряд с огромной силой выталкивается из нее. Сама гильза остается плотно прижатой к внутренней поверхности ствола со всех сторон, кроме той, куда осуществляется метание снаряда. Давление пороховых газов при стрельбе 9 мм пулей достигает 2500 атмосфер. В винтовочном патроне давление может достигать от 4000 до 7000 атмосфер (при давлении около 12000 атмосфер исправная винтовка должна разорваться, что иногда и происходит на практике). В зависимости от типа оружия, калибра и порохового заряда дистанция полета пули может составлять от нескольких сотен метров до нескольких километров.

2.7. Время выстрела

Весь ход событий от нажатия на курок вплоть до попадания пули в цель занимает долю секунды. Последовательность и время процессов таковы:

1. От отдачи головным мозгом команды до нажатия пальцем на спусковой крючок проходит примерно 0,2 с.
2. Боек ударяет в капсюль патрона примерно за 0,005 с.
3. Порох внутри патрона воспламеняется за 0,0004 с.
4. Скачок давления газов, выделяющихся при горении пороха, занимает примерно 0,004 с, в результате чего пуля выталкивается из патрона.
5. В зависимости от угла нарезки ствола скорость вращения пули может составить примерно 1000 оборотов в секунду.
6. Если мишень находится на расстоянии 25 м, снаряд достигает ее примерно за 0,1 с.
7. Общее время, прошедшее от отдачи мозгом команды до поражения цели, составляет 0,31 с.
8. Стрелок ощутит отдачу от выстрела примерно через 0,2 с после вылета пули из ствола.

Обычно неопытный стрелок, взяв в руки огнестрельное оружие и произведя из него выстрел, не сможет отличить его от другого оружия в том, что касается его стабильности, спускового механизма, системы зарядания, прицела, ложа, вертикальной силы, подталкивающей дуло вверх при стрельбе, силы отдачи и удобства пользования в целом.

2.8. Факторы, влияющие на потери личного состава

Когда снаряд попадает в цель, происходит поражение, степень которого зависит от массы снаряда, его скорости и уязвимости цели. Поэтому анализ факторов, влияющих на потери личного состава, требует информации о баллистической угрозе, о цели, против которой она направлена, и об уязвимости цели при этой угрозе. Анализ может касаться как взаимодействия одного определенного боеприпаса и одной цели, так и взаимодействия многих выстрелов и множества целей.

Баллистическую угрозу представляют собой и осколки снарядов. Ее факторами являются траектория снаряда, точность попадания осколков и такие их характеристики, как масса, скорость и распределение в пространстве. Точность попадания снаряда и характеристики осколков, возникающих при его взрыве, влияют на вероятность попадания и выведения из строя элементов цели. Точность характеризует то, насколько успешно боеприпас доставляется к поражаемой цели. Она измеряется степенью попадания 50% осколков в пределы предполагаемой окружности поражения. Характеристики осколков, используемые при анализе факторов снижения потерь, — это начальная скорость, распределение осколков на определенной площади и их массовое распределение. Цели

могут быть единичными или множественными, располагающимися на определенной площади.

2.9. Пробивающая сила и деформация пуль и осколков

Деформация мишени и летящих с высокой скоростью снарядов (пуль и осколков) в высокопрочном волокнистом композите представляет собой сложный процесс. Вследствие высокой скорости снаряда трудно предсказать, каким образом будут вести себя и он, и материал цели. Имеется ряд моделей, с помощью которых можно приближенно описать деформацию снаряда и цели исходя из кинетической энергии снаряда и свойств материала мишени. Все модели такого рода имеют свои недостатки.

Согласно простому анализу баланса сил снаряд меньшего калибра при фиксированном весе проникнет в мишень на большую глубину, так как он имеет меньшее поперечное сечение. Аналогично, более тяжелый снаряд проникнет на большую глубину, чем более легкий. Пробивающая сила пули зависит от ее формы, наличия сердечника, жесткости оболочки, а при наличии полого наконечника и от глубины полости.

Типичные пистолетные пули изготавливают из мягких легко деформирующихся материалов, вызывающих максимальное поражение тканей тела. Пули с полной металлической оболочкой, заполненной свинцом, деформируются сравнительно мало, но способны пробивать броню. С другой стороны, безоболочечная свинцовая пуля легко деформируется и наносит повреждения тканям тела на значительно большей площади.

Имитаторы осколков для лабораторных испытаний делают из упрочненной стали. Они имеют острые грани. Скорость осколка может превышать скорость пистолетных пуль. Поскольку осколки не обладают аэродинамической формой, сопротивление воздуха сильно замедляет их полет. Лобовое сопротивление зависит от формы и размера осколка, а также плотности воздуха, которая в свою очередь зависит от температуры и влажности. При проникновении в волокнистую жесткую броню осколки не деформируются. Однако в зависимости от скорости и силы сопротивления брони острые грани осколка слегка притупляются. Небольшие повреждения таких осколков можно обнаружить с помощью увеличительного стекла.

Вес и скорость полета являются основными параметрами, определяющими кинетическую энергию пули или осколка. Кинетическая энергия E выражается формулой:

$$E = mV^2/2 ,$$

где m — масса и V — скорость снаряда.

Если имеются два снаряда, а скорость одного из них вдвое выше скорости другого, при одинаковой массе снарядов кинетическая энергия более быстрого снаряда будет в четыре раза больше, чем у более медленного.

2.10. Деформация пуль при ударе по броне

2.10.1. Тип пули

Пистолетные и винтовочные пули имеют различный вес и размеры. Однако различаются и две любые единицы одинакового оружия, равно как и заряд пороха, пули, капсюли. Поэтому даже при выстреле из оружия одинакового типа баллистические характеристики пуль будут немного варьироваться. Эти вариации не позволяют назвать баллистику точной наукой. Описывающие ее математические формулы могут быть точными, но подставляемые в уравнения числовые значения могут изменяться в достаточно широких пределах, особенно если выстрел производят из оружия различного типа (рис. 2.22).

Механизм пробивания зависит от материала оболочки, внутренней структуры и скорости пули, ее вращения, а также от свойств материала мишени. Большинство пуль имеют аэродинамическую форму, что позволяет снизить потери скорости вследствие сопротивления воздуха. Обычно пули покрывают металлической оболочкой, которая способствует сохранению формы пули, а также прикрывает и защищает материал, находящийся внутри нее. Пистолетные пули, например, 9 мм с цельнометаллической оболочкой заполнены свинцом, который легко деформируется и наносит тяжелые поражения при проникновении в ткани человека (рис. 2.23).

Ружейные пули обычно имеют небольшой диаметр и, в зависимости от своего назначения, обычно заполнены свинцом и могут иметь металлическую иглу или упрочняющий стержень. Деформируются пули также различно. Деформирование зависит от целого ряда факторов, таких как состав пули, ее диаметр, наличие или отсутствие оболочки, скорость полета, вид огнестрельного оружия, размер ствола, нарезка внутренней поверхности ствола, дистанция стрельбы и мате-



Рис. 2.22. Бронебойные пули наименьшего (.22) и наибольшего (50) калибра



Рис. 2.23. 9 мм свинцовая пуля с металлической оболочкой

риал мишени. Волокнистые композиционные материалы могут быть гибкими, но в зависимости от типа волокна и способа укладки слоев они способны деформировать пулю, проникающую на глубину нескольких слоев (рис. 2.24 и 2.25).

2.10.2. Пули с оболочкой

Пули с цельной металлической оболочкой обладают большей пробивной силой, чем безоболочечные свинцовые пули. Чаще всего оболочку делают из меди, латуни или стали. Предпочтительными являются оболочки и покрытия из меди, которая не повреждает внутреннюю поверхность ствола при выстреле. Особая фор-



Рис. 2.24. Пуля Магнум калибра .44 до и после удара по легкой волокнистой броне

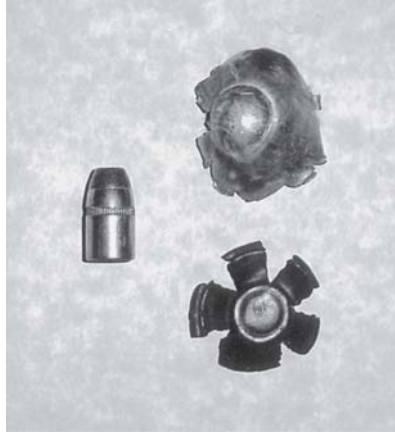


Рис. 2.25. Пуля Магнум калибра .357 до и после деформирования легкой волокнистой броней

ма и твердость оболочки повышают пробивающую силу пули. При последующей деформации и отслаивании оболочки обнажается внутренний материал пули, который вследствие своей мягкости сильно повреждает живые ткани. Некоторые пистолетные или охотничьи пули не имеют металлической оболочки или же оболочка покрывает лишь ее часть (рис. 2.26 и 2.27).

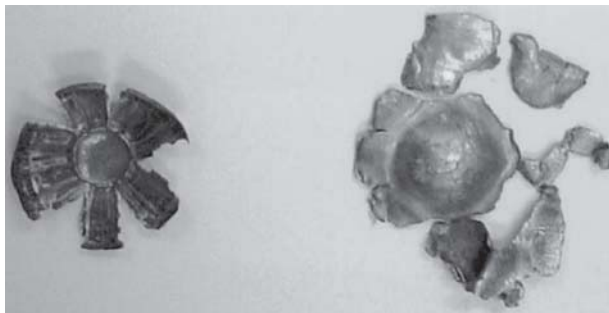


Рис. 2.26. Деформирование пуль .357 Магнум материалом Spectra Shield Plus



Рис. 2.27. Пуля .357 Магнум, деформированная материалом Gold Flex



Рис. 2.28. 9 мм пуля с полной металлической оболочкой до и после соударения с облегченным противобаллистическим композитом

2.10.3. Конструкция пули

Конструкция оболочки и внутренней части пули влияют на характер ее деформирования. Внутри оболочки пули может быть на 100% заполнена свинцом, или же свинцом с бронебойным стержнем, или же включать в себя лишь упрочненный стержень. Когда заполненная свинцом пуля ударяет в цель, внешняя металлическая оболочка деформируется вместе со свинцом. Поскольку свинец является более мягким металлом, он оказывает определяющее влияние на характер деформирования. На рис. 2.28 показана пуля до и после деформирования при ударе о мягкую броню.

2.10.4. Нагрузки на пулю

Наибольшая ускоряющая нагрузка, действующая на пулю и на огнестрельное оружие, возникает при максимальном газовом давлении. Если диаметр задней части пули чуть меньше, чем у ствола, пуля расширяется и плотно заполняет канал ствола. Прочность меди примерно в десять раз выше, чем у свинца, и поэтому оболочки свинцовых пуль часто делают из меди и ее сплавов. Оболочка сдерживает внутренние напряжения в свинце. Прочность стали при растяжении составляет примерно 40000 psi. Пуля не изменяет формы, если нагрузка не превышает определенного предела. Однако предел текучести свинца, меди и олова весьма невелик, и превышение предела текучести приводит к необратимому деформированию пули. Хотя действие максимальной нагрузки может быть чрезвычайно кратковременным, пуля расширяется и заполняет канал ствола.

Пули одинакового веса, но различного типа оказывают различное давление на внутреннюю поверхность ствола. Пули одинакового веса могут иметь различную длину, вес сердечника и оболочки, длину основания и даже, в весьма узких пределах, разный диаметр. Разница между крайними значениями этих показателей может достигать 15%. В целом более высокое давление приводит к увеличению скорости пули при вылете из оружейного ствола.

Твердость и форма упрочняющего стержня также влияют на деформацию пули. Если ее наконечник изготовлен из мягкой стали (пуля 7,62 × 39 АК 47), она легко деформируется формованной броней, на 100% состоящей из СВМПЭ волокон и не имеющей жесткого керамического лицевого слоя. Керамика способ-



Рис. 2.29. Пуля АК 47 до и после удара по легкой композитной броне с керамическим лицевым слоем

на затупить и высокопрочный упрочняющий стержень. Для защиты от стержня из высокопрочной стали применяют керамику в сочетании с подложкой из легких формованных композитов. Керамика затупляет стержень, который затем вместе с осколками керамики останавливается композитной подложкой (рис. 2.29).

2.10.5. Вес пули

Вес пули зависит от ее диаметра, длины и структуры. Пистолетные и охотничьи пули обычно имеют большой вес, поскольку их главным компонентом является тяжелый свинец. Винтовочные пули имеют меньший диаметр, а при использовании оболочки и упрочняющего стержня они могут состоять не только из свинца.

При фиксированной скорости пули ее кинетическая энергия прямо пропорциональна ее весу. Чем тяжелее пуля, тем больше ее кинетическая энергия.

2.10.6. Скорость пули

Одним из основных факторов, определяющих деформацию и пробивающую силу пули, является ее скорость. Энергия пули пропорциональна квадрату скорости. Если скорость одной пули в два раза выше, чем у другой с таким же весом, ее энергия будет в четыре раза больше, чем у более медленной пули.

Пистолетные пули в целом имеют большой вес, но их скорость сравнительно невелика. Это объясняется небольшим количеством пороха и меньшей длиной ствола. С другой стороны, винтовочные пули имеют меньший вес и диаметр, но намного более высокую скорость. Это частично объясняется большой длиной ствола, в котором происходит ускорение пули (рис. 2.30).

2.10.7. Нарезной ствол

Нарезной канал ствола обеспечивает пуле стабильность полета в воздухе. Некоторые пули сразу после вылета из ствола «виляют», что является результатом на-

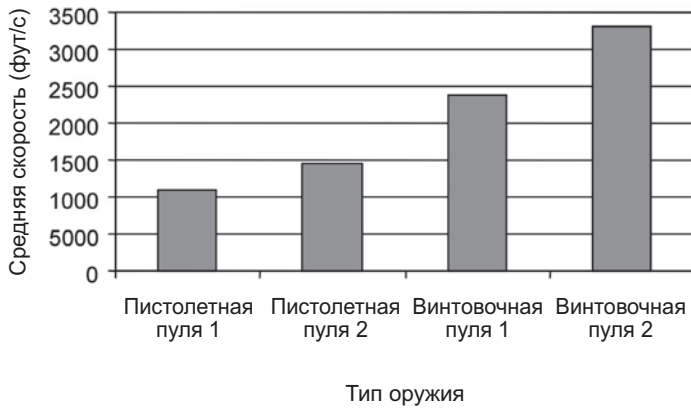


Рис. 2.30. Диапазон скоростей пистолетных и винтовочных пуль (1 фут/с = 0,304 м/с)

резки. Однако такие пули быстро стабилизируются в полете. Важное значение имеет проверка качества, долговечности и баллистических характеристик бронежилета, предназначенного для защиты от нарезного оружия.

2.10.8. Лобовое сопротивление

Воздух оказывает сопротивление движению снаряда. Лобовое сопротивление зависит от скорости снаряда, его формы, размера, плотности и температуры воздуха, атмосферного давления и т.д.

Лобовое сопротивление снижает скорость пули. Однако вследствие аэродинамичности их формы при стрельбе на короткие дистанции такие потери минимальны. Лобовое сопротивление воздуха не деформирует пули.

Лобовое сопротивление приводит к сильному снижению скорости имитаторов осколков и цилиндрических снарядов. Имеются таблицы, описывающие потери скорости при различной скорости осколков (рис. 2.31).

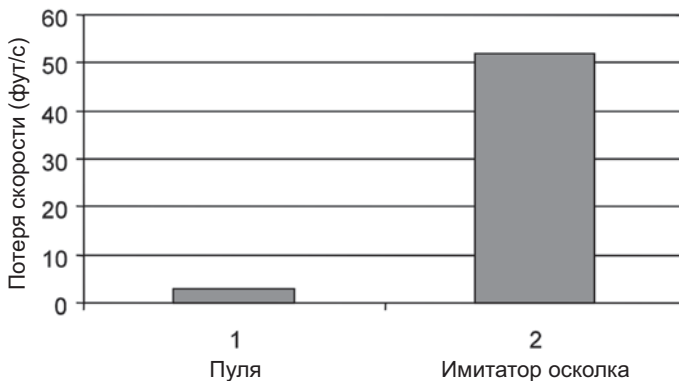


Рис. 2.31. Поправка на лобовое сопротивление воздуха для 9 мм пули с полной металлической оболочкой и имитатора осколка с плоской лицевой поверхностью при скорости полета 1500 фут/с

2.10.9. Кинетическая энергия пули

Кинетическая энергия пули – это энергия, связанная с ее движением. При ударе по мишени кинетическая энергия затрачивается на:

- пробивание мишени,
- деформацию пули,
- выделение тепла.

Чем выше кинетическая энергия, тем больше пробивающая способность пули, ее деформирование и количество производимого тепла. В табл. 2.4 приводятся значения кинетической энергии ряда пистолетных пуль.

Таблица 2.4. Вес, скорость и кинетическая энергия пистолетных пуль

Пуля	Вес (гран)	Скорость(м/с)	Кинетическая энергия (Дж)
38 Special RN (свинец)	158	274	363
22 LRHV	40	335	139
9 мм ЦМО	115	410	593
357 Магнум JSP	124	373	537
9 мм GECO	123	355	502
44 Магнум	240	441	1510
9 мм ЦМО	124	441	781

2.10.10. Угол падения пули

Угол падения пули при ударе по броне является еще одним фактором, влияющим на пробивающую способность и деформацию пули. При угле 90° (перпендикулярный удар), как правило, вероятность пробивания брони максимальна. Если пуля попадает в броню под углом 90° , пуля сравнительно легко пронизывает слои брони. Исключением является броня на основе ткани.

В реальной ситуации пули могут попадать под некоторым углом. Механизм проникновения пули в тканый бронепакет отличается от проникновения в поперечно ориентированный или ламинированный материал. Особенность тканых бронепакетов состоит в том, что их стойкость к удару пули (V_0 или V_{50}) при попадании под углом в 60° ниже, чем при перпендикулярном ударе (90°). Поэтому некоторые стандарты требуют производить баллистические испытания как под углом 90° , так и 60° к поверхности брони. Отметим, что при угле падения 60° баллистическая стойкость поперечно ориентированного композита выше, чем у тканого материала.

2.10.11. Длина ствола

Скорость и стабильность полета пуль и осколков зависит от формы оружейного ствола. Более длинный ствол дольше удерживает снаряд и придает ему большую скорость. В более коротких стволах снаряд ускоряется в стволе в течение меньшего времени и после вылета из него уже не испытывает высокого ускоряющего давления.

Приведенные ниже скорости пули измерялись на расстоянии 6,1 м от дула револьвера Магнум Ремингтон калибра .44. Каждый раз использовали то же ору-

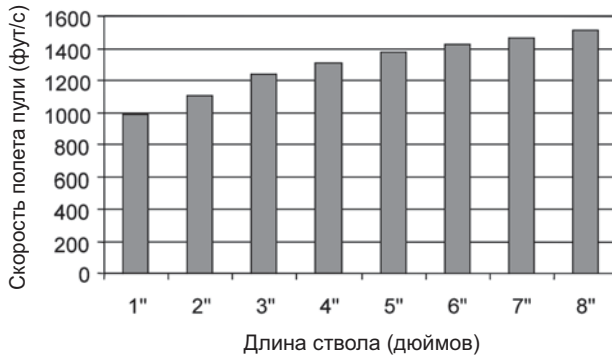


Рис. 2.32. Влияние длины ствола на скорость пули

жие, длину ствола которого последовательно уменьшали на 2,54 см. Полный вес патрона составлял 240 гран. При каждой длине ствола производили десять выстрелов. Значения средней скорости пули приведены на рис. 2.32.

2.10.12. Нарезной канал ствола

Стабильность полета снаряда зависит от скорости вращения, которое он приобретает в стволе под давлением пороховых газов и резьбы, расположенной под определенным углом. Чем выше угол нарезки ствола, тем выше стабильность полета снаряда. Однако резьба приводит к снижению скорости пули, поскольку часть энергии выстрела уходит на работу сил трения в стволе. При отсутствии нарезки снаряд «виляет» при полете.

Большинство пистолетов, изготовленных в США, имеют правую резьбу. Исключение составляют пистолеты и револьверы фирмы «Кольт», имеющие левую резьбу. Число спиральных нарезков обычно варьируется от 4 до 8. Глубина нарезков составляет от 0,0035 до 0,005 дюймов. Для большинства пистолетов .22 калибра шаг резьбы равен 14–20 дюймов на 1 оборот.

2.10.13. Расстояние от среза ствола

Пробивающая способность пули сильно зависит от ее скорости и энергии. Вследствие аэродинамической формы пули ее скорость и кинетическая энергия в полете снижаются незначительно. Однако при существенном увеличении дистанции стрельбы влияние сопротивления воздуха становится заметным. Рис. 2.33 демонстрирует снижение скорости и энергии пули в зависимости от дистанции полета.

2.10.14. Бронематериалы

Снаряд не деформируется, если он сталкивается с мягким материалом, который замедляет движение снаряда не слишком интенсивно. Противобаллистический материал должны обеспечить защиту от снаряда, деформируя его и создавая сильное сопротивление его движению. Волокно само по себе не может остановить пулю. Баллистические волокна подвергают текстильной обработке, что способствует по-

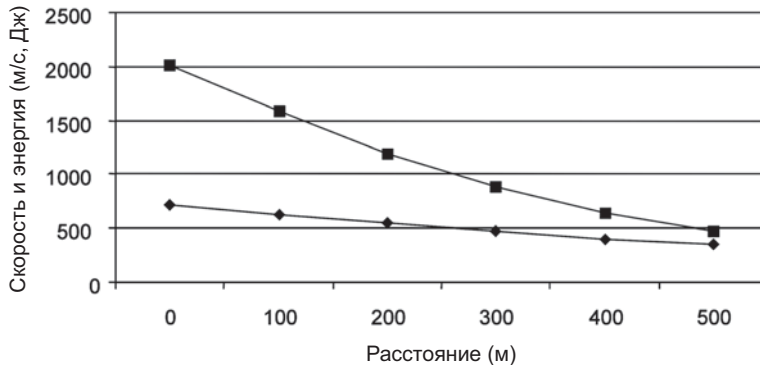


Рис. 2.33. Скорость и кинетическая энергия пули в зависимости от дистанции полета

вышению защитных свойств. Одним из наиболее распространенных способов является ткацкий процесс, создающий ткань (глава 8). Другие способы состоят в создании нетканых поперечно ориентированных материалов (глава 9) и войлоков.

2.10.15. Противобаллистические волокна

В настоящее время мягкую броню делают из волокон трех типов. Это арамидные, СВМПЭ и ПБО волокна. В течение долгого времени производили лишь арамидные и СВМПЭ нити разной толщины. При изготовлении жесткой брони для защиты транспортных средств применяют также стеклянные E и S-2 волокна. Стеклопластики представляют собой недорогую, но тяжелую броню. Они также могут использоваться в несущих конструкциях и обеспечивать защиту от огня.

2.10.16. Прочность волокон

Замедление движения и деформирование снаряда зависят от прочности волокон. Один из самых распространенных способов оценки механических свойств волокон состоит в их растяжении. В результате таких испытаний определяют предел прочности, модуль упругости и предельное удлинение волокон (рис. 2.34 и 2.35).

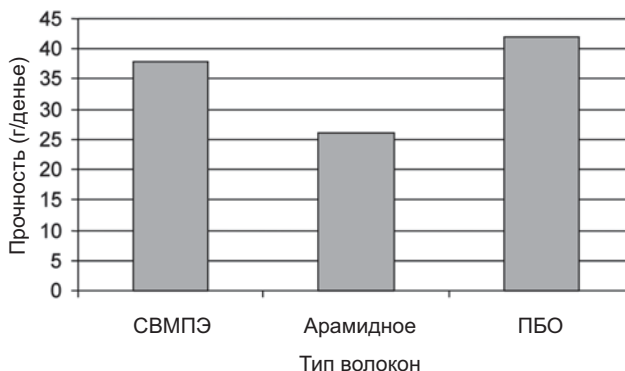


Рис. 2.34. Прочность при растяжении противобаллистических волокон

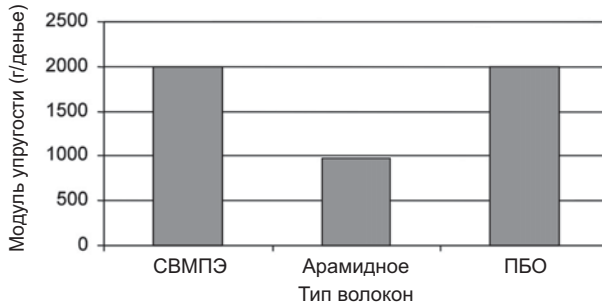


Рис. 2.35. Модуль упругости противобаллистических волокон

При ударе снаряда в мишень, состоящую из множества слоев ткани или нетканого материала, не все волокна подвергаются растяжению. Волокна в первом ряду слоев опираются на нижележащие слои, и поэтому они испытывают сдвиговую нагрузку, передавая нагрузку соседним слоям. По мере замедления и деформирования пули следующий ряд слоев испытывает одновременно растягивающие и сдвиговые напряжения. По мере остановки снаряда сдвиговая компонента напряжения снижается и доминирующей становится растяжение волокон.

Отметим, что существующие методы испытаний не позволяют измерить сдвиговую прочность волокон, поддерживаемых слоями других волокон.

2.10.17. Скорость продольной волны

Скорость продольной волны – это скорость распространения ударной волны растяжения вдоль оси волокна при поперечном ударе высокоскоростного снаряда. Чем выше скорость продольной волны, тем больше область растяжения волокон и тем сильнее рассеивается энергия удара. Скорость продольной волны можно рассчитать по формуле:

$$V_s = \sqrt{E/\rho},$$

где V_s – скорость продольной волны растяжения волокон (рис. 2.36), E – модуль упругости и ρ – плотность волокна.

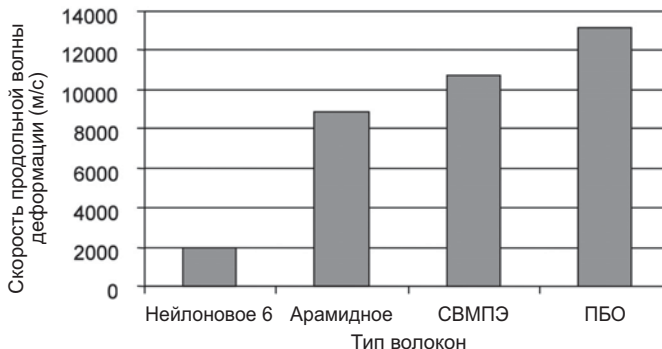


Рис. 2.36. Скорость продольной волны растяжения в различных волокнах

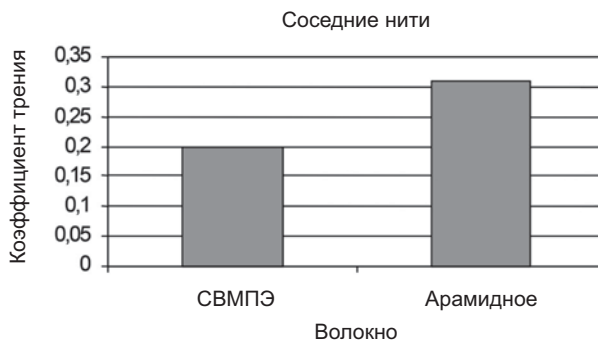


Рис. 2.37. Коэффициент взаимного трения нитей

2.10.18. Трение между волокнами

Трение волокон, наряду с их физическими свойствами, играет важную роль в процессе замедления снаряда. Трение способствует отслоению оболочки и деформации пули, и, в конечном счете, ее остановке. Взаимное трение арамидных волокон выше, чем СВМПЭ волокон, — последние гладки, обладают высокой степенью ориентации, прочны и имеют низкий коэффициент трения. Из-за высокого коэффициента трения арамидных волокон ткань можно делать из менее дорогих волокон с высокой линейной плотностью, в результате чего достигается вполне удовлетворительный уровень баллистической стойкости. Существуют способы повышения трения. Один из них заключается в нанесении на поверхность волокон покрытия, обеспечивающего более сильное трение.

Как указывалось выше, высокопрочные волокна являются основой бронематериала. Одним из факторов, определяющих баллистические свойства материала, является трение между волокнами при взаимодействии с пулей. Трение между волокнами ускоряет деформирование и остановку пули. Однако в случае слишком сильного трения при ударе волокна могут перерезать друг друга, в результате чего эффективность работы материала уменьшается. С другой стороны, если трение между волокнами слишком мало, материал не оказывает требуемого сопротивления для деформирования и остановки пули.

В современных бронематериалах трение можно оптимизировать путем изменения ориентации волокон, нанесения на них покрытия и путем нанесения матрицы на поверхность слоя волокон. Еще одним способом повышения трения между волокнами является прошивка тканого бронепакета. Этот метод широко используют при изготовлении бронежилетов (рис. 2.37).

2.10.19. Вязкоупругие свойства волокон

Вязкоупругие напряжения возрастают по мере увеличения скорости деформации. Ряд волокон, например, арамидные, углеродные, ПБО и стеклянные ведут себя линейноупруго. Другие волокна, например, СВМПЭ, полиэфирные и нейлоновые, проявляют вязкоупругое поведение (рис. 2.38 и 2.39).

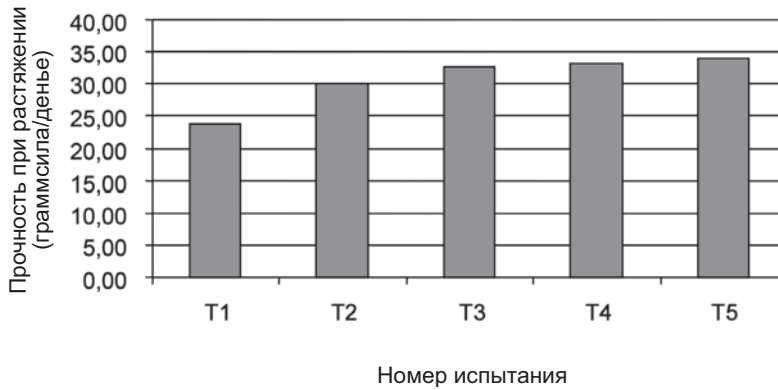


Рис. 2.38. Предел прочности при разрыве СВМПЭ волокон в зависимости от скорости деформации. T1 = 0,01 дюйма/мин, T2 = 0,1 дюйма/мин, T3 = 1,0 дюйма/мин, T4 = 10 дюйма/мин, T5 = 20 дюйма/мин

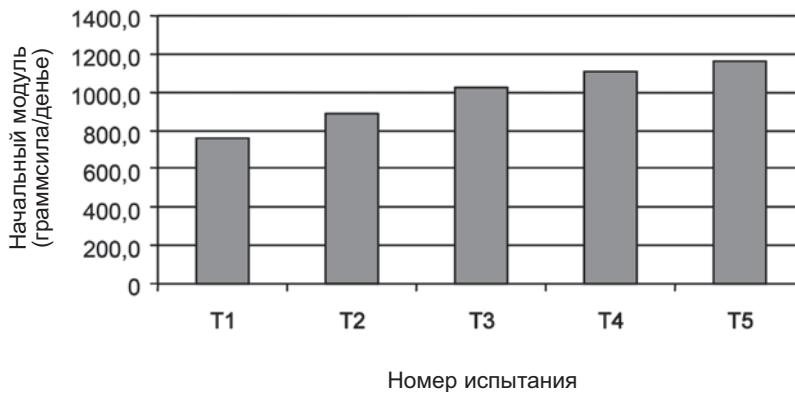


Рис. 2.39. Модуль упругости СВМПЭ волокон в зависимости от скорости деформации. T1 = 0,01 дюйма/мин, T2 = 0,1 дюйма/мин, T3 = 1,0 дюйма/мин, T4 = 10 дюйма/мин, T5 = 20 дюйма/мин

2.10.20. Нанесение покрытий на волокна

Трение между высокопрочным волокном и пулей можно изменять путем нанесения полимерного покрытия. При этом как в тканых, так и в нетканых поперечно ориентированных композитах на основе арамидных и СВМПЭ волокон наблюдалось увеличение баллистической стойкости. Неправильный выбор покрытия может чрезмерно повысить жесткость материала и снизить его притивобаллистическую стойкость. Существует несколько методов нанесения покрытия на волокна, которые будут обсуждаться в главе 10.

Рис. 2.40 демонстрирует влияние нанесения 5% матрицы на характеристики СВМПЭ ткани. После нанесения на ткань 5% полимерной матрицы способность ткани останавливать 9 мм пули с металлической оболочкой существенно возросла.

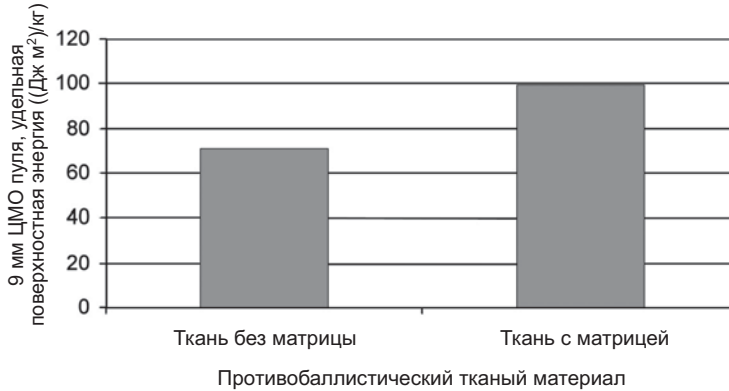


Рис. 2.40. Влияние полимерной матрицы на эффективность бронематериала на основе СВМПЭ ткани

2.10.21. Ориентация волокон

Для эффективной остановки снаряда важно, чтобы соседние нити были правильно ориентированы. Обычно волокна ориентируют в перпендикулярных направлениях. При этом их фиксируют либо механически путем переплетения (в ткани), либо с помощью матрицы. Взаимодействие волокон является важнейшим фактором, способствующим достижению наивысшей баллистической стойкости. Однако при этом оно может ухудшать гибкость материала и приводить к увеличению запреградной деформации. Для преодоления этого недостатка можно использовать волокна с другой ориентацией и способом плетения ткани, например, ткань атласного или сатинового плетения. Атласное плетение позволяет материалу растягиваться в определенных плоскостях.

2.10.22. Деформирование снаряда

Для деформирования и остановки снаряда традиционно используют ткани. Однако за последние несколько лет были разработаны и другие материалы, позво-

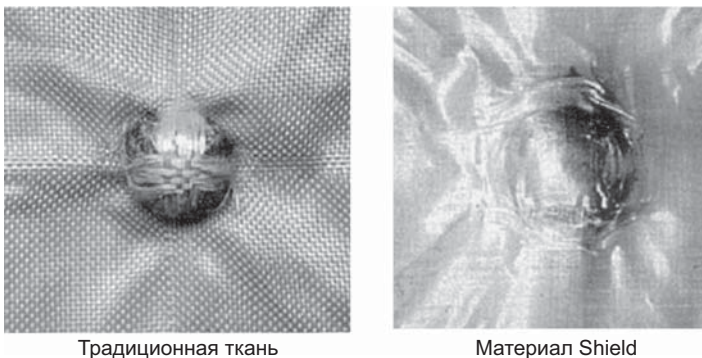


Рис. 2.41. Распределение энергии деформации в тканых и поперечно ориентированных материалах

ляющие задерживать и деформировать пулю. Если толщина слоя волокон соответствует диаметру одного волокна, это позволяет добиться снижения толщины материала и удержать пулю уже первыми слоями. Подробное обсуждение таких методов приводится в главе 9 (рис. 2.41).

Рубленые, беспорядочно ориентированные волокна в виде войлока также способны удерживать снаряды. Однако такие материалы толсты и при отсутствии мер предосторожности могут впитывать воду и прочие химические вещества.

2.10.23. Простегивание

Простегивание бронепакета, состоящего из нескольких слоев ткани, является простейшим методом повышения силы взаимодействия снаряда со слоями ткани. Интервал между швами при простегивании может варьироваться. Частое простегивание повышает баллистические свойства материала и уменьшает запреградную деформацию задней поверхности, но повышает жесткость пакета, что мешает добиться удобного прилегания бронезиленки к телу. Редкое простегивание позволяет избежать излишней жесткости, но уменьшает взаимодействие со снарядом и вызывает выпучивание бронепакета при попадании пули (рис. 2.42).

Обычно противобаллистические ткани имеют полотняное плетение и состоят из крученых нитей. Крученые нити располагаются при ткани вдоль и поперек материала. При ударе высокоскоростной пистолетной пули о первый слой ткани она взаимодействует лишь с ограниченным количеством волокон. Тем не менее, при пробивании следующих слоев с пулей взаимодействует все большее количество волокон, инициируя ее деформирование и замедляя движение. После останова пуля оказывается деформированной и по форме напоминает гриб.

Слои поперечно ориентированных нетканых материалов тоньше слоев ткани, волокна на микроуровне в них полностью распрямлены, а их ориентация ($0, 90^\circ$) сохраняется с помощью связующего вещества. При ударе сила сопротивления достаточна для начала деформирования пули уже в первых слоях волокон. После пробития нескольких слоев брони пуля оказывается сильно расплюсненной и останавливается. Форма деформированной пули напоминает колесо (рис. 2.43).



Рис. 2.42. Простегивание мягкого противобаллистического пакета



Материал
Spectra Shield® Plus

Материал
Gold Flex®

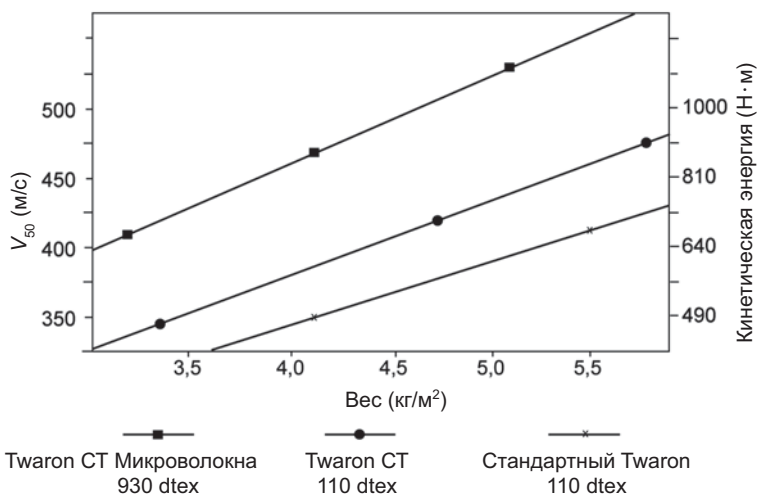
Гибридный материал
Gold Flex®/
Spectra Shield® Plus

Стеганый тканый
арамидный
материал

Рис. 2.43. Деформация пули тканым бронепакетом и поперечно ориентированным композитом на основе арамидных волокон

2.10.24. Влияние линейной плотности нитей

Высокопрочные волокна выпускаются в виде нитей с различной линейной плотностью. Линейная плотность измеряется в единицах текс или денье. Денье – это вес в граммах 9000 метров нити. Обычно предпочтительны волокна с более высокой линейной плотностью, поскольку это обеспечивает меньше ручной работы и более высокую производительность процесса изготовления композита, чем при использовании волокон с низкой линейной плотностью. Однако практика показала, что нити



Сравнение баллистических показателей материалов на основе стандартных нитей Twaron, Twaron CT и Twaron CT Микроволоконна.

Twaron	Удельный вес	Простежка
Стандартный	7,3 кг/м ²	+
CT	6,7 кг/м ²	+
CT Microfilament	5,6 кг/м ²	-

Сравнение веса бронепанелей, находящихся на вооружении германской полиции, класс I.

Рис. 2.44. Влияние линейной плотности нити на баллистические характеристики

с низкой линейной плотностью позволяют создавать более эффективные и, как следствие, более легкие бронематериалы. Если нить довольно толстая, при ударе снаряд взаимодействует лишь с немногими волокнами, находящимися на периферии нити. В результате внутренние волокна работают не в полной мере, и баллистические характеристики материала оказываются пониженными (рис. 2.44).

2.10.25. Влияние толщины нити

Уменьшение толщины нити и получение ее в виде тонкой и широкой ленты повышает эффективность бронематериала. При производстве слоя нетканого материала все волокна оказываются сравнительно прямыми. Это способствует взаимодействию снаряда с большим количеством волокон, что позволяет создать тонкий, гибкий и эффективный бронематериал.

Рис. 2.45 и 2.46 иллюстрируют структуру материала на основе тонких волоконистых лент.

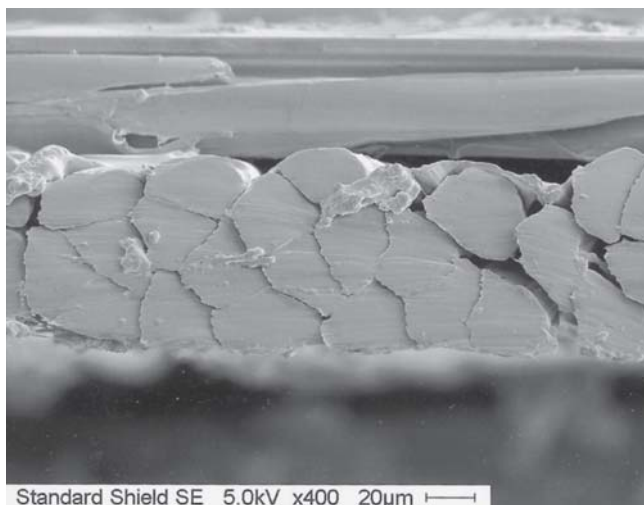


Рис. 2.45. Поперечное сечение противобаллистического материала, демонстрирующее раздавленные волокна в тонкой ленте

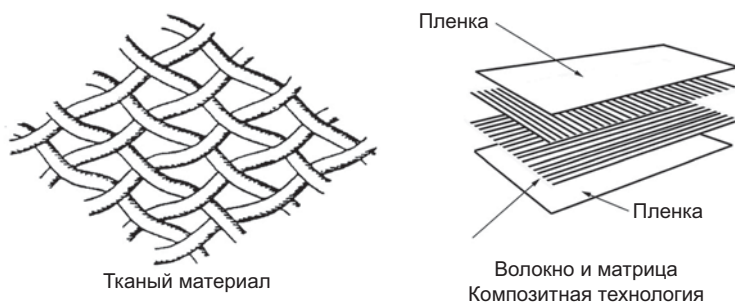


Рис. 2.46. Толстые нити в ткани и тонкие слои волокон в поперечно ориентированном композите

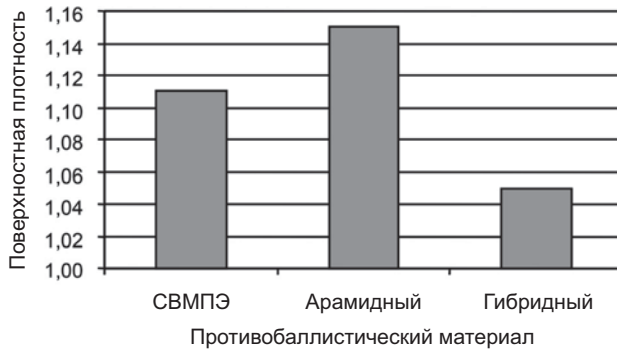


Рис. 2.47. Сравнение поверхностной плотности бронезилета IIIA уровня защиты на основе СВМПЭ, арамидного и гибридного поперечно ориентированных композитов

2.10.26. Гибридные материалы

Каждый тип высокопрочных волокон имеет свои преимущества. Например, арамидные волокна обеспечивают лучшее трение между волокнами по сравнению с СВМПЭ волокнами. Это способствует отслаиванию оболочки пули. С другой стороны, СВМПЭ волокна вязкоупругие, что позволяет им лучше улавливать фрагментированные пули. Если для внешнего слоя брони использовать материал с высоким коэффициентом трения, а для улавливания осколков пули СВМПЭ материал, то защиту от пулевого поражения можно обеспечить при меньшем весе бронезилета, чем при изготовлении его только из арамидных или только из СВМПЭ волокон (рис. 2.47).

2.10.27. Тип, качество и толщина слоя пластилина

Согласно стандарту NIJ 0101.04 при испытаниях бронезилет крепится к подложке из пластилина марки Roma. После выдержки при определенной температуре пластилин калибруют. С обратной стороны пластилина жестко закрепляется лист фанеры. В результате интенсивного использования пластилин может потерять свою текстуру и однородность. Все эти факторы влияют на его деформирование при испытании бронезилетов.

Пластилин, производимый в США, Европе и Азии, может иметь разную консистенцию, а его толщина может варьироваться. Варьироваться может также геометрия ящика, в котором размещается пластилин, и другие параметры, влияющие на взаимодействие снаряда и бронезилета. Все это влияет на воспроизводимость и достоверность результатов испытаний.

2.10.28. Пластилин

Важным фактором, влияющим на деформацию пули во время испытаний, является тип, качество, утрамбованность и толщина слоя пластилина Roma. Если пластилин плохо утрамбован или хранится при повышенной температуре, бронема-

териал будет деформироваться из-за недостаточного сопротивления подложки, и его взаимодействие с пулей будет уменьшено. Это может способствовать пробиванию бронежилета. С другой стороны, если пластилин хранился при низкой температуре, он слишком жесткий и пуля также может пробить бронематериал. Рекомендуемые условия хранения и калибровки пластилина перед испытанием бронежилетов устанавливаются стандартом NIJ 0101.04.

2.11. Литература

- Bajaj, Pushpa and Sriram, «Ballistic Protective Clothing: An Overview», *Indian Journal of Fiber and Textile Research*, Vol. 22, December 1997, 274–291.
- Bhatnagar, A., *New Technologies and Materials for Military Helmets and Body Armor*, PASS 173–183, 1998.
- Bhatnagar, A. and Lang, D., «High Performance Armor Materials», Soldier Modernization Seminar, Ottawa, 1996.
- Bhatnagar, A. and Wagner, L., «High Performance Small Arms Protective Insert». ICCM 14, 2003.
- Gower, H.L., Cronin, D.S., Worswiek, M.J. and Plumtree, A.A., «Effect of material properties on the ballistic impact resistance of Kevlar», CANCOM 2001, Montreal, August 2001.
- Jane's Infantry Weapons*, T.J. Gander (ed.), 24th edn, 1998–9.
- Laible, Roy C, *Ballistic Materials and Penetration Mechanics*, Volume 5, Elsevier Scientific Publishing Company, 1980.
- Lin, L., Bhatnagar, A. and Chang, H.W., «Ballistic Energy Absorption of Composites-I», SAMPE Technical Symposium, 1990.
- Lin, L., Bhatnagar, A. and Chang, H.W., «Ballistic Energy Absorption of Composites-II», SAMPE Technical Symposium, 1991.
- Lin, L., Bhatnagar, A. and Chang, H.W., «Ballistic Energy Absorption of Composites-III», SAMPE Technical Symposium, 1992.
- Military Specification Projectiles, Caliber's .22, .30, .50 and 20 mm Fragment Simulating Projectiles, MIL-P-46593A (ORD).
- Military Standard «Ballistic Test for Armor» MIL-STD-662F.
- NIJ Standard-01.01.04. «Ballistic Resistance of Personal Body Armor», September 2000. *Police Body Armor Standards and Testing*, Volume I, Congress of the United States, Office of Technology Assessment, Washington DC, August 1992. Rinker, Robert A., *Understanding Firearm Ballistic*, 3rd edn, Mulberry House Publishing, 1999.
- Shield Patents, e.g.. US 4,916,000.
- Ulven, C, Vaidya, U.K. and Hosur, M.V., «Effect of projectile shape during ballistic perforation of VARTM carbon/epoxy composite panels», *Composite Structures*, Vol. 61, Nos 1–2, 2003, 143–150.
- Wagner, L. and Bhatnagar, A., «High Performance Woven and Non-woven Ballistic Materials for Flexible Vest», ICCM 14. 2003.

ГЛАВА 3

ПОВЕДЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ ПРИ БАЛЛИСТИЧЕСКОМ УДАРЕ

*А. Шахкарами, Э. Сепус, Р. Вазири, А. Поурсартин,
Университет Британской Колумбии, Канада*

3.1. Введение

При ударе в мишени развиваются процессы пластического деформирования и разрушения как на уровне всей мишени, так и локально вблизи точки удара (Pierson *et al.*, 1993; Pierson, 1994; Ursenbach *et al.*, 1995). Эти процессы зависят от множества факторов, включающих скорость удара, свойства снаряда, размер мишени и характеристики ее поверхностного слоя. Обычно наиболее важным фактором, определяющим переход от локального (баллистического) к глобальному характеру деформирования, является скорость удара (Cantwell and Morton, 1989; Cantwell and Morton, 1991; Abrate, 1994; Lee and Sun, 1993b; Lee and Sun, 1993a). Строго говоря, сама по себе скорость снаряда не позволяет провести четкую границу между баллистическим и статическим режимами деформирования материала. Отношение масс снаряда и мишени (Olsson, 2000; Olsson, 2001) или отношение частоты местных колебаний к частоте колебания всей мишени (Vucinell *et al.*, 1991) служат более надежными показателями перехода к баллистическому характеру поведения при ударе. Однако для конкретного снаряда и мишени в качестве грубого параметра, позволяющего отличить баллистический и статический режимы деформирования мишени, можно использовать скорость. Важно, что локальные механизмы деформирования не зависят от размеров мишени, в то время как квазистатическое поведение всей системы нераздельно связано с ними. Схематической иллюстрацией этому служит рис. 3.1.

Данное наблюдение выполняется и в случае баллистического удара по одиночной нити. Исследуя разрушение высокопрочных нитей при ударе, Carr (1999)

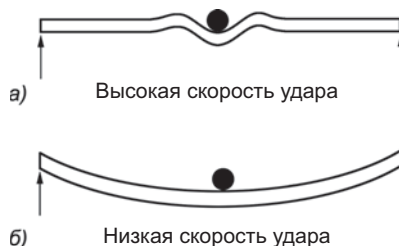


Рис. 3.1. Схематическое изображение деформирования пластины при высокой (а) и низкой (б) скорости удара (Cantwell and Morton, 1989)

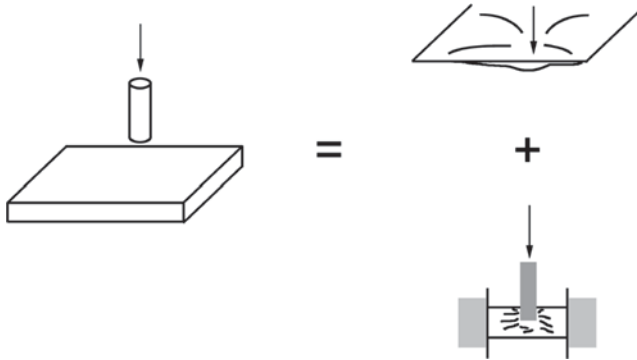


Рис. 3.2. Суперпозиция глобального и локального процессов (Ursenbach, 1995)

обнаружил, что при низких скоростях удара разрушение носит глобальный характер, а при более высоких скоростях удар становится локальным («сдвиговое разрушение»).

Диапазон скоростей перехода от статического к локальному (баллистическому) деформированию простирается от почти статического нагружения вплоть до гиперскоростей удара, причем типичным является взаимное наложение обоих видов поведения, как показано на рис. 3.2 (Ursenbach, 1995).

При достаточно высоких скоростях глобальное смещение плиты становится менее значимым (Zhu *et al.*, 1992b). Такое поведение называют баллистическим. Повреждения мишени при ударе могут быть самыми разнообразными, включая появление выбоин, растрескивание матрицы, расслоение, срезание и разрыв волокон (Abrate, 1991; Abrate, 1994; Abrate, 1998). Степень интенсивности указанных повреждений зависит от скорости удара, геометрии мишени и снаряда, свойств материалов ударника и мишени.

3.2. Глобальные процессы

Глобальные (статические) механизмы поглощения энергии обычно превалируют при малой скорости ударе, когда имеется достаточно времени для передачи и рассеивания энергии снаряда по большому объему мишени. В таких случаях времени хватает на распространение упругих волн (изгибных и сдвиговых) вплоть до границ мишени.

Поведение при ударе по отдельной нити, основного компонента тканей и ламинатов, имеет фундаментальное сходство с поведением мишеней, изготовленных из волокнистых материалов. Всестороннее исследование этого вопроса содержится в серии статей Рахматуллина (1945, 1954) и Смита с соавторами (1960). При трансверсальном ударе по волокну в нем возникает продольная волна деформации, распространяющаяся вдоль него со скоростью звука. Эта волна вызывает растяжение волокна и приводит к смещению материала по направлению к точке удара. Возникает также перпендикулярная волна в форме клина, фронт которой перемещается значительно медленнее продольной

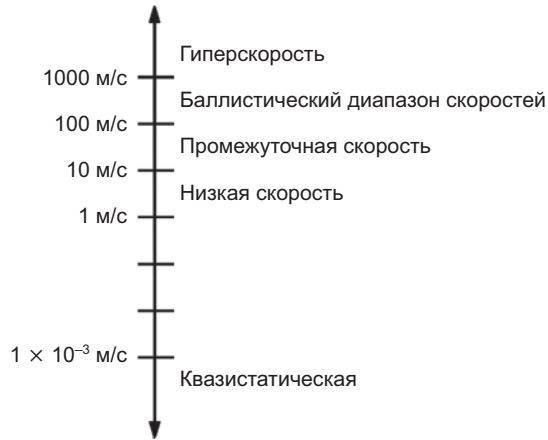


Рис. 3.3. Классификация скоростей удара (Ursenbach, 1995)

волны, а вершина клина движется вместе с ударником. Эту волну называют трансверсальной, или рахматуллинской. На краю клина плоскостное смещение материала превращается во внеплоскостное (Cunniff, 1992; Wilde *et al.*, 1973). В ткани вместо клина вблизи точки удара образуется конус, что объясняется поперечным изгибом нитей утка и основы в ортогональном направлении. Продольная и поперечная волны распространяются с течением времени от точки удара, увеличивая количество энергии, рассеиваемой материалом, вплоть до остановки снаряда или пробивания им мишени (Roylance *et al.*, 1995; Cerup *et al.*, 1999).

Удар со скоростью менее 100 м/с вызывает преимущественно глобальное квазистатическое деформирование мишени. Классификация скоростей удара приведена на рис. 3.3. Низкоскоростной удар приводит к упругому деформированию системы (Cantwell and Morton, 1989; Cantwell and Morton, 1991; Delfosse *et al.*, 1993). Глобальный прогиб развивается по мере того, как волна изгиба многократно пробегает от точки удара до границ мишени и обратно. Увеличение числа отражений при соударении приводит ко все большему приближению характера деформирования к квазистатическому изгибу (Delfosse and Poursartip, 1997).

Примерами квазистатического удара может служить удар молотка, который уронили на структуру во время техобслуживания, или удар твердых камешков, лежащих на взлетно-посадочной полосе, по корпусу самолета во время взлета. В этих случаях внедрение камешка в материал или сквозное пробитие случаются редко. Тем не менее, может появиться повреждение, причем оно может располагаться под поверхностью композита и визуально не наблюдаться (рис. 3.4) (Hoskin and Baker, 1986).

Более точное описание различий квазистатического и динамического поведения дает Abrate (1994) в обзоре исследований ударного поведения слоистых композитов. В целом имеются три вида моделей, которые используют для описания динамики ударного воздействия:

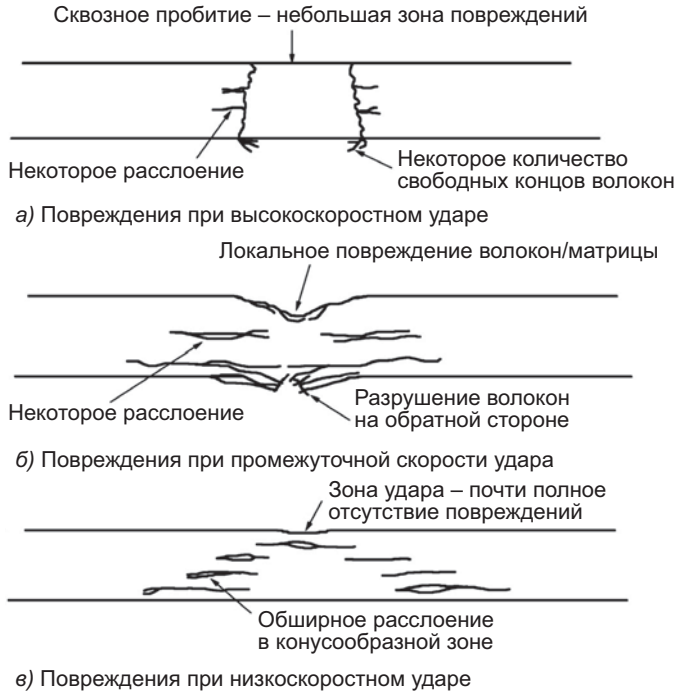


Рис. 3.4. Виды повреждений слоистых композитов при различной скорости удара (Hoskin and Baker, 1986)

1. Модели, основанные на энергетическом балансе и предполагающие, что панель деформируется квазистатично. Этот подход является самым простым.
2. Модели, пример которых показан на рис. 3.5. Они позволяют получить весьма упрощенное описание динамического поведения структуры.
3. Полные модели динамического поведения структуры.

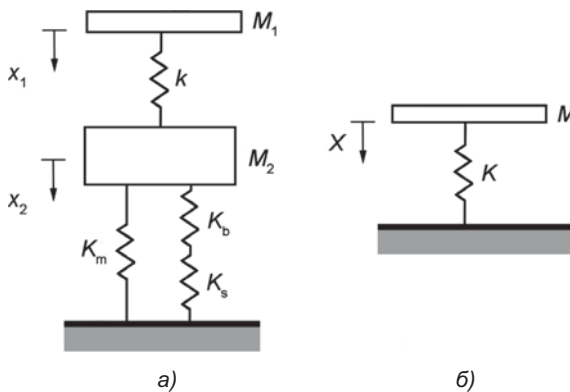


Рис. 3.5. Модель с двумя степенями свободы (а); модель с одной степенью свободы (б) (Abrate, 2001)

Моделирование описывает рассматриваемые события все более точно, что сопровождается соответствующим ростом расходов на компьютерные вычисления. Теоретически каждое исследование должно бы использовать целый ряд моделей, начиная с простейших для выяснения сути явления и вплоть до сложных, проясняющих тонкие эффекты и изучающих влияние различных параметров.

3.2.1. Упругость

При ударе по мишени на основе ткани энергия упругой деформации запасается преимущественно в нитях, вдоль которых распространяется продольная волна деформации. Эта энергия непосредственно зависит от деформации нитей (Ringleb, 1957) и прямо пропорциональна объему деформированной области, возрастающему с течением времени. Размер деформированной области определяется скоростью распространения звука в материале мишени, которая, в свою очередь, зависит от его модуля упругости нити и плотности (Roycastle *et al.*, 1995). Влияние других факторов, влияющих на энергию деформации материала, как, например, граничных условий, будет обсуждаться ниже.

Кинетическая энергия ткани определяется движением нитей в конусе деформации перпендикулярно плоскости мишени и движением материала в плоскости мишени между пределами конуса деформации и фронтом продольной волны деформации. Кинетическая энергия ткани зависит от массы (или поверхностной плотности) мишени и объема приведенного в движение материала. Кинетическая энергия, как и энергия упругой деформации, зависит от граничных условий.

Для жестких композитов эти механизмы в основном соответствуют предсказаниям классической теории упругости (Cantwell and Morton, 1991; Cantwell and Morton, 1989; Delfosse and Poursartip, 1995; Delfosse and Poursartip, 1997; Abrate, 2001; Abrate, 1994). Энергия упругой деформации временно запасается в системе, а затем выделяется в виде тепла. В случае ударного воздействия, не вызывающего повреждений, это единственный механизм потерь. Имеется множество моделей, в которых делается попытка учесть глобальную деформацию мишени и соответствующее поглощение энергии. С ними можно познакомиться в обзорах Abrate (1994; 2001). Общим в них является способ определения жесткости структуры и ее использование для вычисления поглощенной упругой энергии и величины прогиба, а также энергии колебаний. Например, Пирсон (Pierson and Vaziri, 1996; Pierson *et al.*, 1993) использует ранее выведенные уравнения движения (Whitney and Pagano, 1970) для учета влияния деформации сдвига и вращения. Ударное воздействие рассматривается как изменяющаяся со временем перпендикулярная сила, приложенная к центру панели, а сила сопротивления определяется степенью локального повреждения. Иногда процесс перфорации рассматривается независимо от величины глобального изгиба. Обычно для определения поглощенной упругой энергии применяют метод конечных элементов (Quan, 1998).

3.2.2. Диссипация энергии

Нелинейное деформирование композитов обычно является необратимым и связано с явлениями, которые инициируются локально, но затем могут перерасти на

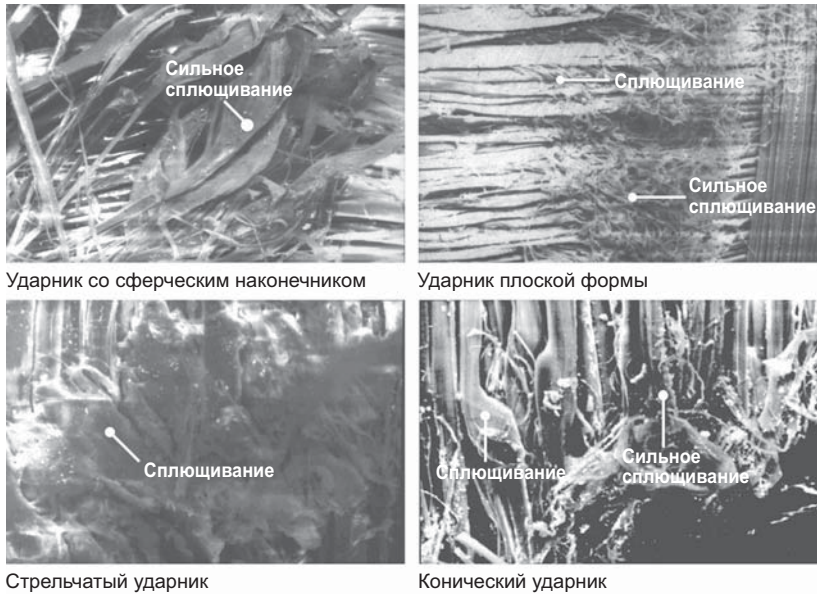


Рис. 3.6. Разрушение волокон при различной форме ударника (Tan *et al.*, 2003)

макроскопический уровень. Поэтому более детально мы будем обсуждать ее в разделе, посвященном локальным явлениям.

Для бронепакетов на основе ткани работа сил трения, рассеиваемая во время удара, является нелинейным механизмом диссипации энергии (рис. 3.6). Диссипация энергии силами трения включает взаимное скольжение нитей, взаимодействие соседних слоев и взаимодействие снаряда и мишени. Считается, что диссипация энергии силами трения составляет лишь малую часть общей величины энергии ударника¹.

¹ Это неаккуратное утверждение. Растягивающее напряжение за фронтом продольной волны растяжения возрастает при увеличении скорости трансверсального удара (Рахматуллин, 1945, 1954), Смит (1960). Существует критическая скорость удара, при которой растягивающее напряжение достигает предела прочности волокна, и она разрушается в момент удара (Баженов с соавт., 2001). Критическая скорость зависит от прочности волокна, но для современных высокопрочных волокон критическая скорость равна 600–800 м/с. Таким образом, для волокнистых материалов следует различать *низкоскоростной баллистический удар* и *высокоскоростной баллистический удар*. При скоростях удара ниже критической (низкоскоростном баллистическом ударе) формируется рахматуллинская поперечная волна (рис. 8.2), и вдоль волокна распространяется продольная ударная волна растяжения, которая эффективно диссипирует энергию. Напротив, при высокоскоростном ударе пуля «срезает» волокно, и поглощение энергии падает. При низкоскоростном баллистическом ударе (300–450 м/с для современных волокон) основным механизмом диссипации энергии является именно работа сил трения нитей (Баженов, 2006). Она обеспечивает чрезвычайно высокую баллистическую эффективность волокнистых материалов. Без трения, только за счет поглощения энергии продольной волной, гибкие бронезилеты, одеваемые под рубашку, оказались бы неспособны остановить пулю пистолета Макарова. По-видимому, утверждение автора справедливо для высокоскоростного удара винтовочными пулями, когда скорость выше критической, т.е. для брони III–IV уровня защиты. Следует также обратить внимание, что баллистический удар является очень сложным явлением и практически все выводы справедливы в определенных скоростных рамках, что в данной книге учитывается не во всех главах. — Прим. ред. перевода.

На величину рассеиваемой трением энергии оказывают влияние многие факторы, включающие коэффициент трения между соседними нитями и поверхностные свойства панели, допускающие или ограничивающие взаимное перемещение нитей. Изучение истирания и фибрилляции волокон дает основания полагать, что при низких скоростях удара трение может играть значительную роль.

3.3. Локальные механизмы диссипации энергии

Локальными называют явления, наблюдаемые в непосредственной близости от области ударного воздействия снаряда. По мере роста скорости ударника поведение панели будет носить все более локальный характер. Однако это не означает, что при высоких скоростях удара поведение непременно должно быть принципиально иным. Сан с соавторами (Lee and Sun, 1993b; Sun and Potti, 1993) показали, что механизмы разрушения углепластика на основе эпоксидной матрицы (AS4/3501-6) в динамических условиях очень близки к механизмам разрушения в квазистатических условиях. Их выводы нашли отражение и в других исследованиях (Zhu *et al.*, 1992a; Lee and Sun, 1993a; Lee and Sun, 1993b; Jackson and Portanova, 1996; Potti and Sun, 1996).

Обсуждаемые механизмы повреждения обычно действуют поэтапно и могут сильно зависеть от геометрии наконечника снаряда (рис. 3.7 и 3.8). Факторы, влияющие на роль данных механизмов, более подробно обсуждаются ниже. Здесь мы рассмотрим различные механизмы в той последовательности, в которой они действуют при проникновении в мишень.

3.3.1. Растрескивание матрицы

Различают два типа трещин в матрице, которые возникают при статическом и динамическом воздействии. Эти трещины показаны на рис. 3.9. Первые называют сдвиговыми трансверсальными, а вторые – изгибными трещинами (Jih and

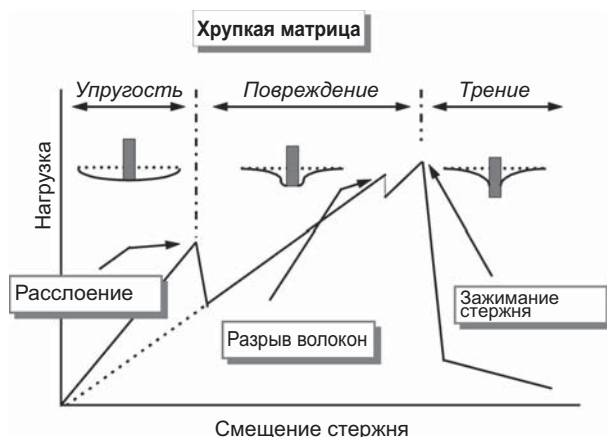


Рис. 3.7. Схематическая диаграмма нагружения (сила-смещение) при статическом внедрении стержня в углепластик на основе хрупкой матрицы (Ursenbach, 1995)

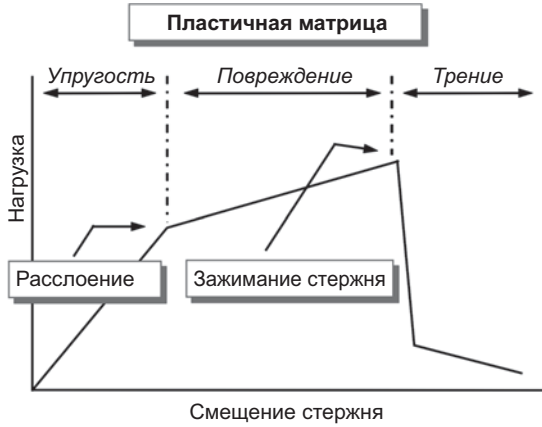


Рис. 3.8. Схематическая зависимость нагрузки от смещения при статическом внедрении стержня в углепластик на основе пластичной матрицы (Ursenbach, 1995)

Sun, 1993; Choi *et al.*, 1991a; Choi and Chang, 1992). Они инициируют расслоение композита. Расслоение ламината вдали от свободных краев также не может произойти при отсутствии трещин в матрице.

Трансверсальные сдвиговые трещины возникают на некотором расстоянии от точки удара под углом примерно 45° к плоскости слоя. Это вызвано суперпозицией межслоевого сдвигового напряжения и поперечного нормального напряжения, как показано в левой части рис. 3.9. Рис. 3.10 иллюстрирует развитие трещин, приводящее к расслаиванию углепластика. Трещины изгиба возникают в нижних слоях ламината. Они вызываются высокими растягивающими напряжениями, обусловленными изгибом пластины (правая часть рис. 3.9).

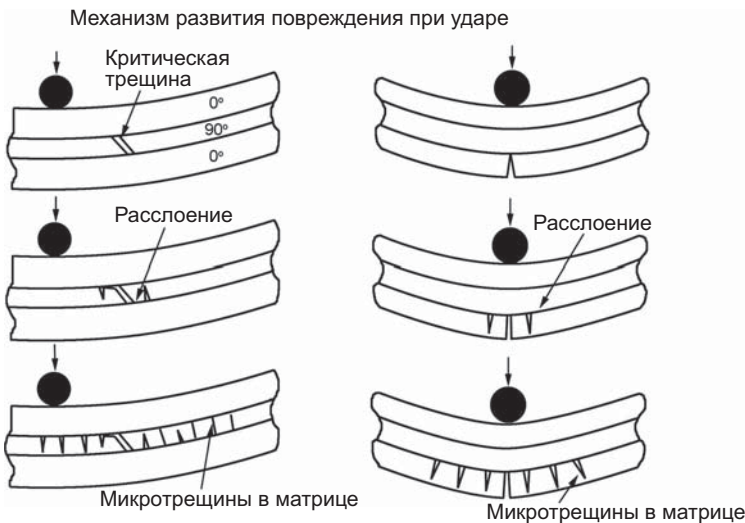


Рис. 3.9. Схематическое изображение развития трещин двух типов в многослойных композитах (Choi *et al.*, 1991a)

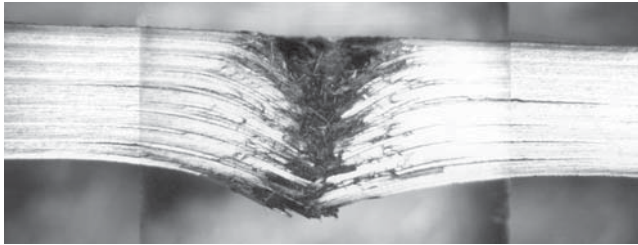


Рис. 3.10. Фотография поперечного сечения пластины углепластика толщиной 6,15 мм, расслоившейся в результате удара. Ударник имел конический наконечник с углом 37° (Sanders, 1997)

Обычно считается, что расслоение, вызываемое внеплоскостной нагрузкой, обусловлено комбинацией разрушения I и II типа. Однако в вопросе роли каждого из этих механизмов мнения расходятся. Имеются утверждения, что главную роль играют напряжения II типа (сдвиговые), а напряжениями I типа (растягивающими) можно пренебречь (Razi and Kobayashi, 1993); что оба механизма играют примерно равную роль (Choi *et al.*, 1991b); и что появление трещин обусловлено только напряжениями I типа (Wu and Springer, 1988). Вероятно, роль обоих механизмов зависит от конкретной системы, и в данном вопросе нельзя сделать однозначный вывод.

Ясно, что расслоение является важным механизмом диссипации энергии в слоистых материалах (Malvern *et al.*, 1989; Wu and Chang, 1995; Greaves, 1992; Zhu *et al.*, 1992a).

3.3.2. Разрыв волокон и образование лепестка разрыва

Если изгиб превышает уровень начала процесса расслоения, на обратной растягиваемой стороне пластины начинается разрыв волокон, и образуется так называемый лепесток разрыва (Goldsmith *et al.*, 1995). Этот термин ранее применяли при описании разрушения металлов (Thomson, 1955; Taylor, 1948; Zaid and Paul, 1958; Johnson *et al.*, 1973; Landkof and Goldsmith, 1985).

3.3.3. Срез

При высокоскоростном ударе по композиту снаряд обычно пробивает несколько первых слоев волокон. Это обусловлено срезом, если снаряд имеет острые края, или разрывом волокон, если растягивающее напряжение превышает предел их прочности. Следующие слои мишени растягиваются и поглощают энергию, действуя как мембраны (рис. 3.11) (Scott, 1999). Вследствие этого некоторые исследователи предлагали размещать слои с высокими баллистическими свойствами у двух поверхностей мишени (Cunniff, 1999).

В случаях тупого наконечника ударника срез часто оказывается завершающим механизмом разрушения. Обычно ударник вырезает «пробку», представляющую собой конусообразный сегмент пластины. Этот механизм разрушения описан многими исследователями (Cristescu *et al.*, 1975; Lee and Sun, 1993b; Sun and Potti, 1993). Он иллюстрируется рис. 3.12.

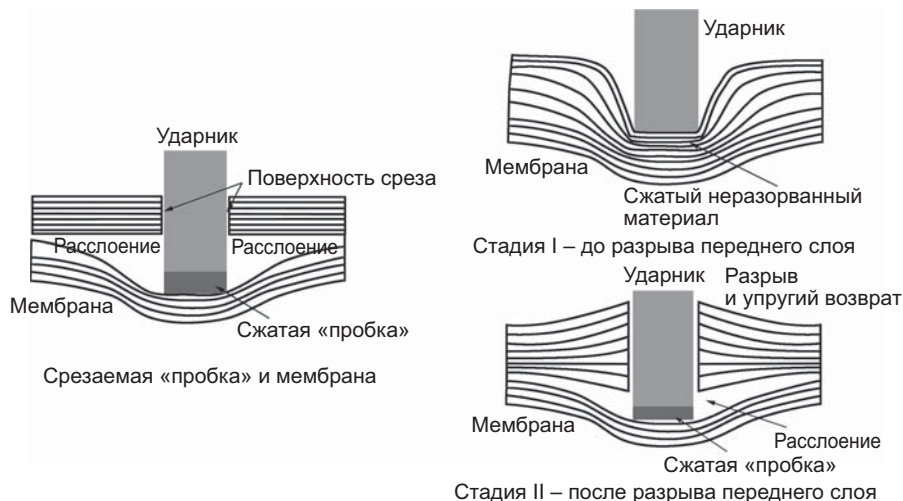


Рис. 3.11. Упругое и необратимое поведение при ударе (Scott, 1999)

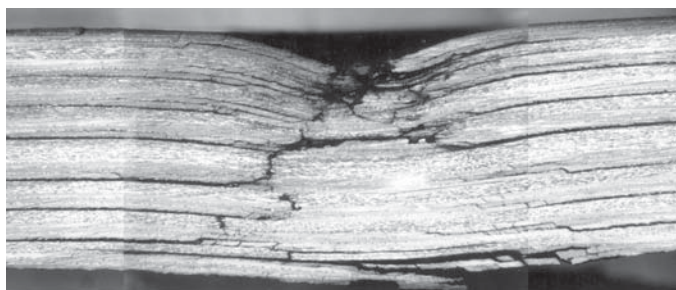


Рис. 3.12. Микрофотография поперечного сечения слоистого углепластика толщиной 6,15 мм после перфорации ударником конической формы с углом 120° . Ясно видно место инициации пробки (Sanders, 1997)

3.3.4. Раздвигание нитей

В мишенях из сухих тканей данный механизм разрушения возникает, когда снаряд раздвигает нити в стороны. Отверстие, возникающее при пробитии мишени, обычно меньше диаметра снаряда, что свидетельствует о раздвигании нитей (Shim *et al.*, 1995). При этом механизме энергия диссипируется в основном за счет сжатия нитей вокруг снаряда и рассеивается вследствие трения между ними (Lim *et al.*, 2002). В отличие от среза, количество энергии, рассеиваемой по этому механизму разрушения в безматричных тканых материалах и слоистых композитах, сильно зависит от формы наконечника снаряда (Tan and Khoo, 2005).

Если мишенью является жесткий волокнистый композит, а ударник имеет коническую форму, наблюдается механизм пробития, состоящий в постепенном расширении отверстия (Greaves, 1992; Howlett and Greaves, 1995; Zhu *et al.*, 1992b). Аналогичный механизм наблюдается и при пробитии металлов (Taylor, 1948; Corbett *et al.*, 1996; Yill, 1950; Woodward, 1978). Примеры раздвигания нитей в стек-

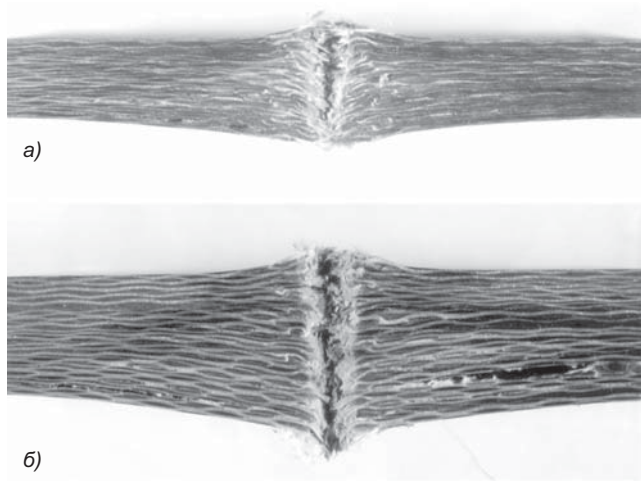


Рис. 3.13. Образец из стеклопластика, на котором видно расширение отверстия и пробития коническими снарядами: с углом 37° в вершине при скорости удара 203 м/с (а) и с углом 120° в вершине при скорости удара 384 м/с. Вес снаряда 13,2 г (б) (Sanders, 1997)

лопластике приведены на рис. 3.13 (Sanders, 1997). В этом случае материал, находящийся перед снарядом, постепенно выталкивается в сторону по мере его движения, в результате чего вблизи отверстия увеличивается толщина образца.

3.3.5. Трение на границе отверстия

Конечный механизм диссипации энергии, общий для всех типов снарядов и материалов, обусловлен трением между ударником и композитом. Этот механизм состоит в работе сил трения при проталкивании снаряда через отверстие, возникшее при пробитии мишени. Сила трения зависит от длины области контакта снаряда и мишени, от сжимающего напряжения, действующего на снаряд, и от коэффициента трения между снарядом и композитом.

3.4. Влияние других параметров

3.4.1. Свойства материала

Тип волокон

В общем, идеальным можно считать материал с высокими характеристиками диссипации энергии (высокими прочностью и деформацией при разрушении, а также низкой плотностью). Для тканых материалов желательно иметь высокую скорость продольной волны, переносящей энергию на большой объем образца. Сейчас в противобаллистических материалах наиболее широко используют высокопрочные стеклянные, арамидные, ПБО и СВМПЭ волокна. На рис. 3.14 представлено сравнение свойств различных волокон (Jacobs and Van Dingenen, 2001). В жестких композитах использование волокон с более высоким модулем упругости приводит к уве-

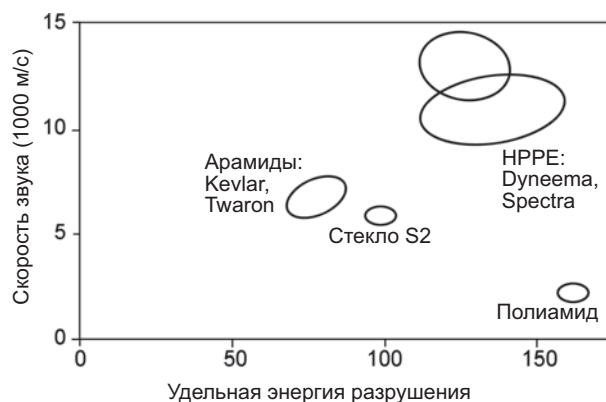


Рис. 3.14. Сравнение свойств противобаллистических волокон (Jacobs and Van Dingenen, 2001)

личению скорости распространения волны изгиба и к росту количества ее отражений при соударении, что увеличивает область деформирования образца.

Поперечные свойства волокон, которые многие исследователи оставляют без внимания, также играют важную роль в диссипации энергии тканями. Поскольку при поперечном ударе в тканом материале нити взаимодействуют друг с другом, их пластическое деформирование в поперечном направлении может снижать продольную прочность при растяжении. Большинство исследований поперечных свойств нитей осуществлялось с целью отработки технологии переработки тканых композитов (Gutowski, 1985) или их транспортировки и хранения (Van Wyk, 1946). В этих работах отмечаются нелинейные свойства тканей, которые должны оказывать сильное влияние на взаимодействие снаряда и мишени. Нелинейность вызывается разными причинами, включающими сложную геометрию нитей в ткани и отдельных волокон в нити, а также нелинейные поперечные свойства самих волокон (Cheng *et al.*, 2004).

Структура нити

Высокопрочные нити обычно состоят из скрученных волокон. Известно, что скручивание нитей изменяет их модуль упругости и прочность. Rao and Farris (2000) изучали различные материалы и обнаружили, что существует оптимальный угол скручивания, при котором прочность нитей оказывается максимальной. У всех исследованных ими нитей этот угол был равен примерно 7° (рис. 3.15).

Влияние скорости деформации и температуры

Хорошо известно, что механические свойства высокопрочных полимеров зависят от скорости нагружения и температуры вследствие процессов релаксации и ползучести. Поскольку характеристики, полученные при статических и квазистатических испытаниях, отличаются от характеристик материала в баллистических условиях, многие исследователи сосредоточили свое внимание на изучении влияния скорости нагружения на механические свойства волокон в нитях и тканях.

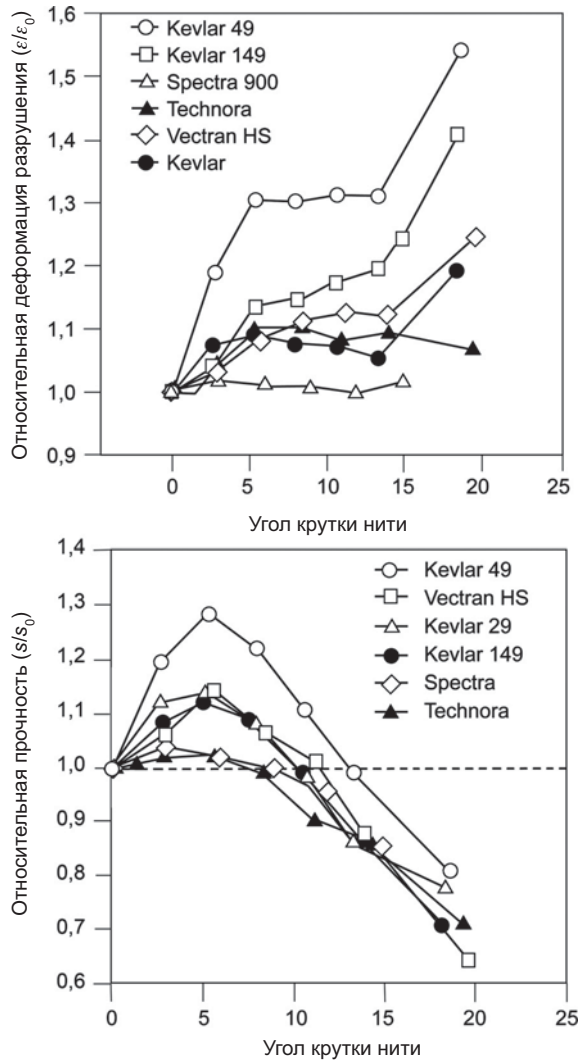


Рис. 3.15. Зависимость относительной деформации и прочности от угла крутки нити (Rao and Farris, 2000)

Figucia *et al.* (1971) провели статические и динамические испытания стеклянных, нейлоновых и шелковых волокон. Они наблюдали заметное увеличение напряжения при высоких скоростях нагружения полимерных материалов. Прочность материала при увеличении скорости нагружения возрастала, а удлинение при разрыве уменьшалось. Termonia и Smith (1988) разработали микроскопическую модель разрыва регулярно расположенных полимерных волокон. Они применили эту модель к ориентированным ПЭ и арамидам. Сравнение расчетных и экспериментальных данных показало, что при увеличении скорости деформации прочность волокон возрастает. Fenstermaker и Smith (1965) для изучения ползучести и релаксации напряжения фотографировали процесс трансверсального удара по по-

лиэфирным волокнам и описали их свойства моделью из трехэлементной системы пружин и демпферов. Wang и Xia (1998) использовали бимодальное распределение Вейбулла, позволяющее оценить чувствительность волокон Kevlar 49 к скорости деформации и температуре. Приведенные на рис 3.16 данные демонстрируют зависимость механических свойств Kevlar от скорости нагружения.

Shim *et al.* (2001) исследовали чувствительность ткани Twaron к скорости деформации методом раздира Хопкинсона. Они пришли к выводу, что механические свойства ткани значительно зависят от скорости деформации. При возрастании скорости прочность при растяжении и модуль упругости увеличиваются, а деформация при разрушении уменьшается. Такое поведение обусловлено как свойствами самих волокон, так и переплетением нитей в ткани.

В слоистых материалах одним из важнейших факторов, определяющих свойства материала, является чувствительность волокон к скорости растяжения. В случае стекловолокон, полиэтиленовых и арамидных волокон чувствительность к скорости деформации затрудняет анализ поведения мишени при ударах с различной скоростью (Harding and Welsh, 1983). Zhu *et al.* (1992a) обнаружили некоторое расхождение результатов испытания путем внедрения индентора при статических и динамических испытаниях. Хотя повреждения при различных скоростях нагружения развивались в одинаковом порядке, полученные характеристики материала можно было использовать только после учета поправки на чувствительность материала к скорости деформации.

Напротив, углеродные и графитовые волокна нечувствительны к изменению скорости в широком диапазоне скоростей деформации (Harding, Welsh, 1983). Неудивительно, что углепластики весьма привлекательны в качестве конструкционного материала.

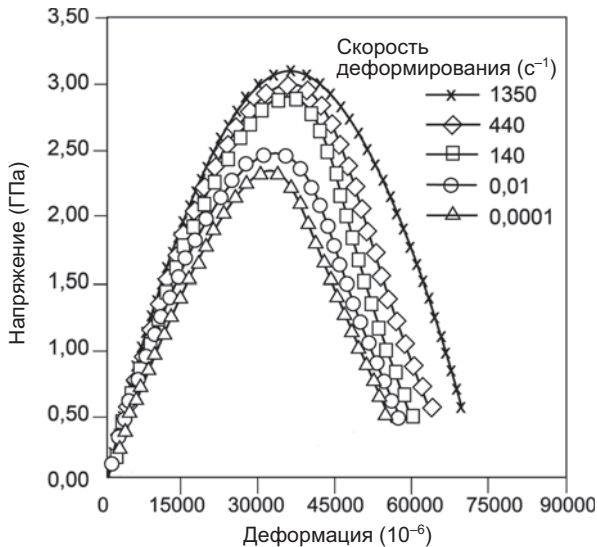


Рис. 3.16. Диаграммы напряжение – деформация волокон Kevlar 49 при различных скоростях деформирования (Wang и Xia, 1998)

Обработка поверхности волокон

В жестких композитах обработка поверхности волокон может радикально изменить уровень адгезии между волокном и матрицей. При хорошей адгезии при низких уровнях энергии удара обеспечивается более высокая прочность, чем при слабой адгезии (Kessler and Bledzki, 1999; Kim and Sham, 2000). При слабой адгезии удар обычно приводит к интенсивному расслаиванию, однако при высоких энергиях удара расслоение часто оказывается предпочтительным, поскольку оно способно эффективно диссипировать энергию.

Диссипация энергии вследствие трения нитей в мишенях из тканых материалов имеет важное значение. Имеется множество работ, посвященных измерению сил трения нитей в тканях. Briscoe и Motamedi (1992) исследовали методы обработки поверхности нитей и их влияние на коэффициент трения. Bazhenov (1997) изучал взаимное трение нитей методом вытягивания нитей из ткани. Он пришел к выводу, что увеличение трения между нитями приводит к расширению активной зоны выдергивания нитей в бронепакете, увеличивая диссипацию энергии при баллистическом ударе. Martinez *et al.* (1993) измеряли трение нитей методом вытягивания нитей, а также трение и износ волокон Kevlar при контакте с металлами. Они отметили желательность измерения свойств при более высоком давлении и скорости нагрузки, чем это удалось сделать им самим. Kirkwood *et al.* (2004, 2005) использовали значения коэффициента трения, полученные методом квазистатического вытаскивания нитей, для моделирования диссипации энергии тканью при распрямлении нитей. Shockey *et al.* (2000) использовали полученный путем таких испытаний коэффициент трения для прогнозирования поведения тканей методом трехмерного моделирования. Они обнаружили, что коэффициент трения зависит от способа переплетения ткани. Rebouillat (1998) показал, что в тканях, сделанных из нитей с меньшей линейной плотностью, коэффициент трения выше, возможно, вследствие большего числа точек соприкосновения по длине нити.

Усилия по измерению трения нитей подчеркивают значение данного параметра для обеспечения эффективности защитных панелей. Duan *et al.* (2005a, 2005b) использовали трехмерную модель ткани и пришли к выводу, что механизмы трения особенно активны в панелях, граничные условия которых допускают существенное перемещение нитей при ударе. Еще интереснее то, что трение не только стабилизирует структуру ткани в области удара, но и влияет на относительную долю энергии упругой деформации и кинетической энергии системы в общей диссипируемой энергии.

Конфигурация волокон

В жестких композитах волокна, как правило, используют в виде однонаправленных слоев или ткани, хотя изредка (по крайней мере, на сегодняшний день) используют и трехмерную ткань. Тканые материалы имеют повышенную межслоевую вязкость разрушения (Kim and Sham, 2000), причем имеются сообщения об улучшении этого показателя в 2–8 раз. В результате, подавление расслоения позволяет уменьшить степень повреждения материала. В слоистых поперечно ориентированных материалах при ударном воздействии нагрузка после достижения

максимального значения резко падает, в то время как в многослойных бронепакетах на основе ткани перед разрушением она сохраняется на некотором постоянном уровне.

Композиты на основе трехмерных тканей имеют более высокую стойкость к повреждениям, чем при использовании обычных двухмерных тканей (Cheng and Jang, 1995). Этот вывод был сделан на основании меньшего количества трещин расслоения в трехмерных тканых структурах. Данный вывод подтверждает Mouritz (2001), обнаруживший, что при взрывах стойкость трехмерной структуры к повреждению возрастает даже сильнее, чем при ударе снарядом.

Ткань

Механические свойства ткани благодаря ее сложной структуре отличны от свойств отдельных нитей. Наличие пересечений нитей, их трение и многие другие факторы изменяют поведение ткани под нагрузкой. Sunniff (1992) обсуждал степень потери эффективности при переходе от волокна к нити, от нити к ткани и от однослойной ткани к многослойному материалу. Он пришел к выводу, что проскальзывание нитей в неплотной ткани или в ткани с низким коэффициентом трения между нитями приводит к снижению эффективности материала. Уже давно было замечено, что ткани с одинаковыми свойствами вдоль основы и утка диссипируют больше энергии, чем несбалансированные ткани.

Хорошо известно, что в процессе ткачества свойства нитей ухудшаются. Lee *et al.* (2002) и Rudov-Clark *et al.* (2003) обсуждают ухудшение свойств стеклянных нитей при получении трехмерных тканых материалов. Согласно их выводам при ткачестве прочность нитей может уменьшиться на 30% из-за высокой степени истирания волокон (рис. 3.17). Напротив, на модуль упругости нитей при растяжении процесс ткачества влияет в меньшей мере. Хотя все эти исследования проводились

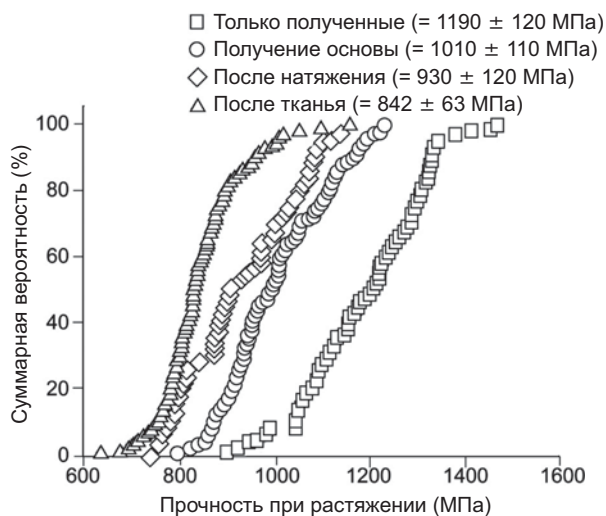


Рис. 3.17. Распределение вероятности разрушения нитей на различных стадиях получения ткани (Lee *et al.*, 2002)

на тканях, предназначенных для получения композиционных материалов, аналогичные заключения применимы и к тканям противобаллистического назначения.

Матрица

Choi *et al.* (1991b) описали два основных типа развития повреждений, которые зависят от способа укладки слоев волокон и от свойств матрицы. Поведение полимерных матриц определяется степенью их пластичности. Главное различие между пластичными и хрупкими матрицами состоит в поведении композита непосредственно после начала расслаивания. Композиты с хрупкой матрицей имеют тенденцию к мгновенному расслоению при последующей почти полной его остановке, в то время как в случае пластичных матриц процесс расслоения происходит постепенно и предсказуемо.

3.4.2. Параметры мишени

Поперечные размеры

При низкой скорости удара размер мишени имеет большое значение, поскольку он определяет количество энергии упругой деформации, которую может запасти мишень.

При высокоскоростном ударе влияние размеров мишени уменьшается, и при достаточно высокой скорости оно может оказаться совершенно незначительным, поскольку в этом случае повреждения имеют локальный характер (Cantwell и Morton, 1989, 1991). Было установлено, что при низких скоростях небольшие по поперечным размерам образцы проявляют большую прочность, чем крупные мишени (Morton, 1988), хотя этот эффект выражен и менее явно, чем влияние толщины (Liu *et al.*, 1998). Это относится и к безматричным тканым материалам. Cunniff (1992) продемонстрировал, что поперечные размеры мишени влияют на баллистические свойства тканых материалов при скоростях удара, близких к баллистическому пределу. Этот эффект уменьшается при увеличении скорости удара, когда локальный характер деформирования делает размеры мишени несущественными.

Толщина

Толщину безматричных тканых материалов обыкновенно характеризуют количеством слоев. В литературе результаты испытаний чаще всего приводят в виде зависимости отношения остаточной скорости V_r к начальной скорости удара V_s . По мере увеличения числа слоев способность ткани диссипировать энергию снижается, возможно, вследствие взаимодействия слоев и повышения поперечного напряжения в первых слоях многослойных пакетов (Cunniff, 1992). На основании исследования двуслойных мишеней Lim *et al.* (2002) пришли к выводу, что это верно только в отношении снарядов с плоской передней кромкой. Использование снарядов другой формы изменяет вид кривой $V_s - V_r$, что будет обсуждаться в разделе, касающемся влияния формы снаряда.

Prosser (1988) измерял V_{50} панелей из ткани с различным количеством слоев и пришел к заключению, что существует линейная связь между квадратом V_{50} и числом слоев, при условии, что механизм диссипации энергии остается неизменным.

Причины изменения механизма диссипации были отнесены на свойства мишени и геометрическую форму снаряда.

Cunniff (1999) пришел к выводу, что при очень больших скоростях (намного превышающих V_{50}) ближайšie к поверхности слои ткани весьма мало влияют на общую диссипацию энергии, поскольку они разрушаются почти мгновенно.

Для жестких композитных панелей механизм пробития зависит от отношения толщины панели к диаметру индентора (Cartwell and Morton, 1988; Olsson, 2000, 2001). Woodward (1984) предложил объяснение изменения механизма проникновения конических снарядов в металлическую мишень, которое применимо и для слоистых материалов (Cartwell and Morton, 1999; Quan, 1998). Дальнейшее подтверждение этим результатам можно найти в работе Liu *et al.* (1998). Согласно Вудварду:

- если толщина панели h меньше диаметра снаряда $2R_p$ ($h < 2R_p$), преимущественным механизмом пробития в металлах с низкой вязкостью разрушения является образование чашевидного углубления, а не расширение отверстия;
- если $h < \sqrt{3}R_p$, преимущественным механизмом пробития для металлов с низкой прочностью, малым деформационным упрочнением и высокой скоростью температурного размягчения является образование и выброс пробки, а не расширение отверстия.

Замечено также, что в толстых панелях вследствие их жесткости роль локального разрушения вблизи ударника становится более важной (Sutherland and Guedes Soares, 2004).

3.4.3. Граничные условия

Влияние граничных условий на поведение безматричных тканых материалов изучали в большом количестве работ. Граничные условия изменяют диссипацию энергии при отражении продольной волны от кромки материала. Это проявляется в виде увеличения сопротивления движению снаряда после возвращения волны деформации обратно к точке удара. Serus *et al.* (1999) исследовали диссипацию энергии в панелях с полностью закрепленными и полностью свободными краями при высокоскоростном ударе. Они обнаружили, что в случае свободных краев сила растяжения нитей значительно снижается после отражения волны деформации, поскольку нити могут вытягиваться в плоскости ткани. В результате энергия растяжения переходит в их кинетическую энергию. Напротив, в панелях с фиксированными краями существенно растет деформация нитей и, как следствие, энергия упругой деформации. Кинетическая энергия панелей с закрепленными краями обусловлена в основном поперечным движением материала в конусе деформации. На практике конечная жесткость закрепления и проскальзывание границ материала во время испытаний приводят к тому, что поведение мишени является промежуточным между случаями полностью фиксированных и полностью свободных кромок.

При баллистическом ударе проскальзывание материала на границе панели почти неизбежно. Serus (2001) продемонстрировал, что проскальзывание оказывает значительное влияние на диссипацию энергии. Ограничение проскальзывания кромки приводит к более высокой скорости диссипации энергии до перфо-

рации. Однако деформация нитей при меньшей степени проскальзывания выше, так что перфорация мишени обычно происходит раньше.

Ограничение поперечного движения жестких композитов с помощью жесткой подложки полностью исключает смещение мишени как целого, и механизм диссипации оказывается целиком локальным, что обуславливает потенциально более высокую степень смятия и разрушения материала непосредственно перед снарядом. Этот эффект более явно выражен для тупоносых снарядов. При увеличении скорости удара изменение размера области, не поддерживаемой подложкой, перестает влиять на поведение мишени (Cantwell and Morton, 1988), поскольку в этом случае удар оказывается полностью локальным.

3.4.4. Свойства снаряда

Обсуждаемые в этом разделе характеристики существенны, только если деформирование носит локальный характер.

Форма снаряда

Форма снаряда непосредственно влияет на поведение нитей и диссипацию энергии тканями материалами. Montgomery *et al.* (1982) изучали поведение панелей на основе волокон Kevlar 29 и Kevlar 49 при ударном воздействии снарядов различной формы. Они пришли к выводу, что при малых скоростях быстрее останавливаются острые снаряды, в то время как при больших скоростях удара быстрее замедляются снаряды с тупым передом.

Tan *et al.* (2003) исследовали поведение одного слоя ткани Twaron при воздействии снарядов различной формы: с полукруглым наконечником, плоских, стрельчатых и конических (рис. 3.18). Исследование показало, что снаряды с плоским наконечником склонны срезать нити кромкой, в то время как снаряды с полукруглым наконечником обычно растягивают нити вплоть до их разрушения. Остальные два вида снарядов пробивали цель подобно клину. Это позволило сделать вывод, что полукруглая форма снаряда вызывает наибольшую потерю энергии по сравнению с другими формами.

Lin *et al.* (2002) провели исследования, аналогичные Tan *et al.* (2003). Они исследовали поведение двух слоев ткани при ударном воздействии снарядов той же формы. Они сделали вывод, что форма снаряда оказывает весьма существенное

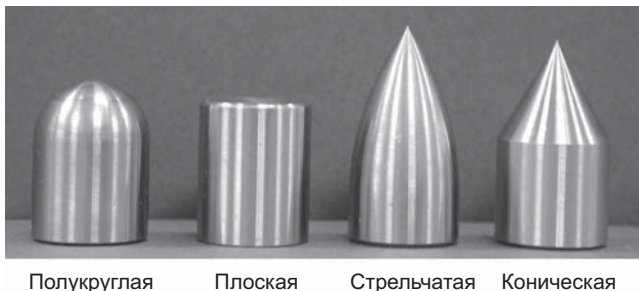


Рис. 3.18. Различные формы ударников, использованные Tan *et al.* (2003)

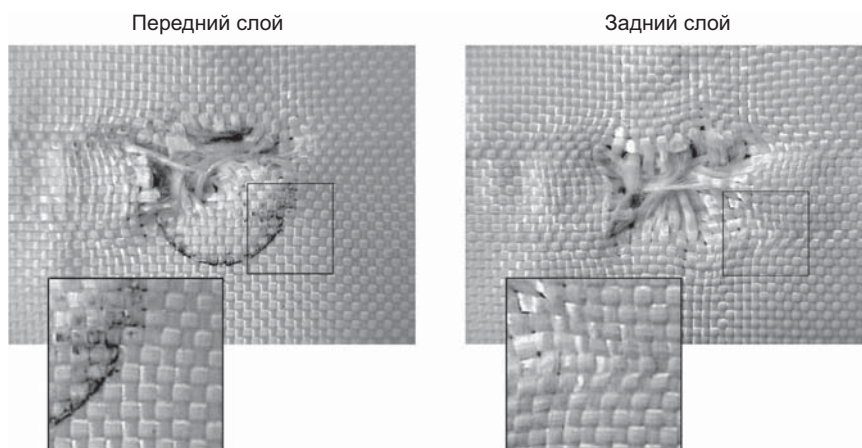


Рис. 3.19. Выгибание нитей на обратной поверхности мишени (Lim *et al.*, 2002)

влияние на поведение мишени, но это влияние ослабевает при увеличении толщины панели. Они также установили, что разрушение нитей существенно на поверхности удара, а на задней поверхности мишени нити преимущественно вытягиваются и изгибаются (рис. 3.19).

Тан и Khoo (2005) изучали поведение гибкого слоистого материала Spectra при воздействии снарядов четырех видов, изображенных на рис. 3.18. Снаряды с плоским наконечником срезают слоистый материал, что аналогично поведению безматричного тканого бронепакета, в то время как полукруглый снаряд растягивает волокна вплоть до их разрыва.

Форма снаряда играет ведущую роль и при пробивании жестких композитов, поскольку она существенно влияет на профиль повреждения (Delfosse and Poursartip, 1995) (рис. 3.20). Предлагались различные модели (Awerbuch and Bodner,

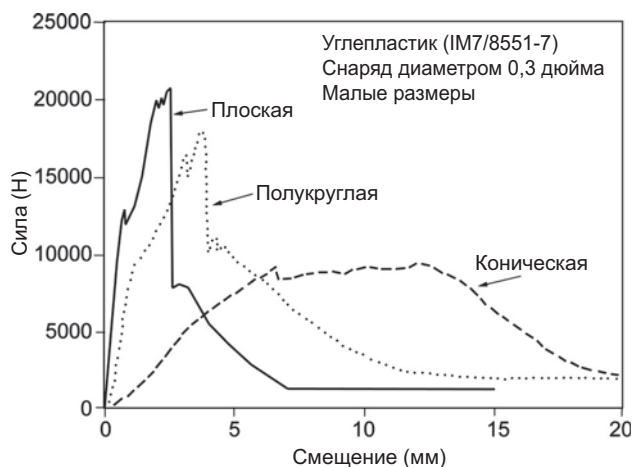


Рис. 3.20. Зависимость силы от смещения при различной форме снаряда. Статические испытания (Delfosse and Poursartip, 1995)

1974; Zhu *et al.*, 1992a; Zhu *et al.*, 1992b), описывающие поведение многослойных углепластиков при ударе (Pierson *et al.*, 1993). В последней работе использовались плоские и конические снаряды, причем вследствие сильного различия поведения в этих случаях пришлось применять различные подходы. Поведение панели определяется формой снаряда, а прочность лимитируется либо ее прочностью при сдвиге, либо прочностью при сжатии в плоскости панели.

Обычно снаряд с тупым наконечником сначала создает первичную выбоину, а затем происходит пластичное срезание материала и образование пробки. Такое поведение может наблюдаться и в случае конических снарядов с достаточно большим углом конуса (120°) (Zhu *et al.*, 1992a). По сравнению с коническими и полукруглыми наконечниками того же диаметра, плоский наконечник позволяет снаряду развить наибольшую силу перед перфорированием материала (Delfosse and Poursartip, 1995).

Действие снаряда с плоским наконечником напоминает сдвиговое вырубание отверстия в металлах (Awerbuch and Bodner, 1974), иллюстрируемое рис. 3.21г

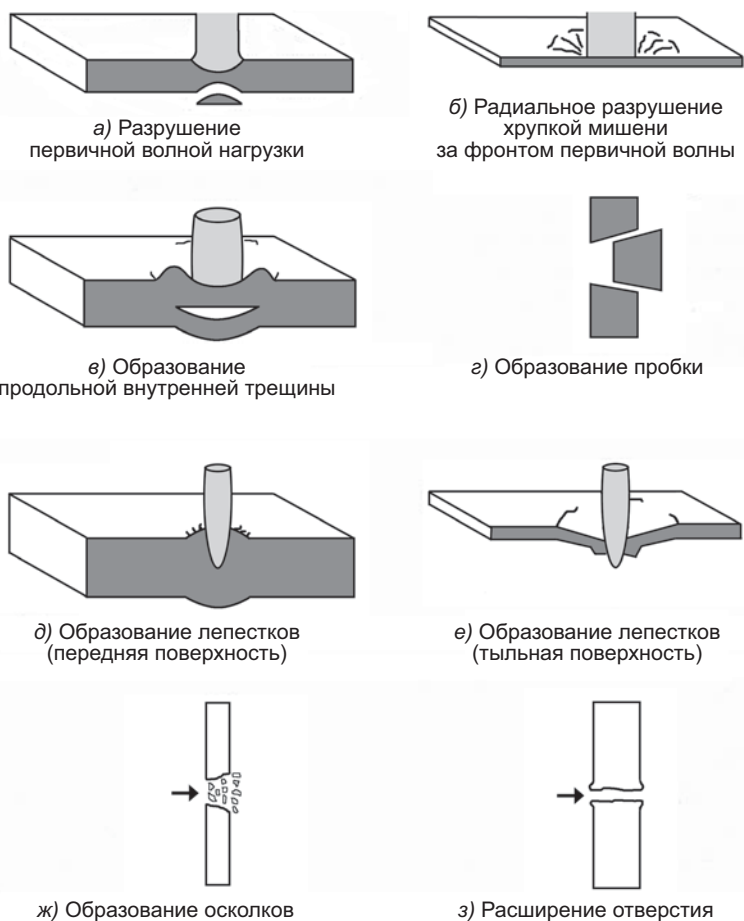


Рис. 3.21. Типичные механизмы пробивания отверстий в металлах (Corbett *et al.*, 1996)

(Corbett *et al.*, 1996). Однако Pierson (1994) и Pierson и Vaziri (1996) отметили, что в композитах срезание происходит вследствие разрушения, а не пластического сдвига, как в металлах, и поэтому использовать аналогию с металлами нужно очень осторожно.

Интересно, что локальные повреждения при квазистатическом вдавливании стержня в композитах (Lee and Sun, 1993b) очень похожи на повреждения, наблюдавшиеся при динамическом ударе снаряда с тупым наконечником (Sun and Potti, 1993; Lee and Sun, 1993a; Jenq *et al.*, 1994). В обоих случаях повреждение начинается с растрескивания матрицы, а заканчивается образованием пробки, сдвигаемой снарядом. Начиная с этого момента необходимо преодолевать силу трения между индентором и пластиной. Эти выводы относятся к панелям толщиной от 2 до 8,1 мм.

Delfosse и Poursartip (1995) продемонстрировали, что геометрия конического снаряда оказывает существенное влияние на характер соударения. Снаряды с коническим наконечником встречали наименьшее сопротивление материалов с малой жесткостью в плоскости панели, таких как Kevlar® и Spectra®. Наконечник снаряда прорезает такой материал по механизму, аналогичному расширению отверстия в металлах (Corbett *et al.*, 1996; Taylor, 1948; Greaves, 1992; Howlett and Greaves, 1995). Однако в более жестких многослойных материалах, армированных углеродными и стеклянными волокнами, конический ударник при движении должен расталкивать в стороны жесткие слои материала, и поэтому он испытывает значительно большее сопротивление. Определенная составляющая перпендикулярных сил сжатия существует вплоть до полного выхода ударника из панели. Начиная с некоторого момента, сила трения при движении снаряда через полностью раскрытое отверстие становится постоянной. Pierson (1994) моделирует баллистическое соударение, разделяя глобальную и локальную реакции мишени. Аналогичный подход использовали Sjoblom *et al.* (1988).

Снаряды полукруглой формы обычно действуют аналогично снарядам плоской формы, но встречают несколько меньшую силу сопротивления вследствие более ранней инициации разрушения.

Твердость снаряда

Пластическое деформирование снаряда представляет собой локальный механизм диссипации энергии. Это явление наблюдается, если прочность снаряда низка. Оно сопровождается «расплющиванием снаряда» и, как сообщают Jacobs и Van Dingenen (2001), оно позволяет диссипировать до 25% общей энергии удара.

Хотя неопровержимые доказательства тому отсутствуют, представляется, что соотношение относительной твердости мишени и ударника играет более важную роль, чем их абсолютная твердость. Если материал снаряда или панели чувствителен к скорости деформирования, может наблюдаться также и зависимость от скорости удара. Кроме того, если панель достаточно жестка и способна вызвать течение и затупление снаряда, площадь фронта взаимодействия будет увеличиваться по мере соударения, а свойства снаряда при этом будут постепенно изменяться.



Рис. 3.22. Классификация типов соударения при различных скоростях движения снарядов (Ollson, 2001)

Масса снаряда

В мишенях из тканых материалов относительная масса снаряда влияет на механизм диссипации энергии. Низкоскоростные снаряды малой массы останавливаются очень легко. При высоких скоростях удара механизм соударения становится локальным (баллистическим). Повышение массы снаряда приводит к инициации глобальных механизмов диссипации и при высоких скоростях удара (Shahkarami *et al.*, 2002).

Для жестких композитов отношение масс снаряда и панели оказывает решающее значение на поведение панели (Ollson, 2000). Олссон развил классификацию поведения материала при ударе, предложенную Cantwell и Morton (1989) (рис. 3.22). Характер поведения определяется формами волн, образующихся при ударе и зависящих от массы снаряда. По Олссону, при очень малой массе снаряда доминируют волны, распространяющиеся вдоль толщины пластины, а продолжительность ударного воздействия очень мала (рис. 3.22а). При умеренной массе снаряда доминируют сдвиговые и изгибные волны, причем напряжение, прогиб и изгибающая деформация имеют различную фазу (рис. 3.22б). Если масса снаряда намного больше массы мишени, то фазы волн напряжения, прогиба и деформации обычно соответствуют друг другу (рис. 3.22в). Отметим, что Олссон, по сравнению с Кантвеллом и Мортеном, провел дальнейшее различие между поведением малых и больших масс ударника.

3.5. Литература

- Abrate, S. (1991) «Impact on laminated composite materials», *Applied Mechanics Reviews*, 44(4), 155–189.
- Abrate, S. (1994) «Impact on laminated composites: Recent Advances», *Applied Mechanics Reviews*, 47(11), 517–544.
- Abrate, S. (1998) «The dynamics of impact on composite structures», *Key Engineering Materials*, 141–143(2), 671–693.
- Abrate, S. (2001) «Modeling of impacts on composite structures», *Composite Structures*, 51(2), 129–138.
- Awerbuch, J. and S. R. Bodner (1974) «Analysis of the mechanics of perforation of projectiles in metallic plates», *International Journal of Solids and Structures*, 10, 671–684.
- Bazhenov, S. (1997) «Dissipation of energy by bulletproof aramid fabrics», *Journal of Materials Science*, 32, 4167–4173.

- Briscoe, B. J. and F. Motamedi (1992) «The ballistic impact characteristics of Aramid fabrics: the influence of interface friction», *Wear (Switzerland)*, 158 (1–2), 229–247.
- Bucinell, R. B., R. J. Nuismer and J. L. Koury (1991) «Response of composite plates to quasi-static impact events», *Composite Materials: Fatigue and Fracture*, 3, 528–549.
- Cantwell, W. J. and J. Morton (1988) «The influence of target geometry on the high velocity impact response of CFRP», *Composite Structures*, 10, 247–265. Cantwell, W. J. and J. Morton (1989) «Comparison of the low and high velocity impact response of CFRP», *Composites*, 20(6), 545–551.
- Cantwell, W. J. and J. Morton (1990) «Impact perforation of carbon fibre reinforced plastic», *Composites Science and Technology*, 38(2), 119–141.
- Cantwell, W. J. and J. Morton (1991) «The impact resistance of composite materials – A review», *Composites*, 22(5), 347–362.
- Carr, D. J. (1999) «Failure mechanisms of yarns subjected to ballistic impact», *Journal of Material Science Letters*, 18, 585–588.
- Cepus, E. (2003) «An experimental investigation of the early dynamic impact behaviour of textile armour systems: Decoupling material from system response», PhD Thesis, The University of British Columbia.
- Cepus, E., A. Shahkarami, R. Vaziri and A. Poursartip (1999) «Effect of boundary conditions -on the ballistic response of textile structures», *Proceedings of International Conference on Composite Materials (ICCM 12)*.
- Chen, H. P. and B. Z. Jang (1995) «Failure mechanisms of 2-D and 3-D woven fiber reinforced polymer composites», *Polymer Composites*, 16(2), 125–134.
- Cheng, M., W. Chen and T. Weerasooriya (2004) «Experimental investigation of the transverse mechanical properties of a single Kevlar KM2 fiber», *International Journal of Solids and Structures*, 41, 6215–6232.
- Choi, H. Y. and F. K. Chang (1992) «A model for predicting damage in graphite/epoxy laminated composites resulting from low-velocity point impact», *Journal of Composite Materials*, 26(14), 2134–2169.
- Choi, H. Y., R. J. Downs and F. K. Chang (1991a) «A new approach toward understanding damage mechanisms and mechanics of laminated composites due to low-velocity impact. Part I. Experiments», *Journal of Composite Materials*, 25(8), 992–1011.
- Choi, H. Y., H.-Y. T. Wu and F. K. Chang (1991b) «A new approach toward understanding damage mechanisms and mechanics of laminated composites due to low-velocity impact. Part II. Analysis», *Journal of Composite Materials (USA)*, 25(8), 1012–1038.
- Corbett, G. G., S. R. Reid and W. Johnson (1996) «Impact loading of plates and shells by free-flying projectiles: A review», *International Journal of Impact Engineering (UK)*, 18(2), 141–230.
- Cristescu, N., L. E. Malvern and R. L. Sierakowski (1975) «Failure mechanisms in composite plates impacted by blunt-ended penetrators», *Foreign Object Impact Damage to Composites*, 159–172.
- Cunniff, P. M. (1992) «An analysis of the system effects in woven fabrics under ballistic impact», *Textile Research Journal*, 62(9), 495–509.
- Cunniff, P. M. (1999) «Decoupled response of textile body armor», *Proceedings of 18th International Symposium on Ballistics*, 814–821.
- Delfosse, D. and A. Poursartip (1995) «Experimental parameter study of static and dynamic out-of-plane loading of CFRP laminates», *Proceedings of Tenth International Conference on Composite Materials (ICCM 10)*, 583–590.
- Delfosse, D. and A. Poursartip (1997) «Energy-based approach to impact damage in CFRP laminates», *Composites*, 28A, 647–655.

- Delfosse, D., R. Vaziri, M. O. Pierson and A. Poursartip (1993) «Analysis of the non-penetrating impact behaviour of CFRP laminates», *Proceedings of the 9th International Conference on Composite Materials*, 366–373.
- Duan, Y., M. Keefe, T. A. Bogetti and B. A. Cheeseman (2005a) «Modeling friction effects on the ballistic impact behavior of a single-ply high-strength fabric», *International Journal of Impact Engineering*, 31(8), 996–1012.
- Duan, Y., M. Keefe, T. A. Bogetti and B. A. Cheeseman (2005b) «Modeling the role of friction during ballistic impact of a high-strength plain-weave fabric», *Composite Structures*, 68(3), 331–337.
- Fenstermaker, C. A. and J. C. Smith (1965) «Stress-strain properties of textile yarns subjected to rifle bullet impact», *Applied Polymer Symposia*, (1), 125–146.
- Figucia, F., L. Weiner and R. Laible (1971) «The mechanical properties of textile materials as influenced by complexity and rate of testing», *Polymer Engineering and Science*, 11(4), 289–294.
- Goldsmith, W., C. K. H. Dharan and H. Chang (1995) «Quasi-static and ballistic perforation of carbon fiber laminates», *International Journal of Solids and Structures*, 32(1), 89–103.
- Greaves, L. J. (1992) «Failure mechanisms in glass fibre reinforced plastic armour», Chertsey Memorandum 92003.
- Gutowski, T. G. (1985) «A resin flow/fiber deformation model for composites», *SAMPE Quarterly*, 16(4), 58–64.
- Harding, J. and L. M. Welsh (1983) «A tensile testing technique for fiber-reinforced composites at impact rates of strain», *Journal of Materials Science*, 18, 1810–1826.
- Hill, R. (1950) *The Mathematical Theory of Plasticity*, Clarendon Press.
- Hoskin, B. C. and A. A. Baker (1986) *Composite Materials for Aircraft Structures*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Institute of the Aerospace Sciences, American Rocket Society.
- Howlett, S. and L. Greaves (1995) «The penetration behaviour of glass fibre reinforced plastic materials», *Proceedings of The 10th international conference on composite materials*, 727–734.
- Jackson, W. C. and M. A. Portanova (1996) «Impact damage resistance of textile composites», *Proceedings of 28th International SAMPE technical conference*, 339–350.
- Jacobs, M. J. N. and J. L. J. Van Dingenen (2001) «Ballistic protection mechanisms in personal armour», *Journal of Materials Science*, 36, 3137–3142.
- Jenq, S. T., H. S. Jing and C. Chung (1994) «Predicting the ballistic limit for plain woven glass/epoxy composite laminate» *International Journal of Impact Engineering*, 15(4), 451–464.
- Jih, C. J. and C. T. Sun (1993) «Prediction of delamination in composite laminates subjected to low velocity impact», *Journal of Composite Materials*, 27(7), 684–701.
- Johnson, W., N. R. Chitkara, A. H. Ibrahim and A. K. Dasgupta (1973) «Hole flanging and punching of circular plates with conically headed cylindrical punches», *Journal of Strain Analysis*, 8(3), 228–241.
- Kessler, A. and A. K. Bledzki (1999) «Low velocity Impact behavior of glass/epoxy cross-ply laminates with different fiber treatments», *Polymer Composites*, 20(2), 269–278.
- Kim, J. K. and M. L. Sham (2000) «Impact and delamination failure of woven-fabric composites», *Composites Science and Technology*, 60(5), 745–761.
- Kirkwood, J. E., K. M. Kirkwood, Y. S. Lee, R. G. Egres, N. J. Wagner, and E. D. Wetzel (2005) «Yarn pull-out as a mechanism for dissipating ballistic impact energy in Kevlar KM-2 fabric. Part II: Predicting ballistic performance», *Textile Research Journal*, 74(11), 939–948.



- Kirkwood, K. M., J. E. Kirkwood, Y. S. Lee, R. G. Egres, N. J. Wagner, and E. D. Wetzel (2004) «Yarn pull-out as a mechanism for dissipating ballistic impact energy in Kevlar KM-2 fabric. Part I: Quasi-static characterization of yarn pull-out», *Textile Research Journal*, 74(10), 920–928.
- Landkof, B. and W. Goldsmith (1985) «Petalling of thin, metallic plates during penetration by cylindro-conical projectiles», *International Journal of Solids and Structures*, 21(3), 245–266.
- Lee, L., S. Rudov-Clark, A. P. Mouritz, M. K. Bannister and I. Herszberg (2002) «Effect of weaving damage on the tensile properties of three-dimensional woven composites», *Composite Structures*, 57, 405–413.
- Lee, S. R. and C. T. Sun (1993a) «Dynamic penetration of graphite/epoxy laminates impacted by a blunt-ended projectile», *Compos. Sci. Technol.*, 49, 369–380.
- Lee, S. R. and C. T. Sun (1993b) «A Quasi-Static Penetration Model for Composite Laminates», *Journal of Composite Materials*, 27(3), 251–271.
- Lim, C. T., V. B. C. Tan and C. H. Cheong (2002) «Perforation of high-strength double-ply fabric system by varying shaped projectiles», *International Journal of Impact Engineering*, 27, 577–591.
- Liu, D., B. B. Raju and X. Dang (1998) «Size effects on impact response of composite laminates», *International Journal of Impact Engineering*, 21(10), 837–854.
- Malvern, L., Sun, C. T. and Liu, D. (1989) «Delamination damage in central impacts at subperforation speeds on laminated Kevlar/Epoxy plates», ASTM STP 1012.
- Martinez, M. A., C. Navarro, R. Cortes, J. Rodrigues and V. Sanchez-Galvez (1993) «Friction and wear behaviour of Kevlar fabrics», *Journal of Materials Science*, 28(5), 1305–1311.
- Montgomery, T. G., P. L. Grady and C. Tomasino (1982) «The effects of projectile geometry on the performance of ballistic fabrics», *Textile Research Journal*, 52(7), 442–450.
- Morton, J. (1988) «Scaling of Impact-Loaded Carbon-Fiber Composites», *AIAA Journal*, 26(8), 989–994.
- Mouritz, A. P. (2001) «Ballistic impact and explosive blast resistance of stitched Composites», *Composites Part B:Engineering*, 32(5), 431–439.
- Olsson, R. (2000) «Mass criterion for wave controlled impact response of composite plates», *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 31(8), 879–887.
- Olsson, R. (2001) «Analytical prediction of large mass impact damage in composite laminates», *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 32(9), 1207–1215.
- Pierson, M. O. (1994) «Modelling the Impact Behaviour of Fiber Reinforced Composite Materials», M.A.Sc. Thesis, Department of Metals and Materials Engineering, The University of British Columbia.
- Pierson, M. O. and R. Vaziri (1996) «Analytical Solution for Low-Velocity Impact Responses of Composite Plates», *AIAA Journal*, 34(8), 1633–1640.
- Pierson, M. O., D. Delfosse, R. Vaziri and A. Poursartip (1993) «Penetration of laminated composite plates due to impact», *Proceedings of Ballistics*, 93.
- Potti, S. V. and C. T. Sun (1996) «Prediction of impacted induced penetration and delamination in thick composite laminates», *International Journal of Impact Engineering*, 19(1), 31–48.
- Prosser, R. A. (1988) «Penetration of Nylon ballistic panels by fragment-simulating-projectiles – Part I: A linear approximation to the relationship between the square of the V50 or Vc striking velocity and the number of layers of cloth in the ballistic panel», *Textile Research Journal*, 61–85.
- Quan, X. (1998) «Efficient impact modelling of composite structures», PhD Thesis, Department of Civil Engineering, The University of British Columbia.

- Rao, Y. and R. Farris (2000) «A Modeling and Experimental Study of the Influence of Twist on the Mechanical Properties of High-Performance Fiber Yarns», *Journal of Applied Polymer Science*, 77, 1938–1949.
- Razi, H. and A. S. Kobayashi (1993) «Delamination in cross-ply laminated composite subjected to low-velocity impact», *AIAA Journal*, 31(8), 1498–1502.
- Rebouillat, S. (1998) «Tribological properties of woven para-aramid fabrics and their constituent yarns», *Journal of Material Science*, 33, 3293–3301.
- Ringleb, F. O. (1957) «Motion and stress of an elastic cable due to impact», *Journal of Applied Mechanics*, 24, 417–425.
- Roylance, D., P. Hammas, J. Ting, H. Chi and B. Scott (1995) «Numerical modeling of fabric impact», *Proceedings of High Strain Rate Effects on Polymer, Metal and Ceramic Matrix Composites and Other Advanced Materials*, 155–160.
- Rudov-Clark, S., A. P. Mouritz, L. Lee and M. K. Bannister (2003) «Fibre damage in the manufacture of advanced three-dimensional woven composites», *Composites: Part A*, 34, 963–970.
- Sanders, T. A. (1997) «Penetration of composite laminates by conical indenters and projectiles», MSc Thesis, University of British Columbia.
- Scott, B. (1999) «The penetration of the compliant laminates by compact projectiles», *Proceedings of 18th International Symposium on Ballistics*, 1184–1191.
- Shahkarami, A., R. Vaziri, A. Poursartip and K. Williams (2002) «A Numerical Investigation of the Effect of Projectile Mass on the Energy Absorption of Fabric Panels Subjected to Ballistic Impact», *Proceedings of 20th International Symposium on Ballistics*.
- Shim, V. P. W., V. B. C. Tan and T. E. Tay (1995) «Modelling deformation and damage characteristics of woven fabric under small projectile impact», *International Journal of Impact Engineering*, 16(4), 585–605.
- Shim, V. P. W., C. T. Lim and K. J. Foo (2001) «Dynamic mechanical properties of fabric armour», *International Journal of Impact Engineering*, 25, 1–15.
- Shockey, D. A., D. C. Erlich and J. W. Simons (2000) «Improved barriers to turbine engine fragments», US Department of Transportation SRI International, Menlo Park, California.
- Sjoblom, P. O., J. T. Hartness and T. M. Cordell (1988) «On low-velocity impact testing of composite materials», *Journal of Composite Materials*, 22(1), 30–52.
- Smith, J. C., J. M. Blandford and H. F. Schiefer (1960) «Stress-strain relationship in yarns subjected to rapid impact loading, Part VI: Velocities of strain waves resulting from impact», *Textile Research Journal*, 30, 752–760.
- Sun, C. T. and S. V. Potti (1993) «High velocity impact and penetration of composite laminates», *Proceedings of ICCM 9. Composites Behaviour. Vol. V*.
- Sutherland, L. S. and C. Guedes Scares (2004) «Effect of laminate thickness and of matrix resin on the impact of low fibre-volume, woven roving E-glass composites», *Composites Science and Technology*, 64 (10–11), 1691–1700.
- Tan, V. B. C. and K. J. L. Khoo (2005) «Perforation of flexible laminates by projectiles of different geometry», *International Journal of Impact Engineering*, 31, 793–810.
- Tan, V. B. C., C. T. Lim and C. H. Cheong (2003) «Perforation of high-strength fabric by projectiles of different geometry», *International Journal of Impact Engineering*, 28, 207–222.
- Taylor, G. I. (1948) «The formation and enlargement of a circular hole in a thin plastic sheet», *Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, 1, 103–124.
- Termonia, Y. and P. Smith (1988) «A theoretical approach to the calculation of the maximum tensile strength of polymer fibers», *High Modulus Polymers*, 321–362.

- Thomson, W. T. (1955) «An approximate theory of armor penetration», *Journal of Applied Physics*, 26(1), 80–82.
- Ursenbach, D. O. (1995) «Penetration of CFRP laminates by cylindrical indenters», MASC Thesis, The University of British Columbia.
- Ursenbach, D. O., R. Vaziri and D. Delfosse (1995) «An engineering model for deformation of CFRP plates during penetration», *Composite Structures*, 32 (1–4), 197–202.
- Van Wyk, C. M. (1946) «Notes on the compressibility of wool», *Journal of the Textile Institute*, 37, T285–T292.
- Wang, Y. and Y. M. Xia (1998) «The effects of strain rate on the mechanical behaviour of Kevlar fibre bundles: an experimental and theoretical study», *Composites: Part A*, 29A, 1411–1415.
- Whitney, J. M. and N. J. Pagano (1970) «Shear deformation in heterogeneous anisotropic plates», *Journal of Applied Mechanics*, 1031–1036.
- Wilde, A., D. Roy lance and J. M. Rogers (1973) «Photographic investigation of high-speed missile impact upon nylon fabric, Part I: Energy absorption and cone radial velocity in fabric», *Textile Research Journal*, (12), 753–761.
- Woodward, R. L. (1978) «The penetration of metal targets by conical projectiles», *International Journal of Mechanical Sciences*, 20 (6), 349–359.
- Woodward, R. L. (1984) «The interrelation of failure modes observed in the penetration of metallic targets», *International Journal of Impact Engineering*, 2(2), 121–129.
- Wu, E. and L. C. Chang (1995) «Woven glass/epoxy laminates subject to projectile impact», *International Journal of Impact Engineering*, 16(4), 607–619.
- Wu, H. T. and G. S. Springer (1988) «Impact induced stresses, strains, and delaminations in composite plates», *Journal of Composite Materials*, 22, 533–559.
- Zaid, M. and B. Paul (1958) «Mechanics of high speed projectile perforation», *Journal of Franklin Institute*, 264, 117–126.
- Zhu, G., W. Goldsmith and C. K. H. Dharan (1992a) «Penetration of laminated Kevlar by projectiles – I. Experimental investigation», *International Journal of Solids and Structures*, 29(4), 399–420.
- Zhu, G., W. Goldsmith and C. K. H. Dharan (1992b) «Penetration of laminated Kevlar by projectiles – II. Analytical model», *International Journal of Solids and Structures*, 29(4), 421–436.
- Рахматуллин Х.А. (1945) *Прикладная математика и механика*, 9 (1), 19.
- Рахматуллин Х.А. (1952) *Прикладная математика и механика*, 16 (1), 24.
- Баженов С.Л., Духовский И.А., Ковалев П.И., Рожков А.Н. (2001). *Высокомолекулярные соединения. А*, 43 (1), 73–83.
- Баженов С.Л. (2006). *Высокомолекулярные соединения. Б*, 48 (10), 73, 1916–1920.

ГЛАВА 4

МОДЕЛИРОВАНИЕ БАЛЛИСТИЧЕСКОГО УДАРА

А.М.С. Хамуда, М.С. Руби, Universiti Putra, Malaysia

4.1. Введение

Моделирование процесса удара вызывает большой интерес у специалистов в областях военной и космической техники. В связи с постоянным развитием оружия поведение брони при ударе широко исследовалось экспериментально, аналитически и численными методами. Тем не менее, эта проблема полностью не решена до сих пор. Экспериментальное исследование баллистического удара имеет критическое значение для выявления основных факторов, определяющих пробивание брони. Сложность проблемы баллистического соударения определяется большим количеством параметров, от которых зависит ее решение. Например, скорости и формы ударника, относительной твердости и массы соударяющихся тел, положения точки удара, размеров мишени, граничных условий, характеристик материалов и т.д. Эти сложности возрастают еще более в случае композиционных материалов вследствие их анизотропии и множества возможных механизмов разрушения. Вследствие этого проектирование брони из композиционных материалов требует огромного количества весьма трудоемких экспериментов [1, 2].

В настоящее время разработаны методы оценки характера взаимодействия ударника и брони, включающие экспериментальные, численные и аналитические методы. Последние достижения в изучении механизмов разрушения и механического поведения слоистых композитов [3–6] и развитие моделей анизотропных материалов [7–9] позволяют значительно сократить объем экспериментов за счет использования расчетных методов моделирования процесса баллистического соударения. С развитием компьютерной техники численные расчеты стали эффективными, позволив уменьшить количество экспериментов. Однако результаты численных расчетов требуют экспериментальной проверки, а использовать их нужно весьма осторожно.

Экспериментальные методы направлены на выявление основных параметров, определяющих взаимодействие ударника и брони, например, свойства материалов, их форма и скорость удара. В уравнения вводят и некоторые другие экспериментально измеряемые параметры, например, глубину проникновения, баллистический предел скорости удара V_{50} и т.д. [10–14]. Аналитические методы позволяют определить глубину проникновения исходя из уравнений состояния непрерывной среды. Правильное понимание механизма соударения необходимо для выбора наиболее адекватных характеристик материала. Импирические парамет-



ры вводят в уравнения, описывающие взаимодействие тел при соударении. Главное достоинство полуэмпирического подхода состоит в уменьшении времени вычислений, правда, за счет некоторой потери точности. Аналитические подходы обсуждаются в работах [15–19].

Численные расчеты используют метод конечных элементов и метод конечных разностей. Так как уравнения, определяющие взаимодействие тел, являются нелинейными, то лишь численные методы позволяют точно моделировать процесс пробивания. Главное преимущество этого подхода состоит в наиболее полном вводе информации, что позволяет лучше понять процесс соударения и улучшить проектирование брони. Точность таких методов зависит от адекватности уравнений, описывающих поведение материалов. Их недостатком является большее время вычислений [20]. Такие программы представляют собой большие компьютерные программы, моделирующие высокоскоростный удар. Они используют некоторую модель материала и аппроксимируют поведение непрерывной среды методами конечных разностей или конечных элементов.

Основной целью этой главы является обсуждение вычислительных методов описания баллистического удара. В первой части главы дан обзор существующих численных методов, а во второй демонстрируются новые методы. Также дан прогноз дальнейшего развития этих методов.

4.2. Особенности вычислительных методов

Уравнения, описывающие соударение твердых тел, являются нелинейными и не решаются аналитически. Поэтому их решают численными методами. Общая схема методов показана на рис. 4.1. Они имеют три основы, позволяющие определить силы, действующие на элементы сетки: 1) ньютоновские законы движения; 2) уравнение состояния; 3) учредительную модель [21]. Поведение потока несжимаемой и невязкой жидкости может быть описано ньютоновскими законами движения совместно с набором дифференциальных уравнений, выведенных из законов сохранения импульса, массы и энергии.

Закон сохранения импульса:

$$\frac{Dv_i}{Dt} = f_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_{ji}}{\partial x_j}. \quad (4.1)$$

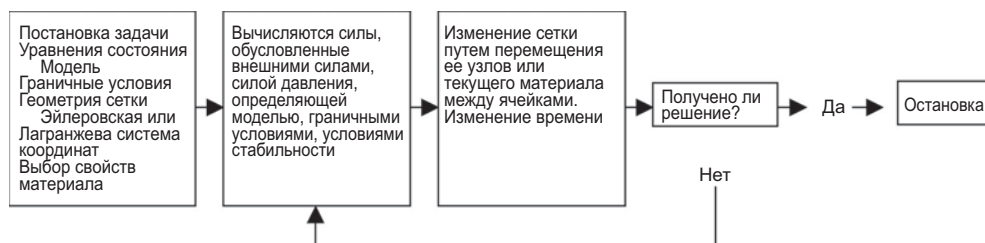


Рис. 4.1. Общая схема расчетов

Сохранение массы:

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0. \quad (4.2)$$

Сохранение энергии:

$$\frac{DI}{Dt} = -\frac{p}{\rho} \frac{\partial v_i}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \Pi_{ij} \dot{\epsilon}'_{ij}, \quad (4.3)$$

где ρ – плотность, v_i – скорость, I – удельная внутренняя энергия, σ_{ij} – тензор напряжений, состоящий из гидростатической части (давления p) и девиаторной части Π_{ij} , f_{ij} – внешние силы, действующие на единицу массы, и $\dot{\epsilon}'_{ij}$ – скорость девиаторных деформаций. Индексы соответствуют стандартной форме записи тензоров, и повторяющиеся индексы подразумевают суммирование. Уравнение состояния связывает давление с плотностью и внутренней энергией. Оно учитывает сжимаемость материала, т.е. изменение его плотности, и необратимые термодинамические процессы типа нагревания при ударе.

Уравнение состояния:

$$p = p(\rho, I). \quad (4.4)$$

Модель связывает напряжение с компонентами деформации ρ , компонентами скорости деформации $\dot{\epsilon}'_{ij}$, внутренней энергией I и накоплением повреждений D . Она учитывается последствия деформирования, состоящие в изменении формы или прочности.

Определяющая модель:

$$\sigma_{ij} = g(\epsilon_{ij}, \dot{\epsilon}'_{ij}, I, D). \quad (4.5)$$

Аналитическое решения уравнений 4.1–4.5 удается получить только в исключительных случаях, когда их удается упростить, сократив количество независимых переменных. В случаях, представляющих практический интерес, количество переменных велико, а уравнения нужно решать совместно. В этом случае вычислительные методы являются единственным способом решения задачи. Все программы используют некоторую форму уравнений сохранения, однако их точность зависит от адекватности уравнения состояния и модели.

4.2.1. Пространственная сетка

При компьютерных расчетах непрерывную физическую систему заменяют структурой, состоящей из дискретных элементов. Континуум заменяют вычислительной сеткой. Существует три метода построения дискретных дифференциальных уравнений: метод конечных элементов, метод конечных разниц и метод SPH. Эти методы предлагают различные алгоритмы решения одной проблемы, и каждый из них имеет свои преимущества и недостатки.



Метод конечных разностей

В методе конечных разностей производные в дифференциальных уравнениях заменяют разностью значений искомых переменных в соседних узлах. Например, частная производная $\partial F/\partial x$ функции F заменяется на $\Delta F/\Delta x$, а значения функции вычисляют в узлах сетки. Первая производная F в точке x_n может быть представлена различными формулами:

$$\begin{aligned}\left. \frac{\partial F}{\partial x} \right|_{x_n} &= \frac{F_{n+1} - F_n}{\Delta x} \\ \left. \frac{\partial F}{\partial x} \right|_{x_n} &= \frac{F_n - F_{n-1}}{\Delta x} \\ \left. \frac{\partial F}{\partial x} \right|_{x_n} &= \frac{F_{n+1} - F_{n-1}}{2\Delta x},\end{aligned}\tag{4.6}$$

что соответствует аппроксимации по следующему, предыдущему и центральному элементу соответственно. Метод конечных разностей хорошо обоснован и прост в осуществлении. Однако он требует, чтобы сетка была структурирована (ячейки были организованы по рядам и колонкам).

Следовательно, для решения задачи при сложной геометрической форме ударника и мишени требуются методы адаптивного определения узлов сетки. Кроме того, эта схема склонна к появлению численной неустойчивости, и отсутствует прямой способ проверки точности решения. Точность решения увеличивается при уменьшении пространственного размера ячейки, однако при этом приходится уменьшать шаг интегрирования по времени, что ведет к возрастанию длительности расчетов [22–25].

Метод конечных элементов

Метод конечных элементов первоначально был разработан для решения задач механического поведения конструкций, однако довольно скоро стало понятно, что он применим для решения и других задач [26–29]. Если в методе конечных разностей определяются точки, в которых вычисляются производные, в методе конечных элементов пространство делится на элементы. Элементы могут быть прямолинейными или изогнутыми и, в отличие от метода конечных разностей, не нуждаются в устройстве структурированной сетки. Следовательно, задачи со сложной геометрической конфигурацией лучше решать методом конечных элементов.

Чтобы представить изменение переменной внутри элемента, используют интерполяционные функции. Каждый элемент имеет набор узлов с известными начальными координатами. Смещение этих узлов неизвестно и определяется в результате решения проблемы. Уравнения, определяющие смещения узлов, рассматривают путем последовательного определения изменения формы всех элементов, а затем их объединяют и решают совместно. Следствием это является возможность параллельного проведения вычислений, что позволяет уменьшить

время вычислений. Система уравнений, связывающих силы и смещения каждого узла, решается путем обращения матрицы жесткости, связывающей напряжения и деформации. Одно из преимуществ этого метода состоит в том, что после получения смещений они могут быть подставлены в исходные уравнения для контроля сходимости полученного решения. Величина расхождения является оценкой погрешности решения, которое в дальнейшем может быть уточнено.

Метод SPH

Метод SPH («гидродинамики сглаженных частиц») был разработан для решения задач астрофизики, включающих массоперенос жидкости, произвольно перемещающейся в трех измерениях в отсутствии границ [30]. Примером является численное моделирование задачи деления быстро вращающейся звезды. Метод SPH использует движение набора точек. В любой момент времени в этих точках известны скорости и тепловая энергия. Каждой точке приписывается некоторая масса, и по этой причине точки называют частицами. Чтобы за один шаг времени частицы перемещались правильно, необходимо определить силы, которые действуют на элемент жидкости. Эти силы определяют при помощи сложных интерполяционных методов, определяющих свойства типа плотности в данной точке. Из-за простоты алгоритма метод SPH является привлекательной альтернативой более хорошо разработанным методам конечных элементов и конечных разностей. Большинство пользователей предпочитает писать свои собственные SPH программы. Как правило, в этом методе используют Лагранжевы координаты, преимуществом которых является устойчивая работа программы и в случае больших смещений, поскольку частицы не связаны.

Хотя в настоящее время этот метод моден и продолжает развиваться, он имеет несколько недостатков. Сейчас отсутствуют убедительные методы описания материалов со сложным реологическим поведением, например, их прочности, упругости и т.д. Кроме того, по своей природе метод SPH не позволяет хорошо использовать некоторые типы граничных условий, что ограничивает его потенциал. Наконец, в задачах типа ударного воздействия, когда сильно изменяется плотность (от очень плотной брони до низкоплотного пара), недостатком SPH является то, что области с низкой плотностью описываются слишком малым количеством частиц, что снижает точность решения. Метод SPH хорош для анализа течения жидкостей, в которых плотность изменяется относительно мало и используются граничные условия поступления или оттока жидкости. В частности, они хороши для решения задач гравитации типа формирования планет и звезд.

4.2.2. Методы интегрирования по времени

Интегрирование по времени является основным методом решения задач динамического поведения конструкций. В этой области было проведено множество исследований [31–34], а здесь они описываются лишь очень кратко. Существует два основных итеративных метода определения поведения системы по времени: неявная и явная схема решения систем уравнений, описывающих механическое поведение материалов.

Процедура решения уравнений движения в дискретных точках называется явной, если решение в момент времени $t + \Delta t$ в вычислительном цикле основано на знании состояния в момент времени t . Преимуществом явного метода является то, что нет необходимости вычислять матрицу жесткости системы и решение может быть выполнено на уровне элемента, что требует относительно небольшой памяти. Его недостаток состоит в том, что он является условно устойчивым по времени и временной шаг нужно выбирать очень осторожно. Временной шаг должен быть достаточно малым, чтобы точно соответствовать высокочастотным модам, определяющим поведение системы при распространении волн.

Многие методы конечных элементов используют явную схему интегрирования для решения сильно подвижных нелинейных проблем. Наиболее широко известной коммерческой программой является LS-DYNA, разработанная в Ливерморской Национальной лаборатории Лоуренса, и ее коммерческие модификации PAMCRASH, MSC/DYNA. Другой программой, использующей этот метод, является ABAQUS/EXPLICIT, которую разрабатывали независимо от программы DYNA.

В неявной схеме интегрирования решение в момент времени $t + \Delta t$ вычисляется из величины ускорения. Неявные методы безусловно устойчивы, однако это достигается ценой необходимости решения системы уравнений на каждом временном шаге. На неявной схеме основаны широко используемые программы ABAQUS, ADINA, ANSYS, NASTRAN, MARK и NIKE. Можно сказать, что неявный метод интегрирования более эффективен для решения статических задач, а явный метод лучше для решения задач высокоскоростных динамических воздействий.

4.2.3. Описание проблемы

Деформированные тела можно описывать в *лагранжевых* или *эйлеровых* координатах [26]. В лагранжевых координатах каждая точка деформированного тела относится к некоторому контрольному состоянию, и дискретная система узлов сетки или набора конечных элементов деформируется вместе с материалом. Хамуда и Хашми [20] систематизировали большинство коммерческих программ, использующих лагранжевы и эйлеровы координаты, как показано в табл. 4.1 и 4.2.

В эйлеровых координатах узлы сетки фиксированы в пространстве и вместе с материалом не движутся. Эти два описания можно сравнить, соответственно, с полицейским, движущимся в автомобиле, и полицейским, стоящим у светофора. В эйлеровых координатах отсутствует механизм отслеживания изменения свойств материала со временем, а лагранжева система следует за материальными частицами, что удобно для точного описания истории материала. Это облегчает описание поведения материала, свойства которого зависят от времени. В настоящее время наиболее сложные задачи решают в лагранжевой системе координат.

Чтобы сравнить два подхода, Predebon *et al.* [31] моделировали соударение цилиндра с мишенью в лагранжевой (программа NEMP) и в эйлеровой (CSQ) системах координат. Они обнаружили, что конечный диаметр модельного цилиндра при решении задачи в лагранжевой системе координат оказался на 2,8% выше, чем при использовании эйлеровой системы.

Таблица 4.1. Вычислительные программы, использующие лагранжеву систему координат

Программа	Год	Разработчики	Фирма
HEMP	1964	M. LWilkins	Lawrence Livermore Laboratories
HEMP-3D	1975	M. LWilkins	Lawrence Livermore Laboratories
HEMP-DS	1983	M. LWilkins	Lawrence Livermore Laboratories
C-HEMP	1987	L. Seanman <i>et al.</i>	SRI Int.
TOODY	1967	W. Herrmann	Sandia National Laboratories
HONDO	1974	S.W. Key	Sandia National Laboratories
EPIC-2	1976	G.R. Johnson	Honeywell Inc.
EPIC-3	1977	G.R. Johnson	Honeywell Inc.
EPIC-2 (Erosion/plugging)	1987	B.E. Ringers	BRL
EPIC-3 (Erosion)	1985	T. Belytschko	BRL
DYNA 2D/3D	1976	J.O. Hallquist	Lawrence Livermore Laboratories
DYNA-2D (Erosion)	1989	J.O. Hallquist	Livermore Software Technology Corp.
DEFEL	1984	W. Flis	DYNA East Corp.
PEPSI	1984	R. Hunklerand G. Paulus	ISL, France
PRONTO 2D	1987	L M. Taylor and D.P. Flanagan	Sandia National Laboratories
ZEUS	1987	J.A. Zukasand S.B. Segletes	Computational Mech. Conslt, Inc.

В принципе, соударение твердых тел лучше описывать в лагранжевой системе координат, так как поверхности тел всегда совпадают с координатами системы дискретных точек и поэтому хорошо определены. Недостатком этого подхода является то, что во многих задачах сетка может стать сильно сжатой и искаженной. Это приводит к уменьшению временного шага интегрирования и уменьшению точности. Эти проблемы в некоторой степени решаются путем изменения сетки. Используют и другой вычислительный метод, называемый туннельным подходом [20]. Программа может использовать любую систему координат для решения интересующей задачи, а выбор способа описания в конечном счете зависит от рассматриваемой задачи.

Объединенная эйлерово-лагранжева система координат

Объединенная эйлерово-лагранжева система координат была разработана с целью объединения их преимуществ. Преимущество этого подхода состоит в возможности использования любой из этих систем при одновременном расчете различных областей решаемой задачи. Такое описание полезно для задач, в которых происходит соударение двух материалов, один из которых менее прочен, чем другой. Малодеформируемая область может рассматриваться в лагранжевой системе, а области с большими деформациями можно рассматривать в эйлеровой системе координат. Недостатком этой методики являются потери, связанные с границей раздела эйлеровых и лагранжевых областей. Объединенная эйлерово-лагранжева система координат используется в коммерческой программе CEL [35].

Таблица 4.2. Вычислительные программы, использующие эйлерову систему координат

Программа	Год	Разработчики	Фирма
PIC	1957	M. Evans and F. Harlow	Los Alamos Laboratories
SHELL	1959	W. Johnson	General Atomic Corp.
SPEAR	1963	W. Johnson	General Atomic Corp.
OIL	1965	J. Walsh and W. Johnson	General Atomic Corp.
TOIL/TRIOIL	1967	W. Johnson	General Atomic Corp.
DROP	1971	W. Johnson	Systems, Science, and Software (S-Cubed)
DROF-9	1971	W. Johnson	S-Cubed
TRIDROF	1976	W. Johnson	Computer Codes Constultant (CCC)
SOIL	1977	W. Johnson	CCC
LASOIL	1987	W. Johnson	Los Alamos Laboratories
RPM	1968	J. Daienes <i>et al.</i>	General Atomic Corp.
HELP	1971	L. Hageman, J. Walsh	S-Cubed, BRL
HELP-75	1975	L. Hageman <i>et al.</i>	S-Cubed
METRIC	1976	L. Hageman <i>et al.</i>	S-Cubed
CHART-D	1969	S.L. Thompson	Sandia National Laboratories
CSQ	1975	S.L. Thompson	Sandia National Laboratories
CSQ-II	1979	S.L. Thompson	Sandia National Laboratories
CHT	1987	J. McGlaun <i>et al.</i>	Sandia National Laboratories
HULL	1971	R. Durrettand D. Matuska	Orland Technology (OTI)
HULL-78	1978	R. Durrettand, J. Osborn	OTI
EPHULL	1988	R. Bell	S-Cubed
MESA	1989	D. Mandell <i>et al.</i>	Los Alamos Laboratories

Произвольная лагранжево-эйлеровская система координат

Произвольная лагранжево-эйлеровская система координат (ALE) первоначально была разработана для анализа поведения жидкостей [36]. В этом подходе вычислительная сетка может перемещаться с произвольной скоростью, отличной и от скорости частицы (лагранжева система), и не равной нулю (эйлерова система координат). Трудность разработки алгоритмов, требующих непрерывного изменения узлов сетки, ограничила использование метода ALE. Другой недостаток состоит в том, что им очень трудно рассматривать границы раздела материалов и свободные поверхности [37].

4.2.4. Переопределение узлов сетки

Метод переопределения узлов сетки состоит в формировании новой сетки в процессе вычисления. Новая сетка может быть определена вручную или автоматически. Метод переопределения узлов сетки применяется гораздо шире, чем лагранжева система координат. Как правило, желательно иметь мелкую сетку в областях, где сильно изменяются напряжения. Переопределение узлов сетки явля-

ется непрямой задачей, требующей вычисления координат новых узлов путем интерполяции координат узлов исходной сетки без существенной потери точности вычислений.

4.2.5. Выбор сетки и граничные условия

Определение узлов сетки, введение характеристик материала и выбор граничных условий являются основными операциями при запуске программы. Некоторые программы разработаны для специфических форм соударяющихся тел или граничных условий, что подчеркивает важность выбора программы для решения специфической задачи. Существуют 1D, 2D и 3D-программы. В связи с сильной зависимостью требуемой памяти машины от количества узлов сетки 3D-программы начали применять лишь в последнее время. Часто для уменьшения пространственных степеней свободы используют упрощающие предположения.

Граничные условия также зависят от типа программы. Обычно граничные условия делятся на следующие типы:

- *Свободная поверхность.* Это самый простой тип граничных условий, не ограничивающий движение узлов сетки.
- *Свободное скольжение.* В случае симметричных граничных условий или свободно скользящей границы скорости границы в перпендикулярном направлении должны оставаться нулевыми. Если граница параллельна осям системы координат, это условие сводится к равенству нулю одной из компонент скорости. Если граница наклонная или изогнутая, нужно учитывать обе компоненты скорости.
- *Отсутствие проскальзывания.* При таких граничных условиях обе компоненты скорости приравнивают к нулю независимо от геометрии сетки.
- *Известный поток вещества.* Для этого типа граничных условий скорости на границе определяются внешними условиями. Необходимость установить скорости усложняется задачей определения плотности и внутренней энергии.
- *Непрерывный поток вещества.* Эти граничные условия аналогичны указанным выше условиям. В этом случае скорость поступления материала, удельный вес, энергию, и т.д. считают равными для смежных ячеек сетки.
- *Силовые.* Эти граничные условия определяют напряжения вдоль или поперек границы. Напряжение может быть как постоянным, так и зависеть от времени.

4.2.6. Моделирование поведения материала

Определяющее уравнение, или *математическая модель* представляет собой математическое уравнение, описывающее физическое поведение материала. Главное преимущество математической модели состоит в возможности численного описания сложных явлений.

Определяющие уравнения вводят для предсказания результатов экспериментов. Точность предсказаний зависит от того, насколько реалистично свойства материала описываются определяющим уравнением. Цитируя Hashmi и Hamouda [38],

«цель моделирования свойств материала состоит в теоретическом описании широкого класса практических задач при использовании простых моделей явления». Следует также подчеркнуть, что численная реализация решения определяющих уравнений в компьютерной программе почти столь же важна, как и сама модель. Известны математически изящные модели, которые вводят непреодолимые вычислительные трудности. Таким образом, математическая модель должна быть не только теоретически строгой, но и позволять ее реальное и эффективное решение вычислительными методами. Моделирование материалов осуществляют на двух структурных уровнях, а именно: микроскопическом и макроскопическом [20].

Наиболее важными характеристиками и особенностями, определяющими поведение композиционных материалов при баллистическом ударе, являются их анизотропия, ударные свойства, связь всестороннего сжатия и сдвигового напряжения, уменьшение степени анизотропии, увеличение плотности материала и фазовые переходы. В случае анизотропных материалов имеется зависимость прочности как от всестороннего сжатия, так и от сдвигового напряжения. Всестороннее сжатие ведет к появлению сдвиговых напряжений, и, аналогично, сдвиговые напряжения ведут к появлению объемных напряжений. Модели [39–40], разработанные специально для описания поведения анизотропных материалов при ударе, появились недавно и объединяют нелинейные определяющие уравнения с уравнением состояния. Связь основана на методологии, предложенной Андерсоном с соавторами [41]. Модель может учитывать увеличение плотности материала и иметь анизотропный критерий разрушения, учитывающий направленное разрушение типа расслоения. Namouda и Hashmi [42] ввели определяющие уравнения для описания баллистического удара по композитам на основе металлической матрицы.

Армированные пластики при ударе демонстрируют сложное поведение. Доминирующими механизмами разрушения композита при растяжении являются расслоение, обусловленное растрескиванием матрицы и ее отслоением от волокон, разрушение волокон и сдвиговое разрушение матрицы, вызываемое комбинацией микрорастрескивания и разрыва волокон. В численных моделях композиционный материал считают гомогенным, и его поведение описывают в рамках макромеханической модели.

4.3. Численное моделирование баллистического удара

Прежде чем описать удар по ткани, рассмотрим поперечный удар по отдельному волокну. При столкновении ударника с волокном в последнем возбуждаются две волны, продольная и поперечная, распространяющиеся от точки удара, как показано на рис. 4.2.

Продольная волна растяжения распространяется вдоль его оси со скоростью звука в материале волокна. Продольная волна распространяется от точки удара на значительное расстояние, и материал за ее фронтом движется по направлению к точке удара, которая движется вместе с ударником. Скорость поперечной волны гораздо ниже скорости продольной волны, т.е. скорости звука в материале. Сравнивая поперечный удар по одиночному слою ткани с ударом по отдельному

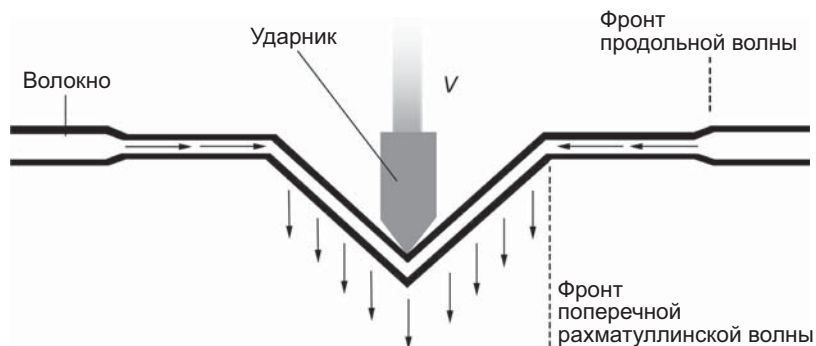


Рис. 4.2. Поперечный баллистический удар по одиночному волокну [43]

волокну, Cunniff [43] отметил, что при поперечном ударе по ткани сначала начинают двигаться нити, которые находятся в непосредственном контакте с ударником. Эти нити он назвал первичными. В них возникают продольные волны, которые распространяются вдоль оси волокон со скоростью звука. Благодаря силам трения вытягиваются также и вторичные нити, непосредственно с ударником не взаимодействующие. Эти нити деформируются, и в них также развиваются волны напряжения, аналогичные волнам в первичных нитях. В свою очередь, вторичные вытягивают следующие нити, с которыми они пересекаются. Взаимодействие нитей зависит от трения между ними. Трение вызывает движение нитей по направлению к точке удара. Поперечное движение нитей продолжается вплоть до разрушения ткани.

Naik [45] изучал поведение композитов на основе ткани. Он сообщил, что ударник действует на множество нитей основы и утка, находящихся непосредственно под ним. В идентичных условиях баллистический предел стеклопластика выше, чем углепластика (табл. 4.3). В стеклопластике главным механизмом диссипации энергии является работа деформации вторичных и первичных нитей. В углепластике основными механизмами диссипации энергии являются энергия деформации вторичных нитей и сдвиговое разрушение матрицы. Morye *et al.* [46–47] разработали простую модель для вычисления поглощения энергии удара композитов.

Таблица 4.3. Результаты баллистических испытаний стеклопластика на основе Е-ткани полотняного плетения и углепластика на основе ткани Т300 саржевого плетения и эпоксидной смолы, $d = 5$ мм, $h = 2$ мм

Материал	Масса ударника	Предсказанный баллистический предел, V_m (м/с)	Экспериментальный баллистический предел, V_{50} (м/с)	Предсказанный размер зоны повреждения	Экспериментальный размер зоны повреждения r_d (мм)	Предсказанный радиус конуса R , (мм)
Е-стекло, полотно	2,8	159	150	9,6	10	35
Углеродное Т300, саржа	1,8	99	–	–	105	59
Углеродное Т300, саржа	2,8	83	–	–	–	61

тами на основе полимерных матриц. Тремя главными каналами диссипации энергии при баллистическом ударе являются энергия разрушения композита, энергия его упругой деформации и кинетическая энергия движущихся частей композита. Эти вклады определяют суммарную диссипацию энергии композитом. В модель вводятся физические характеристики материала и данные высокоскоростного фотографирования. Авторы нашли, что размер деформируемой области на задней поверхности композита определяется модулем сдвига материала в плоскости пластины. Наиболее удивительным результатом оказалось то, что доминирующим механизмом диссипации энергии является кинетическая энергия фрагментов композита.

Ulven *et al.* [48] использовали численное моделирование для исследования влияния геометрии ударника на развитие области повреждения при баллистическом ударе по углепластику на основе эпоксидной матрицы. Авторы [49–54] использовали численное моделирование для изучения влияния формы ударника на поведение мишени при баллистическом ударе. При расчетах предполагалось, что деформации ограничены и среднее давление, замедляющее ударник, состоит из квазистатической и динамической компонент. Модели учитывали баланс энергии.

Gu [55] разработал модель для вычисления остаточной скорости ударника после пробития нескольких слоев ткани. Если пренебречь деформацией ударника и выделением тепла, согласно закону сохранения энергии уменьшение кинетической энергии ударника равно сумме кинетической энергии и энергии деформации нитей. Это позволяет рассчитать остаточную скорость ударника после перфорации многослойного пакета. При ударе скорость деформирования волокон очень высокая, и для вычисления остаточной скорости ударника нужно учитывать влияние скорости на их механические свойства. Изменение механических свойств волокон при высокой скорости деформирования следует учитывать в материалах, чувствительных к скорости нагружения. Вычисленные значения энергии, поглощенной многослойным тканым пакетом, хорошо согласуются с экспериментальными данными. Время перфорации может быть оценено из времени, за которое достигается определенная деформация нитей при данной скорости деформирования. Если время перфорации не удастся измерить экспериментально, этот метод оценки времени применим и при чисто теоретическом моделировании.

Численные расчеты Ройланса с соавторами [3, 6] показали, что кинетическая энергия ударника передается преимущественно первичным нитям в виде упругой и кинетической энергии, а вклад вторичных нитей в диссипацию энергии мал. Lim *et al.* [56] разработали модель конечных элементов для изучения баллистического удара по ткани Tvaron. Для моделирования поведения ткани при высокоскоростном ударе использовали явную схему решения задачи поведения нелинейных трехмерных конечных элементов DYNA3D. Ткань моделировали элементами мембраны. Вязкоупругое поведение материала описывали моделью из трехэлементных наборов пружин и демпферов, параметры которых соответствовали экспериментальным данным. Баллистический предел, остаточную скорость, поглощенную энергию и поперечные профили смещения ткани сравнивали с экс-

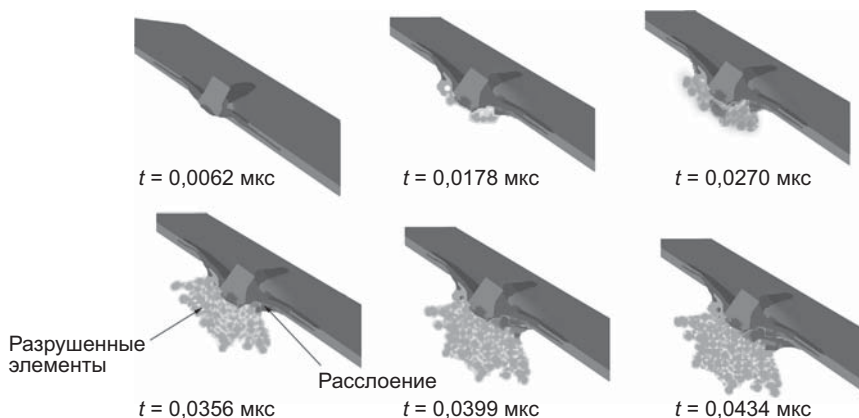


Рис. 4.3. Моделирование повреждения при скорости удара, равной баллистическому пределу [60]

периментальными данными. В недавней работе Lim *et al.* [57–59] рассмотрели влияние поперечного взаимодействия нитей и нашли, что оно может сильно влиять на результаты вычислений. Анализ деформации одного слоя ткани служит примером, показывающим, как различные физические механизмы влияют на поведение ткани при баллистическом ударе. Было показано, что свойства материала, структура ткани, геометрия ударника, скорость удара, взаимодействие соседних слоев ткани, граничные условия и трение играют важную роль. Хотя многие авторы пытались выделить влияние этих факторов, нужно отметить, что при баллистическом ударе в многослойных бронепакетах они связаны.

Silva *et al.* [60] методом численного моделирования при помощи программы AUTODYN 3D изучали баллистический удар по тонким слоистым органо-пластикам на основе волокна Kevlar 29. Для оценки баллистического предела V_{50} и изучения процессов разрушения авторы моделировали удар осколком по пластинам различной толщины. Наблюдалось расслоение, вызываемое сдвигом растягиваемых нитей. Была достигнута хорошая корреляция между экспериментальными данными и результатами вычислений деформации и характера расслоения (рис. 4.3).

Mahfuz *et al.* [61] разработали модель конечных элементов, использующую программу DYNA3D, для исследования поведения композиционного материала при высокоскоростном ударе. 3D-модель описывала броню, состоящую из дискретных слоев различных материалов. Ударник имел тупой наконечник и был упрочнен стержнем из стали 4340. Было определено распределение напряжений по толщине пластины и найдено максимальное напряжение в слое керамики. Оказалось, что условия расслоения критическим образом зависят от двух границ раздела каучукового слоя, склеивающего керамику и композитную подложку.

Gu и Xu [62] опубликовали результаты расчета поведения тканых 3D-компози- тов Tvaron/эпоксид при баллистическом ударе цилиндром с коническим наконечником. Поведение пластины, ориентированной под некоторым углом к оси ударника, они рассчитывали методом конечных элементов при помощи подпрог-

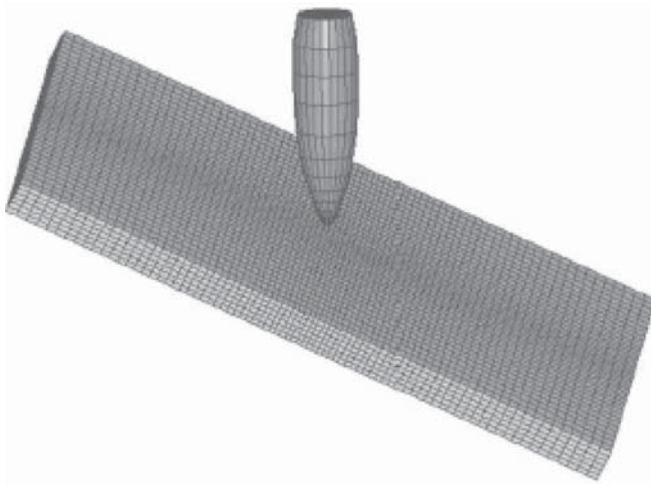


Рис. 4.4. Сетка конечных элементов, описывающая геометрию ударника и пластины [62]

раммы LS-DYNA. Рис. 4.4 демонстрирует систему конечных элементов, моделирующих ударник и пластину, а процесс пробития пластины показан на рис. 4.5. Остаточную скорость ударника после перфорации 3D-композита рассчитывали из его кинетической энергии после столкновении с мишенью. Сравнение результатов расчетов и экспериментов показало, что на уровне микроструктуры анализ достаточно точен. Разработанный на основе данной работы упрощенный метод может быть распространен и на изучение баллистического соударения с другими текстильными 3D-композитами.

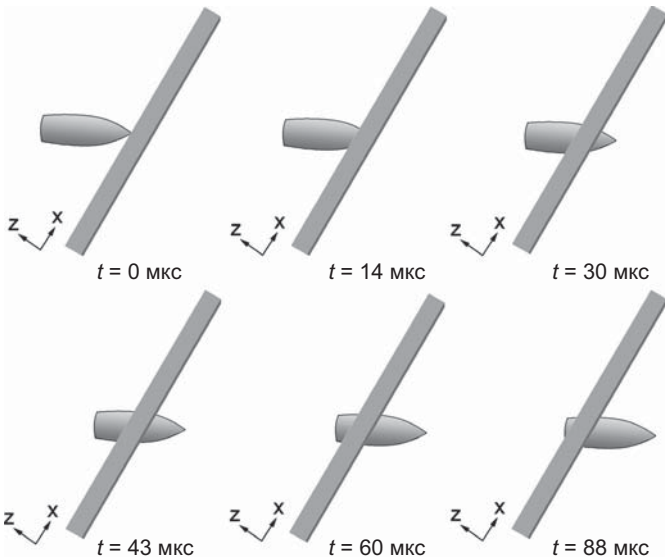


Рис. 4.5. Баллистическое пробивание волокнистой пластины, ориентированной под углом к оси ударника [62]

Taylor и Vinson [63] моделировали ткань очень гибкой изотропной пластиной. Очевидно, эта модель игнорирует анизотропию свойств нитей. Некоторые авторы [64–71] моделировали ткань пучком гибких волокон, связанных в точках переплетения. Для учета контакта слоев и скольжения нитей разрабатываются все более и более сложные модели этого типа [72–75].

Полные 3D-модели конечных элементов с вязкими свойствами использовали в работах [8–9]. В работах [76–77] описана микромеханическая модель, изучающая деформацию и разрушение индивидуальных нитей при ударе. Для корректного описания физических процессов в ткани при ударе осколком авторы рассмотрели геометрию нитей и ткани, выполнили статические и высокоскоростные эксперименты, измерили диаграммы напряжение–деформация, исследовали процесс разрушения и предложили эмпирические выражения, описывающие полученные данные. Duan *et al.* [77] разработали модель конечных элементов для изучения роли трения при баллистическом ударе твердой сферой по тканю многослойному пакету квадратной формы, жестко зажатому на четырех кромках (рис. 4.6 и 4.7). Результаты моделирования показали, что трение между тканью и ударником и взаимное трение нитей оказывают сильное влияние на мезоструктуру ткани в зоне воздействия, препятствуя боковому смещению первичных нитей. Уменьшение боковой подвижности нитей приводит к нагружению и разрыву большего количества нитей. Ткань с высоким уровнем трения между нитями поглощает большее количество энергии, чем ткань без трения. Трение между тканью и ударником задерживает разрыв нитей и распределяет максимальное напряжение нитей на периферию зоны контакта ткани и ударника. Задержка разрыва нитей существенно увеличивает поглощение энергии на более поздних стадиях соударения. Трение между нитями препятствует относительному движению нитей и увели-

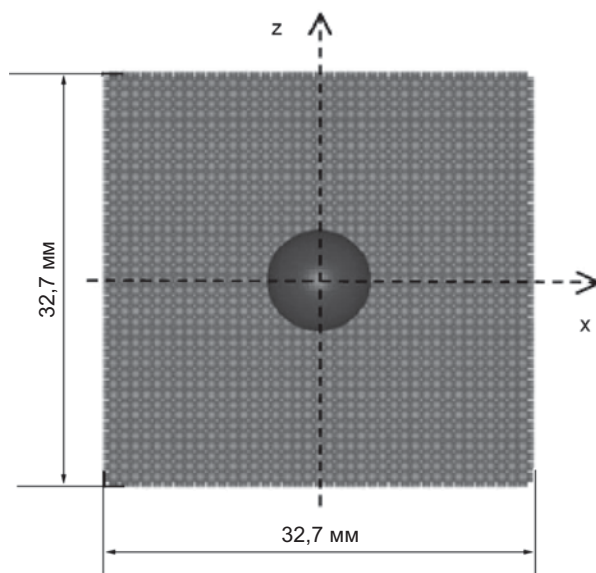


Рис. 4.6. Исходная геометрия жесткой сферы и пакета слоев ткани квадратной формы [77]

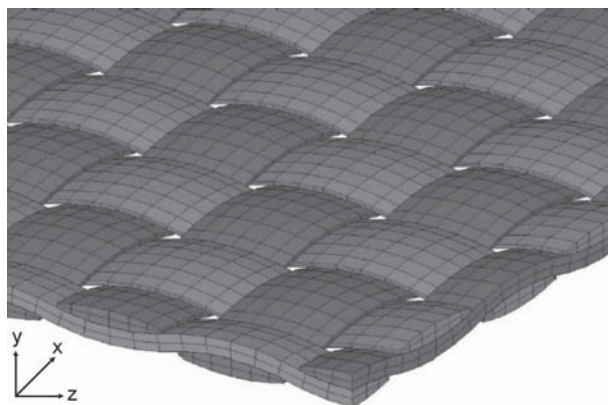


Рис. 4.7. Сетка конечных элементов ткани плотняного плетения [77]

чивает жесткость ткани. В результате, ткань разрывается на более ранних стадиях процесса соударения. Влияние трения между тканью и ударником и трения между нитями нельзя рассчитать простым суммированием этих эффектов. Duan *et al.* [78] сообщили об аналогичном влиянии трения между мишенью и ударником при исследовании низкоскоростного удара по полимерному диску. O'Daniel *et al.* [79] представили детальное описание соударения и описали применимость программы LS-DYNA3D для моделирования соударения.

Shockey *et al.* [72–75] применили численные расчеты для разработки легких бронепакетов на основе ткани, защищающих самолет от осколков снаряда. Была разработана модель, использующая экспериментальные данные и метод конечных элементов при помощи подпрограммы LS-DYNA3D. Эта модель позволила описать деформирование и разрушение нитей при ударе, а также вычислить остаточную энергию осколков после соударения с бронепакетом. Результаты расчетов согласовались с результатами экспериментальных выстрелов из газового ружья. Численное моделирование позволяет определить плотность ткани, число слоев, условий ее закрепления и усилий, прикладываемых к поддерживающей структуре.

В прошлом броня из композиционных материалов представляла собой ламинаты на основе термореактивных матриц. Прозрачную броню обычно делают из слоев поликарбоната, полиметилметакрилата (ПММА), керамики или стекла [80–86]. Хотя слоистые материалы значительно улучшают механические свойства, а технология их производства весьма проста, они имеют невысокую прочность. Часто трещины, появившиеся в более хрупких слоях, быстро распространяются в другие материалы, что приводит к потере структурной целостности изделия. Броня из композиционных материалов обычно состоит из комбинации жестких и эластичных материалов. Jovicic *et al.* [87] предложили применять градиентную броню, чтобы снизить вес и стоимость без существенной потери баллистических свойств. Чтобы развить методологию оптимизации конструкции градиентной брони из композиционных материалов, нужно лучше понимать значение отдельных параметров и компонентов пакета. Один из способов изучения роли этих параметров состоит в численном моделировании удара. Центральный удар шаром по композиту на ос-

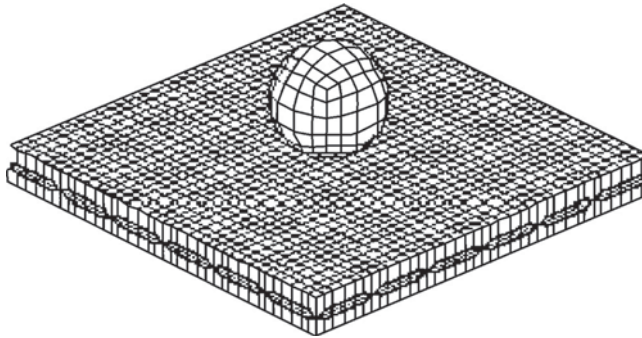


Рис. 4.8. 3D-модель композитной брони [87]

нове полимерной матрицы показан на рис. 4.8. Вычислительные ограничения требуют компромисса при выборе геометрии системы и поведения материала. Jovićić *et al.* [87] обсуждали два типа моделей: (а) волокнистый композит на основе эпоксидной матрицы, используемый в качестве заднего слоя брони, и (б) растрескивающийся передний слой, состоящий из керамических сфер в эпоксидной матрице.

Начато развитие библиотеки геометрической структуры волокнистых материалов, что открывает возможность оптимизации структуры и моделирования высокоскоростных явлений при ударе по композиционным материалам. Для разработки легкой индивидуальной защиты Leigh и Porwal [12] разработали аналитическую модель, описывающую поведение волокнистых материалов при баллистическом ударе. Она рассматривает поведение ненатянутой 2D-мембраны при поперечном ударе ударником с затупленным кончиком. Они описали гипотетическую броню со слоями, имеющими разнообразные свойства, и подняли вопросы о поведении ткани при ударе и параметрах, которые могут определять это поведение. Рис. 4.9 схематически иллюстрирует удар пулей по легкому бронепакету (вес которого, возможно, будет составлять лишь 40% от веса нынешних систем).

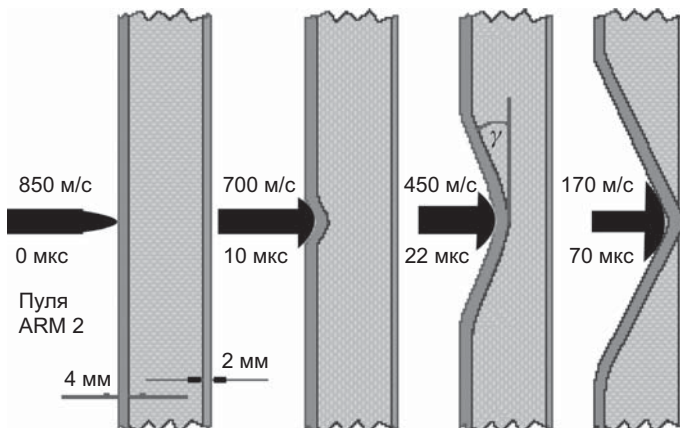


Рис. 4.9. Остановка пули ARM2 гипотетической слоистой волокнистой структурой, вес которой примерно вдвое ниже, чем у современной брони [12]

4.4. Заключение и тенденции развития

В данной главе рассмотрены основные вопросы компьютерного моделирования поведения брони при баллистическом ударе. Результаты вычислений могут быть полезными, если исследователь понимает их ограничения и принцип работы программы. Они дают детальное описание физических процессов и могут использоваться для выполнения расчетов, которые гораздо дешевле и быстрее реальных лабораторных экспериментов. Для иллюстрации способностей коммерчески доступных компьютерных программ были продемонстрированы примеры расчета поведения систем при соударении.

Рассмотрены модели, описывающие деформирование композиционных материалов. Для моделирования поведения брони при баллистическом ударе использовались различные численные методы. Как отмечено, наиболее широко используются метод конечных элементов и метод конечных разностей, хотя последний сегодня уже не столь популярен, как прежде. За последние двадцать лет метод конечных элементов стал рутинным инструментом моделирования явлений удара и перфорации. В последнее время появились многообещающие методы граничных элементов и SPH.

Очень важен вопрос о надежности результатов компьютерных расчетов. Без доверия к точности результатов численного моделирования их ценность не слишком высока. Сегодня получены замечательно точные и надежные методы расчетов многих прикладных задач, в то время как в других областях они в лучшем случае являются качественными и отражают лишь общие физические явления. Обеспеченность надежностью расчетов привела к созданию целого направления, целью которого является проверка результатов численных расчетов.

Один из главных факторов повышения конкурентоспособности состоит в сокращении времени проектирования изделия. Оно критически зависит от возможностей виртуального и реального проектирования без длительных испытаний опытных образцов. Для изделий Министерства обороны США, используемых в экстремальных условиях окружающей среды, все шире применяются методы численного моделирования при высокоскоростном ударе. Хотя в моделировании удара в последние два десятилетия достигнуты большие успехи, компьютерное создание опытных образцов все еще является скорее искусством, а не наукой. Чтобы повышать эффективность компьютерного проектирования опытных образцов брони, приходится выполнять большое количество реальных испытаний, так как многие физические явления сегодня не удается моделировать из первых принципов. Виртуальные компьютерные модели всегда готовы к испытаниям, и это не требует развития принципиально новой технологии. Определенные препятствия созданию виртуальных моделей создают неспособность моделировать задачи с различными физическими явлениями типа горения и фазовых переходов, разрушения и образования осколков, которые проявляются на различных масштабных уровнях и имеют вероятностную природу. Чтобы сделать виртуальное проектирование действительностью уже в следующем десятилетии, требуются радикально новые вычислительные модели, способные рассматривать явления различного масштаба в сильно гетерогенных

материалах, в том числе и разрушение; способные оценить различные характеристики материала и способные автоматически улучшать конструкцию бронесистемы.

При быстром развитии новых методов нападения и защиты требуется столь же быстрая разработка и оценка характеристик нового оружия. Это требует виртуального проектирования и создания прототипов брони. Например, при разработке средств индивидуальной защиты военнослужащих требуется оценить эффективность брони. Однако моделирование поведения материалов типа органо-пластиков на основе волокон Kevlar, работающих в условиях частичного разрушения, требует динамического анализа разрушения, что выходит за пределы сегодняшних знаний. Эти способности требуются также и для поддержания ядерного оружия в боеготовности без проведения реальных испытаний.

Моделирование баллистического удара стало одним из основных направлений развития, позволяющим лучше понять это явление. Оно было основой интенсивного развития в последние годы и будет критическим фактором дальнейшего развития, повышающим безопасность индивидуальных средств защиты.

4.5. Литература

1. Abrate, S., *Impact on Composite Structures*, Cambridge University Press, 1998.
2. Justo, J. and Marques, T., Design and testing of composite panels for ballistic protection, in 2nd International Symposium on Impact Engineering, China, 1996.
3. Roylance, D. and Wang, S. S., *Penetration Mechanics of Textile Structures, Ballistic Materials and Penetration Mechanics*, 273–293, Elsevier Scientific Publ. Co., 1980.
4. Shim, V.P., Tan, B.C. and Tay, T.E., Modelling Deformation and Damage Characteristics of Woven Fabric Under Small Projectile Impact, *Int. J. Impact Engng*, 16, 585–605, 1995.
5. Walker, J.D., Constitutive Model for Fabrics with Explicit Static Solution and Ballistic Limit, Proceedings of the 18th International Symposium on Ballistics, San Antonio, Texas, 1231–1238, 1999.
6. Ting, J., Roylance, D., Chi, C.H. and Chitrangad, B., Numerical Modeling of Fabric Panel Response to Ballistic Impact, Proceedings of the 25th International SAMPE Technical Conference, October 1993.
7. Johnson, G.R., Beissel, S.R. and Cunniff, P.M., A Computational Model for Fabrics Subjected to Ballistic Impact, Proceedings of the 18th International Symposium on Ballistics, San Antonio, Texas, 962–969, 1999.
8. Kollegal, M.G. and Sridharan, S., Strength Prediction of Plain Woven Fabrics, *Journal of Composite Materials*, 34, 240–257, 2000.
9. Tabiei, A. and Jiang, Y., Woven Fabric Composite Material Model With Material Nonlinearity For the Finite Element Simulation, *Int. J. of Solids and Structures*, 36, 2757–2771, 1999.
10. Awerbuch, J. and Bodner, S.R., Analysis of the mechanics of perforation of projectiles in metallic plates, *Int. J. of Solids and Structures*, 10, 671–84, 1974.
11. Tobin, L., Current UK thoughts on ballistic test methods. In: Proceedings of Personal Armour Systems Symposium PASS 94, Gotts, P.L. and Kelly, P.M. (eds) Defence Clothing and Textiles Agency, 21–25 June, 1994, Colchester; 447–453.

12. Leigh, S. P. and Porwal, P.K., A new membrane model for the ballistic impact response and V50 performance of multi-ply fibrous systems, *Int. J. of Solids and Structures*, 40, 6723–6765, 2003.
13. Billon, H.H. and Robinson, D.J., Models for the ballistic impact of fabric armor. *Int. J. Impact Engng*, 25, 411–422, 2001.
14. Chocron-Benloulou, I.S., Rodriguez, J. and Sauchez-Galvez, V., A simple analytical model to simulate textile fabric ballistic behavior. *Text Res J*, 67(7), 520–528, 1997.
15. Wilkins, L., Mechanics of penetration and perforation, *Int. J. Engng Sci.*, 16, 793–807, 1978.
16. Johnson, W.E. and Anderson, Jr. E. C., History and application of hydrocodes in hypervelocity impact, *Int. J. Impact Engng*, 5, 423–440, 1987.
17. Zukas, J. A., *Impact Dynamics*, Wiley-Interscience, New York, 1982.
18. Zukas, J. A., *High Velocity Impact Dynamics*, Wiley-Interscience, New York, 1990.
19. Walters, W.P. and Zukas, J.A., *Fundamentals of Shaped Charges*, Wiley-Interscience, New York, 1989.
20. Hamouda, A.M.S. and Hashmi, M.S.J., Modelling the impact and penetration events of modern engineering materials: characteristics of computer codes and material models, *Journal of Materials Processing Technology*, 56, 847–862, 1996.
21. Anderson, Jr C.E., An overview of the theory of hydrocodes, *Int. J. of Impact Engng*, 5, 33–59, 1987.
22. Hamouda, A.M.S. and Hashmi, M.S.J., High-speed impact of elastic-plastic work hardening material into a rigid boundary, *Journal of Materials Processing Technology*, 64, 189–197, 1997.
23. Hamouda, A.M.S. and Hashmi, M.S.J., Simulation of the Impact of a Tool Steel Projectile into Copper, Mild-steel, Stainless-steel (304) Test Specimens, in *Structures Under Shock and Impact* (Ed. P.S. Bulson), Computational Mechanics Publications, 51–61, 1992.
24. Woodward, R.W., Modelling Geometrical and Dimensional Aspects of Ballistic Penetration of Thick Metal Targets, *Int. J. Impact Engng*, 18(4), 369–381, 1996.
25. Zhu, G., Goldsmith, W. and Dharan, C. K. H., Penetration of Laminated Kevlar by Projectiles – Analytical Model, *Int. J. Solids Structure*, 29, 421–436, 1992.
26. Reddy, J. N., *An Introduction to the Finite Element Method*, 3rd edn, McGraw-Hill, 2006.
27. Moaveni, S., *Finite Element Analysis: Theory and Application with ANSYS*, 2nd edn, Prentice-Hall, 2003.
28. Burnett, D., *Finite Element Analysis: From Concept to Applications*, Addison Wesley, 1987.
29. Zienkiewicz, O.C. and Cheung, Y.K., *The Finite Element Method in Structural and Continuum Mechanics*, McGraw-Hill, 1967.
30. Monaghan, J. J., An introduction to SPH, *Computer Physics Communications*, 48, 89–96, 1988.
31. Predebon, W. W., Anderson, Jr, C. E. and Walker, J.D., *Computational Mechanics*, 7, 221, 1991.
32. Rosinsky, R. Lagrangian Finite Element Analysis of Penetration of Earth Penetrating Weapons, Lawrence Livermore National Laboratory (1985) Report UCID-20886.
33. Herrmann, W., Nonlinear Transient Response of Solids. In Pilkey, B. (ed.), *Shock and Vibration Computer Programs, Reviews and Summaries*, Shock and Vibration Information Center, Naval Research Laboratory, Washington, DC, 1975.
34. Liu, W. K., Chang, H., Chen, J.-S. and Belytschko, T., Arbitrary Lagrangian-Eulerian Petrov-Galerkin finite elements for nonlinear continua, *Comput. Methods Appl. Mech. Engng*, 68, 259–310, 1988.

35. Century Dynamics, Inc., AUTODYN. Interactive Non-Linear Dynamic Analysis Software, 1997.
36. Nackenhorst, U., The ALE-formulation of bodies in rolling contact: Theoretical foundations and finite element approach, *Comput. Methods Appl. Mech. Engng*, 193, 4299–4322, 2004.
37. Hansbo, P., Hermansson, J. and Svedberg, T., Nitsche's method combined with space-time finite elements for ALE fluid-structure interaction problems, *Comput. Methods Appl. Mech. Engng*, 193, 4195–4206, 2004.
38. Hashmi, M.S.J. and Hamouda, A.M.S., Development of 1D Constitutive Equations for Metals Subjected to High Strain Rate and Large Strains, *International Journal of Strain Analysis*, 29, 117–127, 1994.
39. Hayhurst, C., Hiermaier, S., Clegg, R., Riedel, W. and Lambert, M., Development of material models for Nextel and Kevlar epoxy for high pressures and strain rates, in: Hypervelocity Impact Symposium, Huntsville, AL, 1999.
40. Hiermaier, S., Riedel, W., Clegg, R. and Hayhurst, C., Advanced material models for hypervelocity impact simulations, Tech., Rep., ESA/ESTEC Contract No. 12400/ 97/NL/PA(SC), 1999.
41. Anderson, C., Cox, P., Johnson, G.R. and Maudlin, P., A constitutive formulation for anisotropic materials suitable for wave propagation computer program, *Computational Mechanics*, 15, 201–223, 1994.
42. Hamouda, A. M. S. and Hashmi, M. S. J., Mechanical properties of aluminium metal matrix composites under impact loading, *International Journal of Materials Processing Technology*, 56, 743–756, 1996.
43. Cunniff, P.M., An analysis of the system effect in woven fabrics under ballistic impact, *Textile Res J*, 62, 495–509, 1992.
44. Cunniff, P.M., A semiempirical model for the ballistic impact performance of textile-based personnel armor, *Text Res J*, 66(1), 45–59, 1996.
45. Naik, R.A., *Analysis of woven and braided fabric reinforced composites*. NASA CR-194930, National Aeronautics and Space Administration, Washington, DC, 1994.
46. Morye, S.S., High performance polymer composites for ballistic protection, PhD thesis, The University of Leeds, November 1998.
47. Morye, S.S., Hine, P.J., Duckett, R.A., Carr, DJ. and Ward, I.M., Modelling of the energy absorption by polymer composites upon ballistic impact, *Composites Science and Technology*, 60, 2631–2642, 2000.
48. Ulven, C., Vaidya, U.K. and Hosur, M.V., Effect of projectile shape during ballistic perforation of VARTM carbon/epoxy composite panels, *Composite Structures*, 61, 143–150, 2003.
49. Wen, H.M., Predicting the penetration and perforation of FRP laminates struck normally by projectiles with different nose shapes, *Composite Structures*, 49, 321–329, 2000.
50. Wen, H.M., Penetration and perforation of thick FRP laminates, *Compos Sci Technol*, 61, 1163–72, 2001.
51. Ben-Dor, G., Dubinsky, A and Elperin, T., Optimization of the nose shape of an impactor against a semi-infinite FRP laminate, *Compos Sci Technol*, 62, 663–667, 2002.
52. Ben-Dor, G., Dubinsky, A. and Elperin, T., A model for predicting penetration and perforation of FRP laminates by 3-D impactors, *Compos Struct*, 56, 243–248, 2002.
53. Gellert, E.P., Cimpoeru, S.J. and Woodward, R.L., A study of the effect of target thickness on the ballistic perforation of glass-fiber-reinforced plastic composites, *Int J. Impact Eng*, 24, 445–456, 2000.

54. Lee, S.W.R. and Sun, C.T., Dynamic penetration of graphite/epoxy laminates impacted by a blunt-ended projectile, *Compos Sci Technol*, 49, 369–380, 1993.
55. Gu, B., Analytical modeling for the ballistic perforation of planar plain-woven fabric target by projectile, *Composites: Part B*, 34, 361–371, 2003.
56. Lim, C.T., Shim, V.P.W. and Ng, Y.H., Finite-element modeling of the ballistic impact of fabric armor, *International Journal of Impact Engineering*, 28, 13–31, 2003.
57. Shim, V.P.W., Lim, C.T. and Foo, K.J., Dynamic mechanical properties of fabric armour, *Int J Impact Eng*, 25, 1–15, 2001.
58. Shim, V.P.W., Tan, V.B.C. and Tay, T.E., Modeling deformation and damage characteristics of woven fabric under small projectile impact, *Int J Impact Eng*, 16, 585–605, 1995.
59. Yong, S.Y., Shim, V.P.W. and Lim, C.T., An experimental study of penetration of woven fabric by projectile impact. In: Shim, V.P.W., Tanimura, S. and Lim, C.T. (eds), *Impact response of materials & structures*. Singapore: Oxford University Press, 559–565, 1999.
60. Silvaa, M.A.G., Cismasiua, C. and Chioreanb, C.G., Numerical simulation of ballistic impact on composite laminates, *International Journal of Impact Engineering*, 31, 289–306, 2005.
61. Mahfuz, H., Zhu, Y., Haque, A., Abutalib, A., Vaidya, U., Jeelani, S., Gama, B., Gillespie, J. and Fink, B., Investigation of high-velocity impact on integral armor using finite element method, *International Journal of Impact Engineering*, 24, 203–217, 2000.
62. Gu, B. and Xu, J., Finite element calculation of 4-step 3-dimensional braided composite under ballistic perforation, *Composites: Part B*, 35, 291–297, 2004.
63. Taylor, W. J. and Vinson, J. R., Modeling Ballistic Impact into Flexible Materials, *AIAA Journal*, 28, 2098–2103, 1990.
64. Shim, V. P., Tan, V.B.C. and Tay, T. E., Modelling Deformation and Damage Characteristics of Woven Fabric Under Small Projectile Impact, *Int. J. Impact Engng*, 16, 585–605, 1995.
65. Walker, J. D., Constitutive Model for Fabrics with Explicit Static Solution and Ballistic Limit, Proceedings of the 18th International Symposium on Ballistics, San Antonio, Texas, 1231–1238, 1999.
66. Iremonger, M.J. and Went, A.C., Ballistic impact of fiber composite armours by fragment-simulating projectiles, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 27(7), 575–581, 1996.
67. Lee, B.L., Walsh, T.F., Won, S.T., Patts, H.M., Song, J.W. and Mayer, A.H., Penetration failure mechanism of armor-grade fiber composites under impact, *J Compos Mater*, 35(18), 1605–1629, 2001.
68. Leech, C.M., Hearle, J.W.S. and Mansell, J., A variational model for the arrest of projectiles by woven cloth and nets, *J Text Inst*, 70(11), 469–478, 1979.
69. Leech, C.M., The dynamics of flexible filaments assemblies. In: Hearle, J.W.S., Thwaites, J.J. and Amirbayat, J. (eds), *Mechanics of flexible fiber assemblies*. The Netherlands: Sijthoff & Noordhoff, 1980.
70. Navarro, C., Simplified modeling of the ballistic behavior of fabrics and fiber-reinforced polymeric matrix composites, *Key Engng Mater*, 141–143, 383–400, 1998.
71. Parga-Landa, B. and Hernandez-Olivares, F., An analytical model to predict impact behavior of soft armours, *Int J Impact Engng*, 16(3), 455–466, 1995.
72. Shockey, D.A., Giovanola, J.H., Simons, J.W., Erlich, D.C., Kolpp, R.W. and Skaggs, S.R., Advanced armour technology: application potential for engine fragment barrier for commercial aircraft. US Department of Transport, Federal Aviation Administration, DOT/FAA/AR97-53, 1997.

73. Smith, J.C., Blandford, J.H. and Towne, K.H., Stress-strain relationships in yarns subjected to rapid impact loading. Part VIII. Shock waves, limiting breaking velocities, and critical velocities, *Text Res J*, 32, 67, 1962.
74. Smith, J.C., McCrackin, F.L. and Scniefer, H.F., Stress-strain relationships in yarns subjected to rapid impact loading. Part V. Wave propagation in long textile yarns impacted transversely, *Text Res J*, 28(4), 288–302, 1958.
75. Shockey, D. A., Erlich, D. C. and Simons, J. W., Lightweight Fragment Barriers for Commercial Aircraft, Proceedings of the 18th International Symposium on Ballistics, San Antonio, Texas, 1999.
76. Shockey, D. A., Erlich, D. C. and Simons, J. W., Improved Barriers to Turbine Engine Fragments, SRI Semiannual Report No. 5 to FAA, January 1999.
77. Duan, Y., Keefe, M., Bogetic, T.A., Cheeseman, B.A. and Powers, B., A numerical investigation of the influence of friction on energy absorption by a high-strength fabric subjected to ballistic impact, *International Journal of Impact Engineering*, 2005.
78. Duan, Y., Saigal, A., Greif, R. and Zimmerman, M.A., Impact behavior and modeling of engineering polymers, *Polym Eng Sci*, 43(1), 112–124, 2003.
79. O’Daniel, J. L., Koudelab, K. L. and Krauthammer, T., Numerical simulation and validation of distributed impact events, *International Journal of Impact Engineering*, 31, 1013–1038, 2005.
80. Choi, H., Downs, F. and Chang, F., A new approach toward understanding damage mechanisms and mechanics of laminated composites due to low-velocity impact: Part I, and Part II, *Journal of Composite Materials*, 25, 992–1038, 1991.
81. Clegg, R., Hayhurst, C., Leahy, J. and Deutekom, M., Application of coupled anisotropic material model to high velocity impact response of composite textile armour, in 18th Int. Symposium and Exhibition on Ballistics, San Antonio, Texas USA, 1999.
82. Choi, H. and Chang, F., A model for predicting damage in graphite/epoxy laminated composites resulting from low velocity point impact, *J Comp Mater*, 26(14), 2134–2169, 1992.
83. Lee, S.W.R. and Sun, C.T., Dynamic penetration of graphite/epoxy laminates impacted by a blunt ended projectile, *Compos Sci Technol*, 49, 369–380, 1993.
84. Wu, E., Tsai, C. and Chen, Y., Penetration into glass/epoxy composite laminates, *J Compos Mater*, 28(18), 1783–1803, 1994.
85. Hayhurst, C., Hiemaier, S., Clegg, R., Riedel, W. and Lambert, M., Development of material models for nextel and Kevlar/epoxy for high pressures and strain rates. In: Hypervelocity Impact Symposium, Huntsville, AL, 1999.
86. Zhu, G., Goldsmith, W. and Dharan, C.K.H., Penetration of laminated Kevlar by projectiles – II. Analytical model, *Int J Solids Struct*, 29(4), 399–420, 1992.
87. Jovicic, J., Zavaliangos, A. and Ko, F., Modeling of the ballistic behavior of gradient design composite armors, *Composites: Part A*, 31, 773–784, 2000.

ГЛАВА 5

СТАНДАРТЫ И СПЕЦИФИКАЦИИ ЛЕГКИХ БРОНЕЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

А. Бхатнагар, Honeywell International Inc., США

5.1. Введение

В настоящей главе рассмотрены стандарты испытания и спецификации, используемые в США и других странах Южной Америки, Европы и Азии при испытаниях брони военного назначения. Стандарты испытаний и спецификации используют при проектировании, производстве и закупке средств индивидуальной защиты. Поскольку легкие средства защиты начали производить относительно недавно, стандарты их испытания и спецификации продолжают развиваться. Аналогично, продолжают развиваться методы и технические средства испытаний.

Основными причинами разработки стандартов испытания и спецификаций являются:

- необходимость разработки новых более эффективных бронематериалов;
- улучшение понимания поведения волокон, тканей, нетканых материалов и поперечно-армированных композитов при баллистическом ударе;
- появление новых мощных баллистических угроз типа самодельных взрывопакетов;
- лучшее понимание опасности баллистических травм;
- необходимость разработки защиты от поражающих воздействий малой и сверхбольшой мощности.

В США стандарты испытаний и спецификации являются очень детальными. В Европе, Южной Азии и странах Тихоокеанского кольца стандарты испытаний и спецификации лишь немного отличаются от американских. Стандарты испытаний и спецификации могут быть очень детальными и охватывать каждую деталь бронезилов, каски или броневедомобиля. В этой главе будут описаны лишь основные черты стандартов и спецификаций легкой индивидуальной защиты, используемых в гибких бронезилов, формованных нагрудных пластинах, переносных ручных щитах для разгона массовых беспорядков, касках полицейских и военнослужащих, а также броневедомобилей.

Во многих странах используют стандарты США или немного изменяют их для учета местных особенностей. Например, стандарт США 0101.04 для испытания бронезилов. Уровень защиты IIIA этого стандарта требует полной остановки (V_0) 9-мм пули с цельнометаллической оболочкой и Магнума-44 и ограничивает величину запреградной деформации 44 мм. Во многих странах уровень IIIA требует лишь остановки пули с цельнометаллической оболочкой. Другие различия касаются скорости пули и величины запреградной деформации.

Наиболее широко используют следующие стандарты баллистических испытаний:

MIL-STD-662F

Стандарт NIJ 0101.04 для легких бронежилетов

Стандарт NIJ 0101.08

Международный стандарт ISO/FDIS 14876

STANAG 2920

PSDB.

Примерами спецификаций являются:

INTERCEPTOR

SAPI

SPEER.

Защита транспортных средств типа грузовых самолетов и вертолетов описывается различными спецификациями. Производство и испытание легких броне-материалов обычно описывают спецификацией MIL-L-62474B.

СТАНДАРТЫ

5.2. Военный стандарт MIL-STD-662F. Баллистический предел V_{50}

Данный стандарт определяет процедуру, оборудование, условия испытаний и классификацию уровней защиты металлической, неметаллической и композитной защиты от легкого стрелкового оружия. Он же описывает процедуру проведения испытаний при определении баллистического предела V_{50} .

5.2.1. Назначение

Стандарт испытаний описывает метод испытания для принятия к эксплуатации новых броне-материалов. Баллистические испытания проводят для оценки эффективности средств индивидуальной защиты, бронированных сидений авиатехники, внешней и внутренней авиационной брони, бронестекол и брони легких и тяжелых транспортных средств и структур.

5.2.2. Определения

Заменяемая броня

Броня, которую можно установить или убрать из системы в виде снаряжения без ухудшения ее структурной целостности или действия.

Поверхностная плотность

Вес броне-материала в расчете на единицу площади, выраженный в фунтах на квадратный фут или килограммах на квадратный метр поверхности.

Броня

Материал, который используется для защиты от пуль или осколков.

Приемные баллистические испытания

Испытания для определения возможности принятия брони. Выполняется на выборке представительных образцов.

Баллистические коэффициенты

Баллистические коэффициенты – это приближенные формулы, определяющие среднюю скорость ударника.

Баллистическое соударение

Воздействие, производимое ударом снаряда по цели.

Баллистический предел

Скорость, при которой снаряд полностью перфорирует данную броню при определенном угле удара.

Баллистический предел V_{50}

Предел V_{50} определяют как скорость ударника, при которой количество частичных пробитий равно количеству полных пробитий в указанном интервале скоростей удара. Для определения баллистического предела требуется как минимум два частичных и два полных пробития. Часто используются баллистические пределы, определенные при четырех, шести и десяти сериях выстрелов.

Баллистическая стойкость

Мера способности материала или детали полностью останавливать или уменьшать скорость и массу ударника.

Керамическая броня

Тип брони, состоящей из керамической пластины, связанной с подложкой из композиционного материала или металла.

Часы

Электронный инструмент, используемый для измерения времени полета ударника между двумя датчиками.

Композитная броня

Броня, состоящая из двух или нескольких различных материалов, связанных между собой и формирующих систему защиты.

Правильный выстрел

Понятие правильного баллистического выстрела применимо только к броне, содержащей керамические пластины.

- Правильный выстрел по центральной пластине проводится по неповрежденной керамической пластине композитной брони в область радиусом 25,4 мм от ее центра.

- Правильный выстрел по смежной пластине проводится по пластине, имеющей общую границу с пластиной, по которой до этого произвели правильный удар.
- Выстрел по сочленению считают правильным, если центр удара находится в пределах 3,8 мм от линии сочленения двух пластин, но не ближе 12,7 мм от точки сочленения трех или более пластин.

Правильный удар

Удар считается правильным, если ударник бьет по неподдерживаемой области мишени под определенным углом на расстоянии, превышающем двойной диаметр пули от всех повреждений, обусловленных предыдущими ударами, или от любой трещины, или от края испытываемого образца.

Имитатор осколка

Снаряд, предназначенный для моделирования воздействия осколков боеприпасов на мишень.

Начальная скорость

Скорость снаряда в момент времени, когда прекращается действие ускоряющей силы. Выражается в футах или метрах в секунду.

Комплексная броня

Бронематериал, используемый как часть структуры, несущей нагрузку или выполняющей другую функцию помимо баллистической защиты. Иногда ее называют структурной броней.

Фотоэкран

Фотоэлектрическое устройство, активирующее или деактивирующее часы при пролете снаряда.

Дульная скорость

Скорость снаряда относительно ствола в момент его выхода из оружейного ствола. Скорость зависит от веса снаряда, мощности заряда, характеристик ствола и т.д.

Наклон

Мера отклонения оси снаряда от нормали к плоскости мишени. Наклон снаряда, перпендикулярного к поверхности брони, равен 0° .

Угол наклона

Угол между нормалью к поверхности мишени и траекторией полета снаряда.

Пробитие

Пробитие является полным, если снаряд, осколок снаряда или упрочняющий стержень пробил контрольную пластину, в которой появляется трещина или отверстие, что регистрируется светом 60-ваттной 110-вольтовой лампы, прошедшим через контрольную пластину.

Частичное пробитие

Любой удар снаряда, остановленного баллистической мишенью, должен считаться частичным пробитием.

Имитатор осколка

Снаряд из специального материала, форма и размер которого моделирует осколки, образующиеся при взрыве снаряда.

Метательное взрывчатое вещество

Быстрогоорящее вещество или смесь, сгорание которого создает давление, продвигающее снаряд через ствол оружия.

Отделяющийся поддон

Легкий носитель снаряда, в который помещается снаряд указанного калибра, обеспечивающий ввод снаряда в оружие большего калибра. Отделяющийся поддон обычно отбрасывается на небольшое расстояние от дула, и движение продолжает только подкалиберный снаряд.

Легкое стрелковое оружие

Оружие, выстреливающее сжатым газом снаряд диаметром не более 20 мм.

Боеприпасы легкого стрелкового оружия

Все боеприпасы диаметром не более 20 мм.

Раздельная броня

Бронева система, имеющая промежутки между элементами брони.

Дробление

Отделение части или расслаивание слоя материала вблизи места удара на передней или задней поверхности брони. Дробление может представлять угрозу, даже если сама броня осталась непробитой.

Скорость удара

Скорость снаряда при ударе по цели.

Расстояние до цели

Расстояние от точки, находящейся посередине между двумя триггерными устройствами, измеряющими начальную скорость снаряда, и целью.

Предельная баллистика

Раздел баллистики, исследующей воздействием оружия на цель, включая пробивание, образование осколков и воздействие взрыва, направленного взрыва, детонации, горения и боевых зажигательных веществ.

Испытываемый образец

Бронепластина, секция или деталь брони, испытываемая с целью оценки баллистических защитных свойств.

Баллистический предел V_{50}

Скорость, при которой вероятность пробития брони равна 50 процентам.

Контрольная пластина

Тонкий лист, расположенный за испытываемым образцом параллельно его плоскости. Используется для обнаружения полного пробития и наличия дробления.

Угол наклона снаряда

Угол наклона снаряда — это угол отклонения продольной оси снаряда от линии его полета в точке, расположенной настолько близко к точке удара, насколько позволяют возможности измерений.

5.2.3. Требования

Условия испытаний

Если не определено иначе, все баллистические испытания должны проводиться в стандартных атмосферных условиях при температуре $23 \pm 2^\circ\text{C}$ и относительной влажности $50 \pm 5\%$. Температура и влажность должны регистрироваться при каждом выстреле.

Установка оборудования

ЧАСЫ

Расстояние от плоскости среза дула до первой пары триггерных часов должно быть достаточно большим для предотвращения повреждения взрывом или задымления оптических устройств. Расстояние между плоскостями часов зависит от скорости снаряда. Оно может определяться и физическими ограничениями. Последняя пара часов должна помещаться на расстоянии не менее 1,22 м перед испытываемой мишенью. Она должна быть защищена от повреждения осколками.

КОНТРОЛЬНАЯ ПЛАСТИНА

Контрольная пластина делается из алюминиевого сплава 2024-T3, 2024-T4 или 5052. Ее размещают на расстоянии 150 ± 10 мм за испытываемым образцом параллельно его плоскости. Если испытывается каска, контрольная пластина жестко фиксируется внутри нее на расстоянии 51 мм от точки удара. В специальных случаях ее размер может быть меньше, чем указано в спецификациях для касок.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ СЕРИЯ ВЫСТРЕЛОВ

Предварительные выстрелы проводят по ряду причин. Это может быть ориентация образца, измерение скорости или разогрев ствола для получения воспроизводимой скорости снаряда. Дополнительные выстрелы производят согласно предъявляемым требованиям.

ИЗМЕРЕНИЕ УГЛА НАКЛОНА СНАРЯДА

После предварительной установки образца на нем определяют точку удара, и корректируют положение образца таким образом, чтобы точка удара приходилась на

предварительно определенной линии полета снаряда. Угол наклона оси снаряда измеряют, используя карты углов поворота, полученные при помощи фотографирования. Угол наклона не должен превышать 5° .

ПЕРВАЯ СЕРИЯ ВЫСТРЕЛОВ

При приемных испытаниях в первой серии выстрелов вес порохового заряда должен быть таким, чтобы скорость снаряда была на 23–30 м/с выше минимума, требуемого для вычисления V_{50} . При других испытаниях вес заряда должен быть таким, чтобы скорость снаряда была близка к предварительно оцененному значению V_{50} .

ИЗУЧЕНИЕ КОНТРОЛЬНОЙ ПЛАСТИНЫ

Контрольную пластину нужно осмотреть для определения пробития испытываемой брони. Если обнаружено отверстие, пробитие считают полным. Если имеется лишь небольшая вмятина, контрольную пластину нужно исследовать при помощи света для проверки, произошло ли полное пробитие мишени.

ПОСЛЕДУЮЩИЕ СЕРИИ ВЫСТРЕЛОВ

Если в первой серии выстрелов были обнаружены полные пробития, заряд пороха нужно уменьшить, чтобы скорость снизилась на 15–30 м/с. Если в первой серии выстрелов полные пробития не зарегистрированы, вес заряда увеличивают так, чтобы скорость возросла на 15 м/с. Увеличение или уменьшение веса пороха для изменения скорости ударника (на 15 м/с) проводят до тех пор, пока не будут достигнуты два частичных и одно полное пробитие. После получения частичного и полного пробития вес заряда изменяют так, чтобы приращение или уменьшение скорости составляло 15 м/с. Если не имеется специальных требований, испытания продолжают до тех пор, пока не будет определен баллистический предел V_{50} выстрелами по случайно определенным точкам образца.

ВЫЧИСЛЕНИЕ БАЛЛИСТИЧЕСКОГО ПРЕДЕЛА V_{50}

V_{50} вычисляют, определяя арифметически среднее значение скорости, при которой равны количества частичных и полных пробитий в пределах допустимого разброса скорости.

5.2.4. Отчет о баллистических испытаниях

Отчет о баллистических испытаниях должен содержать следующую информацию:

1. Информацию заказчика.
2. Описание испытательной установки.
3. Количество выстрелов.
4. Номер партии и количество образцов.
5. Номер пункта спецификации.
6. Пункт спецификации.
7. Описание материала брони.
8. Идентификацию материала каждого испытываемого образца.

9. Температуру и влажность испытательных устройств.
10. Дату испытания.
11. Имена персонала, проводящего испытания, и свидетелей.
12. Используемое оружие.
13. Используемый снаряд.
14. Вес снаряда.
15. Тип пороха.
16. Вес пороха при каждом выстреле.
17. Скорость удара, используемую для вычисления V_{50} при самой высокой скорости частичного пробития, самой низкой скорости полного пробития, разброс скорости и скорости при каждой серии выстрелов.
18. Характеристики контрольной пластины.
19. Вычисление баллистического предела V_{50} .
20. Особенности проведения испытаний или поведения материала.

5.2.5. Принятие к производству или отклонение

Испытанные образцы брони должны удовлетворять минимальным требованиям к значению V_{50} , предъявляемым к броне. При неспособности любых испытываемых образцов удовлетворить минимальным требованиям баллистического предела V_{50} должна отклоняться вся представляемая ими партия.

5.3. Стандарт NIJ 0101.04

Это один из наиболее широко используемых стандартов Национального института правосудия (NIJ) США. Стандарт NIJ 0.0101.04 начал действовать с сентября 2000 г. Он является основой соответствующих стандартов во многих странах Южной Америки, Европы и Азии. Этот стандарт устанавливает минимальные требования к характеристикам материала и метод испытаний средств индивидуальной защиты от выстрелов из легкого оружия и винтовок. Стандарт определяет также критерии классификации бронежилетов и последовательность испытаний.

Противобаллистическую индивидуальную броню стандарт классифицирует на семь уровней защиты. Уровни защиты I, IIА, II и IIIА соответствуют возрастающему уровню защиты от пистолетных выстрелов. Броня III и IV уровней защищает от мощных винтовок и предназначена для использования лишь в тактических условиях.

5.3.1. Выбор бронежилетов для испытания и сертификации

I, IIА, II и IIIА УРОВНИ ЗАЩИТЫ

Испытываются шесть полных бронежилетов с окружностью груди 117–122 см для мужчин и 107–112 см для женщин. Для баллистических испытаний из них случайно отбирают пять бронежилетов. Четыре бронежилета испытывают на пробитие и для определения величины запреградной деформации, а один бронежилет используют для определения баллистического предела.



III УРОВНЕНЬ ЗАЩИТЫ

На испытания представляют четыре полных жилета или панели размером не менее 254×305 мм. Из этой группы случайно выбирают два образца. Два образца испытывают на пробитие и для определения величины запреградной деформации, а один используют для определения баллистического предела. Один оставшийся возвращают.

IV УРОВНЕНЬ ЗАЩИТЫ

На испытания представляют девять полных жилетов или панели размером не менее 254×203 мм. Из этой группы случайно выбирают восемь образцов. Два образца испытывают на пробитие и для определения величины запреградной деформации, а шесть используют для определения баллистического предела. Один оставшийся возвращают.

5.3.2. Материалы поддержки брони

КОНСТРУКЦИЯ ПОДДЕРЖИВАЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ

При испытаниях должны быть как минимум три установки, к которым крепится испытываемый образец, за которым имеется слой поддерживающего пластилина № 1. Внутренний размер поддерживающего короба должен быть равен 610×610 мм. Его глубина должна составлять 140 мм. Короб, заполняемый слоем пластилина, должен быть сменным. Его задняя часть делается из древесины или фанеры толщиной 19,1 мм.

ПОДДЕРЖИВАЮЩИЙ КОРОБ

Боковые стороны короба делают из твердой древесины или металла. Короб заполняют пластилином № 1, который должен иметь минимально возможное содержание пустот.

5.3.3. Метод испытания и измерение запреградной деформации

При классификационных испытаниях средства индивидуальной защиты корпуса военнослужащего должны успешно пройти ряд испытаний, состоящих из двух частей. В первой серии баллистических испытаний определяют общие характеристики брони, оцениваемые по критерию успех/неудача. Во второй серии определяется запреградная деформация и статистический разброс характеристик системы.

5.3.4. Определение пробития и измерение запреградной деформации

Весь бронезилет и бронепластины обстреливают из оружия, указанного в табл. 5.1. При испытаниях измеряют два значения запреградной деформации и записывают результаты испытаний на успех/пробитие брони. В этой серии испытаний используют пластилин № 1, находящийся в прямом контакте с обратной поверхностью бронепанели. Запреградную деформацию поддерживающего пластилина измеряют, если не произошло перфорации бронепакета.

Таблица 5.1. Основные требования стандарта NIJ 0101.04 P-BFS

Уровень защиты	Серия испытаний	Тип пули	Вес пули (г)	Скорость (± 9 м/с)	Выстрелов по детали под углом падения 0°	Глубина запреградн. деформации (мм)	Выстрелов по детали под углом падения 30°	Выстрелов по панели	Выстрелов по образцу	Выстрелов пулями одного типа	Всего выстрелов
I	1	.22 калибр LR LRN	2,6	329	4	44	2	6	12	24	48
	2	.380 ACP FMJ RN	6,2	4 322	44	2	6	12	24		
IIA	1	9 мм FMJ RN	8,0	341	4	44	2	6	12	24	48
	2	40 S&W FMJ	11,7	322	4	44	2	6	12	24	
II	1	9 мм FMJ RN	8,0	367	4	44	2	6	12	24	48
	2	357 Mag JSP	10,2	436	4	44	2	6	12	24	
IIIA	1	9 мм FMJ RN	8,2	436	4	44	2	6	12	24	48
	2	44 Mag JHP	15,6	436	4	44	2	6	12	24	
III	1	7,62 НАТО FMJ	9,6	838	1	44	0	6	12	12	12
IV	1	.30 калибр бронебойн. M2	10,8	869	1	44	0	1	2	2	2
Специальный	*	*	*	*	*	44	*	*	*	*	*

Панель — передняя или задняя вставляемая деталь бронесистемы; образец — полная бронесистема, включающая все панели (переднюю и заднюю).

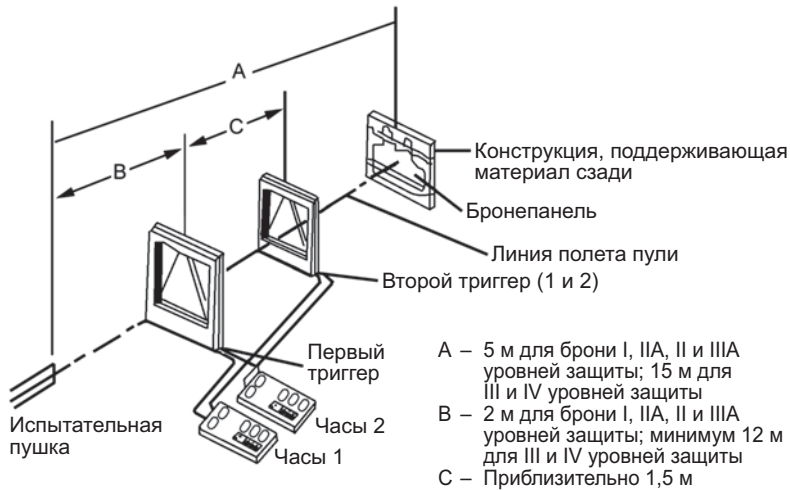


Рис. 5.1. Баллистическая испытательная установка

5.3.5. Вес

Бронематериал испытывают с помощью испытательной пушки ANSI/SAAMI, установленной на универсальной стойке ANSI/SAAMI. Коммерческое огнестрельное оружие использоваться не должно.

5.3.6. Измерение скорости

Скорость пули определяют при помощи двух независимых часов, и скоростью пули считают среднее значение полученных значений. Первый фотоэкран спускового механизма хронометра помещают на расстоянии не менее двух метров от среза дула испытательной пушки, как показано на рис. 5.1.

5.3.7. Условия испытаний

Бронежилеты I, IIA и II уровней защиты проверяют после 12 часов хранения в испытываемых условиях (21°C, 50% влажности), а также во влажных условиях, как определено в стандарте 0101.04.

5.3.8. Подготовка поддерживающего материала

Пластин № 1 выдерживают по меньшей мере три часа при температуре выше 29°C. Затем его калибруют, бросая на него с высоты двух метров стальной шар диаметром 63,5 мм и весом 1043 г. Среднее значение глубины пяти вмятин должно быть 20 ± 3 мм.

5.3.9. Испытания бронежилета

После выбора типа пули пушку разогревают, производя несколько выстрелов, и крепят бронежилет ремнями шириной 51 мм к поддерживающей структуре.

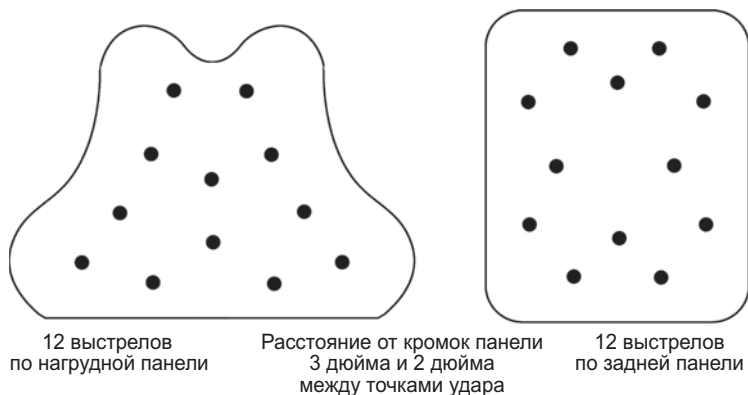


Рис. 5.2. Положение точек удара по бронезилету

Выстрелы по бронезилету

Четыре бронеконкомплекта, представляющие собой полный бронезилет или только защиту груди и спины, тестируют шестью правильными выстрелами пуль. Рис. 5.2 демонстрирует положение точек удара. Полное испытание проводят 48 пулевыми выстрелами. Ни одна пуля не должна пробить бронезилет. Аналогично, ни одно из 16-ти измеренных значений запреградной деформации в нормальном направлении не должно превышать 44 мм.

Испытания бронезилетов проводят также при угле падения 60° и во влажных условиях.

5.3.10. Вычисление баллистического предела

Для испытания бронезилетов I, II, III и IV уровней защиты требуется минимум 12 выстрелов, включающих пять частичных и пять полных пробитий. Для брони III и IV уровней защиты требуются минимум 6 выстрелов, включающих три частичные и три полные пробития. Специальные испытания могут потребовать дополнительных данных о частичных и полных пробитиях.

5.3.11. Отчет

Отчет об испытаниях представляется не позднее чем через 10 дней после их проведения в офис NIJ. Он должен содержать результаты испытаний и другие документы.

5.4. PSDB стандарт испытания бронезилетов

PSDB стандарт описывает метод испытаний, принятый полицейским управлением Великобритании для оценки уровня защиты от огнестрельного оружия.

5.4.1. Общие требования

Система защиты должна обеспечить защиту жизненно важных органов человека, например, сердца, печени, позвоночника, почек и селезенки от поражения

и травматического воздействия пули при минимальных ограничениях подвижности тела.

Баллистические вставки должны быть сменными. Для снижения уровня травматического воздействия вместе с броней должен использоваться отделяемый противотравматический пакет.

5.4.2. Другие требования

Стандарт описывает детали испытаний в сухих и влажных условиях (после погружения в воду на один час).

УСТАНОВКА БРОНИ

Перед испытаниями бронезащиту тела размещают вертикально на передней поверхности короба размером 420 × 350 × 100 мм, заполненного свободным от пор пластилином Roma № 1. Пластилин калибруют, используя стальной цилиндр со сферическим наконечником.

УРОВЕНЬ ЗАЩИТЫ, ОРУЖИЕ, БОЕПРИПАСЫ, ВЕС ПУЛИ, РАССТОЯНИЕ И СКОРОСТЬ

Эти параметры описаны в табл. 5.2. Минимальное расстояние до брони для уровней защиты HG1 и HG2 должно быть 5 м, а для защиты от винтовки и дробовика – 10 м. Стандарт испытаний описывает положения точек удара. Выстрелы 1, 2, 3 и 6 проводятся под углом 90°, а выстрелы 4 и 5 – под углом 60°.

ПРЕДЕЛЬНАЯ ЗАПРЕГРАДНАЯ ДЕФОРМАЦИЯ

Максимально допустимая запреградная деформация равна 25 мм.

ТРЕБОВАНИЯ

При испытаниях броню не должна пробить ни одна пуля с указанными выше скоростями, а запреградное смещение не должно превышать 25 мм. При испытании

Таблица 5.2. Уровни защиты

Уровень защиты	Калибр	Боеприпас	Вес пули (г)	Скорость (м/с)
HG-1	9 мм	9 мм ЦМО Dynamit Nobel	8,0	360±10
	0.357" Магнум	Norma	10,2	385±10
HG-2	9 мм	9 мм ЦМО Dynamit Nobel	8,0	425±10
	0.357" Магнум	Norma	10,2	450±10
	0.44" Магнум	Remington	15,6	440±10
RF1 ружье	7,62 мм	Royal Ordnance Пуля NATO	9,3	830±15
SG1 дробовик	12 калибр	Винчестер 1 унция	28,4	435±25

ЦМО – с цельнометаллической оболочкой.

жестких бронепанелей ни один осколок панели, металлический или керамический, не должен оказаться в пластине.

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ОТЧЕТА

Детальный отчет описывает скорость выстрелов, результаты в форме успех/неуспех, а также глубину запреградной деформации для каждого выстрела.

5.5. Соглашение НАТО STANAG 2920 для баллистических испытаний индивидуальной брони

5.5.1. Цель

Цель этого соглашения состоит в стандартизации принципов определения уровней баллистической защиты корпуса тела и касок, а также материалов, используемых при производстве этих изделий.

5.5.2. Общее

Соглашение предназначено для испытания и сравнения бронематериалов, защищающих от пуль стрелкового оружия и имитаторов осколков.

5.5.3. Испытательное оборудование

РАЗМЕР СТВОЛА

Удар может производиться любой пулей, от которой требуется защита. Имитатор осколка снаряда определяется стандартом США MIL-P-46593. Предпочтителен осколок калибра 5,385 мм FSP A3/6723/1 (весом 1,02 г). При испытании защиты от ружей рекомендуется использовать головку гильзы того же калибра, что и пуля.

ДИАПАЗОН СКОРОСТЕЙ

Средняя скорость выстрелов должна быть в пределах 80 м/с выше и ниже ожидаемого баллистического предела, а скорость пули должна контролироваться с точностью ± 15 м/с.

СТВОЛ

Выстрел производится из пушки, калибр которой равен калибру винтовки. Выстрел осколком может производиться из гладкоствольной пушки с использованием отделяющегося поддона.

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ

Время измеряется при помощи двух часов.

УГОЛ НАКЛОНА СНАРЯДА

Для проверки степени эллиптичности отверстия должен использоваться жесткий материал типа картона.

РАЗМЕР БРОНИ И ЕЕ КРЕПЛЕНИЕ

Материал брони должен быть охарактеризован максимально точно. Он должен жестко крепиться болтами или зажимами к твердой конструкции, чтобы удар снарядом был перпендикулярен поверхности брони. Броня не должна иметь поддержки на расстоянии 30 мм от любой точки крепления.

СИСТЕМА КОНТРОЛЯ

Система контроля состоит из листа алюминия толщиной 0,5 мм, помещаемого за броней на расстоянии 15 см.

5.5.4. Методы испытания

ВНЕШНИЕ УСЛОВИЯ

Броня выдерживается при температуре $20 \pm 2^\circ\text{C}$ при относительной влажности $65 \pm 5\%$ в соответствии со стандартом ISO 554-1976.

КОЛИЧЕСТВО ВЫСТРЕЛОВ

По броне делается по крайней мере шесть выстрелов, и измеряется скорость полета каждой пули. Учитываются только правильные выстрелы, поражающие броню под углом не более 5° к нормали. Расстояние от точки удара до точек крепления или поддержки, краев панели, точек предыдущего удара или мест деформации материала должно быть не менее 30 мм. В случае брони на основе ткани выстрелы не должны производиться в те же самые первичные нити.

ПОЛНОЕ И ЧАСТИЧНОЕ ПРОБИТИЕ

Пробитие считается полным, если в результате выстрела снаряд пробил мишень или оказалась перфорированной система контроля. Во всех остальных случаях пробитие считается частичным.

БАЛЛИСТИЧЕСКИЙ ПРЕДЕЛ V_{50}

Баллистический предел V_{50} определяют как скорость, для которой вероятность пробития равна точно 0,5. Он определяется изменением количества пороха, увеличивая или уменьшая скорость пули на 30 м/с.

Количество выстрелов при определении V_{50} должно обеспечивать три полных и три частичных пробития в интервале изменения скорости ± 40 м/с, или пять полных и пять частичных пробития в интервале ± 50 м/с, или семь полных и семь частичных пробитий в интервале ± 60 м/с.

5.5.5. Отчет

Отчет о результатах испытаний или серии испытаний представляется в нескольких пунктах. Они включают полное описание материала, его поверхностную плотность, толщину, тип пули или фрагмента, V_{50} , самую высокую скорость снаряда при частичном пробитии и самую низкую скорость при полном пробитии, разброс скорости при вычислении баллистического предела V_{50} .

5.6. Международный стандарт ISO/FDIS 14876. Бронезащита тела

ISO (Международная организация по стандартизации) является Всемирной федерацией национальных бюро стандартов. Стандарт испытаний ISO 14876-1 состоит из следующих частей:

Часть 1. Общие требования.

Часть 2. Стойкость к удару пули. Требования и методы испытаний.

Часть 3. Стойкость к удару ножом. Требования и методы испытаний.

Часть 4. Стойкость к удару шилом или заточкой. Требования и методы испытаний.

Ниже мы дадим лишь краткое описание частей, касающихся бронезащитных жилетов.

5.6.1. Введение

Следует понимать, что ни одна броня не может обеспечить полную защиту тела от поражения любым оружием. Однако при использовании бронезащиты вероятность и серьезность поражения уменьшаются.

5.6.2. Предмет

Европейский стандарт определяет общие требования, определяет классы бронезащитных жилетов, их размер, площадь защищаемой области, эргономические характеристики, требования безвредности и помещаемую на бронезащитном жилете информацию. Он также описывает методы испытания.

5.6.3. Классы бронезащитных жилетов

Бронезащитные жилеты классифицируют следующим образом.

- **Класс А**
Бронезащитный жилет не защищает верхнюю часть плеча и боковые части туловища. Зазор между нижним краем бронезащитного жилета и верхом тазовых костей не должен превышать 70 мм. Класс А используется только в качестве тайной бронезащиты.
- **Класс В**
Бронезащитный жилет не защищает верхнюю часть плеча, но закрывает боковые части туловища. Зазор между нижним краем бронезащитного жилета и верхом тазовых костей не должен превышать 20 мм. Обычно класс В служит тайной защитой, но может быть и открытой бронезащитой тела.
- **Класс С**
Бронезащитный жилет обеспечивает защиту верха плеча. Закрывает бока туловища. Зазор между нижним краем бронезащитного жилета и верхом тазовых костей не должен превышать 20 мм.
- **Класс D**
Аналогичен классу С, но нижний край бронезащитного жилета находится ниже верха тазовых костей не менее чем на 40 мм.

- Класс E
Защищает таз и крепится к броне другого класса.
- Класс F
Представляет собой воротник, дополняющий броню другого класса.
- Класс G
Броня класса G представляет собой формованные бронепластины, одиночные или множественные, предназначенные для обеспечения более высокого уровня защиты при ношении совместно с бронежилетами класса A, B, C или D.

5.6.4. Размеры

Размеры брони соответствуют стандарту EN 340. Размеры бронезащиты тела должны быть основаны по крайней мере на трех размерах тела мужчин и на четырех размерах тела женщин.

5.6.5. Ограничения

Бронежилет определенного размера должен регулироваться более чем на 50 мм на груди или на спине или на 100 мм в единственном центральном месте.

Бронежилет не должен скользить по телу при изменении положения рук. При приложении силы вертикально вверх к креплению на задней части шейной части одежды бронежилет не должен своими краями давить на горло или подбородок.

МОДУЛЬНЫЕ ВСТАВКИ

Вставки типа формованных бронепластин должны надежно крепиться к бронежилету или помещаться в закрытые карманы. Пластины не должны отделяться от бронежилета или вытаскиваться из карманов.

5.6.6. Эргономические требования

Бронезащита тела должна разрабатываться так, чтобы дискомфорт при ее использовании был минимален. При нормальном движении жесткие края и грубые поверхности не должны причинять беспокойства. Бронежилет не должен ограничивать движение головы, рук, туловища и ног. Он не должен создавать серьезно-го теплового дискомфорта и не должен приводить к накоплению пота.

5.6.7. Методы испытаний

Погрешность измерений не должна превышать $\pm 2\%$ от величины измеряемой характеристики.

ЭРГОНОМИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ

Эргономические испытания мужских и женских бронежилетов проводят на образцах трех размеров. Размеры должны соответствовать минимальной, средней и наибольшей возможной регулировке брони каждого размера.

ЧИСТКА

Бронезащита тела будет очищаться пять раз способами, указываемыми изготовителем бронезиленета. Между циклами чистки бронезащита полностью высушивается.

СТОЙКОСТЬ К ПРОБИТИЮ И ЗАПРЕГРАДНОЕ СМЕЩЕНИЕ

При правильном выстреле броня не должна допускать пробития. Глубина запреградного смещения не должна превышать 44 мм. Исключением является защита женских грудей, для которых глубина запреградного смещения не лимитируется.

5.6.8. Уровни защиты

Полная процедура испытаний для каждого уровня защиты должна включать все испытания, внесенные в табл. 5.3.

5.6.9. Крепление испытываемых образцов

Система крепления образцов должна иметь короб и ремни. При баллистических испытаниях расстояние от кромки ремней до точки удара должно быть не менее 50 мм.

5.6.10. Поддерживающий материал

Поддерживающий материал должен представлять собой органический или минеральный глиноподобный материал (как правило, это пластилин Roma № 1). Поддерживающий материал нужно заменять после каждой тысячи выстрелов, после его загрязнения или через два года после первого использования.

Воспроизводимость свойств пластилина определяют, бросая на него стальной шар и измеряя глубину появившейся вмятины.

5.6.11. Восстановление поддерживающего материала

Перед вторым и последующими выстрелами пластилин нужно возвращать в первоначальное состояние. Испытываемый образец повторно крепят и разгла-

Таблица 5.3. Спецификация пуль и патронов

Уровень	Боеприпас	Масса пули (г)	Скорость пули (м/с)
1	9 × 19 мм, полная стальная оболочка	8,0±0,2	360±10
2	9 × 19 мм, полная стальная оболочка	8,0±0,2	415±10
3	9 × 19 мм, полная стальная оболочка .357 Магнум, полная стальная оболочка (коническая пуля)	8,0 ±0,2 10,2 ±0,2	425±10 430±10
4	5,56 × 45 мм, M193 7,62 × 51 мм пуля НАТО	3,6±0,2 9,4±0,2	970±15 830±15
5	7,62 × 51 мм, AP с упрочненным стальным сердечником	9,7±0,2	820±15
S	12/70 калибр, жесткая свинцовая болванка	32,0±0,5	425± 10

живают на поддерживающем материале. Бронежилет приводят в первоначальное состояние, разглаживая слои, смещенные при ударе друг относительно друга.

5.6.12. Точки удара

Точки выстрелов по бронежилету и поддерживающим пластилиновым слоем должны удовлетворять следующим критериям:

- Все точки удара должны находиться в пределах отмеченной области.
- Расстояние от всех точек удара до края поддерживающего короба должно быть не менее 50 мм.
- Расстояние от всех точек удара до края ремней должно быть не менее 50 мм.
- Расстояние от точек третьего и последующих ударов до прямой линии, проходящей через две любые точки предыдущих ударов, должно быть не менее 10 мм.
- Точки удара при перпендикулярном выстреле по броне 1, 2 и 3 уровней защиты должны находиться на расстоянии:
 - не менее 75 мм от точки предыдущего удара;
 - не менее 75 мм от предыдущего удара, произведенного под углом к броне;
 - не менее 200 мм от точки любого предыдущего удара.
- Точки удара при выстреле под углом 60° для брони 1, 2 и 3 уровней защиты должны находиться на расстоянии:
 - не менее 75 мм от точки предыдущего удара;
 - не менее 75 мм от предыдущего удара, произведенного под углом к броне;
 - не менее 200 мм от точки любого предыдущего удара.

5.6.13. Испытания во влажных условиях

Бронезащита тела должна погружаться вертикально в сосуд с деионизированной или дистиллированной водой при температуре 15–20°C на 60±5 мин. Затем ее нужно подвесить на 3±0,5 мин. для стекания воды и испытать в пределах 30 мин.

5.6.14. Отчет

Отчет должен содержать следующую информацию:

- информацию об изготовителе, идентификацию, название или код, тип, размеры образца, номер партии и дату производства;
- уровень защиты;
- информацию о дополнительных испытаниях и, соответственно, форме ударников, которыми испытывался образец по условиям технического задания;
- дату и список выполненных испытаний.

5.7. Стандарт испытаний касок NIJ 0106.01

Этот стандарт последний раз был пересмотрен в декабре 1981 г., и сейчас NIJ разрабатывает новый стандарт. Данный стандарт устанавливает требования к каскам с определенным уровнем защиты и метод их испытания.

5.7.1. Уровни защиты

Каски делят на три уровня защиты.

Уровень I (22LR-38 специальный)

Это самый низкий уровень защиты от баллистической угрозы.

Уровень IIA

Каска должна защищать от выстрелов низкоскоростными пулями из Магнума 357 и 9-мм пистолетными с цельнометаллической оболочкой.

Уровень II

Каска должна защищать от более скоростных пуль длинноствольного оружия, высокоскоростных пуль Магнума 357 и 9-мм пистолетными пулями с цельнометаллической оболочкой.

Специальный уровень

В специальных случаях покупатель может изменить требования.

По сравнению с бронезилетами, стандарт не предусматривает испытание касок IIIA, III и IV уровней защиты. В принципе, можно сделать каски IIIA уровня защиты (останавливающие высокоскоростные пули Магнума 357 и Магнума 44), III уровня (защита от винтовочных пуль) и IV уровня (защита от бронебойных пуль). Однако человеческая шея имеет малую жесткость и не может противостоять удару пули с кинетической энергией более 100 Дж.

5.7.2. Выборка и метод испытания

Испытываются три каски размера $7\frac{1}{4}$ и две каски случайно выбранного размера. Загрузку пороха в некоторых случаях можно производить вручную, чтобы скорость пуль соответствовала табл. 5.4. Для классификации уровня защиты каждый образец испытывают при скоростях удара, описанных в табл. 5.4.

5.7.3. Манекен головы

Выстрелы

При испытаниях каски манекен головы должен иметь размер $7\frac{1}{4}$ (рис. 5.3). При испытании височной части каски контрольную пластину нужно фиксировать, как показано на рис. 5.3. При испытании лобной и задней частей каски манекен должен быть заменен и контрольную пластину нужно фиксировать в корональной плоскости (рис. 5.3).

Таблица 5.4. Методы испытаний касок

Уровень защиты	Параметры испытаний			Требования	
	Боеприпас	Вес пули (г)	Скорость (м/с)	Количество правильных выстрелов	Количество пробитий
I	22 свинцовая	2,6	320±12	4	0
	38 специальн.	10,2	259±15	0	0
IIA	357 Магнум	10,2	381±15	4	0
	ПНО 9 мм ЦМО	8,0	332±15	4	0
II	357 Магнум	10,2	425±15	4	0
	ПНО 9 мм ЦМО	8,0	358±15	4	0

Сокращения: ЦМО – с цельнометаллической оболочкой, ПНО – с полым наконечником, покрытым оболочкой.

Контрольная пластина должна делаться из алюминиевого сплава 2024-T3 или 2024-T4 и иметь толщину 0,5 мм.

Испытание манекена головы

Манекен головы делается из сплава магния или другого материала, рекомендованного стандартом NIJ 0106.01. Он должен имитировать ускорение человеческой головы при ударе пули. Из-за множества причин в настоящее время в США отсутствуют лаборатории, позволяющие проводить такие испытания.

5.7.4. Испытания на пробитие

Схема испытательной установки описана ниже. Триггерное устройство измерения скорости пули помещается на расстоянии, указанном на рис. 5.1. Сначала производится предварительный выстрел, определяющий линию полета пули.

Затем в манекен, используемый при испытаниях лобной и затылочной частей каски, вставляют контрольную пластину, размещают каску и жестко крепят ее

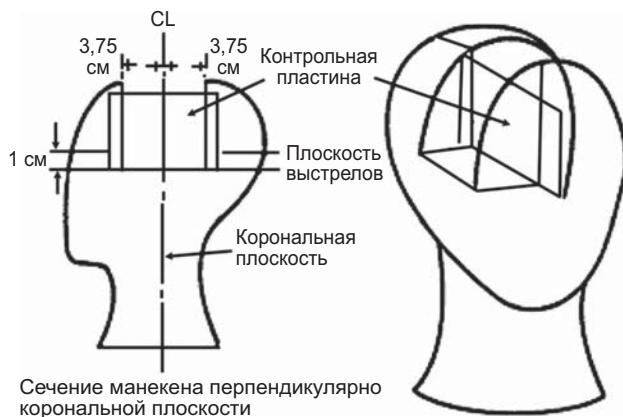


Рис. 5.3. Манекен головы

ремнем к подбородку. Пуля не должна сталкиваться с ремнем. Манекен с каской размещают так, чтобы произвести выстрел в нужную точку, а угол падения пули был равен 90° к поверхности каски.

Первый выстрел производят в переднюю часть каски. Выстрел должен производиться в точку, находящуюся на расстоянии не выше 90 мм от плоскости основания и не более чем 50 мм от плоскости симметрии каски. После этого регистрируют скорость пули, исследуют каску и контрольную пластину для определения, произошло ли пробитие и соответствует ли точка удара заранее определенной области. Если пробитие отсутствует, каску снова помещают на манекен и производят четыре выстрела в каждую из сторон каски на расстоянии не выше 50 мм выше плоскости основания и не более 75 мм от плоскости симметрии. Если пробития отсутствуют, испытания повторяют на второй каске, которую перед этим погружают на 2–4 часа в воду с температурой $25 \pm 5^\circ\text{C}$.

Отчет о результатах испытаний должен содержать описание испытанных касок, например, их форму, размер и вес. Описывается тип пули, ее скорость, область поражения на каске и отмечается, имеются ли пробития.

5.8. Бронезащита транспортных средств

Для бронирования транспортных средств используют материалы, аналогичные жесткой формованной броне в бронезилетах. Имеются случаи, когда военное служение США в Ираке использовали бронематериал специфического назначения в совершенно иных целях.

По мере развития и уменьшения веса бронематериалов изменяются и стандарты испытаний. Некоторые стандарты испытания средств индивидуальной защиты могут использоваться для испытания защиты транспортных средств, например, формованных панелей на основе тканых арамидных препрегов. Отметим, что технология производства брони для защиты транспортных средств может несколько отличаться от технологии изготовления нагрудных бронепластин.

Панели различного размера формуют в автоклавах и прессах высокого давления.

5.9. Стандарт испытания брони NIJ 0108

Имеется целый ряд облегченных бронематериалов, разработанных для защиты от легкого и мощного оружия. Эти материалы используют в переносных щитах, бронированных щитах для разгона массовых беспорядков, бронированных помещениях охраны, полицейских блокпостах, временном жилье военнослужащих и жилых транспортных средствах.

Такие бронематериалы могут состоять из металлов, керамики, прозрачного стекла, тканей, войлокообразных материалов и волокнистых композиционных материалов.

Таблица 5.5. Классификация жесткой брони

Уровень защиты	Боеприпас	Вес пули (г)*	Длина ствола (см)	Скорость (м/с)
I	22 свинцовая	2,6	15–16,5	320±12
	38 специальн.	10,2	15–16,5	259±15
IIA	357 Магнум ПНО	10,2	10–12	381±15
	9 мм ЦМО	8,0		332±15
II	357 Магнум ПНО	10,2	15–16,5	425±15
	9 мм ЦМО	8,0	15–16,5	358±15
IIIA	44 Магнум	15,55	14–16	426±15
	9 мм ЦМО	8,0	24-26	426±15
IV	7,62 мм 308 Винчестер ЦМО	9,7	56	838±15
V	30-06 бронебойн.	10,8	56	868±15
Специальный	Как предписано	Как предписано	Как предписано	Как предписано

* Пять пуль при испытании брони I, IIA, II, IIIA и IV уровней защиты, одной пули для V уровня защиты.

ЦМО – цельнометаллическая оболочка.

5.9.1. Классификация

По этому стандарту материалы делятся на следующие уровни баллистической защиты:

- уровень I (22 I.R; 38 Специальный),
- уровень IIA (9 мм ЦМО, Магнум 357),
- уровень II (9 мм ЦМО, Магнум 357),
- уровень IIIA (9 мм ЦМО, Магнум 44),
- уровень III (пуля M80),
- уровень IV (30-06 AP),
- специальные уровни (табл. 5.5).

5.9.2. Баллистические испытания

После крепления оружия и прицеливания производятся несколько предварительных выстрелов по контрольной пластине для определения точки удара.

Испытываемый образец крепится на расстоянии 5 м от оружия. Контрольная пластина размещается на расстоянии 15 см за образцом. Производится первая серия выстрелов, и при помощи часов измеряется скорость пули. Исследуется контрольная пластина и образец для определения, произошло ли пробитие и был ли удар правильным.

Если пробития отсутствуют, образец крепится повторно и производятся дополнительные серии испытаний. Места ударов распределяются по возможности равномерно, чтобы испытать каждую часть образца.

СПЕЦИФИКАЦИИ

5.10. Бронезащита тела «Перехватчик»

«Перехватчик» представляет собой систему защиты тела от различных угроз и состоит из бронезилета и модульных элементов, изменяющих вес брони и уровень защиты. «Перехватчик» функционально объединяется с модульными элементами.

5.10.1. Компоненты

- Основной бронезилет.
- Воротник.
- Защита горла.
- Защита паха.
- Защитные вставки от стрелкового оружия.

5.10.2. Размеры

Самый малый, малый, средний, большой и очень большой. Защита горла имеет только один размер.

5.10.3. Особенности

Антибаллистическая защита

«Перехватчик» обеспечивает защиту от множественных ударов разнообразными осколками, пистолетными и винтовочными пулями. В частности:

- пулями $7,62 \times 51$ мм винтовки М-80 НАТО,
- советскими пулями $7,62 \times 54$ мм,
- пулями М-855 калибром 5,56 мм армии США.

Функциональная интеграция

Все компоненты «Перехватчика» должны иметь возможность функционального соединения при всех конфигурациях системы. Все компоненты системы должны быть полностью взаимозаменяемыми с другими системами того же размера без ухудшения функциональных характеристик.

Удаление и введение вставок

В бронезилет должны легко вставляться дополнительные антибаллистические пластины. Промежуток между основным носителем и вставкой не должен превышать допустимого значения.

Одевание/снятие

Система «Перехватчика» должна легко собираться, одеваться и регулироваться без посторонней помощи максимум за 30 или 15 сек.

Таблица 5.6. Вес системы

Изделие	Площадь защиты (дюйм ²)	Вес (фунтов)
Бронежилет и воротник	755	8,50
Защита горла	18	0,25
Защита паха	70	0,70

Одевание/снятие воротника

При движении воротник не должен легко сниматься. Он должен легко крепиться и сниматься, но для этого должна требоваться специальная операция. Воротник не должен беспокоить военнослужащего при ношении и не должен отрываться, если бронежилет держат за любой край или за край воротника.

5.10.4. Площадь защиты и вес

Площадь защиты и вес бронесистемы среднего размера описаны в табл. 5.6.

5.10.5. Внешние условия

Все элементы системы «Перехватчика» должны длительно использоваться во всех допустимых климатических условиях днем и ночью. Рабочие характеристики всех частей системы не должны опускаться ниже минимального уровня, указанного в документации. Допустимые климатические условия включают повышенную температуру в сухой и влажной атмосфере, постоянную повышенную влажность, переменную влажность, постоянную повышенную температуру, холод, серьезный холод и воздействие грибков.

Влажные условия

Для моделирования влажных условий используют морскую воду. Антибаллистический материал полностью погружают в морскую воду температурой $21 \pm 3^\circ\text{C}$ на 24 час. Затем для стекания воды его подвешивают на 60 с, после чего в пределах 5 мин. проводят испытания.

Ускоренное старение

Противобаллистическую систему помещают в атмосферу чистого кислорода и выдерживают в камере при давлении 300 ± 10 psi в течение 16–96 час. При этом не должно наблюдаться визуальное изменение вида образца.

Загрязнение техническими жидкостями

Противобаллистическая система должна погружаться на 24 час. при комнатной температуре в каждую из следующих жидкостей: моторное масло, бензин и оружейную смазку. После этого образец подвешивают вертикально на три минуты для стекания жидкости. Чтобы предотвратить пачкание, поверхность протирают для удаления избытка масла, после чего быстро проводят баллистические испытания.

Другие требования

ВРЕМЯ СЛУЖБЫ

Если не имеется баллистических поражений, система должна непрерывно служить в типичных полевых условиях в течение 10 лет. При промежуточном хранении на складе от одного месяца до пяти лет максимум она должна служить в течение 15 лет.

НАДЕЖНОСТЬ

«Перехватчик» не должен иметь эксплуатационных отказов при непрерывном использовании в течение 120 дней. В первые два года непрерывной эксплуатации весь ремонт должен выполняться пользователем.

КАМУФЛЯЖ

Камуфляж зависит от окружающего ландшафта. Он должен уменьшать заметность изделия в видимом и ИК (близком и далеком) диапазонах до приемлемого уровня.

СТОЙКОСТЬ К ИСТИРАНИЮ

Все смежные слои системы должны выдерживать минимум 2000 циклов истирания без нарушения свойств поверхности и расслаивания.

5.11. Вставки

Для обеспечения защиты от мощных винтовок в противоосколочный бронезиленет «Перехватчика» вставляют дополнительные бронепластины. Защитные вставки являются частью системы, основой которой является гибкий противоосколочный противопистолетный бронезиленет. Защитные вставки используют совместно с гибкой подкладкой, вместе с которой они образуют полную броню.

5.11.1. Конструкция защитных вставок

Защитные вставки состоят из высокопрочных керамических монопластин (из карбида кремния или карбида бора) с двойной кривизной поверхности, приклеенной к формованной пластине на основе волокнистого материала Spectra Shield. Кривизна поддерживающего материала должна соответствовать кривизне керамики.

5.11.2. Процесс формования защитных вставок

Керамическая монопластина имеет двойную кривизну, зависящую от размера жилета. Керамика может использоваться отдельно или усиливаться подслоем волокнистого композита. Защитные слои органопластика на основе СВМПЭ волокон Spectra и термопластичной матрицы формуют в автоклаве или в прессформе. Керамику и композит соединяют с помощью клея.

5.11.3. Вес

Защитные вставки всех размеров должны иметь однородную поверхностную плотность.

5.11.4. Толщина

Защитные вставки всех размеров должны иметь одинаковую толщину на всей поверхности.

5.12. Нагрудные пластины, используемые в странах Тихоокеанского кольца

Для защиты от мощного стрелкового оружия в гибкий противоосколочный бронезиловый вставляют жесткие бронепластины. Спецификация описывает требования к защитным свойствам бронепластин.

5.12.1. Форма нагрудных бронепластин

Нагрудные бронепластины должны иметь изогнутую форму. Наспинные пластины могут быть как плоскими, так и изогнутыми. Пластины обоих типов должны ясно маркироваться.

5.12.2. Размеры пластин

Нагрудная и наспинная пластины должны иметь размер 300 × 250 мм.

5.12.3. Толщина пластин

Пластины должны иметь однородную толщину, не превышающую 18 мм.

5.12.4. Вес пластины

Вес пластин обоих типов не должен превышать 1,6 кг.

5.12.5. Баллистическая стойкость

Противобаллистические пластины должны обеспечивать защиту от многократных выстрелов из различных пистолетов и винтовок.

5.12.6. Образцы

Перед началом массового производства подрядчик должен изготовить шесть образцов нагрудных пластин для их испытания.

5.12.7. Баллистические испытания

Испытания выполняются определенной заказчиком независимой баллистической лабораторией, в своей стране или за ее пределами. Испытываются три из пяти комплектов нагрудных пластин каждой партии. При отказе одного из образцов бракуется вся партия.

5.13. Европейский бронезилет

Бронезилеты военнослужащих европейских стран предназначены для защиты от баллистической угрозы при различных военных операциях. Этими операциями могут быть военные конфликты в Европе, Африке, пустынях Азии, поддержание мира под эгидой ООН, а также миссии Красного Креста. Для различных операций требуются различные камуфляжные цвета бронезилета.

5.13.1. Типы военных бронезилетов

- Защитный зеленый военный камуфляж.
- Военный камуфляж для пустынных областей.
- Синий камуфляж ООН.
- Белый камуфляж Красного Креста.

5.13.2. Размеры бронезилетов

Бронезилеты имеют три размера (малый, средний и большой).

5.13.3. Внешний слой бронезилета

Гибкий бронезилет должен состоять из водостойкой ткани, сделанной из смеси хлопковых и полиэфирных волокон.

5.13.4. Баллистическая стойкость

При скорости 430 м/с девятимиллиметровой свинцовой пули с медной оболочкой запреградная деформация в слое поддерживающего пластилина не должна превышать 30 мм.

5.13.5. Слои

Противобаллистический ламинат делают из обработанной водоотталкивающим раствором арамидной ткани с поверхностной плотностью 190 г/м². Слои простегиваются под углом. Размер сетки указывается специально. Гибкий бронезилет должен иметь карманы для вставных жестких бронепластин, защищающих от поражения винтовочными пулями.

5.13.6. Количество бронепластин

В противобаллистический комплект входят пять жестких бронепластин.

5.13.7. Размеры жестких бронепластин

- Изогнутая нагрудная пластина имеет размер 250 × 300 мм.
- Плоская задняя пластина имеет размер 300 × 250 мм.
- Пластина защиты паха имеет размер 150 × 250 мм.
- Пластина воротника имеет размер 200 × 165 мм.

Таблица 5.7. Баллистические угрозы и запреградное смещение европейского военного бронезиелета

Конфигурация	Калибр пули	Скорость пули (м/с)	Расстояние от ствола (м)	Место остановки пули	Максимальная деформация (мм)
Гибкий бронезиелет. Передняя формованная пластина + гибкий бронезиелет	9 мм	430	7,65	Гибкий бронезиелет	30 мм
	7,62 мм	865	7,65	Формованная пластина	30 мм
Передняя формованная пластина + гибкий бронезиелет	5,56	1000	7,65	Формованная пластина	30 мм
Задняя формованная пластина + гибкий бронезиелет	7,62	865	7,65	Формованная пластина	30 мм
Задняя формованная пластина + гибкий бронезиелет	5,56	1000	7,65	Формованная пластина	30 мм
Формованная тазовая пластина + гибкий бронезиелет	7,62	865	7,65	Формованная пластина	Не измеряется
Формованный воротник	7,62	865	7,65	Формованная пластина	Не измеряется

5.13.8. Поверхностная плотность бронеконплекта

Бронепластины должны иметь постоянную поверхностную плотность, лежащую в диапазоне 17–20 кг/м².

5.13.9. Толщина

Толщина формованных бронепластин не должна превышать 22 мм.

5.13.10. Баллистическая стойкость

Детали испытания всех компонентов мягких бронезиелетов и вставных формованных бронепластин приведены в табл. 5.7.

5.13.11. Маркировка

Каждый бронезиелет должен иметь маркировку, указывающую его размер, способ чистки и инструкцию по обслуживанию.

5.14. Азиатский бронезиелет

В течение многих лет страны Южной Азии покупали противобаллистические бронезиелеты, произведенные за их пределами, главным образом в Великобритании. Однако сейчас в некоторых странах начали производить собственные гибкие бронезиелеты из закупленного за границей сырья. Формованные жесткие бронепластины, как правило, производят за пределами этих стран.

Ниже приводится краткий обзор особенностей соответствующих спецификаций.

5.14.1. Баллистические испытания нагрудных пластин

- Производится выстрел пуль НАТО калибра 7,62 мм с расстояния 10 м.
- Производится выстрел пуль с мягким стальным сердечником из автомата АК-47 с расстояния 10 м.

5.14.2. Размеры пластины

305 × 254 мм.

5.14.3. Количество пластин

Как минимум две изогнутые пластины — нагрудная и задняя.

5.14.4. Материал пластин

Жесткая формованная панель на основе высокопрочного полиэтиленового волокна.

5.14.5. Вес бронепластин

Максимум 1,5 кг, в том числе пластин воротника, защиты паха и плеч.

5.14.6. Площадь защиты

Площадь защищаемой гибким бронежилетом области тела, включая грудь и спину, должна быть не менее 0,55 м².

5.14.7. Размеры

Бронежилет имеет два размера — средний и большой.

5.14.8. Внешний слой гибкого бронежилета

Делается из высокопрочного стойкого к истиранию нейлона с водоотталкивающим покрытием.

5.14.9. Материал гибкого бронежилета

Бронежилет делается из слоев арамидной ткани полотняного плетения, обработанной водоотталкивающим составом. Для фиксации структуры и уменьшения запреградной деформации бронепакет прострачивают.

5.14.10. Испытания

Гибкий бронежилет испытывают согласно стандарту NIJ 0101.04 пулями калибром 9 мм, имеющими скорость 430 м/с.

5.14.11. Травмозащитный материал

Для уменьшения запреградной деформации в гибком бронежилете допускается использование слоя противотравматического материала.

5.14.12. Запреградная деформация

Запреградное смещение пластилинового основания согласно стандарту NIJ 0101.04 не должно превышать 25 мм.

5.14.13. Общий вес гибкой и жесткой брони

Полный вес гибкой и жесткой брони не должен превышать 6,3 кг для бронезиловидного материала среднего размера и 6,6 кг для бронезиловидного материала большого размера.

5.14.14. Другие особенности

Минимальный срок службы бронезиловидного материала равен 10 годам. И гибкий бронезиловидный материал, и жесткие формованные бронепластины должны сохранять баллистические характеристики в следующих условиях:

- при температуре от -50 до $+50^{\circ}\text{C}$,
- в условиях влажной горячей атмосферы при влажности 95% и температуре 40°C .

5.15. Спецификации касок

Каски наземных войск и парашютистов регламентируются спецификацией MIL-N-44099A. Эта спецификация начала действовать с декабря 1986 г., заменив действовавшую с 1983 г. спецификацию MIL-N-44099. Миллионы касок, сделанных для Министерства обороны США и вооруженных сил других стран, соответствуют этой спецификации. Соответствующая этой спецификации форма каски принята во многих странах, например, во Франции, Бразилии, Тайване и Саудовской Аравии.

Спецификация представляет собой детальный документ, регламентирующий производство и характеристики касок. Здесь будет описана лишь ее часть, касающаяся легких касок из композиционных материалов. Другие части спецификации, описывающие систему подвески и подбородочный ремень, приемные испытания и способ упаковки, рассматриваться не будут.

5.15.1. Размеры касок

Собранная каска должна иметь один из следующих размеров: очень малая, малая, средняя и большая.

5.15.2. Корпус каски

Материал

Согласно спецификации MIL-C-44050 корпус каски делают из арамидной ткани, покрытой слоем каталитически отверждаемой матрицы, состоящей из 50% фенолформальдегидной и 50% поливинилового смол. Для обеспечения защитного зеленого цвета каски матрица должна быть окрашена. Вес матрицы составляет 15–18% от полного веса корпуса каски.

Изготовление корпуса

Из покрытой слоем матрицы арамидной ткани вырезают лепестковые или комбинированные лепестковые и прямоугольные заготовки. Заготовки накладывая друг на друга так, чтобы промежутки между двумя любыми смежными слоями не превышали половины дюйма. Общее количество лепестковых и прямоугольных слоев ткани в любой точке корпуса каски должно быть не менее 19.

Формование корпуса каски

Корпус каски получают при помощи двух прессформ при высокой температуре и давлении за один цикл отверждения матрицы. Повторно корпус формовать нельзя. При наличии расслоений и пузырей корпус должен браковаться.

5.15.3. Отделка каски

Сформованный корпус сверлят, после чего к очищенному и отшлифованному нижнему ребру приклеивают резиновую кромку. После высыхания клея все каверны и трещины на внешней поверхности корпуса заполняют эпоксидной смолой, поверхность очищают, шлифуют и подготавливают для окраски. Затем поверхность окрашивают сначала грунтовой, а затем и чистовой краской, в которую вводят добавки, создающие текстурированную поверхность. Наконец, устанавливают систему подвески и подбородочный ремень.

5.15.4. Испытания

Каска проходит описанные ниже испытания:

Вес

Максимальный вес каски с системой подвески и подбородочным ремнем ограничен следующими значениями:

Размер	Вес (унций)
Очень малый	50
Малый	51
Средний	53
Большой	57

Погружение в воду

Каску погружают в воду с температурой 16–27°C на 16 час., после чего она сохнет на воздухе в течение 12 час. На внешней поверхности каски не должны появиться дефекты, свидетельствующие о расслоении корпуса, размягчении или подгорании матрицы.

Баллистические испытания

Перед испытаниями каску выдерживают в испытательной камере не менее 24 час. Поверхность каски делят на пять ясно различимых областей, одну из ко-

торых отмечают кругом диаметром 50 мм, и четыре равных боковых областей. Баллистические испытания проводят согласно стандарту MIL-STD-662, используя осколки .22 калибра, соответствующие стандарту MIL-P-46593. Каску жестко устанавливают, и в каждую из пяти отмеченных областей производят как минимум два выстрела в случайно выбранные точки, расстояние между которыми должно быть не менее 37 мм. Все выстрелы производят нормально к плоскости поверхности каски. Баллистический предел всех касок должен быть не менее 610 м/с.

5.16. MIL-L-62474B. Многослойный органопластик на основе арамидной ткани

Спецификация была пересмотрена в 1984 г. Ее используют все отделы и агентства Министерства обороны США. Она описывает использование многослойного органопластика на основе арамидной ткани в композитной броне.

5.16.1. Классификация

Ламинаты описывают следующим образом:

- Тип 1. Плоские.
- Тип 2. Формованные.
- Класс А. Используются нити с линейной плотностью 1500 денье, состоящие из 1000 элементарных волокон.
- Класс В. Используются нити с линейной плотностью 3000 денье, состоящие из 1333 волокон.

5.16.2. Требования

Тестируемые образцы

Перед началом массового производства подрядчик должен предоставить опытные образцы для осмотра и испытания. Все последующие ламинаты должны соответствовать этим образцам по всем физическим и эксплуатационным параметрам. Любое изменение технологии производства, метода переплетения ткани, состава полимерной матрицы или конструкции ламината требует новых приемных испытаний.

Материалы

Антибаллистический материал не должен иметь дефектов, неблагоприятно влияющих на эксплуатационные характеристики и надежность продукта.

Классифицированные изделия

После успешного прохождения испытаний подрядчик несет ответственность за использование только классифицированных материалов.

Арамидная ткань

- Ламинаты класса А. Арамидная ткань 42×42 из некрученых нитей с линейной плотностью 1500 денье.
- Ламинаты класса В. Арамидная ткань 21×21 из некрученых нитей с линейной плотностью 3000 денье.

Арамидные ткани классов А и В при максимальной влажности 5 вес.% должны весить 551 ± 25 г/м².

Матрица

Матрица состоит из каталитически отверждаемой смеси фенолформальдегидной и поливинилбутиральной смол. Вес отвержденной матрицы составляет 16–20% от полного веса материала, а влажность не должна превышать 2%.

5.16.3. Изготовление

Ламинат должен состоять из указанного количества слоев арамидной ткани, склеенных матрицей. Его изготавливают за один цикл формования при высокой температуре и давлении.

5.16.4. Вариация толщины

Изменение толщины не должно превышать 0,38 мм для ламината типа I и 0,76 мм для ламината типа II. Ламинат должен быть достаточно ровным, а изменение толщины не должно превышать 5,00 мм/м.

5.16.5. Вес

Поверхностная плотность ламината должна соответствовать установленному стандарту (0,62–0,74 кг/м²).

5.16.6. Процесс формования ламината

При формовании ламината должны выполняться следующие условия:

- ламинаты типа I формируют в прессе при давлении 1380 ± 70 кПа,
- ламинаты типа II формируют в прессе при давлении 1380 ± 70 кПа или в автоклаве при давлении минимум 345 кПа.

Указанное выше давление должно поддерживаться на следующих стадиях процесса прессформования ламинатов типа I и II:

- при увеличении температуры пластин пресса до $166 \pm 6^\circ\text{C}$,
- при температуре пластин пресса $166 \pm 6^\circ\text{C}$ в течение времени прессования, указанного в табл. 5.8,
- при охлаждении пресса до 82°C . После этого ламинат можно удалять из пресса.

Таблица 5.8. Время формования

Количество слоев	Время формования (мин)
1–10	30
11–20	45
21–30	60

Указанное давление должно поддерживаться на следующих стадиях автоклавного формования ламинатов типа II:

- (а) при увеличении температуры автоклава до $166 \pm 6^\circ\text{C}$,
- (б) при формовании пластин при температуре $166 \pm 6^\circ\text{C}$ в течение времени, указанного в табл. 5.8,
- (в) при охлаждении до 66°C , после чего ламинат можно удалять из автоклава.

5.16.7. Окончательная обработка ламинатов

Ламинат можно формовать между двумя впоследствии удаляемыми слоями пленки. Обрезку и механическую обработку пластины проводят вместе со впоследствии удаляемыми внешними слоями. После обрезки ламината с использованием охлаждающей жидкости его обрабатывают механически и сушат при температуре $93 \pm 6^\circ\text{C}$. После высушивания кромки всех вырезов и отверстий ламината его покрывают эпоксидной смолой. Эпоксидная смола должна соответствовать стандарту MTL-R-9300, а температура ее отверждения должна быть не ниже 121°C .

5.16.8. Характеристики ламината

Защитный поверхностный слой удаляют вручную при комнатной температуре без применения растворителя.

Теплостойкость

Ламинаты не должны расслаиваться после двух циклов нагрева от -54 до $+121^\circ\text{C}$.

Баллистическая стойкость

Для определения предела баллистической стойкости ламината V_{50} используют осколок калибра 0,30 (весом 44 грана), соответствующий стандарту MIL-P-46593. Испытания двух пластин размером 508×508 мм, состоящих из двадцати шести слоев, описываются стандартом MIL-STD-662. Среднее значение V_{50} должно быть не менее 686 м/с.

Визуальный осмотр

Ламинат должен удовлетворять уровню I стандарта ASTM D2563. Он не должен обнаруживать следующих дефектов: (1) пор, (2) дефектов подгорания, (3) трещин, (4) поверхностных трещин, (5) крэйзов, (6) краевых расслоений (7) внутренних расслоений, (8) пятен непроклеенных матрицей слоев, (9) недостаточной пропитки матрицей и (10) морщин простроченных слоев бронепакета. Слои ткани не должны иметь капель матрицы, быть достаточно прямыми и не иметь вздутий.

5.17. Литература

International Standard, ISO/FDIS 14876-1, final draft, 2002.

Military Standard, MIL-L-62474B (AT), title «Laminate: Aramid-Fabric-Reinforcement, Plastics», 25 June 1984.

Military Standard, MIL-H-44099A, title «Military Specification: Helmet, Ground Troops and Parachutists», 22 December 1986.

Military Standard, MIL-STD-662F, «V50 Ballistic Test for Armor», 18 December 1997. Ministère De La Defense, Gilet Pare-Balle, Serie 3, Edition 4, February 2002. Ministère De La Defense, Casquen Composite et Casque Composite Adapta I.L., Edition 3, February 2003.

National Institute of Technology Standard, NU Standard 0106.01 for Ballistic Helmets, December 1981.

National Institute of Technology Standard, NU Standard 0108.01 title «Ballistic Resistant Protective Materials», US Department of Justice, September 1985. Performance Requirements, «INTERCEPTOR» – Multiple Threat Body Armor, 30 March 1998.

Performance Specification, Personal Armor, USMC Small Arms Protective Inserts (SAPI), 1 December 2003.

ГЛАВА 6

ИСПЫТАНИЕ ЛЕГКИХ ПРОТИВОБАЛЛИСТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Д. Р. Данн, Н. Р. Уайт, Laboratory Inc., США

6.1. Введение

Противобаллистическая броня предназначена для защиты от высокоскоростных снарядов (из инертных материалов). Индивидуальную броню часто включают в более широкую категорию средств индивидуальной защиты, в которую входят средства защиты от поражения обломками, вызываемыми ураганами, а также средства защиты от случайного столкновения высокоскоростных транспортных средств (самолетов, поездов и т.д.) с различными летящими низкоскоростными предметами (камнями, птицами и кирпичами). Наконец, бронематериалы часто применяются для защиты от осколков, которые образуются в результате разрушения высокоскоростных роторных машин и двигателей.

Монопластины брони представляют собой отдельный твердый слой однородного материала. Композитной броней называют изделия, состоящие из нескольких слоев одного или различных бронематериалов, которые могут быть механически твердыми или гибкими.

6.2. Пробитие брони

Кинетическая энергия ударника определяется его массой и скоростью. Если цель отражает поражающий элемент, то поглощенной и рассеянной оказывается лишь часть этой энергии. Аналогично, если ударник полностью пробивает цель и продолжает движение, то поглощается и рассеивается также лишь часть энергии удара. Если же ударник остается в цели, вся его энергия поглощается и рассеивается мишенью. Это предъявляет самые серьезные требования к характеристикам брони, и способность эффективно поглощать и рассеивать энергию является одной из основных характеристик бронематериала.

Материал брони должен превосходить по своим характеристикам материал снаряда, разбивая его на осколки или деформируя при ударе. При этом энергия ударника должна распределяться на большой области мишени. Деформированный ударник должен воздействовать на значительную область цели и преодолеть повышенное сопротивление области контакта.

Если снаряд не деформируется и концентрирует энергию удара на очень малой области, вероятность пробития мишени увеличивается. Наоборот, если снаряд сильно деформирован, сопротивление области контакта с мишенью возрас-

тает, и она будет успешно работать. Если твердость поверхности брони превосходит твердость снаряда, это позволяет вызвать интенсивную деформацию последнего при ударе.

Многослойная высокопрочная волокнистая броня позволяет деформировать ударник и распределить его энергию на значительную область мишени. Ударник должен нагрузить слой волокон до предела его прочности, после чего слой разрушается. По мере пробития слоев мишени ударник деформируется все более и более сильно, а его энергия постепенно уменьшается.

6.3. Броня

Броня предназначена для остановки снаряда. Однако, даже если средство индивидуальной защиты не пробито, ударник может нанести травму или биомеханическое повреждение. Современная индивидуальная броня должна предотвращать пробитие и нанесение серьезной травмы, но не биомеханического повреждения. Ударник должен быть либо отражен, либо остановлен, а его энергия рассеяна. Имеется предел энергии, которая может быть благополучно вынесена человеческим телом. Параметры человеческого тела (вес, сила мускулатуры, общее здоровье и уязвимость различных частей тела) варьируются весьма сильно и плохо поддаются стандартизации. В особенности, испытания неадекватно характеризуют степень повреждения мозга и шеи при непроникающих ударах по каске. Проблему травмирования туловища остановленным (бронежилетом) ударником начали изучать лишь в самое последнее время.

6.4. Испытание брони

По своему характеру все испытания являются либо неразрушающими, либо разрушающими. Неразрушающие испытания проводят, чтобы убедиться в удовлетворительном состоянии системы, которую потом возвращают к эксплуатации. Разрушающие испытания проводят на статистически представительной выборке образцов, устанавливающей вероятностные характеристики испытываемой системы.

Количество отобранных для испытания образцов определяется двумя факторами: общим количеством образцов и уровнем доверия тому, что характеристики выбранных образцов соответствуют всему исходному набору. Чтобы гарантировать, что выбранные образцы представительны для всей системы, выборка должна быть случайной и отражать изменения в партиях произведенных товаров, поставках сырья, изменений технологического процесса и персонала при производстве всей партии в контролируемый период времени.

6.5. Баллистическая угроза

Снаряды, кидаемые рукой или выстреливаемые с помощью оружия, предназначенного для охоты или используемого вооруженными силами и органами правопорядка. То, как кинетическая энергия снаряда расходуется при ударе, зависит



от его формы. Бронебойные пули предназначены для пробивания легкой брони и ранения защищаемого ею человека. Напротив, пули, предназначенные для использования против незащищенных броней целям, разработаны для передачи всей их энергии цели.

Для увеличения пробивающей способности военное оружие снабжают бронебойными пулями, содержащими жесткий недеформируемый сердечник. Напротив, военное оружие, предназначенное для использования против небронированных целей, снабжают непрочными свинцовыми пулями в тонкой медной оболочке.

Боеприпасы, предназначенные для охоты на диких животных, заряжают дробью. Пули этого типа могут иметь мягкие свинцовые разрываемые наконечники, которые усиливают поражение, создавая более крупные раны, чем такие же пули с полной жесткой оболочкой. Международные соглашения запрещают применение разрывных пуль с мягким наконечником в военных целях.

Специальная категория снарядов используется только в испытательных лабораториях для оценки характеристик брони. Эти снаряды состоят из более прочных материалов, чем обычные пули, и дают более воспроизводимые результаты испытаний. Первые из них, весьма жесткие стальные снаряды, называемые имитаторами осколков, были разработаны для оценки баллистических характеристик легкой индивидуальной брони и более тяжелой транспортной брони. Стандарт MIL-P-46593A определяет четыре размера и веса имитаторов осколков – калибром .22 и весом 17 гран, калибром .30 и весом 44 грана, калибром .50 и весом 207 гран, а также калибром 20 мм и весом 830 гран.

Совсем недавно для испытания индивидуальной брони были разработаны стальные имитаторы осколков правильной цилиндрической формы. Их вес равен 2, 4, 16 и 64 гран. Испытание цилиндрических имитаторов описывается стандартом HPW-010-02-01.

Ни имитаторы осколков, ни цилиндрические имитаторы осколков не предназначены для моделирования определенной баллистической угрозы. Они предназначены для моделирования фрагментов, образующихся при разрыве различных осколочных снарядов. Стандартизированные имитаторы осколков применяют во многих частях мира также и для моделирования воздействия осколков от разрушающихся машин, гоночных двигателей и т.д.

6.6. Методы испытаний

Характеристики брони могут быть определены двумя методами испытаний, определяющими баллистическую стойкость или баллистический предел соответственно. Баллистическая стойкость оценивает характеристики материала по сравнению с заранее определенными требованиями. Баллистический предел V_{50} определяет предельные характеристики материала. Выбор типа испытания определяется целью проводимых испытаний. В обоих случаях методика испытаний должна гарантировать надежность и воспроизводимость результатов испытаний.

Характеристики брони определяют путем испытания в требуемых условиях. Условия и детали испытаний должны гарантировать надежность и воспроизводимость результатов.

6.7. Баллистическая стойкость

Испытания, определяющие баллистическую стойкость брони, проводятся для оценки характеристик материала по критерию успех/неуспех при заданных условиях. Этот тип испытания не определяет ни границу, при которой перестают удовлетворяться некоторые требования, ни границу начала пробития. Критерий оценки результатов испытания состоит в определении, пробита ли цель пулей или осколком. Методика испытания на баллистическую стойкость состоит в:

- 1) описании испытываемого материала, количества и размеров образцов;
- 2) выборе образцов для всего спектра испытаний;
- 3) определении калибра, типа, конструкции, веса и скорости пули, а также направления и угла удара;
- 4) выдерживании образца в условиях испытаний в течение некоторого времени перед испытаниями;
- 5) проверке окружающих условий;
- 6) установке подложки из пластилина (если нужно) и ее калибровке;
- 7) определении приемлемого отклонения оси пули от направления полета;
- 8) определении приемлемых отклонений от направления косого удара;
- 9) определении, какие выстрелы являются правильными;
- 10) определении необходимого количества и точек правильных выстрелов для каждого образца;
- 11) принятии решения, разрешается ли перезакрепление образца между выстрелами;
- 12) установке образца;
- 13) определении метода измерения скорости пули;
- 14) определении метода фиксации пробития;
- 15) определении критерия, произошло ли пробитие испытываемого материала;
- 16) определении метода измерения запреградной деформации;
- 17) определении допустимого уровня остаточных характеристик системы после испытаний;
- 18) определении способа записи данных и предоставления отчета;
- 19) определении способа размещения образцов после испытаний.

Метод испытаний на баллистическую стойкость хорош, если требуется только заключение об успехе или неуспехе системы. Например, для демонстрации продукта при продаже, в полевых условиях, принятии партии и т.д.

Поскольку получаемые этим методом определяются лишь успех или неуспех, получаемая информация не позволяет сравнивать характеристики различных систем или описывать изменение свойств системы в зависимости от технологических параметров производства. Для получения количественных данных определяют баллистический предел V_{50} .

6.8. Измерение баллистического предела V_{50}

Измерение V_{50} проводится одним из четырех аналогичных методов испытания, определяющих вероятность пробития противобаллистических материалов. Все эти методы основаны на определении некоторой неколичественной характеристики устройства (не обязательно брони) в зависимости от переменного воздействия. Например, определяется, зажигается ли спичка или нет, функционирует ли плавкий предохранитель или нет, и т.д. Идентичные образцы подвергают воздействию и получают результаты «успех/неуспех» при изменении некоторого изменяющегося параметра. Различия четырех методов являются процедурными, и, хотя результаты аналогичны, их надежность зависит от сложности применяемой методики. Эти методы используют для определения вероятности пробития брони в зависимости от скорости снаряда (рис. 6.1).

Сами по себе эти характеристики большого практического значения не имеют и используют лишь для разработки противобаллистических материалов. Кроме того, удар с определенной скоростью снаряда может быть произведен лишь с некоторой точностью и требует значительных расходов на боеприпасы и броню.

6.8.1. Метод Пробита

В предварительно выбранном узком интервале скоростей производят десять выстрелов. Определяют количество пробитий и вычисляют вероятность пробития. Количество точек, необходимых для построения зависимости вероятности от скорости удара, определяется требуемой степенью достоверности и диапазонами скоростей и вероятности пробития.

6.8.2. Метод Лэнгли

Этот метод был разработан для получения кривой во всем интервале вероятности пробития при минимальном количестве испытаний. Однако при испытаниях брони скорость ударника часто выходит за рамки требуемого скоростного интервала. Первую серию выстрелов проводят при скорости, равной среднему значению скоростей, для которых предсказывается 100%-ная и нулевая вероятность про-

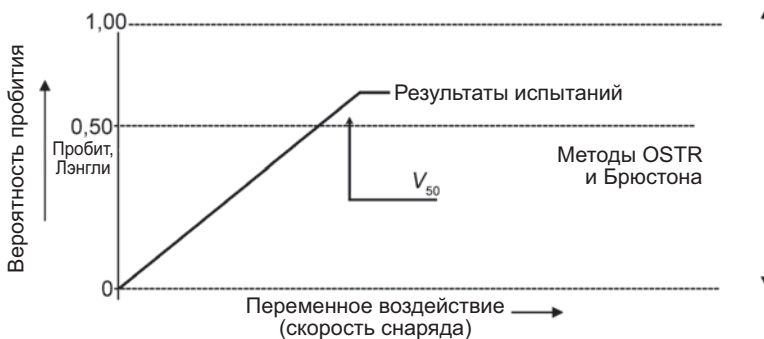


Рис. 6.1. Зависимость вероятности пробития брони от скорости снаряда

бития. Последующие стрельбы проводят точно при скорости, вычисленной на основании результатов первой серии выстрелов. Обычно для определения баллистического предела требуется 20 серий выстрелов.

6.8.3. Метод OSTR

Метод OSTR является развитием метода Лэнгли, он требует несколько серий выстрелов при одной скорости. Все недостатки метода Лэнгли, состоящие в излишних затратах на боеприпасы и броню и сложности процедуры испытаний и вычислений, в этом методе усугублены еще сильнее. Его достоинством являются более качественные результаты.

6.8.4. Метод Брюстона

Этот метод можно использовать для получения результатов во всем диапазоне скоростей, но реально его используют в области 50%-ной вероятности пробития. Методика несложна, а скорость снаряда не требуется контролировать с такой же точностью, как в других методах. Начальную серию выстрелов проводят при скорости, когда предполагается 50%-ная вероятность пробития. Скорость пули обычно изменяют на 60, 90 или 125 фут/с. Количество выстрелов может меняться, но оставаться четным (2, 4, 6, 8 или 10). Испытания продолжают, пока половина выстрелов не будет приводить к пробитию (50%-ная вероятность). Из-за практичности и низкой стоимости этого метода испытаний его широко используют для измерения V_{50} брони по стандарту MIL-SD-662, который является частным случаем метода Брюстона. Для более подробного знакомства с этим методом, его методикой, достоинствами и недостатками можно обратиться к стандарту MIL-STD-331A.

Баллистический предел брони V_{50} обычно определяют модифицированным методом Брюстона, первоначально разработанным для испытания приборов. Он состоит в определении качественной реакции системы по критерию «успех/неуспех» на воздействие переменной интенсивности. Стандарт MIL-STD-662F, являющийся модификацией метода Брюстона и регламентирующий определение баллистического предела V_{50} , был принят в декабре 1997 г. Он описывает процедуру определения скорости удара, при которой броня пробивается с вероятностью 50%. Скорость пуль в каждой последующей серии выстрелов увеличивают или уменьшают до тех пор, пока не будет достигнуто равное количество пробитий и остановок пуль в узком интервале скоростей. Среднее значение скорости пуль при равном количестве пробитий и не пробитий называют V_{50} образца.

После проведения испытаний и протоколирования результатов величина V_{50} становится количественной характеристикой бронезащитных свойств, оценивающей и отражающей физическую структуру образца.

Степень надежности величины V_{50} тем выше, чем уже допустимый диапазон скоростей пуль при вычислении вероятности пробития. Если 9-миллиметровая пуля со скоростью 2 фут/с не пробил лист бумаги, а вторая такая же пуля со скоростью 5000 фут/с пробил этот лист, то усреднение дает значение V_{50} , равное 2501 фут/с.

Недопущение чрезмерной ширины интервала допустимых скоростей в 5000 фут/с устраняет неопределенности этого характера. В зависимости от требуемого уровня надежности максимально допустимый разброс скорости ударника принимают равным 60, 90, 125 или 150 фут/с. Однако следует отметить, что при недостаточной однородности образца измерение величины V_{50} в указанном диапазоне разброса скоростей может оказаться невозможным. В таких случаях результаты игнорируют. Допустимый диапазон разброса скоростей при определении V_{50} характеризует точность измерений.

Изменение толщины или твердости испытываемого образца может привести к кажущейся путанице в логике, когда менее быстрая пуля пробивает, а более скоростная пуля не пробивает мишень. В таких случаях из максимальной скорости непробивающего выстрела вычитают минимальную скорость пробивающего выстрела, а разницу называют «интервалом смешанных результатов». Эта характеристика отражает стабильность состава образца. Например, при случайном попадании высокоскоростной пули в более твердую область она может не пробить мишень, а при попадании в более мягкое место может произойти пробитие.

Методика измерения V_{50} должна включать:

- 1) описание испытываемого образца, его размера и номер образца. Отметим, что для бронежилетов сложной структуры величину V_{50} измеряют нечасто, поскольку изменение структуры противоречит предположению однородности образцов. Иными словами, величиной V_{50} принято характеризовать свойства материала, а не структуры;
- 2) выбор образцов;
- 3) определение калибра, типа, конструкции и веса пули;
- 4) выдерживание образца в условиях испытаний в течение некоторого времени перед испытаниями;
- 5) проверку окружающих условий;
- 6) установку подложки из пластилина (если она нужна) и ее калибровку;
- 7) определение приемлемого отклонения оси пули от направления полета;
- 8) определение приемлемых пределов направления косого удара;
- 9) определение, какие выстрелы считаются правильными;
- 10) определение минимально необходимого количества пробитий и непробитий для вычисления V_{50} ;
- 11) принятие решения, можно ли перезакреплять образец между выстрелами;
- 12) определение максимально допустимого разброса скорости пули при вычислении V_{50} ;
- 13) определение допустимого количества выстрелов по одной мишени;
- 14) определение способа крепления образца;
- 15) определение метода измерения скорости пули;
- 16) определение критерия, произошло ли пробитие;
- 17) определение, считать ли образование осколка панели пробитием;
- 18) определение, нужно ли измерять остаточную скорость ударника;
- 19) определение способа записи данных и представления отчета об испытаниях;
- 20) определение размещения образцов после испытаний.

Измерения V_{50} проводят, если требуется сравнить свойства двух или нескольких различных бронематериалов, исследуется влияние окружающих условий на свойства материала или производится модификация бронематериала.

Поскольку при измерении V_{50} предполагается, что испытываемый образец однороден, эта характеристика имеет ограниченную значимость при оценке бронеконструкций, имеющих швы, сварные соединения, узлы сборки и т.д. В этих случаях обычно проводят испытания на баллистическую стойкость.

6.9. Методика определения стойкости к удару острым предметом

Испытание на стойкость к удару острым предметом аналогично испытанию на баллистическую стойкость. Она проводится по критерию «успех/неуспех» при некоторых условиях. Эти испытания не определяют границы выполнения этих требований. Однако, эту границу часто определяют, изменяя энергию удара поражающего объекта.

Испытания на стойкость к удару острым предметом проводят одним из двух типов поражающих элементов – колющим оружием (заточкой) или режущим оружием (ножом). Методики в обоих случаях одинаковы и включают:

- 1) описание испытываемого образца – материала или защитного комплекта (жилета), количество и размеры образцов;
- 2) выбор образцов;
- 3) Выбор оружия, которым производят испытание (заточка или лезвие), и точное описание их конструкции и материала;
- 4) выбор оборудования, используемого для удара поражающим объектом, обеспечивающим его выстреливание (из духового ружья) или падение сверху;
- 5) определение скорости и импульса удара. Удар его энергией характеризовать не принято, так как при равной энергии удара изменение массы и скорости ударника изменяет результат;
- 6) определение количества, местоположения и направления ударов;
- 7) определение, какие выстрелы считаются правильными;
- 8) определение максимально допустимого разброса направления косого удара;
- 9) выбор испытательной установки, способа крепления образца и пластиковой подложки;
- 10) определение метода измерения скорости удара;
- 11) определение критерия, произошло ли пробитие;
- 12) выбор метода измерения деформации;
- 13) выбор состояния образцов перед испытаниями;
- 14) выбор температуры и влажности внешней среды;
- 15) определение способа записи данных и представления отчета об испытаниях;
- 16) определение размещения образцов после испытаний;
- 17) определение методологии характеристики степени остроты лезвия и выбор удара;
- 18) принятие решения, разрешается ли перезакрепление образца между ударами.



6.10. Сравнение композитной и монолитной брони

Методы испытаний *жестких* композиционных материалов в принципе аналогичны методам испытания гомогенных материалов. Исключением является то, что из-за склонности к расслаиванию область повреждения слоистых композиционных материалов при ударе больше, чем в случае гомогенной брони. Как следствие, для жесткой брони из композиционных материалов допустимое расстояние между точками ударов должно быть больше.

Методы испытания *гибкой* брони должны учитывать некоторые особенности, которых не имеет жесткая броня. Гибкая броня должна предотвращать получение тупой травмы столь же хорошо, как и пробитие. Оценка степени защиты от тупой травмы осуществляют измерением смещения задней поверхности брони, которая крепится к податливому материалу. В качестве этого материала обычно используют пластилин, пластичность которого калибруют до и после испытаний.

Удар по гибкой броне приводит к вытягиванию отдельных нитей в точке воздействия. Это явление может привести к разрыхлению структуры и пробитию брони. Изготовители прострачивают тканый бронепакет для предотвращения раздвигания нитей и проскальзывания пули между ними, что уменьшает запреградную деформацию, но уменьшает гибкость бронепакета. Методы испытаний гибкой брони должны либо предусматривать разглаживание материала после каждого выстрела, либо игнорировать выпучивание задней поверхности бронезиленета.

Наконец, баллистический удар по ткани приводит к растяжению и вытягиванию нитей в точке удара по всей их длине в горизонтальном и вертикальном направлениях. Поэтому методы испытания гибкой брони должны либо предусматривать повторный выстрел по вытянутым нитям, либо запрещать повторный удар по ним.

6.11. Дополнительные проблемы

6.11.1. Определение скорости пули

Важнейшей характеристикой любого баллистического испытания является скорость снаряда. Общепринятым методом обеспечения точных измерений является периодическая калибровка измерительной аппаратуры. Если полученные значения скорости вызывают подозрения, испытания нужно приостанавливать для проверки точности измерений. Чрезмерная уверенность в надежности измерений может привести к продолжающимся ошибочным определениям величины скорости. Два независимых метода определения скорости почти исключают ошибки, поскольку случайное совпадение двух ошибочных значений крайне маловероятно.

6.11.2. Энергия

Использование кинетической энергии для характеристики эффективности брони при ударе острым предметом может вводить в заблуждение, если при этом од-

новременно не измеряется скорость удара. Опыт показал, что удар острыми предметами равной энергии, но различной массы и скорости приводит к различающимся последствиям. Поэтому удар острым предметом должен производиться при определенной массе и скорости ударника.

6.11.3. Расстояние до цели

Полет пули после вылета из ствола всегда характеризуется некоторой неустойчивостью, вызванной выбросом продуктов горения и состоящей в вилиании пули. Степень этой неустойчивости зависит от массы пороха. Неустойчивость исчезает на небольшом расстоянии от среза ствола. Расстояние, на котором пуля стабилизируется, непостоянно, но эксперимент показал, что расстояния в 3–3,6 м достаточно для стабилизации полета пистолетных пуль, а при большем объеме пороха для высокоскоростных винтовочных пуль может потребоваться 9–11 м. Для обеспечения стабильности полета пули броня должна располагаться на расстоянии не менее 4,5 м при испытании пистолетными пулями и не менее 12 м, если выстрел производится из винтовки или ударник имеет большой калибр. Чтобы различием между измеренной и реальной скоростью пули при ударе можно было пренебречь, расстояние от точки удара до аппаратуры, измеряющей скорость, должно быть минимальным.

6.11.4. Испытания касок

Испытание касок в настоящее время проводят при помощи пуль (вооруженные силы и правоохранительные органы) или осколков (вооруженные силы). В случае пуль обычно определяют баллистическую стойкость, а в случае осколков измеряют баллистический предел V_{50} .

Для измерения V_{50} каску жестко крепят на шарнирной установке, а удар осколком производят перпендикулярно ее поверхности.

Баллистическую стойкость касок к удару пулями проводят на касках, закрепленных на манекенах в форме головы, причем их движение ограничивается только подбородочным ремнем и системой подвески. Каска может разрушиться вследствие недостаточной прочности ее верхней части или слабости крепления системы подвески в местах шурупов или заклепок, которые являются потенциально наименее прочными точками касок. Баллистическое испытание касок должно включать выстрелы в эти точки, но многие процедуры испытания этим пренебрегают.

Все методики испытания касок регламентируют минимально допустимое расстояние от точки удара пуль до края каски и расстояние между точками ударов. Кроме того, они предусматривают испытание пяти основных областей каски — передней, задней, верхней, правой и левой сторон. В настоящее время не существует общепринятых методик оценки степени защиты от тупой травмы и степени биомеханической защиты, которую обеспечивает каска. Испытание касок предусматривает исключительно защиту от пробития.

Для регистрации пробития во всех методах испытания касок используются контрольные пластины, делаемые из алюминия марки 2024Т3 и имеющие тол-

щину 0,05 мм. Их размещают на небольшом расстоянии за испытываемой поверхностью каски (обычно 2 дюймов) для фиксации пробития или непробития.

6.11.5. Испытания светопрозрачного щитка шлема

Испытания прозрачной индивидуальной брони отличаются от непрозрачной брони (жилета и каски) тем, что к прозрачной броне близки глаза. Поскольку незащищенные глаза могут быть серьезно травмированы даже при слабом ударе, к прозрачной броне предъявляют более жесткие требования защиты, чем к бронезилету или каске.

Образцы бронезащиты глаз устанавливают или на манекене головы (защитные очки), или на каске (светопрозрачные щитки). Пробитие определяют с помощью контрольной пластины (алюминиевой фольги толщиной 0,5 мм), помещенной на небольшом расстоянии (обычно 2 дюйма) за испытываемым материалом. Критерии успешного испытания прозрачной брони часто включают дополнительные требования, например, отсутствие растрескивания или фрагментации образца.

6.11.6. Испытания бронезилетов

В настоящее время баллистические характеристики жилетов определяют либо путем удара пулей (правоохранительные органы и вооруженные силы), либо удара осколком (вооруженные силы). В случае пули обычно определяют баллистическую стойкость, а в случае осколков измеряют баллистический предел V_{50} . Баллистический предел V_{50} иногда измеряют и для пулевого воздействия.

Удар пулей или осколком проводят как на полностью собранных жилетах, так и на образцах противобаллистических материалов, из которых их делают. Испытание мишеней обоих типов может проводиться при различных способах крепления образцов, включающих:

- крепление к массивной раме с поддерживающим слоем пластилина;
- крепление к жесткой раме без поддержки образца пластилином;
- крепление к раме, подвешенной за верхнее ребро и грузом, подвешенным к нижнему ребру рамы.

Испытания натальной брони могут включать дополнительные выстрелы со скоростью, заведомо обеспечивающей пробитие. В этом случае может измеряться остаточная скорость ударника для оценки степени опасности поражения при ударе. Остаточную скорость измеряют только на образцах с неподдерживаемой задней частью.

Помимо общих измерений, описанных в параграфах 6.7 и 6.8.4, испытание бронезилетов может включать удар по таким элементам жилета, как швы, молнии, застежки, карманы и т.д.

При испытании брони определяют величину запреградной деформации ее задней поверхности путем измерения глубины вмятины на пластилиновой подложке. Это смещение оценивает степень защиты от тупой травмы. Ударник, остановленный броней, создает в пластилине вмятину, окруженную областью под-

нятия, что напоминает кратер вулкана. Значение глубины вмятины не должно учитывать это поднятие, и измерения производятся от невозмущенной поверхности пластилина до самой глубокой точки вмятины. Помимо глубины вдавливания, некоторые методики требуют также определения объема углубления. Для этого углубление заливают быстро твердеющей массой и измеряют объем отливки, погружая ее в воду.

6.11.7. Испытания вставных бронепластин

Часто гибкая броня имеет передние и задние карманы, в которые вставляют жесткие бронепластины, обеспечивающие защиту от винтовочных пуль. Бронепластины такого типа могут предназначаться для усиления гибкой брони, но они могут использоваться и автономно, без гибкой брони. Если вставка является усиливающей, она должна испытываться совместно с гибкой броней.

Часто вставка способна противостоять лишь одному или нескольким баллистическим ударам, что требует множества образцов для определения баллистического предела V_{50} . В этом случае при измерении величины V_{50} выстрелы производят по нескольким образцам.

Физические свойства материала вставок могут требовать специальных условий их хранения. Например, керамика является чрезвычайно хрупкой и при небрежном обращении легко повреждается. Поэтому некоторые процедуры испытаний требуют, чтобы перед баллистическим испытанием по вставке был произведен низкоскоростной механический удар.

6.11.8. Испытания брони транспортных средств и конструкционной брони

Обычно между конструкционной броней и броней, используемой для защиты транспортных средств, не делают никакого различия. Это основано на представлении, что ни одна из них не контактирует с телом человека, а инерционность у них одинаково большая (оба типа брони крепятся жестко). Баллистические испытания такой брони отличаются от испытаний индивидуальной брони только тем, что образцы жестко крепят, а деформацию не измеряют.

При испытаниях комплекта транспортной и конструкционной брони требуется испытывать не только основные материалы, но и специфические элементы комплекта типа стыков между дверями и каркасом, петли, замки, сварные изделия, застежки и переговорные устройства. Критерии принятия этих структур должны включать определенные требования к их работоспособности после баллистических испытаний. Например, поломка замка двери в результате баллистического удара может считаться недопустимой.

6.11.9. Защита от фрагментов

Для защиты от взрывных самодельных устройств и разлетающихся осколков различных предметов используют защитные одеяла и контейнеры, а также жесткие конструкции, защищающие от фрагментов промышленного оборудования и дви-



гателей гоночных автомобилей. Такая защита делится на три типа – защиту от осколков, взрывной волны и комбинации фрагментов и взрывной волны.

Испытания защиты от осколков конструкций аналогичны испытаниям персональной и транспортной брони.

Испытание средств защиты от взрывной волны и комбинации осколков и волны взрыва имеет особенности, не характерные для стандартных испытаний противобаллистической брони. В этом случае необходимо отводить и обезвреживать взрывную волну. Обычно для этого в защитный контейнер вводят перегородки (щиты) и отводят волну в безопасную область. Защитные контейнеры часто делают из высокопрочных материалов, защищающих от осколков и давления взрыва, за исключением некоторой ослабленной области, в которую направляется и отводится взрывная волна. Так как при взрыве давление газа связано с его температурой, в контейнер часто вводят щиты с большой площадью поверхности, охлаждающие газ. Однако, если сила взрыва оценена неверно, взрыв может разрушить защитный контейнер, в результате чего появятся дополнительные осколки.

Бронеодеяла защищают от взрыва не очень эффективно, так как он обычно поднимает одеяло и взрывная волна оказывается направленной под него.

Стандартных методов испытания этих устройств не существует, и они отрабатываются специально в каждом отдельном случае. Эти методики, как правило, используют множество датчиков давления, оценивающих скорость уменьшения давления при удалении от взрывного устройства, и множество контрольных пластин для оценки риска образования осколков.

6.11.10. Методы испытания бронежилетов

Отвечая на обращение Сообщества полицейских США, в марте 1972 г. Национальный институт юстиции (NIJ) разработал метод испытаний, оценивающий баллистические характеристики натальной брони. До того времени имелась возможность рекламировать и продавать индивидуальную броню, которая не прошла надежные испытания. Стандарт NIJ-STD-0101.00 навел порядок в этом вопросе. С 1972 г. методы испытаний пересматривали несколько раз, и последний стандарт NIJ-STD-0101.04 датирован июнем 2001 г.

Принятие полицейским Управлением США стандарта NIJ-STD-0101 привело к тому, что теперь в США практически не имеется натальной брони, которая не прошла бы соответствующие испытания. Более того, этот стандарт с незначительными отличиями используются для оценки брони во всем мире. В результате, стандарт NIJ-STD-0101, возможно, будет принят в качестве международного стандарта испытания натальной брони.

Соответствие стандарту NIJ-STD-0101 производимых средств индивидуальной защиты всегда было добровольным. Чтобы поощрить использование этого стандарта и повысить надежность индивидуальной брони, NIJ разработал методику сертификации натальной брони. Процесс сертификации также является добровольным, но изготовители не могут провозгласить соответствия стандарту NIJ-STD-0101, если они не прошли процесс сертификации.

Процесс сертификации требует, чтобы производитель представил броню в NIJ, который испытывает ее и гарантирует:

- 1) что на броне имеются несмываемый номер и название модели,
- 2) образец удовлетворяет минимальным требованиям качества изготовления и маркировки.

Броню, не удовлетворяющую требованиям качества и маркировки стандарта NIJ-STD-0101, возвращают изготовителю, не проводя баллистических испытаний. Броню, соответствующую этим требованиям, отправляют в одобренную NIJ лабораторию для баллистических испытаний на соответствие требованиям стандарта NIJ-STD-0101. Изготовитель оплачивает стоимость этих испытаний, а копии отчета об их результатах и испытанные образцы возвращаются в NIJ, где они хранятся на случай, если они потребуются в будущем. Изготовителю выдают сертификат, подтверждающий соответствие изделия стандарту NIJ-STD-0101 (если таковое имеется).

Броню испытывают на соответствие I, IIA, II, IIIA, III или IV уровню защиты стандарта NIJ-STD-0101.04. Хотя в стандарте NIJ-STD-01 это не определено, предполагается, что броня более высокого уровня защиты соответствует и всем более низким уровням. Исключение составляет броня IV уровня защиты, которая должна выдержать единичный удар, но не обязана выдерживать последующие выстрелы, что требуется от брони более низких уровней защиты.

Броню с I по IIIA уровни защиты называют «пистолетной». Ее испытывают пулями двух калибров, одна из которых имеет высокую пробивающую способность, а вторая – большую энергию. Броню III уровня защиты часто называют «винтовочной». Ее испытывают только боеприпасами калибра 7,62 × 51 мм винтовки M80 НАТО. Броню IV уровня защиты, защищающую от «винтовочных бронебойных» пуль, испытывают только боеприпасами M2 калибра AP .30-06.

Сертификационное испытание NIJ брони всех уровней защиты включает две процедуры. Первая подтверждает или не подтверждает соответствие требованиям соответствующего уровня защиты, а вторая состоит в измерении баллистического предела моделей для анализа послесертификационных отказов.

Сертифицированная броня должна отвечать требованиям соответствующего уровня защиты. Эти требования не удовлетворены, если броня была пробита или чрезмерно велика запреградная деформация.

Броню, которая успешно прошла испытания на соответствие определенному уровню защитных требований, испытывают далее для определения баллистического предела V_{50} . Эта информация нужна для анализа будущего практического поведения брони. Баллистический предел V_{50} равен скорости снаряда, при которой вероятность пробития сертифицированной брони равна 50%. Величина V_{50} не имеет значения при сертификации и используется только для контроля дальнейшего постепенного изменения характеристик брони.

Согласно стандарту NIJ-STD-0101.04 для определения баллистической стойкости бронежилетов от I до IIIA уровня защиты испытывают по два образца с помощью боеприпасов двух калибров, зависящих от уровня защиты (всего четыре бронежилета). Все испытания проводят после выдержки жилетов во влажных ус-



ловиях, причем с задней стороны они поддерживаются пластилином. Пластичность пластилина должна проверяться до и после испытания каждого образца. Бронепанели испытывают в шести указанных точках с не более чем двумя дополнительными выстрелами (всего восемь), если один или два из выстрелов оказались неправильными. Выстрел считают неправильным, если скорость пули оказалась слишком высокой или низкой, расстояние между точками удара оказалось слишком малым или если удар был произведен слишком близко к краю панели. Если хотя бы один из 48 правильных выстрелов пробивает броню или глубина вмятины в глине превышает 44 мм, считают, что модель испытания не прошла. После этого бронесистему разбирают и осматривают для поиска повреждений, чтобы подтвердить соответствие каждой из ее восьми панелей стандарту. При любом изменении конструкции модель считают не прошедшей испытания, даже если она прошла испытания на баллистическую стойкость. Модели, прошедшие испытания на баллистическую стойкость и устойчивость конструкции, испытывают далее с целью определения баллистического предела V_{50} передней и задней панелей.

Измерения V_{50} брони с I по IIIA уровнями защиты проводят на сухих, поддерживаемых слоем пластилина, панелях с помощью 9-мм пуль с цельнометаллической оболочкой весом 124 гран. Испытания V_{50} проводят независимо, т.е. определяют параметры и передней, и задней панелей, причем ни одно из них не может использоваться для отмены уже сертифицированной модели.

Испытания на баллистическую стойкость бронежилетов III и IV уровней защиты проводят пулями только одного калибра, с помощью боеприпаса 7,62 × 51 мм винтовки M80 НАТО и бронебойного винтовочного боеприпаса M2 калибра .30-06 соответственно. В обоих случаях испытывают четыре бронепанели, причем каждую панель III уровня защиты испытывают шестью выстрелами (итого 24), а панели IV уровня защиты – одним выстрелом (всего четыре).

Если модель прошла испытания на баллистическую стойкость и удовлетворяет конструкционным требованиям для соответствующего уровня защиты, измерения V_{50} брони III уровня защиты проводят с помощью боеприпаса 7,62 × 51 мм винтовки M80 НАТО, а брони IV уровня защиты – с помощью бронебойной пули M2 калибра .30-06.

6.11.11. Сравнение новой и бывшей в эксплуатации брони

Результаты испытания корректны, если выбранные образцы являются представительными для всей партии брони. Для этого строго контролируют условия производства бронематериалов и избегают изменений в технологии производства.

Однако в процессе эксплуатации брони появляющиеся небольшие повреждения совместно с воздействием окружающей среды могут привести к изменению свойств материала, в том числе и баллистических. В результате различных воздействий образцы идентичной брони приобретут различные баллистические характеристики. Это особенно очевидно в случае бронежилетов, которые могут быть чувствительными к воздействию солнечного света, влаги, высокой темпе-

ратуры и т.д. Поэтому конкретная использованная броня не может представлять свойства всей совокупности изделий, и характеристики каждого экземпляра должны оцениваться независимо от остальных.

Как это ни парадоксально, современные методы испытания бронежилетов является разрушающими и не позволяют возвращать к дальнейшему использованию образцы, успешно прошедшие испытания. Этот парадокс нельзя разрешить до тех пор, пока не будут разработаны неразрушающие методы оценки баллистической стойкости брони.

ЧАСТЬ II

МАТЕРИАЛЫ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

ГЛАВА 7

ПРОТИВОБАЛЛИСТИЧЕСКИЕ ВОЛОКНА

Т. Там, А. Бхатнагар, Honeywell International Inc., США

7.1. Введение

Высокоэффективные противобаллистические волокна разрабатывают для специальных целей, требующих исключительной прочности, теплостойкости или химической стойкости. Из них делают легкие композиционные материалы для авиации, пуленепробиваемые жилеты, защитную одежду для офицеров пожарной охраны и изделия, стойкие к надрезам и прокалыванию. В более мирных областях из них делают рыболовную леску, тетиву, морские веревки и паруса, типа используемых в парусных гонках на Кубок Америки.

7.2. Традиционные высокопрочные волокна

7.2.1. Стекланные волокна

Самыми старыми и наиболее известными высокопрочными волокнами являются стекланные волокна. Стекланные волокна относительно негибки и не слишком подходят для изготовления тканей. Их достаточно широко используют для теплоизоляции, в огнестойких тканях и для изготовления композитов на основе полимерных матриц. В последние годы высококачественное оптическое стекловолокно произвело революцию в связи.

7.2.2. Углеродные волокна

Следующим классическим примером высокопрочных волокон являются углеродные волокна, из которых делают высокопрочные и жесткие композиты, а также электропроводные, тепло- и химостойкие текстильные материалы. Важнейшими факторами, определяющими их физические свойства, является степень карбонизации и ориентация плоскости, в которой лежат атомы углерода. Углеродные волокна делают из особо чистого искусственного шелка или высококачественных полиакриловых волокон (ПАН), а также жидкокристаллических пековых волокон. Почти идеальным углеродным материалом является графит.

7.3. Жесткоцепные ароматические волокна

Самыми известными синтетическими высокопрочными органическими волокнами являются арамидные волокна. Арамид, как и нейлон, является полиами-

дом, получаемым из ароматических кислот и аминов. На рис. 7.1 и 7.2 представлены нейлон 6 и нейлон 66, имеющие гибкую связь между амидными группами, а на рис. 7.3 изображена химическая структура Номекса, в которой между амидными группами расположено ароматическое кольцо, придающее полимерной цепи жесткость.

Благодаря стабильности ароматических колец и увеличению прочности амидных звеньев, благодаря их связи с ароматическими структурами арамиды имеют более высокую прочность и термостойкость, чем алифатические полиамиды (нейлоны). Параарамидные волокна (торговой марки Kevlar и Twaron), основанные на терефталевой кислоте и *p*-фенилендиамине или полиаминобензойной кислоте, имеют более высокую прочность и термостойкость, чем волокна Номекс, в которых химически связаны атомы углерода, находящиеся в метаположениях бензольных колец. Более высокая степень сопряжения и стержнеобразная геометрия молекул, а также лучшая ориентация линейных макромолекул ответственны за повышенную прочность волокон. Высокая прочность параарамидов обусловила их широкое использование в бронежилетах первого поколения. Арамидные

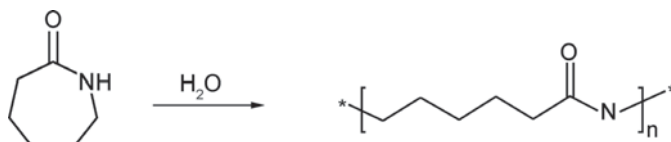


Рис. 7.1. Структура нейлона 6

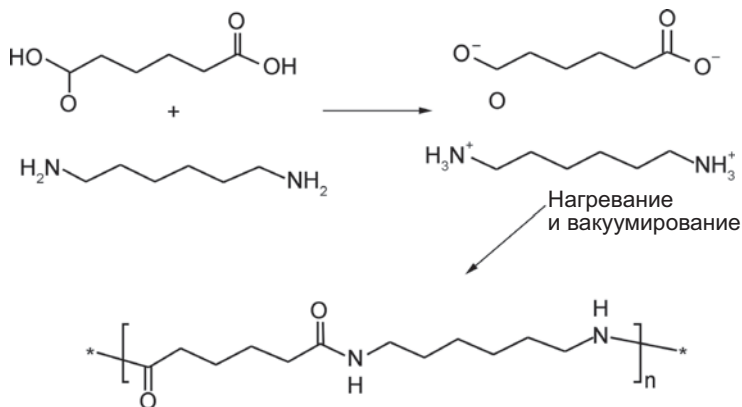


Рис. 7.2. Структура нейлона 66

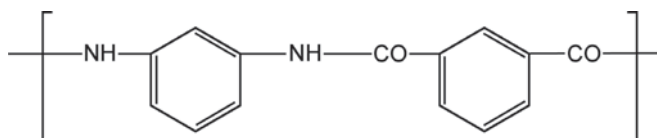


Рис. 7.3. Структура волокон Номекс

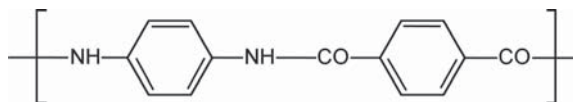


Рис. 7.4. Химическая структура арамидных волокон

нити (рис. 7.4) можно нарубить на пучки коротких волокон и сделать из них войлокообразный материал. Для изготовления стойкой к порезам защитной одежды эти волокна можно смешать с другими волокнами, имеющими свои преимущества. Арамидные волокна лиотропны. Их формируют из раствора и они плавятся при более низкой температуре, чем термотропные жидкокристаллические волокна.

7.4. Термостойкие волокна

7.4.1. ПБИ волокно

Полибензимидазол (ПБИ) является еще одним термостойким сопряженным ароматическим полимером (рис. 7.5).

Дополнительной причиной высокой термостойкости этих волокон является лестничная структура полимера. Полибензимидазол был разработан в 1950-х гг. В 1960-х гг. компания «Селаниз» разработала процесс полимеризации термостойкого полибензимидазола (РБИ®) и технологию формования ПВИ волокон. После пожара на космическом корабле «Аполлон» в 1967 г. НАСА сотрудничало с компанией «Селаниз» в вопросе разработки текстильных изделий из волокон ПБИ. Производство волокон было начато в 1983 г. ПБИ отличается высокой стоимостью по причине дорогого сырья и больших производственных издержек. При высокой равновесной влажности (7–8%) волокна ПБИ имеют желтоватый цвет. Ткань из этого волокна на ощупь кажется мягкой и удобной (из-за высокой равновесной влажности). Смешивание с другими термостойкими волокнами, напри-

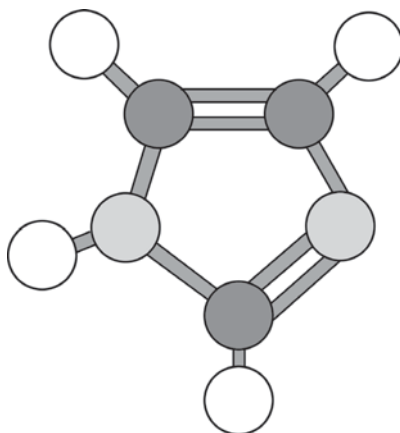


Рис. 7.5. Химическая структура ПБИ

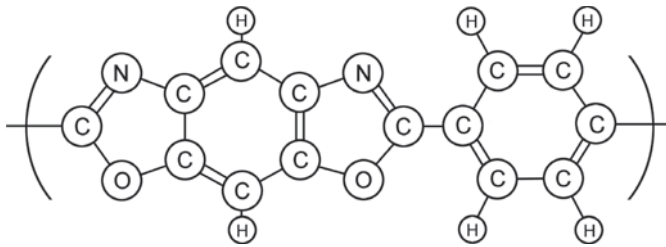


Рис. 7.6. Химическая структура ПБО

мер, арамидными для уменьшения стоимости или увеличения прочности может расширить область использования ПБИ волокон.

7.4.2. ПБО волокна

Полифенилбензобисозазольные (ПБО) волокна являются следующим типом терлостойких полимеров, основанным на циклических ароматических структурах (рис. 7.6). ПБО волокна имеют очень высокий предел прочности при растяжении и высокий модуль упругости, что позволяет делать из них армированные пластики. В настоящее время фирма «Тойобо» под торговой маркой Zylon производит ПБО волокна из жесткоцепного р-полифенилен-2,6-бензобизоксазола.

7.5. Высокопрочные термопластичные волокна

7.5.1. Жидкокристаллические полимеры

Волокна из жидкокристаллических (ЖК) полимеров (рис. 7.7) формируют из расплава при высокой температуре. Единственным коммерчески доступным ЖК волокном является Vectran[®], формируемый из расплава полимера. Волокна Vectran[®] легки и имеют исключительно высокую прочность и жесткость, что делает их очень хорошей альтернативой стали. При одинаковом весе волокна Vectran в пять раз прочнее стали. Форма поперечного сечения волокон идеальна для получения из них высокотемпературных фильтров. Чтобы увеличить прочность ткани, их иногда смешивают с арамидными или другими высокопрочными волокнами [1].

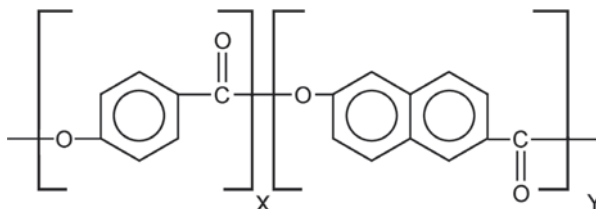


Рис. 7.7. Структура жидкокристаллического волокна

7.5.2. СВМПЭ

Методом гельформования из сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) можно получить сильно ориентированные волокна. Эти волокна имеют высокую прочность, химическую стойкость, хорошую износостойкость и малый вес, что делает их практически идеальными для большого спектра изделий, от стойкой к порезам защитной одежды до морских канатов. Так как СВМПЭ легче воды, такие канаты плавают. При одинаковой массе СВМПЭ волокна торговой марки Spectra® в десять раз прочнее стали. Основными недостатками этих волокон являются плохая термостойкость, обусловленная относительно низкой температурой плавления полиэтилена, и ползучесть под нагрузкой.

7.6. Сравнение физических свойств

На рис. 7.8 приводится сравнение свойств различных волокон.

7.7. Требования к высокопрочным волокнам

Чтобы получить волокна с высокими модулем упругости и прочностью при растяжении, необходимо выполнить по крайней мере три требования:

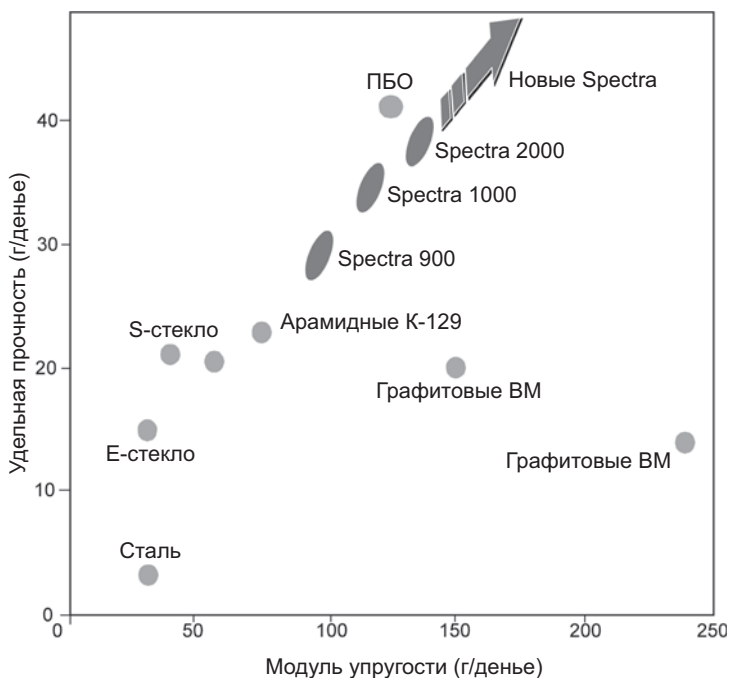


Рис. 7.8. Корреляция прочности при растяжении и модуля упругости высокоэффективных волокон [5]



Рис. 7.9. Хаотическая ориентация молекул жесткоцепного полимера

1. Полимерные молекулы должны быть ориентированы строго в направлении оси волокна.
2. Молекулярная масса и длина молекулярной цепи должны быть очень большими.
3. Волокно должно иметь высокую степень кристалличности и не должно иметь дефектов.

Имеются два способа получения высокопрочных волокон, удовлетворяющих вышеупомянутым требованиям. Первый состоит в получении высокоориентированной структуры из жесткоцепных стержнеобразных молекул с относительно низкой молекулярной массой (рис. 7.9), примером чего являются арамидные (лиотропные) или жидкокристаллические (термопластичные) полимеры [2, 3]. Из такого полимера можно сформовать волокно и увеличить его молекулярную массу путем отжига или дополнительного вытягивания. Примером этого способа является процесс формования арамидных волокон.

Второй способ состоит в использовании полимера со сверхвысокой молекулярной массой и гибкой длинной цепочкой, примером чего является формирование волокон из сверхвысокомолекулярного полиэтилена [2, 3] (рис. 7.10). Так как из расплава СВМПЭ сформовать волокно не удастся (полимер имеет слишком высокую вязкость и не течет даже при очень высоких температурах), волокна фор-



Рис. 7.10. Клубки гибкоцепных полимерных волокон

муют из разбавленного раствора концентрацией от 2 до 30%. В разбавленном растворе СВМПЭ полимерная цепь «разматывается» и образует гелеобразную сетку. Методом гелеформования получают волокна из слабосвязанной сетки длинных молекулярных цепей. После этого волокна для увеличения механических характеристик подвергают дополнительной ориентационной вытяжке. Эти процессы будут иллюстрироваться ниже на примере высокоэффективных СВМПЭ волокон типа Spectra® и Dyneema®.

7.8. Арамидные волокна

Арамидное волокно основано на поли(р-фенилентерефталамиде) (ПФТФ). Рис. 7.11 описывает процесс полимеризация этого полимера по механизму поликонденсации [2, 3].

В отличие от большинства ароматических полиамидов в парасостоянии, ПФТФ не растворяется в обычных растворителях. Однако его можно растворить в концентрированной серной кислоте [2, 3] (рис. 7.12).

Степень упорядоченности молекул полиарамида в растворе зависит от его концентрации, что иллюстрирует рис. 7.13 [2, 3]. При увеличении концентрации полимера от 5 до 12% вязкость раствора, как и ожидалось, увеличивается. Стержнеподобные молекулы принимают форму, показанную на рис. 7.14.

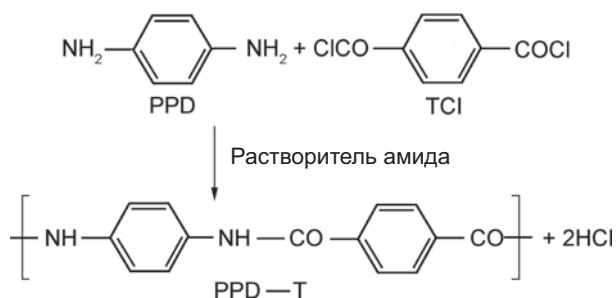


Рис. 7.11. Реакция поликонденсации

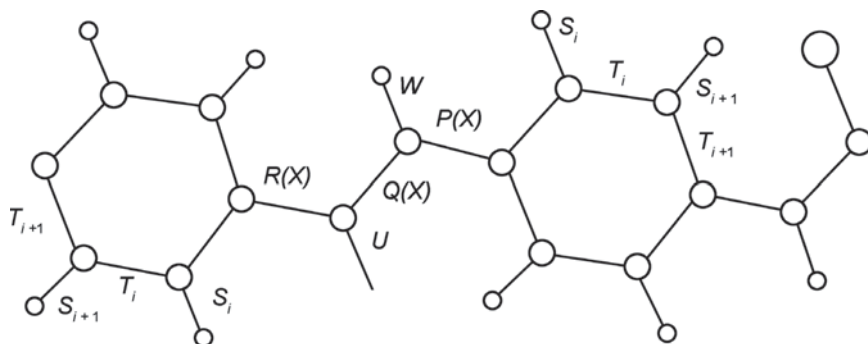


Рис. 7.12. Арамид в серной кислоте

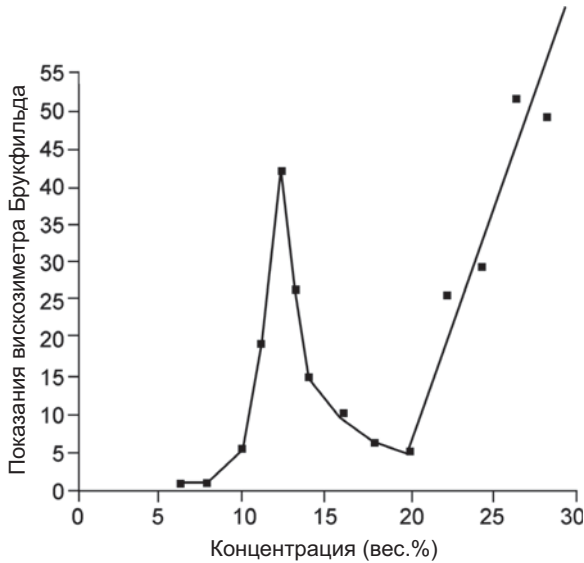


Рис. 7.13. Зависимость вязкости раствора от концентрации полимера в серной кислоте

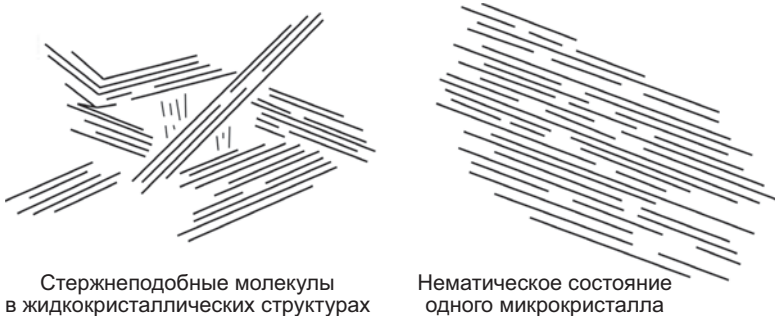


Рис. 7.14. Распределение стержнеобразных молекул в разбавленном растворителе

При дальнейшем увеличении концентрации стержнеобразные полимерные молекулы переходят в нематическое состояние с высокой степенью ориентации. В результате, вязкость раствора снижается, как показано на рис. 7.13. При удлинении в процессе течения при формировании волокон из анизотропного раствора молекулы полимера ориентируются вдоль оси струи, что создает ориентацию волокна.

7.8.1. Формование арамидных волокон

Рис. 7.15 иллюстрирует формирование арамидных волокон из раствора. В этом процессе анизотропный раствор ПФТ-Ф проходит через воздушный промежуток в коагуляционную ванну, как показано на рис. 7.15. После коагуляции полимера нить промывают и высушивают [2, 3].

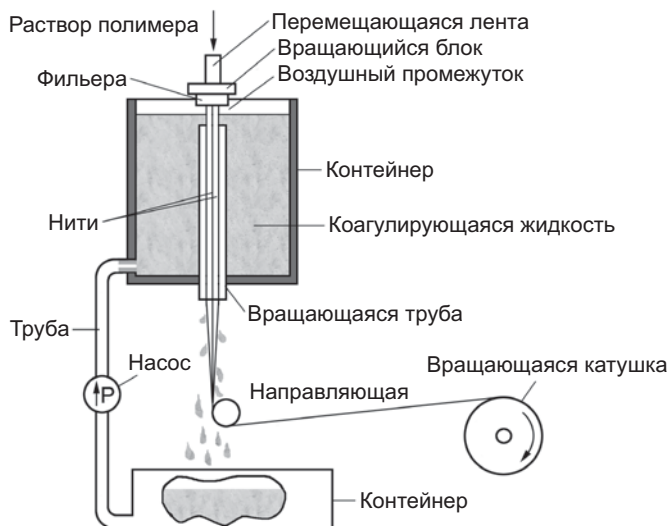


Рис. 7.15. Схема процесса формирования арамидных волокон

Метод формирования волокон из ориентированных жесткоцепных полимеров основан на ориентации молекул при сдвиговом течении струи через фильеру и ее дальнейшем удлинении, как показано на рис. 7.16. Разориентация молекул после выхода из капилляра сводится к минимуму удлинением струи в воздушном промежутке и в коагулирующей ванне, где она превращается в высокоориентированное кристаллическое волокно. Чтобы увеличить модуль упругости волокна, его затем подвергают высокотемпературной обработке под растягивающим напряжением. Свойства волокон Kevlar приведены в табл. 7.1 [2, 3].

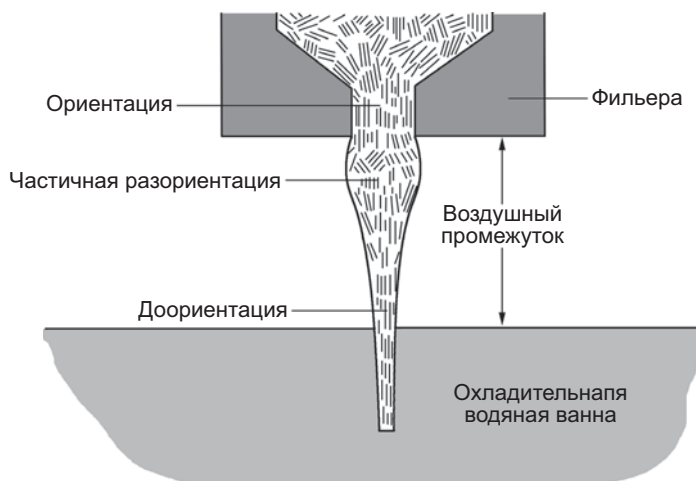


Рис. 7.16. Ориентация молекул в фильере благодаря удлинению и сдвиговому течению раствора

Таблица 7.1. Свойства арамидных волокон

Свойство нити	Противобаллистическое волокно	Высокомодульное волокно
Прочность при растяжении (г/денье) (Kpsi)	23,0–26,5 420–485	18,0–26,5 340–420
Модуль упругости (г/денье) (Mpsi)	550–750 10,3–14	950–1100 17,4–21
Относительное удлинение (%)	3,6–4,4	1,5–2,8
Плотность (г/см ³)	1,44	1,44
Равновесная влажность (%) при 25°С и влажности 65%	6	1,5–4,3

7.8.2. Структура и морфология арамидных волокон

Имеется несколько масштабных уровней микро- и макроструктуры арамидных волокон. Они кратко рассматриваются ниже.

Структура фибрилл

Разрушение арамидного волокна при растяжении сопровождается его интенсивной фибриллизацией, т.е. образованием тонкофибриллярной «метелки». Этот тип разрушения отражает высокоупорядоченную поперечную структуру волокна (рис. 7.17 и 7.18).

Фибриллярная структура волокна

Арамидное волокно легко фибриллизуется под действием сил трения, особенно если они действуют перпендикулярно оси волокна. Фактически, легко фибриллируются почти все высокоориентированные волокна (например, Spectra®). Это обусловлено тем, что макромолекулы удерживаются вместе лишь ван-дер-ваальсовскими или водородными связями. На рис. 7.19 изоб-



Рис. 7.17. Распространение трещины в волокне

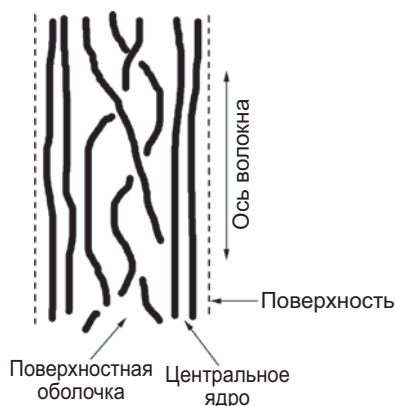


Рис. 7.18. Оболочка и ядро волокна

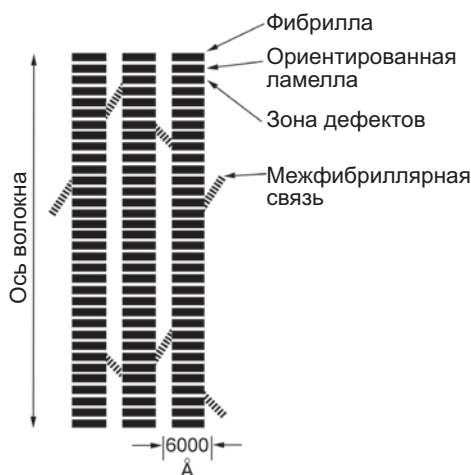


Рис. 7.19. Модель фибриллярной структуры арамидного волокна

ражена модель фибриллярной структуры арамидных волокон. Силowymi элементами этих волокон являются отдельные фибриллы, тогда как в обычных волокнах силowymi элементами являются молекулярные цепи. Поперечный размер фибрилл равен приблизительно 600 нм, а длина достигает нескольких сантиметров [2, 3].

7.8.3. Морфология и ориентация арамидных волокон

На рис. 7.20 схематически показана микрофибрилла. Прямые линии изображают полимерные ПФТФ молекулы. Некоторые из них имеют концы и изгибы. Эти дефекты являются слабыми точками структуры волокна. Некоторые ПФТФ молекулы проходят через аморфные дефектные области, соединяя высокопрочные микрокристаллиты. Сетка «проходящих» молекул (рис. 7.20) обеспечивает высокую прочность волокна.

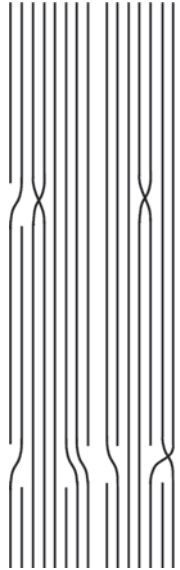


Рис. 7.20. Модель кристаллической структуры арамидного волокна

7.8.4. Складчатые структуры

В поляризационном микроскопе в арамидном волокне наблюдаются уникальные поперечные полосы. Если волокно растянуть, эти полосы становятся тоньше [2, 3]. Это наблюдение привело к гипотезе, что арамидное волокно имеет складчатую структуру, как показано на рис. 7.21. Причина возникновения складчатой слоистой структуры в арамидных волокнах до конца не понята и сейчас.

Для объяснения причины образования складчатой структуры было предположено, что при коагуляции сначала формируется поверхностный слой волокна, который и несет растягивающее напряжение. Это позволяет «ядру» волокна сбросить

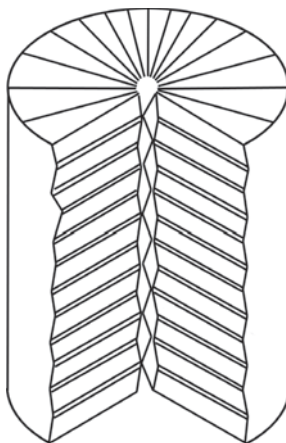


Рис. 7.21. Модель складчатой структуры арамидного волокна

сильно с себя напряжения, в результате чего в нем формируются регулярные складки [2, 3]. Складчатая структура придает волокну способность к значительному удлинению. Это может быть причиной уменьшения толщины поперечных полос в волокне Kevlar под напряжением.

7.8.5. Кристаллическая структура

Арамидное волокно имеет упорядоченную кристаллическую структуру. Метод высокоугловой рентгеновской дифракции не выявляет аморфного гало, что указывает на высокую степень кристалличности полимера. При этом наблюдается пара резких колец в экваториальной плоскости, указывающей, что волокно может содержать несколько процентов неориентированных кристаллитов.

7.9. Гельформование СВМПЭ волокон

Процесс создания высокоэффективных СВМПЭ волокон из очень длинных гибких полиэтиленовых молекул является вторым предельным случаем формования волокон. Хотя химическая структура СВМПЭ идентична обычному полиэтилену высокой плотности (ПЭВП), т.е. самому распространенному техническому полимеру, из расплава волокна сформовать не удастся из-за чрезмерно высокой вязкости. Кроме того, из-за очень сильной перепутанности гибких полимерных молекул ориентационная вытяжка высокопрочных СВМПЭ волокон практически невозможна даже при очень малой скорости растяжения.

Получить высокопрочные СВМПЭ волокна позволяет процесс гельформования. Полимер, состоящий из очень длинных, гибких и запутанных молекул, растворяют в растворителе до концентрации 2–15% (в зависимости от молекулярной массы) и тщательно перемешивают в экструдере или другом смешивающем устройстве, как показано на рис. 7.22.

В растворе молекулы распутываются и формируют свободно связанную гелеобразную сетку. Затем гель продавливают через фильеру, как при обычном формовании волокон из расплава. После охлаждения гелеобразного волокна его можно очень сильно вытянуть, в результате чего образуются высокоориентирован-

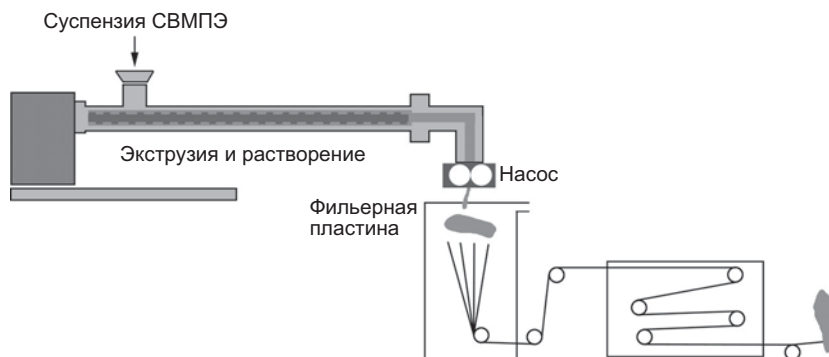


Рис. 7.22. Модель процесса гельформования волокон [6]

ные высокопрочные волокна. Растворитель для СВМПЭ может быть легколетучим или нет, но принцип гельформования остается тем же. Пеннингс с соавторами [4] предложили модель гельформования и вытягивания высокопрочных волокон, показанную на рис. 7.22, 7.23 и 7.24.

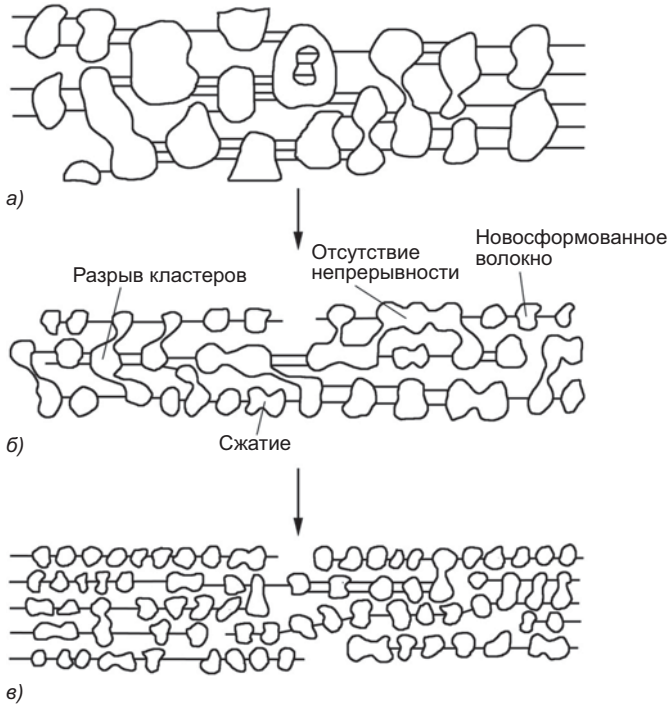


Рис. 7.23. Стадии деформирования гелеобразного волокна

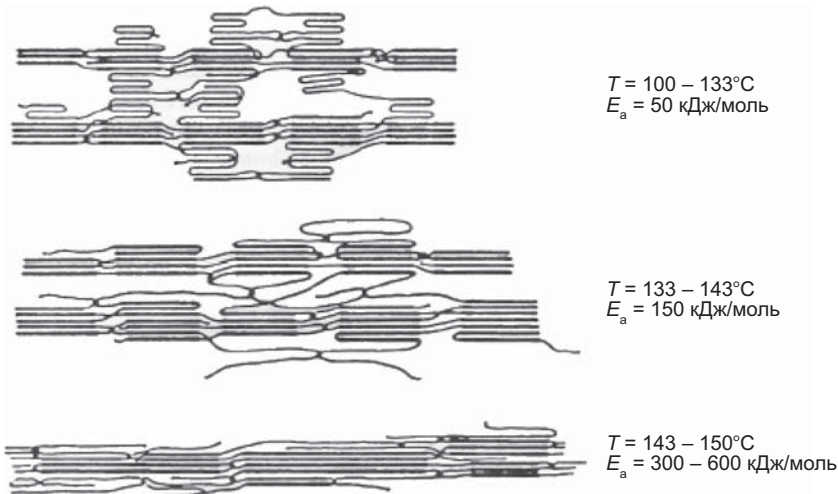


Рис. 7.24. Механизм деформирования СВМПЭ при горячей вытяжке

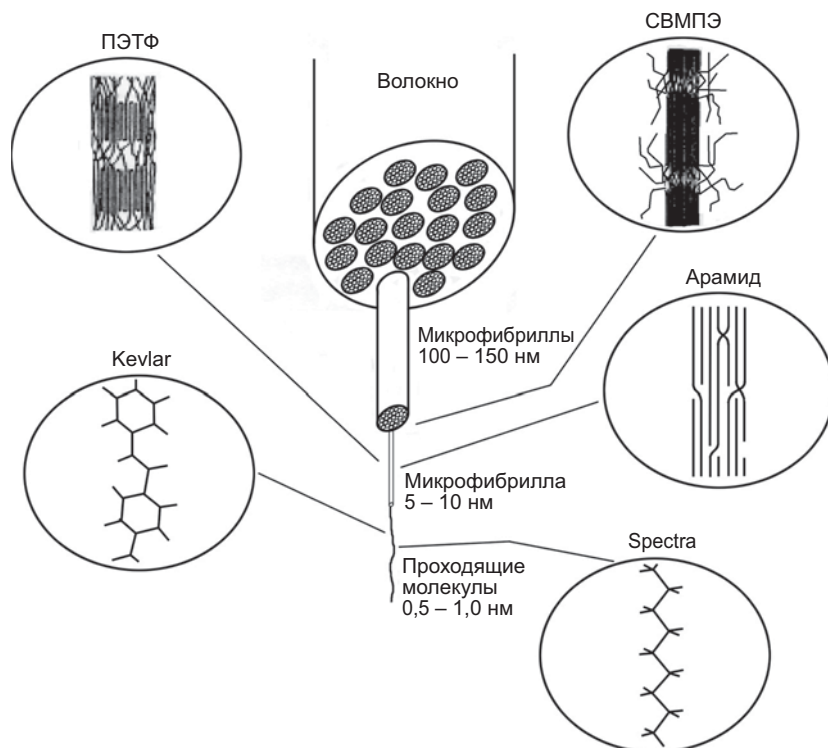


Рис. 7.25. Микро- и макроструктура ПЭТФ, арамидных и СВМПЭ волокон

7.9.1. Морфология СВМПЭ волокна

Как и у арамидных волокон, структура высокопрочных СВМПЭ волокон имеет макро- и микроуровни. На рис. 7.25 показана модель структуры волокон. Микрофибриллы вытянуты вдоль волокон. Они состоят из почти идеальных кристаллитов, перемежающихся относительно малыми аморфными областями (рис. 7.26). Микрофибриллярная структура волокна далека от идеальной. Таким образом, хотя удельная прочность СВМПЭ волокон и превышает прочность стали в десять раз, она все еще далека от теоретической прочности ковалентных С-С связей (рис. 7.27).

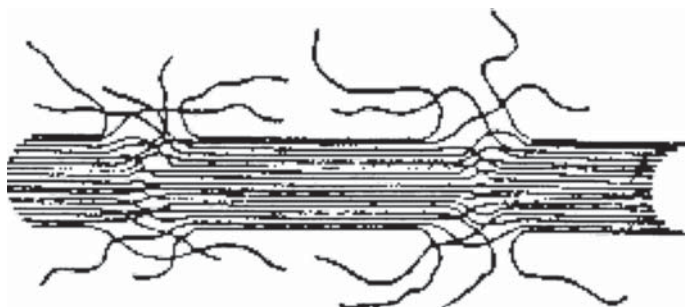


Рис. 7.26. Микрофибрилла СВМПЭ волокна

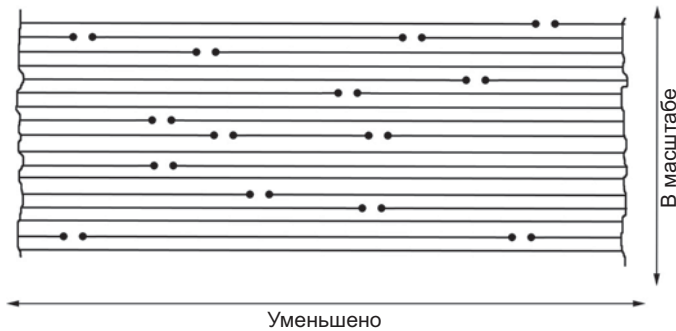


Рис. 7.27. Модель структуры СВМПЭ микрофибриллы

Очевидно, увеличение количества «проходных» молекул в аморфной области должно приводить к возрастанию прочности и модуля упругости полимера. Это означает, что имеется потенциал дальнейшего повышения свойств СВМПЭ волокон (рис. 7.27).

На рис. 7.28 представлена модель макрофибриллы. Поскольку между микрофибриллами вещество находится в аморфном состоянии, структуру волокна можно представить как композит, состоящий из почти идеально ориентированных кристаллических микрофибрилл в аморфной матрице. Эта модель аналогична описанной выше модели арамидного волокна. Отличие состоит в том, что в арамидном волокне межфибриллярное взаимодействие обусловлено водородными связями между полиамидными молекулами. На рис. 7.28 показаны четко разделенные аморфные и кристаллические области [5]. Однако имеются также и проходные молекулы, которые соединяют соседние кристаллиты. Очевидно, увеличение количества «проходных» молекул должно приводить к возрастанию прочности и стабильности размеров СВМПЭ волокна.

Типичные свойства СВМПЭ волокон представлены в табл. 7.2 [6]. По мере усовершенствования технологии гельформования свойства волокон постепенно улучшаются. В настоящее время выпускаются различные марки волокон Spectra, например, S-900, S-1000 и S-2000, а фирма DSM выпускает волокна SK 75 и SK 76. Волокна последнего поколения имеют постепенно уменьшающуюся толщину и все более высокую прочность при растяжении и модуль упругости.

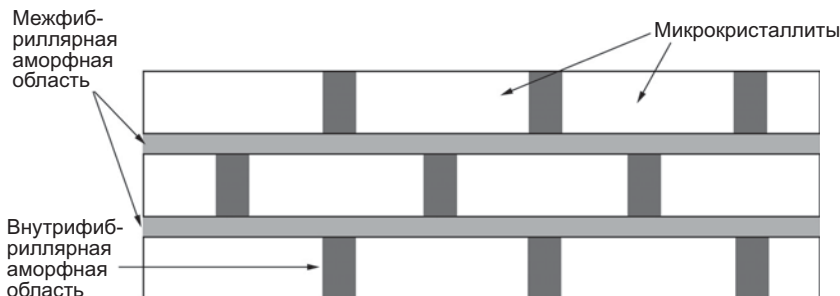


Рис. 7.28. Модель структуры высокопрочной СВМПЭ микрофибриллы

Таблица 7.2. Свойства СВМПЭ волокон

Характеристика	Стандартные волокна	Высокопрочные волокна
Прочность при растяжении (г/денье) (ГПа)	25,5–30,5 420–485	37,5–41,0 3.21–3.61
Модуль упругости (г/денье) (ГПа)	775–920 66–79	1320–1450 113–124
Относительное удлинение (%)	3,6–4,4	1,9–3,6
Плотность (г/см ³)	0,97	0,97

7.10. ПБО волокна

Синтетические волокна, используемые для защиты от баллистического поражения, с течением времени становятся все более прочными. Первыми такими волокнами были нейлоновые волокна, затем появились арамидные волокна, СВМПЭ. Последней разработкой в этой области являются поли(р-фениленбензобисоксазольное) (ПБО) волокна.

Высокая прочность ПБО волокон обусловлена стержнеобразной формой полимерной цепи, что, впрочем, затрудняет формование волокон из этого полимера. По этой причине разработка технологии формования ПБО волокон потребовала много времени. В 1991 г. компания Dow Chemical начала работать над этой проблемой совместно с компанией Toyobo. Их работа привела к созданию уникальной технологии формования, открывшей путь к промышленному производству ПБО волокон.

Компания Toyobo получила лицензию от Dow Chemical и продолжила дальнейшее развитие технологии. Экспериментальная установка по производству ПБО волокон была запущена в начале 1995 г., а промышленное производство началось в 1998 г.

7.10.1. Полимеризация и формование

ПБО полимеризируют из диаминорескоцинол дигидрохлорида и терефталевой кислоты в полифосфорной кислоте. Затем из прядильного раствора полимера в фосфорной кислоте формируют волокно. Формирование структуры волокна происходит во время разделения фаз в процессе коагуляции полимера. Когда выдавленный из фильеры нематический раствор жесткоцепных молекул соприкасается с коагулянтном, образуется набухшая микроволокнистая сетка. В процессе коагуляции из нее выдавливается растворитель и формируется плотная волокнистая структура. Затем коагулированное волокно промывают и высушивают.

Сразу после формования прочность при растяжении ПБО волокон может превышать 5,7 ГПа, а модуль упругости – 175 ГПа. После термообработки при 600°С модуль упругости возрастает до 275 ГПа, а прочность при этом не снижается.



7.10.2. Микрофибриллы и поры

Изучение поверхности разрушения ПБО волокон в растровом электронном микроскопе показывает, что волокно состоит из набора фибрилл диаметром от 10 до 50 нм. При изучении структуры этим методом, однако, нужно проявлять осторожность, поскольку в процессе разрыва волокна могут образовываться микротрещины.

В экваториальной плоскости диаграмм рентгеновского рассеяния ПБО волокон наблюдается полоса, указывающая на наличие микропор, сильно удлиненных в направлении оси волокна. В процессе термообработки эта полоса исчезает, и появляется четырехлепестковая фигура, напоминающая крылья бабочки. Аналогичные полосы наблюдаются и на диаграммах рассеяния волокон Kevlar. Интересно, что ПБО волокна, имеющие более высокую прочность, чем Kevlar, дают ту же самую картину рассеяния. Поры являются дефектами, приводящими к уменьшению предела прочности волокон.

Для оценки диаметра микропор в ПБО волокне анализировали профиль интенсивности экваториальной линии малоуглового рентгеновского рассеивания (МУРР). После поправки на фон логарифм интенсивности строят в зависимости от квадрата вектора рассеивания. Эта зависимость имеет вид прямой линии, из наклона которой средний диаметр микропор оценивают как 24Å.

7.10.3. Структура и физические свойства волокон

Структура

Структура ПБО волокон формируется в процессе коагуляции, промывки и высушивания. Сформованные волокна имеют фибриллярную структуру, а диаметр сильно вытянутых пор равен приблизительно 20 Å. Свежесформованное волокно ориентировано, о чем свидетельствует метод Фурье-преобразования диаграмм электронного рассеяния волокон.

При формировании волокон образуются микрокристаллиты, размер которых в процессе термообработки увеличивается от 100 до 200 Å. Диаграмма малоуглового рассеяния свежесформованного волокна имеет вид четырехлепестковой структуры, которая исчезает после термообработки.

ПБО волокна перед высушиванием состоят из микрофибрилл диаметром приблизительно 10–50 нм и большого количества капилляроподобных микропор. Эти микропоры связаны друг с другом посредством межфибриллярных микротрещин. На поверхности волокна поры отсутствуют. Микрофибрилла состоит из длинных ПБО молекул, ориентированных вдоль оси волокна. Методом малоуглового рентгеновского рассеяния степень ориентации молекул оценивается как 0,95. В плоскости сечения волокна а-ось ПБО кристалла ориентируется преимущественно в радиальном направлении. В случае высокомолекулярных ПБО волокон степень ориентации Эрманна достигает значения 0,99.

Свойства ПБО волокон

Прочность при растяжении, модуль упругости, термостойкость и огнестойкость являются четырьмя главными физическими характеристиками ПБО воло-

кон. ПБО является первым органическим волокном, прочность которого (в расчете на единицу сечения) превосходит сталь и углеродное волокно. Теоретический модуль упругости полимеров был вычислен благодаря недавним успехам вычислительных квантовохимических методов. Реальный модуль упругости ПБО волокон фирмы Тоубо составляет лишь 60% от теоретического значения кристалла ПБО, но модуль упругости некоторых волокон высшего качества достигает теоретического предела. Отметим, что ПБО имеет самый высокий теоретический предел модуля упругости среди всех линейных полимеров.

Термостойкость ПБО примерно на 100°C выше, чем у полиарамидов. Огнестойкость (кислородный индекс) этих волокон неожиданно оказался даже выше, чем у волокон ПБИ (с кислородным индексом 41), которые до разработки ПБО являлись самыми термостойкими волокнами, не говоря о полиарамидах (кислородный индекс 29).

Термостойкость

ПБО волокна имеют очень высокую термостойкость. Физические свойства этих волокон зависят от температуры значительно слабее, чем у других органических волокон. Модуль упругости не проявляет существенного уменьшения даже при высоких температурах, и при 400°C наблюдается лишь 20%-ное снижение модуля упругости. При высоких температурах прочность этих волокон также выше, чем у полиамида. При 500°C их прочность при растяжении равна 15 г/денье.

Другие свойства

Равновесная влажность ПБО волокон очень низка. При температуре 25°C и относительной влажности воздуха 65% равновесное содержание воды равно 0,6 вес.% в волокнах марки ПБО-НМ и 2,0 вес.% в волокнах ПБО-АС. Стабильность размеров при изменении влажности и температуры также очень высокая. Скорость ползучести этих волокон при одинаковом отношении приложенного напряжения к пределу прочности примерно вдвое ниже, чем у Кевлара. Химическая стойкость к действию органических растворителей и щелочей превосходна, и потери прочности при этом не наблюдается. По стойкости окраски ПБО превосходят другие высокоэффективные органические волокна. ПБО волокна не столь стойки к действию кислот, как к действию щелочей, но все же более стойки, чем полиарамиды (табл. 7.3).

Таблица 7.3. Свойства ПБО волокон

Линейная плотность волокон		1,5	1,5
Плотность	г/см ³	1,5	1,5
Прочность при растяжении	г/денье	42	42
	ГПа	5,8	5,8
Модуль упругости	г/денье	1300	2000
	ГПа	180	280
Относительное удлинение	%	3,5	2,5
Поглощение влаги	%	2,0	0,6
Температура деструкции	°C	650	650

7.11. Дополнительная литература

- AFMA website Fiber Source, High Performance Fiber.
- Chinese patent CN 2392788Y.
- Hearle, J. W. S. (ed.) *High-performance Fibres*, Woodhead Publishing Limited, 2000.
- Ktagawa, Tooru, Murase, Hiroki and Yabuki, Kazuyuki, «Morphological Study on Poly-p-phenylenbenzobisoxazole (PBO) Fiber», *J. of Polymer Science: Part B: Polymer Physics*, **36**, 39–48 (1996).
- US patent 4536536, Karesh and Prevorsek Assigned to Allied Corporation, 20 August 1985.
- Van Dingenen, Jan L. J. Gel-spun high performance polyethylene fibers. In Hearle, J. W. S. (ed.) *High-performance Fibres*, Woodhead Publishing Limited, 2000, pp. 62–92.
- Yabuki, K. Poly(p-phenylenebenobisoxazole) fiber, The Twelfth Annual meeting, the Polymer Processing Society, Sorrento, Italy, May 27–31, 1996, 279–281.

7.12. Литература

1. Engineering Brochure. www.Vectran.net.
2. Yang, H. H. *Kevlar Aramid Fiber*, John Wiley & Son, 1993.
3. Yang, H. H. *Aromatic High Strength Fibers*, SPE Mongraph, John Wiley & Son, 1989.
4. Smook, J. and Pennings, J. *Journal of Material Science*, **19**, 31 (1984).
5. Prevorsek, D. «Spectra: The latest entry in the field of high-performance fibers. In Lewin, M. and Preston, J. (eds) *Handbook of Fiber Science and Technology, Vol. 3 High Technology Fibers Part D*, Marcel Dekker, 1996, p. 17.
6. Spectra® fiber technical information.

ГЛАВА 8

ТКАНИ И КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ПРОТИВОБАЛЛИСТИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ

*Дж. В. Сонг, US Army Research, Development and Engineering Command,
Natick Soldier Center, Office of Scientific Research, США*

8.1. Введение

Признание превосходства легкой индивидуальной брони на основе волокнистых материалов над металлической броней пришло во время Второй мировой войны [1–3]. Это превосходство стало еще очевиднее во время войны в Корее, где использование бронезилета из 12-ти слоев нейлоновой ткани позволило значительно снизить количество и степень серьезности ранений груди [4, 5]. Волокнистую броню для защиты личного состава используют по нескольким причинам. Во-первых, ткани, как безматричные, так и покрытые тонким слоем полимерной матрицы, гибки. В боевых условиях гибкость бронезилета является существенным достоинством. Во-вторых, анизотропия полимерных волокон обеспечивает максимально высокий модуль упругости и прочность в направлении ориентации нитей. Это обусловлено ориентированием полимерных молекул вдоль направления оси волокон в процессе их формования. Благодаря разнообразию методов ориентирования полимеров в настоящее время выпускается множество доступных высокопрочных волокон, в том числе и разработанных специально для защиты от баллистических воздействий.

Из волокон и полимерных матриц делают высокопрочные композиционные материалы. Склеивая волокна или слои ткани небольшим количеством полимерной матрицы, получают достаточно жесткий композиционный материал. Формованные изделия из композиционных материалов мягче стали, но их жесткость достаточна для получения изделий определенной формы, например, касок для защиты от осколков противопехотных снарядов. Волокнистые композиты легче и прочнее стали прежде всего из-за высокой прочности и низкой плотности волокон. Эти композиты имеют небольшое содержание полимерной матрицы (обычно менее 20 вес.%) и из них получают как мягкую, так и жесткую броню типа индивидуальной бронезилетов или защитных касок.

8.1.1. Волокна

Развитие волокнистой брони ускорилось после разработки фирмой DuPont Inc. в 1970-х гг. первых жесткоцепных полимерных волокон [6]. Эти волокна назвали «Кевлар», и в настоящее время их используют в различных сферах, включая ин-



дивидуальную броню для вооруженных сил и сил правопорядка, а также в конструкционных материалах. Позднее на европейском рынке под торговой маркой Twaron появились волокна того же химического строения, производимые голландской фирмой Akzo Nobel Inc. Для азиатского рынка под идентичной торговой маркой японская фирма Teijin Inc начала производить тот же тип арамидного волокна. Кроме того, под торговой маркой Technora фирма Teijin внедрила сополимерные арамидные волокна, которые при равной прочности имеют улучшенную химическую стойкость и усталостные характеристики.

Помимо арамидных волокон, в настоящее время в бронесистемах широко используют ориентированные сверхвысокомолекулярные полиэтиленовые (СВМПЭ) волокна. Уже в 1930-х гг. теоретики [7] и экспериментаторы предполагали, что теоретический предел модуля упругости линейных полимеров значительно выше, чем реально достигнутые в то время значения этого показателя в коммерчески доступных текстильных волокнах [8–14]. Марк предсказал, что если удастся выстроить молекулы линейного полиэтилена в плоскую зигзагообразную структуру, модуль упругости полимера приблизится к 250 ГПа [8]. Позже, Sakurada [9–11] вычислил модуль упругости кристалла полиэтилена, который оказался близок к оценке Марка. В работах 1970-х гг. теоретический предел модуля упругости полиэтилена оценивался в 300–400 ГПа [12–14]. Лабораторное достижение теоретически предельных свойств стало реальностью в начале 1980-х гг., когда было разработано СВМПЭ волокно [15–23]. В настоящее время по аналогичной технологии эти волокна производят три компании. Первой эти волокна начала производить фирма Allied-Signal Inc. (теперь Honeywell) в США под торговой маркой Spectra®. На европейском рынке голландская фирма DSM Inc. внедрила волокно Dyneema, а японская фирма Mitsui Petrochemical Inc производит волокно Tskmilon® для азиатского рынка.

Поли(р-фениленбензобисоксазол) (ПБО) является другим высокопрочным жесткоцепным полимером, имеющим большие перспективы для применения в броне. Это волокно проявилось в результате исследований, начатых в конце 1960-х гг. и финансируемых Лабораторией материалов ВВС США. Химическая структура и технология производства были запатентованы в 1980-х годах [24–26]. Японская фирма Toyobo Inc. начала промышленное производство этих волокон под торговой маркой Zylon®.

В этой главе описываются в основном материалы на основе волокон Кевлар, Spectra и Zylon, являющиеся типичными представителями семейств арамидных, СВМПЭ и ПБО волокон соответственно. Хотя имеющаяся технология производства волокон различных торговых марок одного семейства несколько различается, их химический состав, физические, механические и противобаллистические свойства весьма близки. В табл. 8.1 приведены плотность и механические характеристики волокон, применяемых в противобаллистических изделиях.

Как показано в табл. 8.1, существует резкий скачок механических свойств при переходе от частичнокристаллических волокон нейлон-66, получаемых формованием из расплава, к Кевлару-29®, который является первым жидкокристаллическим жесткоцепным полимерным волокном. Вариация физических свойств

Таблица 8.1. Упругие свойства волокон противобаллистического назначения

Тип волокна	Плотность (г/см ³)	Прочность при растяжении		Деформация при разрушении (%)	Модуль упругости	
		(г/день)*	(МПа)		(г/день)*	(ГПа)
Нейлон-66	1,14	10	1006	18,2	45	5
Кевлар-29	1,44	22	2794	3,5	525	67
Кевлар-129	1,44	27	3429	3,3	755	96
Кевлар-КМ2	1,44	27	3429	4,3	500	64
Spectra-900	0,97	31	2610	3,6	920	79
Spectra-1000	0,97	38	3250	2,9	1320	113
Spectra-2000	0,97	41	3510	2,9	1450	124
Zylon-AS	1,54	43	5800	3,5	1325	180
Zylon-НМ	1,56	42	5800	2,5	1962	270

* Единицу измерения (грамм-сила/день) используют для характеристики линейной плотности текстильных волокон, описывающей толщину волокон. День характеризует массу волокон длиной 9000 м в граммах. Площадь поперечного сечения (А) волокна может быть получена из линейной плотности нити по следующей формуле: $A = \text{День} / (900000 \text{ см} \times \rho)$, где ρ – плотность волокна в г/см³. Например, предполагая, что волокно Кевлар имеет круглое поперечное сечение, волокно с линейной плотностью 1,5 день имеет диаметр 12 мкм. Переход от г/день к Паскалям имеет вид: $\text{Па} = (8,82 \times 10^7) (\text{г/день}) (\rho)$.

волокон Кевлар, Spectra и Zylon обусловлена в основном различием условий их вытяжки и высокотемпературной термообработки после формования. При этом изменяется морфология кристаллической структуры и молекулярная ориентация полимера, которая сильно влияет на механические свойства, например, модуль упругости и удлинение при разрыве.

8.1.2. Структура ткани

В изделиях противобаллистического назначения волокна используют как в виде нетканых материалов, так и в виде тканей различного типа. При этом волокна используются как отдельно, так и в сочетании с полимерными матрицами. Типичными неткаными материалами являются войлоки, которые получают путем ориентирования и взаимного зацепления волокон. Другой часто используемой нетканой структурой является многослойный материал марки Shield, получаемый последовательной укладкой однонаправленных слоев непрерывных волокон под определенным углом. Ткани получают переплетением нитей в виде двух- или трехмерных структур. В зависимости от типа переплетения нитей ткани подразделяют на полотняные, саржевые, сатиновые (атласные) и т.д. Трехмерные материи различаются также по типу соединения слоев.

Двухмерные ткани

Наиболее часто в изделиях противобаллистического назначения используют двухмерные (2-D) ткани, полученные путем переплетения нитей под углом 90°. Как показано на рис. 8.1, основными типами переплетения являются полотняное, саржевое и сатиновое. Ткань полотняного переплетения имеет самую высокую плотность переплетений, за ней следуют саржа и затем сатин.

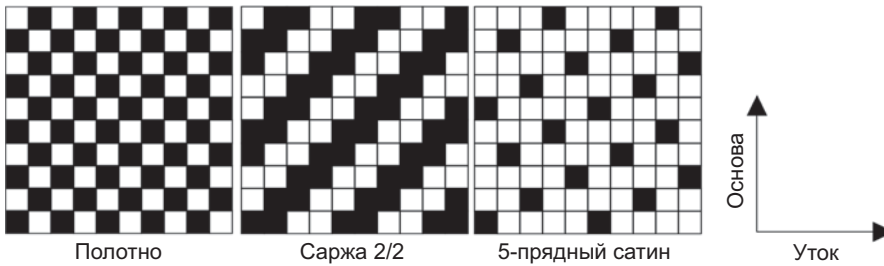


Рис. 8.1. Три основных типа переплетения нитей в ткани

Поэтому стабильность размеров полотна выше, чем у тканей другого переплетения.

Однако, переплетение нитей значительно уменьшает эффективность армирования по сравнению с характеристиками однонаправленных композитов. Исследования влияния типа ткани на ее баллистические характеристики привели к мысли, что структуры с меньшим количеством переплетений нитей имеют более высокие характеристики из-за меньшего сопротивления распространению продольной волны растяжения [28]. Было также найдено, что ткани из более тонких нитей имеют лучшие характеристики, чем ткани из более толстых нитей. Это указывает, что недостаточно частое переплетение может быть преодолено увеличением числа нитей, противодействующих проникновению пули. Очевидно, эффективное разрушение волокна при баллистическом ударе, которое является основным каналом диссипации кинетической энергии, более вероятно в тканях из тонких нитей, чем в случае толстых нитей.

Ниже кратко описаны физические характеристики типичных тканей, используемых в высокопрочных композитах противобаллистического и конструкционного назначения [29].

Наиболее часто используют *полотняные ткани*. Их делают путем переплетения нитей основы и утка по типу «над одной-под одной нитью». Полотняные ткани легко пропитываются матрицей. С другой стороны, для заполнения промежутков между нитями такие ткани требуют больше матрицы. Помимо обычных крученых нитей в полотняных тканях используют некрученые нити в виде плоской ленты (ровинги), что уменьшает толщину ткани.

Ткани корзинного переплетения подобны полотнам, но в них две нити поочередно проходят сначала над двумя, а затем под двумя перпендикулярными нитями. Такие ткани более плоские и гибкие, чем полотна. Нити в них менее изогнуты, чем при полотняном переплетении. Корзинное переплетение часто используют в случае толстых нитей, из которых делают тяжелые ткани.

Саржевое переплетение очень похоже на корзинное, но в этом случае одна, а не две нити проходит над двумя, а затем под двумя нитями. Саржевое переплетение $2/2$ соответствует случаю, когда нить проходит над двумя, а затем под двумя перпендикулярными нитями. Шаг переплетения может быть увеличен. Например, в сарже $4/4$ нить пропускают сначала над четырьмя, а затем под четырьмя перпендикулярными нитями. Саржевые ткани имеют характерные диагональные

линии, которые образуются в результате переплетения. Эта оптическая иллюзия часто приводит к ошибочной укладке слоев саржи под углом 45° к требуемому направлению. Саржевые ткани гибче полотна, а по сравнению с сатином четырех- или восьмипрядного переплетения они имеют большую стабильность формы. Саржу часто используют для изготовления композитов сложной формы методами вакуумного формования и ручной выкладки. Из углеродных волокон часто делают саржевые ткани за их эстетичный внешний вид.

Переплетение «гусиной лапкой» является наиболее простым способом переплетения в семействе *сатиновых тканей*. Переплетение «гусиной лапкой» фактически является четырехрядным сатином. Ткань ткют, пропуская нить под одной, а затем над тремя перпендикулярными нитями, так что нить пропускается под каждой четвертой нитью. Такую ткань называют четырехрядным сатином.

Пятирядное сатиновое переплетение. Если изгибы нитей нежелательны, можно использовать 5-рядный сатин. В этом случае нить проходит сначала над четырьмя, а затем под одной нитью. Такие ткани часто используют в авиакосмической промышленности для изготовления деталей сложной формы из высокопрочных и легких композитов.

Восьмирядное сатиновое переплетение. В этом случае нить сначала проходит под одной, а затем над семью перпендикулярными нитями. Такие ткани из тонких стеклянных нитей часто используют в авиакосмической промышленности.

Трехмерные ткани

Трехмерные (3-D) ткани делают, переплетая нити в трех измерениях. Существуют различные типы 3-D тканей, различающиеся способом ориентации нитей. Типичными структурами являются 3-D «тесма» и 3-D «плетенки». Главное преимущество 3-D структур состоит в армировании материала не только в плоскости, но и в поперечном направлении, что подавляет расслоение многослойных композитов.

Волокнистые 3-D композиты имеют отличную стойкость к повреждениям при баллистическом ударе [30–32]. С другой стороны, 3-D композиты менее эффективно поглощают энергию удара по сравнению с тонкими 2-D тканями, используемыми в бронезиловках и касках [32]. Это обусловлено либо более высоким содержанием матрицы в 3-D композитах, либо подавлением процесса расслоения этого композита.

Выбор оптимальной структуры переплетения

В настоящее время в противобаллистических изделиях наиболее часто используют ткани полотняного и корзинного переплетения, а также однонаправленные нетканые материалы. При определении оптимальной структуры ткани, размера нити и плотности переплетения нужно учитывать наличие водоотталкивающего покрытия и аппрета, обеспечивающих хорошую адгезию волокон и матрицы и предотвращающих поглощение влаги. Табл. 8.2 и 8.3 показывают структуру тканей на основе волокон Кевлар и Spectra, которые в настоящее время используются в различных противобаллистических системах [29].

Таблица 8.2. Структура тканей на основе волокон Кевлар

Переплетение	Линейная плотность нитей; основа × уток	Структура ткани основа × уток	Толщина (мм)	Вес (г/м ²)	Предел прочности (кгс/см) основа × уток
Кевлар-29 и 129					
Полотно	840 × 840	31 × 31	0,3048	220,59	161 × 170
Полотно	1500 × 1500	24 × 24	0,4318	319,00	197 × 214
Полотно	1000 × 1000	31 × 31	0,3810	281,67	161 × 166
Полотно	840 × 840	26 × 26	0,2540	196,83	134 × 1 43
Полотно	1500 × 1500	17 × 17	0,3048	223,98	139 × 145
Полотно	1420 × 1420	17 × 17	0,2794	220,59	152 × 152
Полотно	1000 × 1000	22 × 22	0,2540	281,67	116 × 130
Полотно	400 × 400	32 × 32	0,1524	108,60	80 × 77
2 × 2 саржа	1500 × 1500	35 × 35	0,5842	468,32	322 × 325
2 × 2 саржа	1420 × 1420	35 × 35	0,5842	464,93	349 × 357
Полотно	200 × 200	40 × 40	0,1270	71,27	60 × 58
Полотно	3000 × 3000	17 × 17	0,6096	461,53	286 × 322
8 × 8 саржа	1500 × 1500	48 × 48	0,8128	638,00	393 × 411
4 × 4 саржа	3000 × 3000	21 × 21	0,7620	546,37	357 × 357
4 × 4 саржа	3000 × 3000	24 × 24	0,7620	610,85	416 × 447
Кевлар-LT					
Полотно	400 × 400	36 × 36	0,1778	122,17	98 × 100
Кевлар-КМ2					
Полотно	850 × 850	31 × 31	0,3048	230,77	157×170
Кевлар-49					
Полотно	1420 × 1420	17 × 17	0,3048	217,19	125 × 134
Гусиная лапка	195 × 195	34 × 34	0,0762	57,69	38 × 38
8Н полотно	380 × 380	50 × 50	0,2032	166,29	118 × 116
Полотно	195 × 195	34 × 34	0,0762	57,69	46 × 46
Полотно	380 × 380	22 × 22	0,1016	74,66	53 × 53
Полотно	1140 × 1140	17 × 17	0,2540	169,68	112 × 115
Гусиная лапка	1140 × 1140	17 × 17	0,2286	169,68	111 × 114
Полотно	1420 × 1420	13 × 13	0,2540	162,89	102 × 107
4 × 4 саржа	1420 × 1420	28 × 28	0,4826	363,12	243 × 232
4 × 4 саржа	2130 × 2130	27 × 22	0,6350	461,53	326 × 263
8 × 8 саржа	1420 × 1420	40 × 40	0,6604	509,04	327 × 320

8.1.3. Матрицы

Одной из первых матриц, использованной для изготовления противобаллистических бронежилетов, была смесь фенольной и поливинилбутиральной (ПВБ) смол. Эта смола была разработана компанией DeBell and Richardson Inc. для нейлоновых шлемовых прокладок в начале 1960-х гг. [33]. Матрицу получают смешением катализируемого фталевым ангидридом фенол формальдегида и ПВБ с весовым отношением компонент 1:1. Carswell [34] сообщил, что смесевая фенол/ПВБ матрица имеет более высокие свойства как по отношению к чистому ПВБ

Таблица 8.3. Структура тканей на основе волокон Spectra

Переплетение	Линейная плотность нитей; основа × уток	Структура ткани основа × уток	Толщина (мм)	Вес (г/м ²)	Предел прочности (кгс/см) основа × уток
Ткани Spectra-900					
Полотно	1 200 × 1 200	10 × 10	0,305	101,72	89 × 89
Полотно	1 200 × 1 200	17 × 17	0,457	186,48	160 × 152
Полотно	1200 × 1200	21 × 21	0,508	237,34	196 × 178
Полотно	650 × 650	34 × 34	0,432	213,60	169 × 160
8 × 8 корзинная	1 200 × 1 200	48 × 48	0,965	525,53	446 × 410
8Н сатин	1 200 × 1 200	21 × 23	0,457	247,51	196 × 214
Ткани Spectra-1000					
Полотно	215	45 × 45	0,152	88,15	98 × 85
Полотно	650	17 × 17	0,279	94,93	107 × 98
Полотно	650	34 × 34	0,432	203,43	196 × 187
Полотно	215	56 × 56	0,178	108,50	125 × 116
Полотно	375	32 × 32	0,178	108,50	107 × 98
8Н сатин	650	32 × 32	0,355	186,48	187 × 178
Полотно	375	32 × 32	0,178	108,50	107 × 98
Ткани Spectra-2000					
Полотно	180	49 × 49	0,007	2,45	440 × 440

(термопласт), так и по отношению к фенольной смоле (термореактопласт). Фенол/ПВБ смесь имеет высокую ударную вязкость, гибкость и эластичность термопласта (ПВБ) и хорошую термостойкость и стойкость к растворителям, характерные для фенольной смолы. Использование этой смолы совместно с нейлоновыми [35], кевларовыми [36, 37] или стеклянными волокнами [38] позволяет достичь хорошей противобаллистической стойкости композита.

Смесь фенол/ПВБ широко используют в качестве матрицы для изготовления брони на основе волокон Кевлар. Она позволяет добиться более высокой прочности склеивания слоев ткани на раздир по сравнению с другими матрицами, например, фенолвинилацетальной смесевой матрицей [39]. Исследование влияния состава на свойства фенол/ПВБ смесей показало [40, 41], что максимальная адгезионная прочность достигается при концентрации ПВБ 40%. Противобаллистическая стойкость композита максимальна при концентрации ПВБ от 40 до 60%. При меньшей концентрации ПВБ в смеси (от 0 до 20%) органопластики на основе волокон Кевлар разрушаются хрупко, и их баллистические характеристики оказываются пониженными.

Для изготовления композитов на основе тканей из полиэтиленовых волокон Spectra оптимальны винилэфирная (ВЭ) (Derakane® компании Dow Chemical) и термопластическая полиуретановая смолы (ПУ) (Dispercol® компании Mobay Chemical) [42–48]. Были рассмотрены также смеси ВЭ и ПУ и другие матричные смолы типа меламинформальдегида, поливинилового спирта и модифицированные фенол/ПВБ системы [45]. Исследование органопластиков на основе ткани Spectra и смесей ВЭ и ПУ смол показало, что баллистическая стойкость брони



определяется жесткостью и объемным содержанием матрицы [42]. Оба эти факторы определяют степень смещения волокон при ударе, влияя таким образом на величину поглощенной энергии и силу торможения снаряда. То же исследование показало, что более жесткая ВЭ смола больше ограничивает движение нитей, увеличивая способность композитов к поглощению энергии пули.

Несмотря на высокую жесткость, термостойкость и устойчивость к действию растворителей, из-за необходимости применения растворителей и выделения вредных паров при пропитке волокон все более актуальными становятся экологические проблемы, возникающие при использовании термореактивных смол, включая фенольные и ВЭ. Другим недостатком термореактивных смол является ограниченный срок хранения из-за постепенной поперечной сшивки при хранении. Кроме того, термореактивные матрицы нельзя использовать повторно, а волокнистые композиты на основе термореактивных матриц трудно ремонтировать.

В этих отношениях термопластичные матрицы гораздо лучше термореактивных смол [49]. Композиты на основе термопластичных матриц могут храниться очень долго, и они имеют гораздо меньшую стоимость производства. Высокая ударная вязкость и химическая стойкость этих полимеров делают их очень привлекательными для использования в волокнистых композитах. При этом высокая прочность и малая ползучесть должны сохраняться при повышенной внешней температуре. Термопласты плавятся, и поэтому композиты на их основе легче изготавливать и ремонтировать в полевых условиях путем плавления матрицы.

Кроме вышеупомянутой термопластичной полиуретановой матрицы (Dispercol) для изготовления защитных щитов на основе СВМПЭ ткани Spectra использовали стирол-бутадиен-стироловый сополимер Kraton® компании Shell Chemical. В органопластиках на основе волокон Кевлар использовали также термопластичные полиэтилен низкой плотности (ПЭНП) и линейный полиэтилен низкой плотности (ЛПЭНП).

8.1.4. Броня из волокнистых композитов

Легкие противобалистические композиты используют высокую ударную стойкость высокопрочных полимерных волокон Кевлар®, Spectra® и Zylon® [27, 39–52]. Из этих волокон в форме непрерывных нитей или тканей и полимерной матрицы получают уникальные волокнистые бронекompозиты. Как отмечалось выше, бронекompозиты отличаются очень низким содержанием матрицы (менее 20% по весу), что обеспечивает максимальную реализацию высокой стойкости волокон к поперечному удару.

Если ламинат не слишком толстый, из-за очень низкого содержания матрицы он обычно оказывается относительно гибким. Из волокнистых бронематериалов делают также жесткую броню, используемую, в частности, в противоосколочных касках [27, 40–48, 52, 53]. Композиты из арамидных и СВМПЭ волокон все более широко используются для изготовления легких бронированных укрытий (навесов) [51].

Важнейшим параметром, характеризующим баллистическую стойкость материала, является максимальная скорость или кинетическая энергия ударника, при которой материал еще не пробивается [28, 46]. Баллистический предел V_{50} определяют как скорость ударника, при которой вероятность полного пробития равна 50%. Важными характеристиками также являются остаточная прочность, описывающая степень повреждения материала после удара пулей.

Эксперимент ясно показывает, что прочность при растяжении является наиболее важной характеристикой волокон, определяющей баллистическую стойкость композита. Несмотря на динамический характер нагружения очевидно, что основным каналом поглощения энергии при ударе является энергия упругого растяжения волокон. Конечно, только из механических свойств волокон при растяжении баллистические свойства материалов предсказать невозможно из-за различия их физических и тепловых характеристик.

Однако для одинаковых материалов с немного различными технологическими условиями изготовления можно установить корреляцию между их статической прочностью при растяжении и баллистическими свойствами. Данные Riewald *et al.* [27] (табл. 8.4) демонстрируют влияние свойств волокон при растяжении на противобаллистические характеристики защитной каски. Для более полной информации в табл. 8.4 приведены также упругие характеристики нитей. Для обеих касок в качестве матрицы использовали одинаковую фенол/ПВБ матрицу. Ткань Кевлар-29 имела корзинное 2/2 переплетение, а ткань Кевлар-КМ2 представляла собой простое полотно. Поверхностная плотность обеих тканей была равна 0,36 кг/м².

Как видно из табл. 8.4, модули упругости волокон близки. Начальные части диаграмм растяжения в обоих случаях линейны вплоть до разрушения. Однако эти волокна имеют существенно различную прочность и деформацию при разрыве, а также энергию деформации, определяемую как площадь под кривой напряжение–деформация. Приведенные данные ясно указывают, что более высокая прочность (более чем на 20%) и более высокая деформация при разрушении (на 30%) нитей Кевлар-КМ2 приводят к существенному увеличению баллистической эффективности композита (более чем на 20%). При одинаковых баллистических характеристиках композиты на основе волокон КМ2 на 20% легче, чем их аналоги из Кевлар-29. Это иллюстрирует влияние свойств волокон при растяжении на баллистические характеристики композита.

Таблица 8.4. Баллистический предел V_{50} и удельный баллистический предел ($V_{50}/\text{вес}$) касок из двух типов арамидного волокна (Кевлар-29 и Кевлар КМ2)

Волокно	Линейная плотность нити	Вес (кг)	V_{50} (м/с)	$V_{50}/\text{вес}$ (м/с/кг)	Энергия деформации (МПа)	Прочность при растяжении (МПа)	Относительное удлинение при разрыве (м/м)	Модуль упругости (ГПа)
Кевлар-29	1500	1,34	686	512	51	2794	0,033	67
Кевлар КМ2	1500	1,18	697	617	78	3429	0,043	64
Разница (%)		-16	1,6	20	41	23	30	-4,7

8.2. Ударные испытания

Ударную стойкость волокнистых материалов широко исследовали при разработке брони на основе ткани [65, 66], волокнистых композитов [27, 44, 50, 56], жесткой композитной брони с лицевым керамическим слоем [54, 55], а также конструктивных деталей в авиационной и аэрокосмической технике [57–60]. Эти работы потребовали внимательного изучения механического поведения волокнистых материалов при поперечном ударе.

В зависимости от скорости и массы ударника удар классифицируют как (а) низкоскоростной удар [61, 62] или (б) баллистический удар [63–66]. Результаты испытаний часто сравнивают с результатами квазистатической индентации стержня в бронепакет, при котором поперечная сила прикладывается с относительно низкой скоростью, когда динамическими эффектами можно пренебречь [67–69]. Скорость движения нагружающего стержня при таких испытаниях постоянна, что моделирует действие ударника с очень большой массой.

Примерами низкоскоростного удара [61, 62] служат автомобильные аварии и удар инструмента (молотка), падающего с относительно небольшой высоты. Испытания на низкоскоростной удар осуществляют падающим грузом или с помощью гидравлической испытательной машины. Отметим, что скорость падающего ударника изменяется при ударе, а гидравлическая испытательная машина обеспечивает постоянную скорость внедряемого стержня.

В отличие от низкоскоростного удара, баллистический удар является динамическим событием, включающим распространение ударных волн нагружения [63–66]. Во многих случаях материал разрушается до отражения волны деформации от его границ [64]. Баллистический удар, как правило, вызывается пулями или осколками взорвавшихся боеприпасов. Их масса обычно намного меньше, а скорость намного больше, чем при низкоскоростном ударе. При баллистических испытаниях часто используют боевое или пневматическое оружие. Как и при ударе падающим грузом, при баллистическом ударе происходит уменьшение скорости ударника.

8.3. Механизмы разрушения брони

Механизмы разрушения волокнистых материалов при баллистическом ударе исследовали во многих экспериментальных и теоретических работах [42, 44, 48, 50, 54–58, 60–62]. В отличие от жестких конструктивных композитов аэрокосмического назначения, доминирующим механизмом диссипации энергии гибкой брони, по-видимому, является работа растяжения волокон [42, 70]. Однако на баллистические характеристики гибких композитов влияют также и свойства матрицы [42, 70]. Влияние небольшого количества матрицы на степень склейки нитей и на противобаллистические характеристики материала исследовано далеко не до конца. В проведенных исследованиях подробно изучалось также поведение безматричных тканей при трансверсальном баллистическом ударе [65, 66]. В этом случае на заключительных стадиях пробития происходит распрямление нитей.

8.3.1. Тканые бронепакеты

Рис. 8.2 иллюстрирует деформирование тканей из нейлона-66 и Кевлара-29 при баллистическом ударе [71]. В обоих случаях образуется конус, распространяющийся от точки удара. Так как Кевлар-29 имеет более высокий модуль упругости, размер конуса в нем больше, чем в нейлоне-66 (рис. 8.2). Вследствие этого при баллистическом ударе Кевлар-29 поглощает больше кинетической энергии, чем нейлон-66.

Как отмечалось выше, основной механизм поглощения кинетической энергии броней при баллистическом ударе состоит в разрыве волокон вследствие их растяжения¹. Хансен описал механизм баллистического пробития тканого бро-

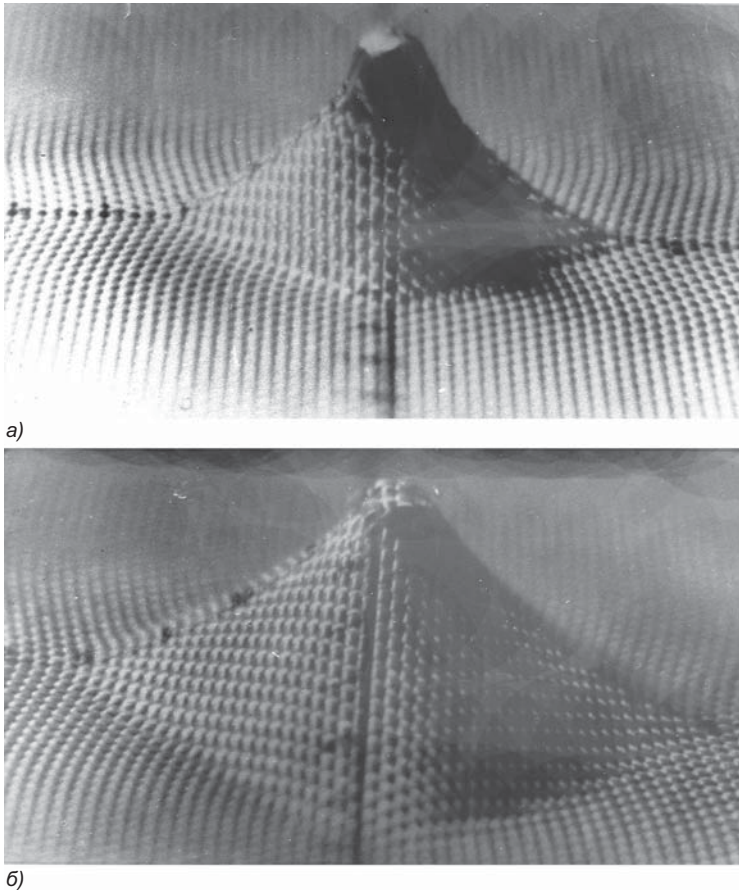


Рис. 8.2. Формирование конуса в тканях из нейлона 66 (а) и Кевлара-29 (б) при баллистическом ударе. Структура ткани (корзинное переплетение 2/2), поверхностная плотность ткани (14 унций/ярд [2]) и скорость удара (200 м/с) одинаковы. Удар производился симулятором осколка массой 17 гран

¹ Это верно лишь для высокоскоростного баллистического удара. Гораздо более аккуратное утверждение приведено авторами данной главы в разделе 8.3.2. — *Прим. ред. перевода.* См. примечание редактора перевода в главе 3 на с. 89.

непакета [72]. При баллистическом ударе по ткани сначала происходит растяжение и вытягивание нитей, непосредственно подвергшихся удару пулей. Эти нити пересекаются с перпендикулярными нитями, и в точках пересечения протекают два процесса. Первичные нити, подвергшиеся удару пулей, передают часть напряжения пересекающим их волокнам и таким образом они «разгружают» себя. В точках пересечения происходит частичное отражение волны деформации назад к точке удара. Это увеличивает напряжение в точке удара, и, если скорость снаряда уменьшилась не слишком значительно, напряжение в конечном счете превысит прочность волокон, и ткань разорвется.

На рис. 8.3 показаны различные волокна, разрушенные вследствие баллистического удара [73]. Волокна Кевлар сильно расщеплены и фибриллизированы. Волокно ПБО выглядит аналогично Кевлару. Волокно Нейлон-66 демонстрирует следы частичного плавления. Волокно Spectra (СВМПЭ) демонстрирует следы растяжения, образование кинков и изгиб после обрыва. В волокнах Spectra также наблюдаются следы плавления. Плавление объясняется двумя причинами: (а) выделением тепла при трении мишени и снаряда и (б) эффектом адиабатического нагревания при пробивании [44, 74].

Характер разрушения волокон зависит и от других факторов, например, от линейной плотности волокон и нитей, структуры переплетения ткани, степени крутки и ориентации нитей. Figucia [75] исследовал влияние структуры ткани на баллистическую стойкость. По его данным, сатиновые ткани, в которых взаимодействие нитей не очень сильное (рис. 8.1), по характеристикам превосходят ткани полотняного и корзинного переплетения. Он также сообщил, что при равной полной поверхностной плотности тканая броня на основе нитей с малой линейной плотностью более эффективно поглощает энергию, чем ткани из более тол-

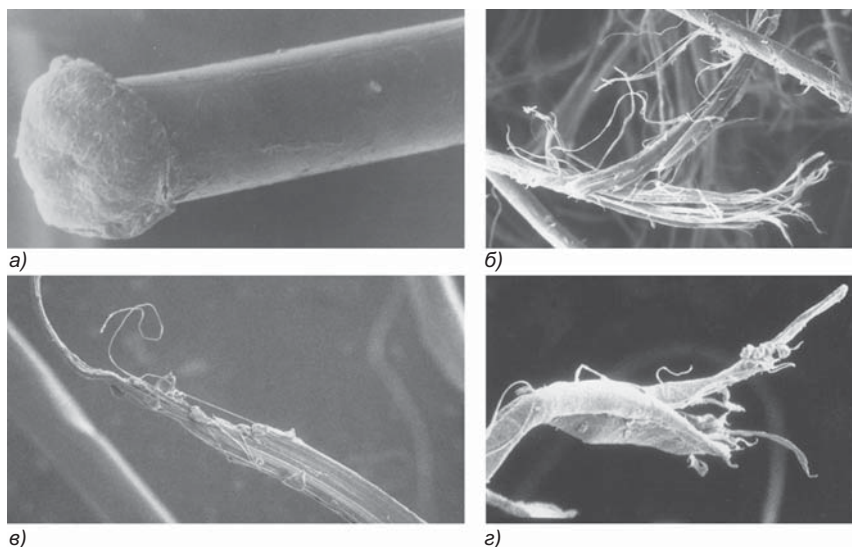


Рис. 8.3. Разрушение волокон Нейлон-66 (а), Кевлар-29 (б), Spectra (в) и Zilon (г) при баллистическом ударе

стых нитей. Этот вывод, по-видимому, справедлив и для многослойных композитов. Исследование композитов на основе волокон Spectra установило, что многослойные композиты из однонаправленных слоев работают значительно лучше, чем композиты из ткани полотняного переплетения [42].

8.3.2. Броня из волокнистых композитов

Хансен установил, что основными механизмами разрушения в композитах на основе стеклянных и кевларовых волокон при баллистическом ударе являются расслоение, сдвиговое разрушение матрицы и разрыв волокон [72]. При высокоскоростном баллистическом ударе по стеклопластику на основе эпоксидной матрицы одним из основных механизмов разрушения является разрыв волокон [76–78]. В случае низкоскоростного удара важное значение имеет также расслоение, сопровождаемое растрескиванием матрицы.

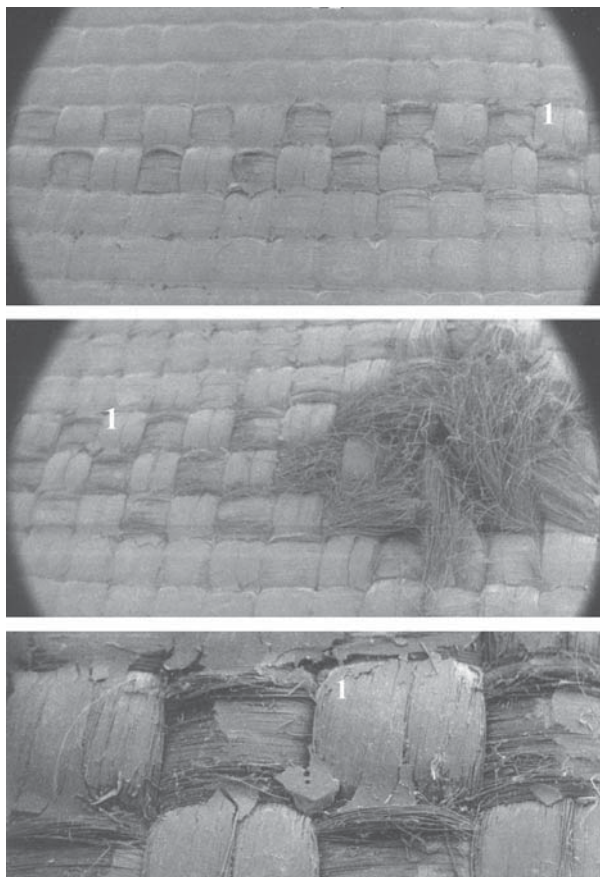


Рис. 8.4. Разрушение пятислойных композитов на основе волокон Кевлар-29 при баллистическом ударе. Метка отмечает след распространения продольной волны, растрескивание и отслоение матрицы. Удар имитатором осколка массой 17 грам

Исследование композитов на основе волокон Кевлар-29 и стекловолокон S-2 и термореактивной матрицы подтвердило, что разрыв волокон является основным механизмом диссипации энергии удара [79]. Более того, для достижения максимальной баллистической стойкости композита разрыв волокон при распространении продольной волны деформации является наиболее предпочтительным типом повреждения. Рис. 8.4 демонстрирует интенсивный разрыв волокон Кевлар-29 вблизи точки удара. Растрескивание матрицы и отслоение волокон наблюдаются довольно далеко от точки удара, по-видимому, из-за распространения продольной волны вдоль оси волокон. Отраженная волна приводит к изгибу волокон вблизи точки удара.

В стеклопластике наблюдается сдвиговое разрушение (рис. 8.5) с минимальным повреждением волокон вдали от точки удара. Если волокна не испытывают существенного смещения, как на рис. 8.4, вклад расслоения в поглощение энергии баллистического удара минимален.

СВМПЭ волокна Spectra и Dyneema имеют совершенно иные тепловые и физические характеристики. В отличие от других типов волокон, СВМПЭ плавится при относительно низкой температуре (около 150°C), а их температура стеклования значительно ниже комнатной температуры (около -120°C). Все другие описанные выше высокопрочные волокна теплостойки вплоть до температуры разложения, превышающей 400°C . Поэтому композиты на основе СВМПЭ волокон при баллистическом ударе имеют особенности.

Lee *et al.* [42, 48] исследовали механизмы повреждения композитов на основе ткани Spectra и многослойных поперечно ориентированных ламинатов на основе волокон Spectra при баллистическом ударе. При пробивающем ударе по композиту на основе ткани волокна Spectra срезаются вблизи поверхности удара и разрываются на растягиваемой задней поверхности панели. Боковое смещение при пробивании проявляется в виде расслоения и образования симметричного конуса вблизи точки удара. Как следует из рис. 8.6, в поперечно ориентированных композитах Spectra на задней поверхности мишени вблизи точки удара также наблюдается сдвиговое разрушение и разрыв волокон. Отметим, что расслоение поперечно ориентированных нетканых композитов на основе волокон Spectra отличается от композитов на основе ткани.

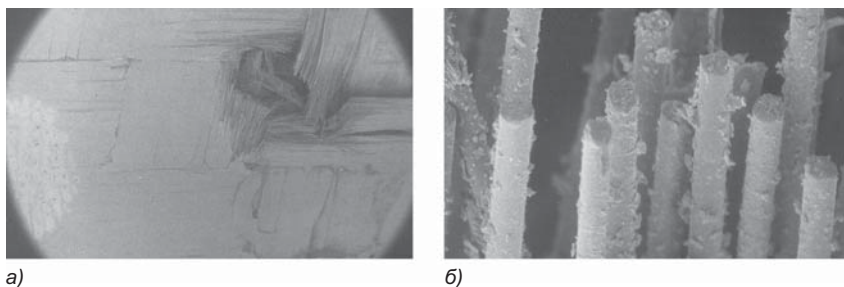


Рис. 8.5. Разрушение пятислойного стеклопластика на основе волокон S-2 при баллистическом ударе. Передняя поверхность панели (а), увеличенное изображение разрушенных волокон (б). Удар имитатором осколком массой 17 грам

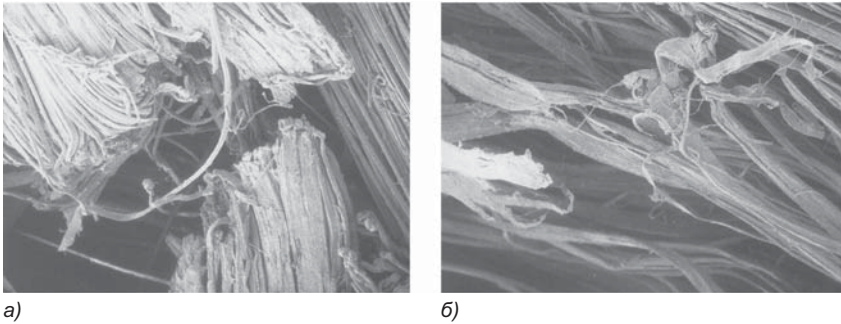


Рис. 8.6. Разрушение композита на основе препрега Spectrashield при баллистическом ударе. Передняя поверхность панели (а), задняя поверхность панели (б). Удар имитатором осколка массой 17 гран

Расслоение органопластика на основе препрега Spectrashield при баллистическом ударе напоминает полосы, наблюдавшееся Cristescu *et al.* [77] в стеклопластике с эпоксидной матрицей. При ударе снаряд давит на ряд (полосу) волокон в первом слое ламината. Эти волокна в свою очередь оказывают поперечное давление на второй слой, и происходит последовательное расслоение слоев ламината вплоть до завершения полного пробития или остановки снаряда. Ширина отслаиваемых полос обычно близка к диаметру снаряда, а их длина зависит от времени, требуемого для перерубания первого слоя. В ламинатах Spectrashield при баллистическом ударе полосы направлены вдоль слоев волокон.

Вклад энергии деформации разрушенных волокон в диссипацию энергии может быть оценен путем изучения образца после пробития. Hsieh *et al.* [70] исследовали поведение безматричных бронепакетов и композитов на основе тканей Кевлар и Spectra при низкоскоростном и баллистическом ударах. В обоих случаях композиты по своим характеристикам превосходили сухие ткани. Изучение образцов после испытаний показало, что в композитах количество разорванных волокон выше, чем в тканях.

Lee *et al.* [48] также отметили более сильное поглощение энергии в композитах на основе ткани Spectra-900 по сравнению с безматричными тканями бронепакетами Spectra-900 такой же конфигурации. Ограничение смещения волокон небольшим количеством матрицы (< 20 вес.%) приводит к увеличению количества разрушенных волокон по сравнению с сухой тканью, в которой нити вытягиваются при внедрении снаряда. Эти авторы изучали также влияние матрицы на баллистическое поведение ткани Spectra, исследуя разорванные волокна. В органопластиках на основе ткани Spectra при использовании венилэфирной (ВЭ) матрицы количество разорванных волокон больше, чем в случае полиуретановой (ПУ) матрицы. Поглощение энергии в композите Spectra/ВЭ выше, чем в Spectra/ПУ. Жесткая ВЭ матрица более эффективно ограничивает движение волокон и при внедрении снаряда стимулирует большее количество разрушений волокон, чем эластичная ПУ матрица.

Хотя вклад матрицы в поглощение энергии при баллистическом ударе менее существенен, чем вклад волокон, свойства матрицы также прямо или косвенно

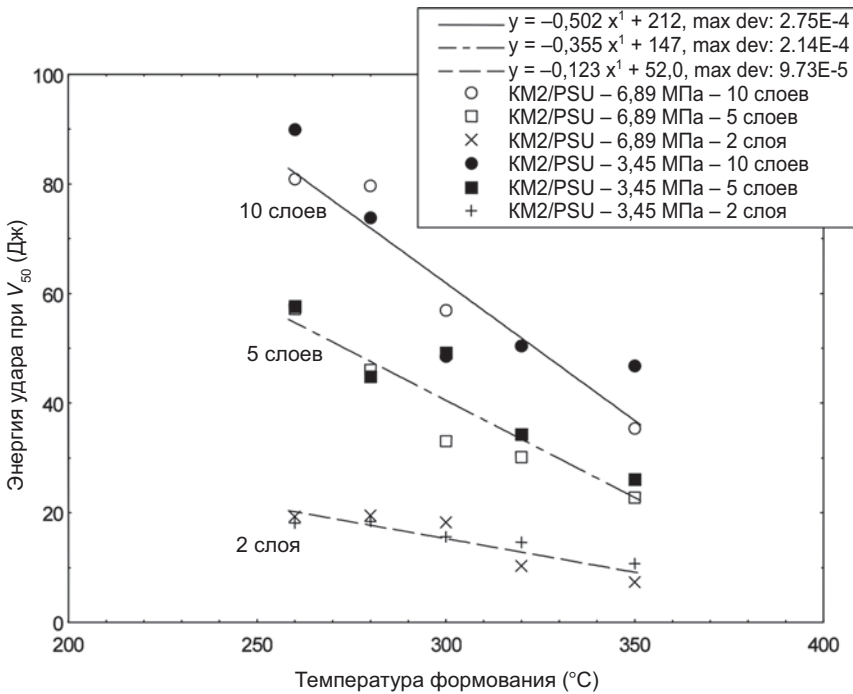


Рис. 8.7. Влияние температуры формования на энергию, поглощаемую композитом Кевлар-КМ2/ПС при ударе. Скорость удара была равна баллистическому пределу V_{50}

влияют на баллистические характеристики композита. Изменение свойств матрицы в зависимости от способа технологической обработки является еще одним фактором, влияющим на поглощение кинетической энергии композитом. Это особенно актуально для термопластичных матриц, поведение которых в зависимости от технологии изготовления композита изменяется сильнее, чем в случае термореактивных матриц. Сонг [80] сообщил о существенном влиянии свойств термопластичной матрицы на противобаллистические характеристики композита, особенно в случае аморфных поликарбоната (ПК) и полисульфона (ПС). Как показывает рис. 8.7, увеличение температуры формования приводит к заметному уменьшению поглощения энергии удара композитом Кевлар-КМ2/ПС.

При повышении температуры формования жесткость композита Кевлар-КМ2/ПС увеличивается как из-за улучшения пропитки волокон полимером, так и из-за изменений морфологической структуры матрицы. Очевидно, величина поглощаемой энергии обратно пропорциональна жесткости композита Кевлар-КМ2/ПСУ. Изучение разрушенных образцов Кевлар-КМ2/ПСУ выявило сдвиговое разрушение волокон в композитах, сформованных при высокой температуре.

Рис. 8.8 иллюстрирует влияние волокон, типа и концентрации матрицы, а также структуры волокон на противобаллистические характеристики композитов, используемых в защитной нательной броне.

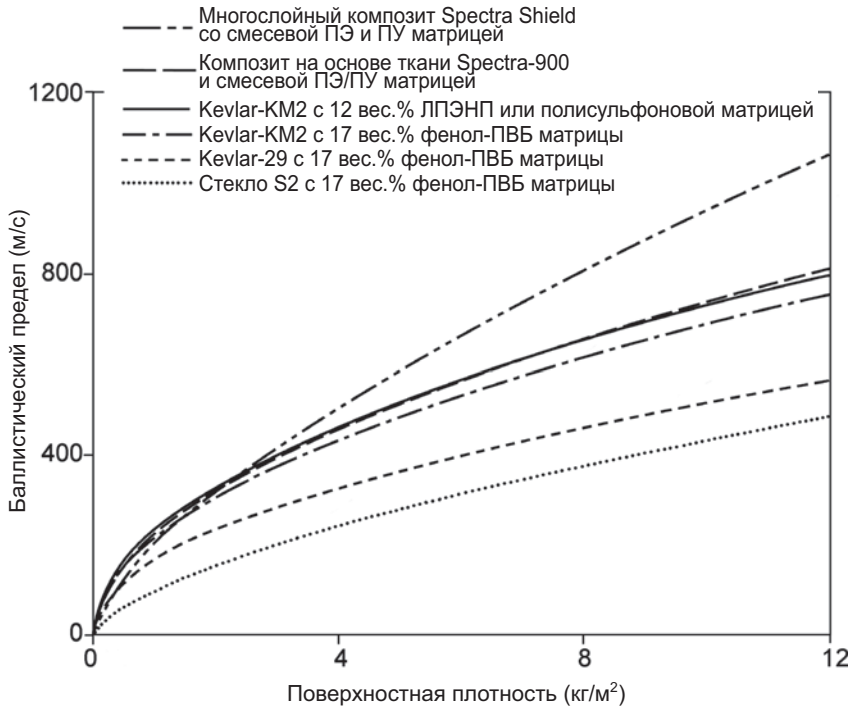


Рис. 8.8. Баллистические характеристики относительно тонких пластин композитов на основе различных волокон, матриц и содержания матрицы. Данные получены при помощи удара имитатором осколка массой 17 гран

Для описания этих кривых использовали [41] эмпирическую формулу $V_c = \gamma(A_d)^\delta$, где V_c — баллистический предел, A_d — поверхностная плотность композита, γ и δ — константы. Значения констант γ и δ приведены в табл. 8.5. Аналогичные соотношения использовали также для описания влияния толщины брони [48].

Хотя приведенные на рис. 8.8 данные описываются комбинацией различных параметров, они иллюстрируют относительное влияние различных параметров на баллистические характеристики композитов. Как уже упоминалось выше, многослойный композит на основе слоев Spectrashield имеет значительно лучшие характеристики, чем композит на основе ткани Spectra. Этот результат отражает существенное влияние структуры волокон. Различие свойств композитов Кевлар-29/фенол-ПВБ (фенольная поливинилбутираловая матрица), Кевлар-КМ2/фенол-ПВБ и стекло S-2/фенол-ПВБ показывает влияние типа волокна. Влияние типа и содержания матрицы демонстрируют композиты на основе Кевлар-КМ2.

Таблица 8.5. Константы γ и δ

	Стекло S-2/ фенол/ПВБ	Кевлар-29/ фенол/ПВБ	Кевлар-КМ2/ фенол/ПВБ	Кевлар-КМ2/ ЛПЭНП или ПС	Spectra-900	Spectra shield
γ	98,81	157,69	216	234	223	200
δ	0,64	0,56	0,502	0,492	0,518	0,67

8.4. Аналитические модели

Одна из самых важных задач состоит в определении критической скорости, выше которой снаряд пробивает мишень. Эту характеристику называют баллистическим пределом. Она имеет первостепенное значение при создании систем противобаллистической защиты. Обзор механизмов баллистического пробивания металлических материалов может быть найден в работах [81, 82]. Во многих работах предпринималась попытка связать начальную скорость ударника с остаточной скоростью и баллистическим пределом для разнообразных материалов [46, 56, 59, 66, 69, 81–89]. Из-за сложного характера процесса взаимодействия мишени и ударника большинство таких моделей являются эмпирическими или полумпирическими.

Авербух и Боднер выделили три последовательные стадии процесса внедрения ударника в металлическую пластину при баллистическом ударе [88]. Основной стадией является формирование «пробки» и ее выталкивание. «Пробкой» авторы назвали материал мишени, который находится перед снарядом и движется вместе с ним. На первой стадии процесса пробития на снаряд действуют следующие силы: (а) инерционная сила, обусловленная ускорением массы материала мишени, и (б) сжимающая сила, обусловленная сжатием мишени в области контакта со снарядом. Вторая стадия пробития состоит в начале сдвигового движения пробки из материала мишени. Третья стадия начинается после полного образования пробки. На этой стадии пробка и снаряд движутся вместе как единое твердое тело, на которое по всему периметру пробки действуют сдвиговые силы.

Рехт и Ипсон рассмотрели внедрение в мишень недеформируемого снаряда с тупым наконечником [85]. Процесс внедрения они моделировали как неупругое столкновение двух свободных цилиндров – снаряда и пробки, отделившейся от мишени. Удар они считали абсолютно неупругим, и поэтому конечные скорости снаряда и пробки совпадали. Из закона сохранения импульса следует:

$$V_r = \frac{m_p}{m_p + m_s} V_s, \quad (8.1)$$

где V_r и V_s – остаточная и начальная скорости снаряда соответственно, а m_p и m_s – массы снаряда и пробки.

Энергия E , потраченная на деформирование и выделение тепла при ударе, равна разнице между начальной и конечной кинетической энергией:

$$E = \frac{1}{2} m_p V_s^2 - \left[\frac{m_p}{m_p + m_s} \right] \frac{1}{2} m_p V_s^2$$

или

$$E = \left[\frac{m_s}{m_p + m_s} \right] \frac{1}{2} m_p V_s^2. \quad (8.2)$$

Дополнительная энергия теряется в процессе пробивания из-за наличия сдвиговых сил на периферии области сдвига. Пусть величина этой энергии равна W , тогда полный баланс энергии может быть записан:

$$\frac{1}{2} m_p V_s^2 = E + W + \frac{1}{2} (m_p + m_s) V_r^2. \quad (8.3)$$

Если скорость ударника равна баллистическому пределу V_c , $V_r = 0$, $V_s = V_c$ и

$$W_c = \left[\frac{m_p}{m_p + m_s} \right] \frac{1}{2} m_p V_c^2, \quad (8.4)$$

где W_c – величина W при $V_s = V_c$.

Для данных мишени и снаряда потеря кинетической энергии из-за действия сдвиговых сил при критической скорости W_c предполагается постоянной. Подставляя уравнения 8.2 и 8.4 в уравнение 8.3, получаем следующее выражение:

$$V_r = \frac{m_p}{m_p + m_s} \sqrt{V_s^2 - V_c^2}. \quad (8.5)$$

Используя тот же подход, основанный на законах сохранения энергии и импульса, Ламберт [84] обобщил уравнение Рехта-Ипсона (8.5):

$$V_r = a (V_s^p - V_c^p)^{1/p} \text{ при } V_s > V_c. \quad (8.6)$$

Здесь $a = m_p / (m_p + h m_s)$, а опытным путем было определено $h = 1/3$. Параметры a и p будут оптимизированы для данной задачи.

Уравнение 8.6 является основой модели Джонаса-Ламберта, включающей уравнение Рехта-Ипсона (8.5) в качестве частного случая. Для недеформируемого твердого снаряда $p = 2$. Тогда:

$$V_r^2 = A (V_s^2 - V_c^2) \text{ при } V_s > V_c. \quad (8.7)$$

По определению, критическая скорость V_c является минимальной скоростью ударника, при которой начинается пробивание мишени. Следовательно, V_c постоянно для данного материала мишени и данного снаряда. Поэтому уравнение 8.7 можно записать в виде:

$$V_r^2 = A V_s^2 - B \text{ при } V_s > V_c, \quad (8.8)$$

где $B = A V_c^2$ – отрезок, отсекаемый линейной частью графика зависимости V_r^2 от V_s^2 . Следовательно,

$$V_c = \sqrt{\frac{B}{A}}. \quad (8.9)$$

Zhu *et al.* [56] рассмотрели три стадии внедрения ударника в волокнистый композит, аналогичные трем стадиям внедрения ударника в металлическую пластину, предложенным Авербухом и Боднером [88]. Первая стадия – вдавливание. Как и в случае металлической мишени, вдавливание вызвано сжимающей силой, с которой действует снаряд. Стадия вдавливания заканчивается, когда начинается разрушение волокон. Вторая стадия – перфорация, которая подобна формированию пробки в металлической пластине. На этой стадии дальнейшее внедрение увеличивает поверхность контакта, что повышает сопротивление ламината. С другой стороны, разрушение волокон уменьшает сопротивление материала. Разрушение волокон является доминирующим процессом. Заключительная стадия состоит в выходе снаряда. Как и для случая металлической мишени, на третьей стадии пробития трение является единственной силой, противодействующей движению снаряда.

Vinson *et al.* [90–92] предложили модель конических оболочек. Они предположили, что после удара снаряда по композитному материалу формируется конус, который продолжает расти до тех пор, пока снаряд или пробьет цель, или остановится. Мишень они рассматривали как деформируемую мембрану, сопротивление внедрению которой обусловлено исключительно энергией ее деформирования. При данной скорости удара скорость изменяется во времени, так же как и деформация вплоть до начала разрушения. При критической скорости V_c можно считать $V_r = 0$. Для данных мишени и снаряда зависимость предельной деформации от скорости удара имеет линейный характер, что можно использовать для описания связи V_c и V_s .

Для безматричного тканого пакета Cunniff [66, 83] рассмотрел связь полной энергии во время внедрения с энергией растяжения E_{se} и кинетической энергией E_{ke} :

$$\frac{1}{2} m_p (V_s^2 - V_r^2) = E_{se} + E_{ke}. \quad (8.10)$$

При критической скорости $V_s = V_c$ снаряд и мишень находятся в покое, что описывается $V_r = 0$. В этот момент энергия удара равна энергии деформации:

$$E_{se} = \frac{1}{2} m_p V_c^2 \text{ при } V_s = V_c. \quad (8.11)$$

Выше критической скорости экспериментальные значения энергии деформации описываются показательной функцией:

$$E_{se} = \frac{1}{2} m_p V_c^2 e^{-K_1 \left(\frac{V_s - V_c}{V_c} \right) K_2} \text{ при } V_s > V_c. \quad (8.12)$$

Здесь K_1 и K_2 – константы. При $V_s > V_c$ после завершения пробития энергия деформирования незначительна.

$$E_{ke} = \frac{1}{2} K_3 A_d A_p V_r^2 \text{ при } V_s \geq V_c. \quad (8.13)$$

K_3 – постоянная, A_d и A_p – поверхностная плотность мишени и снаряда соответственно. Отметим, что произведение $A_d A_p$ равно массе пробки, которая находится непосредственно перед снарядом.

На основании экспериментальных исследований композитов, армированных волокнами Кевлар, Spectra и стекловолокон, Лин *et al.* [46] описали связь энергии деформирования E_c и теплоту, выделяемую при скорости ударника, равной баллистическому пределу, формулой: $E_c = \alpha D^\beta$, где α и β – константы, D – диаметр ударника. С учетом этого соотношения уравнение (8.8) может быть записано в виде:

$$V_r = \sqrt{A \left(V_s^2 - \frac{2}{m_p} \alpha D^\beta \right)}. \quad (8.14)$$

Результаты исследования поведения углепластика на основе эпоксидной матрицы при статическом внедрении стержня Ли и Сан описали следующей формулой [59, 69]:

$$E_r = \frac{m_p}{2} V_r^2 = \frac{m_p}{2} V_c^2 - F_E(b + h), \quad (8.15)$$

где b и h – длина снаряда и толщина ламината соответственно, V_c – скорость при внезапном падении силы сопротивления мишени [69] вследствие начала образования пробки. Предполагается, что пробка формируется мгновенно. F_E – сила трения при начале выталкивания пробки.

Баллистический предел V_c вычисляется, подставляя V_r из уравнения (8.15) в уравнение (8.16):

$$V_c = \sqrt{V_s^2 - V_r^2} \text{ при } V_r > 0. \quad (8.16)$$

Позднее Sun и Potti предложили модель, описывающую остаточную скорость формулой [87]:

$$V_{RS} = \sqrt{V_s^2 - \frac{2}{m_p} E_{DP}}, \quad (8.17)$$

где V_{rs} – остаточная скорость и E_{DP} – энергия динамического пробития. Предполагая, что энергия динамического пробития постоянна, на основании закона сохранения энергии она описывается формулой:

$$E_{DP} = \frac{1}{2} m_p (V_s^2 - V_r^2) \text{ при } V_r > 0, \quad (8.18)$$

где V_r – остаточная скорость и V_s – скорость удара для данных мишени и снаряда.

Очевидно, увеличение толщины мишени приводит к увеличению баллистического предела V_c , т.е. критической скорости удара [41, 52, 56, 70]. Segal [52] сообщил, что баллистический предел возрастает пропорционально поверхностной плотности

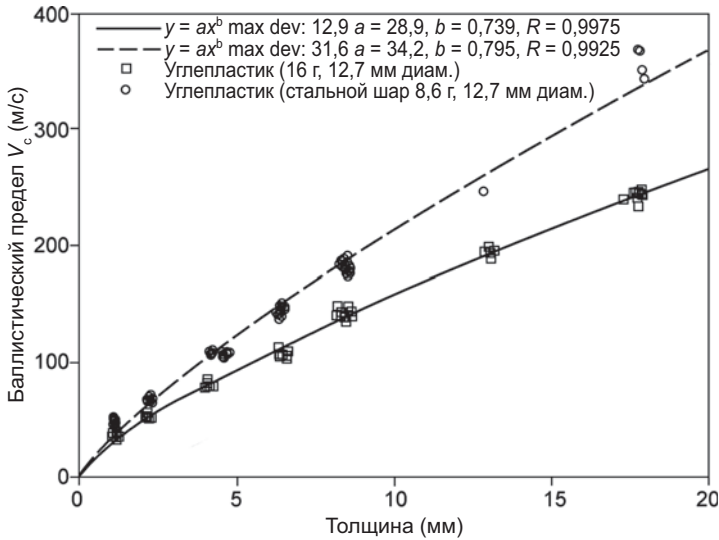


Рис. 8.9. Влияние толщины на баллистический предел углепластика на основе эпоксидной матрицы

мишени. Для относительно тонких пластин из углепластика на основе эпоксидной смолы Hsieh *et al.* [70] сообщили, что поглощенная энергия (пропорциональная V_c^2) увеличивается пропорционально количеству слоев в ламинате, а влиянием скорости деформирования можно пренебречь. Иными словами, показатель степенной функции, описывающей зависимость V_c от толщины мишени, равен $1/2$. Однако исследование поведения углепластиковых ламинатов (толщиной до 18 мм) на основе эпоксидной матрицы показало, что показатель степени не равен 0,5 [48, 93, 94].

Исследование композитов на основе матриц из алюминия и ряда полимеров, в том числе поликарбоната, показало, что механизм разрушения мишени связан с величиной показателя степенной зависимости скорости баллистического предела V_c от толщины. Дополнительные механизмы поглощения энергии при пробитии (расслоение, отслоение и разрыв волокон) приводят к тому, что показатель степенной зависимости V_c от толщины для углепластика на основе эпоксидной матрицы равен не 0,5, а лежит в интервале от 0,74 до 0,80 (рис. 8.9).

Song и Egglestone вывели аналогичное соотношение между баллистическим пределом и поверхностной плотностью относительно тонких гибких композитов [41]:

$$V_c = \gamma(A_d)^\delta, \quad (8.19)$$

где A_d — поверхностная плотность ламината, γ и δ — константы, определяемые конструкцией мишени.

Для гибридной индивидуальной брони Florence предложил простую модель, состоящую из очень твердого негибкого поверхностного слоя и гибкого поддерживающего волокнистого композита [95]. При ударе снаряда в твердую керамику его импульс распределяется по большой округлой области, диаметр которой зависит от механических свойств и формы снаряда и керамики. Эксперименталь-

ные наблюдения показывают, что вне этого круга волокнистый композит остается связанным с керамическим слоем, и энергия удара поглощается в основном в данной круглой области. Следовательно, задний поддерживающий слой можно рассматривать как круглую мембрану или пластину, зафиксированную на круглой границе.

Были предложены следующие выражения:

$$V_c = \left[\frac{\varepsilon S}{0,91 m_p f(a)} \right]^{1/2} \quad (8.20)$$

и

$$f(a) = \frac{m_p}{m_p + (m_c + m_b) \pi R^2} \pi R^2,$$

где ε – максимальная деформация поддерживающего композита, S – постоянное напряжение в композите, m_c и m_b – масса керамического и поддерживающего материала соответственно, R – радиус круглой области, участвующей в разрушении и поглощении энергии.

Описанные аналитические модели описывают влияние механизмов разрушения и свойств мишени на баллистический предел. Хотя механизмы разрушения волокнистых композитов гораздо сложнее разрушения однородных металлических пластин, модели внедрения ударника в металлическую пластину являются приемлемой основой и для волокнистых композитов.

8.5. Литература

1. Laible, R. C., «Fibrous Armor» in Laible, R. C. (ed.) *Ballistic Materials and Penetration Mechanics*, Elsevier Scientific Publishing Co., NY, 73–116 (1980).
2. Temple, R., *Mod. Plast.*, **22**, 102 (1945).
3. Anonymous, *Mod. Plast.*, **30**, 96 (1953).
4. Vanderbie, J. H., Clothing Series Rept. No. 2, Headquarters Quartermaster Research & Engineering Command, Natick, MA (1957).
5. Herget, C. M., Coe, G. B. and Beyer, J. C., in Coates, J. B. and Beyer, J. C. (eds), *Wound Ballistics*, Depart. of the Army, Washington, DC (1962).
6. Kwolek, S. L. US Patent 3,600,350 Assigned to DuPont, August 17 (1971).
7. Carothers, W. and Hill, J. W., *J. Am. Chem. Soc.*, **54**, 1579 (1932).
8. Mark, H., *Trans Faraday Soc.*, **32**, 143 (1936).
9. Sakurada, I. and Kaji, K., *J. Polym. Sci., C*, **31**, 57 (1970).
10. Sakurada, I. Ito, T. and Nakame, K., *Bull. Inst. Chem. Res. Kyoto Univ.*, **42**, 77 (1964).
11. Sakurada, L. Nukushima, Y. and Ito, T., *J. Polym. Sci.*, **57**, 651 (1962).
12. Black, W. B., *J. Macromol Sci. Chem. A*, **7**, 3 (1973).
13. Hollyday, L. and White, J. W., *Pure Applied Chem.*, **26**, 545 (1971).
14. Manley, T. R. and Martin, C. G., *Polymer*, **14**, 491 (1973).
15. Kavesh, S. and Prevorsek, D., US Patent 4,413,110, Assigned to Allied, October (1983).



16. Penning, A. J., Lemstra, P. J., Kalb, B. and Smith, P., *Polymer Bull. (Berlin)*, **1**, 11, 733 (1979).
17. Smith, P. and Lemstra, P. J., *Makromol. Chem.*, **180**, 2983 (1978).
18. Smith, P. and Lemstra, P. J., *J. Mat. Sci.*, **15**, 505 (1980).
19. Kunugi, T., *New Mater. New Proc. Electrochem. Tech.*, **1**, 58 (1981).
20. Penning, A. J. and Smook, J., *Polym. Bull. (Berlin)*, **10**, 7–8, 291 (1983).
21. Porter, R. S., Tsurata, A., Kanamoto, T. and Tanak, K., *Poly. Eng. Sci.*, **23**, 521 (1983).
22. Penning, A. J. *et al*, *Pure Appl. Chem.*, **55**, 777 (1983).
23. Brewster, E. P., Nelson, D. and Patton, R., *SAMPE Symposium and Exhibition*, **28**, 65 (1983).
24. Wolfe, J. F. and Loo, B. H., US Patent 4,125,700, Assigned to SRI International, September 30 (1980).
25. Wolfe, J. F., Sybert, P. and Sybert, J., US Patent 4,533,692, Assigned to SRI International, August 6 (1985).
26. Wolfe, J. F., Sybert, P. and Sybert, J., US Patent 4,533,693, Assigned to SRI International, August 6 (1985).
27. Riewald, P. G., Folgar, F., Yang, H. H. and Shaughnessy, W. F., «Lightweight Helmet from A New Aramid Fiber», *Proc. of the 23rd SAMPE Int'l Tech. Conf.*, 684–695 (1991).
28. Donovan, J. G., Kirkwood, B. and Figucia, F., «Development of Lower Cost Ballistic Protection», US Army Natick RD&E Center (Natick, MA) Technical Report Natick/TR-85/019L (1985).
29. «Fabric Around the World», Clark-Schwebel Inc. Brochure (1997).
30. Ko, F. K. and Hartman, D., «Impact Behavior of 2D and 3D Glass/Epoxy Composites», *SAMPE J.*, July/August (1986).
31. Jeng, S. T., Kuo, J. T. and Sheu, L. T., «Ballistic Impact Response of 3D Four-Step Braided Glass/Epoxy Composites», *Key Engineering Materials*, Vols 141–143, Part I, 349 (1998).
32. Song, J. W., Shaker, M. and Ko, Frank K., «The Effect of Different Fiber Architectures on Ballistic Impact Failure Mechanisms of Kevlar Composites», *Proceedings of SAMPE-ACCE-DOE-SPE Midwest Advanced Materials and Processing conferences*, 443–453 (2000).
33. Margosiak, S. A., «Development of rapid production systems for laminated nylon helmet liners», Debell and Richardson Inc., Contract No.: DA19-129qm-828, US Army quartermaster Command Final Report (1960).
34. Carswell, T. S., *Phenoplastics*, Interscience Publishers, NY (1947).
35. Lastnik, A. L. and Gate, J. W., Personnel Armor Symposium, US Navy Research Labs., Washington, DC (October 1961).
36. Alesi, A. L., Ames, R. P., Gagne, R. A., Litman, A. M. and Prifti, J. L., *Army Sci. Conf. Proc.*, **1**, 18 (1974).
37. Bowyer, W., 3rd Intern. Conf. Composite Mat., Paris, France (August 1980).
38. Laibie, R. C. and Denomee, M. R., CEMEL report No. TR-78-76 CE, Headquarters Quartermaster Res. & Dev. Command, Natick, MA (1978).
39. Eby, L. T. and Brown, H. P., «Thermosetting Adhesives», in R. L. Patrick (ed.), *Treatise on Adhesion and Adhesives*, Vol. II, Marcel Dekker, NY (1969).
40. Song, J. W. and Allen, R., «Effect of resin crosslinking in Aramid Composites on Ballistic Impact Resistance», US Army Natick RD&E Center Technical Report no. TR-87/040L(1987).

41. Song, J. W. and Egglestone, G. T., «Investigation of the PVB/PF Ratios on the Crosslinking and Ballistic Properties in Glass and Aramid Fiber Laminate Systems», *Proc. of the 19th SAMPE Int'l Tech. Conf.*, Closed session, 108–119 (1987).
42. Lee, B. L., Song, J. W. and Ward, J. E., «Failure of Spectra® Polyethylene Fiber-Reinforced Composites Under Ballistic Impact Loading», *J. Composite Materials*, **28**, 13, 1202–1226 (1994).
43. Lee, B. L., Walsh, T. F., Won, S. T., Song, J. W. and Kurtz, A. G., «Failure mechanisms of ballistic-grade fiber composite structures», *Proc. of World Forum on New Materials*, SV-4: L11, 1–12, Florence, Italy (1998).
44. Prevorsek, D. C., Kwon, Y. D. and Chin, H. B. «Analysis of the Temperature Rise in the Projectile and Extended Chain Polyethylene Fiber Composite Armor During Ballistic Impact and Penetration», *Polymer Engineering and Science*, **34**, 141–152 (1994).
45. Prevorsek, D. C. and Chin, H. B., «Development of a Light Weight Spectra Helmet», Phase I Interim Technical Report from Allied-Signal Inc. to US Army Natick RD&E Center, Natick, MA (DAAK60-87-C-0089/D) (1988).
46. Lin, L. C., Bhatnagar, A. and Chang, H. W., «Ballistic Energy Absorption of Composites», *Proc. of the 22nd SAMPE Int'l Tech. Conf.*, 1–13 (1990).
47. Song, J. W. and Ward, J.E., «Fiber Orientation Effect on Dynamic Mechanical and Ballistic Properties of Spectrashield Composites», 3rd Natick Science Symposium, 169–185 (1990).
48. Lee, B. L., Walsh, T. F., Won, S. T., Patts, H. M., Song, J. W. and Mayer, A. H., «Penetration Failure Mechanisms of Armor-Grade Fiber Composites under Impact», *J. Comp. Mat.*, **35**, 18, 1605–1633 (2001).
49. Gosnell, R. B., *Engineering Materials Handbook*, Volume 1, «Composites», ASM International, Metal Park, Ohio, 97–103 (1987).
50. Zhu, G., Goldsmith, W. and Dharan, C. K. H., «Penetration of Laminated Kevlar by Projectiles. I. Experimental investigation», *Int. J. Solids. Struct.*, **29**, 4, 399–420 (1992).
51. Schuman, T. L., «S2000 Ballistic Hardened C³I Shelter», *Proc. of the 24th SAMPE Int'l Tech. Conf.*, T280–T290 (1992).
52. Segal, C. L., «High-Performance Organic Fibers, Fabrics and Composites for Soft and Hard Armor Applications», *Proc. of the 23rd SAMPE Int'l Tech. Conf.*, 651–660 (1991).
53. Thomas, T. S., «Facets of a Lightweight Armor System Design», *Proc. of the 22nd SAMPE Int'l Tech. Conf.*, 304–318 (1990).
54. Rajandran, A. M. and Kroupa, J.L., «Impact Damage Model for Ceramic Materials», *Journal of Applied Physics*, **66**, 3560–3565 (1989).
55. Florence, A. L., «Interaction of Projectiles and Composite Armor, Part II», US Army Materials and Mechanics Research Center, Watertown, MA, Technical Report, AMMRC-CR-69-15 (1969).
56. Zhu, G., Goldsmith, W. and Dharan, C. K. H., «Penetration of Laminated Kevlar by Projectiles. II. Analytical Model», *Int. J. Solids Structures*, **29**, 4, 421–436 (1992).
57. Cairns, D. S. and Lagace, P. A., «Transient Response of Graphite/Epoxy and Kevlar/Epoxy Laminates Subjected to Impact», *AIAA Journal*, **27**, 11, 1590–1596 (1989).
58. Rosenberg, Z., Brar, N. S. and Bless, S. J., «Dynamic High-Pressure Properties of Al-N Ceramic as Determined by Flyer Plate Impact», *J. of Applied Physics*, **70**, 167–171 (1991).
59. Lee, S. W. R. and Sun, C. T., «Dynamic Penetration of Graphite/Epoxy Laminates Impacted by a Blunt-Ended Projectile», *Composites Science and Technology*, **49**, 369–380 (1993).
60. Mittal, R. K. and Khalili, M. R., «Analysis of Impact of a Moving Body on an Orthotropic Elastic Plate», *AIAA Journal*, **32**, 4, 850–856 (1994).



61. Jin, C. J. and Sun, C. T., «Prediction of Delamination in Composite Laminates Subjected to Low Velocity Impact», *J. Compos. Mater.*, **27**, 7, 684–701 (1993).
62. Choi, H. Y. and Chang, F.-K., «Model for Predicting Damage in Graphite/Epoxy Laminated Composites Resulting from Low-Velocity Point Impact», *J. Compos. Mater.*, **26**, 14, 2134–2169 (1992).
63. Smith, J. C., Blandford, J. M. and Schiefer, H. F. «Stress-Strain Relationships in Yarns Subjected to Rapid Impact Loading: Part VI. Velocities of Strain Waves Resulting from Impact», *Text. Res. J.*, **30**, 10, 752 (1960).
64. Smith, J. C., Blandford, J. M. and Towne, K. M., «Stress-Strain Relationships in Yarns Subjected to Rapid Impact Loading: Part VIII. Shock Waves, Limiting Breaking Velocities, and Critical Velocities», *Text. Res. J.*, **32**, 1, 67 (1962).
65. Roylance, D., Wilde, A. and Tocci, G., «Ballistic Impact of Textile Structures», *Text. Res. J.*, **43**, 34–41 (1973).
66. Cunniff, P. M., «An Analysis of the System Effects in Woven Fabric Under Ballistic Impact», *Text. Res. J.*, **62**, 9, 495–509 (1992).
67. Lin, J. L. and Lee, Y. J., «Use of Static Indentation Laws in the Impact Analysis of Composite Laminated Plates and Shells», *J. Appl. Mech.*, **57**, 787–789 (1990).
68. Lee, S. M. and Zahuta, P., «Instrumented Impact and Static Indentation of Composites», *J. Compos. Mater.*, **25**, 2, 204–222 (1991).
69. Lee, S.-W. R. and Sun, C. T., «A Quasi-Static Penetration Model for Composite Laminates», *J. of Composite Materials*, **27**, 3, 251–271 (1993).
70. Hsieh, C. Y., Mount, A., Jang, B.Z. and Zee, R. H., «Response of Polymer Composites to High and Low Velocity Impact», *22nd International SAMPE Technical Conference*, 14–27 (1990).
71. Figucia, F., Williams, C., Kirkwood, B. and Koza, W., «Mechanisms of Improved Ballistic Fabric Performance», *Proceedings for the Army Science Conference*, Vol. 1., 383–397 (1982).
72. Hansen, J. V. E., «Development of Improved Lightweight Ballistic Armor», US Army Natick Research, Development and Engineering Center (Apr. 1984).
73. Ward, J. E. and Koza, W., «Hi-tech Fibers for Improved Ballistic Protection», *Proceedings of Army Science Conference*, Vol. IV, 265–274 (1986).
74. Cohen, S. H., Prosser, R. A., King, A. and Desper, C. R., «Analysis of Ballistically Coupled Damage in Some Test Panel Fibers», US Army Natick RDE Center Technical Report #: Natick/TR-92/032, (1992).
75. Figucia, F., «Energy Absorption of Kevlar Fabrics Under Ballistic Impact», *Proceedings for Army Science Conference* (1982).
76. Takeda, N., Sierakowski, R. L., Ross, C.A. and Malvern, L. E., «Delamination-Crack Propagation in Ballistically Impacted Glass/Epoxy Composite Laminates», *Experimental Mechanics*, **22**, 19 (1982).
77. Cristescu, N., Malvern, L. E. and Sierckowski, R. L., «Failure Mechanisms in Composite Plates Impacted by Blunt-Ended Penetrator», *Foreign Object Impact Damage to Composites*, ASTM STP 568, ASTM, 159 (1975).
78. Lin, D. and Malvern, L. E., «Matrix Cracking in Impacted Glass/Epoxy Composite Laminates», *J. of Composite Materials*, **21**, 594 (1987).
79. Song, J. W. and Egglestone, G. T., *Proceedings for US Army Science Conference*, Vol. 3, 191–204 (1988).
80. Song, J. W., «Thermoplastic Composites for Ballistic Applications», Doctorate Thesis, UMass Lowell (2004).

81. Zukas, J. A., Nicholas, T., Swift, H. F., Grezczuk, L. B. and Curran, D. R., *Impact Dynamics*, Krieger Publishing Company, Malabar, Florida (1992).
82. Backman, M. E. and Goldsmith, W., «The Mechanics of Penetration of Projectiles into Targets», *Int. J. of Engng. Sci.*, **16**, 1–99 (1978).
83. Cunniff, P. M., «A design tool for the development of Fragmentation protective body Armor», *Proceedings of 18th International Symposium in Ballistics*, 1295 (1999).
84. Lambert, J. P., «A Residual Velocity Predictive Model for Long Rod Penetrators», ARBRL-MR-02828, BRL, Aberdeen Proving Ground, MD (1978).
85. Recht, R. F. and Ipson, T. W., «Ballistic Perforation Dynamics», *J. of Applied Mechanics*, **30**, *Trans. ASMS*, **85**, Series E, 384–390 (1963).
86. Bourget, D. and Pageau, G., «The Effective Ballistic Resistance Concept, A New Approach for Assessing the Average Energy Absorption Capability of Armour Materials», *Proceedings 18th International Symposium on Ballistics*, 1287–1294 (1999).
87. Sun, C. T. and Potti, S. V., «A Simple Model to Predict Residual Velocities of Thick Composite Materials Subjected to High Velocity Impact», *Int. J. Impact Eng.*, **18**, 3, 339–353 (1996).
88. Awerbuch, J. and Bodner, S. R., «Analysis of the Mechanics of Perforation of Projectiles in Metallic Plasts», *Int. J. of Solids and Structures*, **10**, 671–684 (1974).
89. Jeng, S. T., Jing, H. S. and Chung, C., «Predicting the Ballistic Limit for Plain Woven Glass/Epoxy Composite Laminate», *Int. J. Impact Eng.*, **15**, 4, 451–464 (1994).
90. Vinson, J. R. and Zukas, J. A., «On the Ballistic Impact of Textile Armor», *J. Appl. Mech.*, 263–268 (June 1975).
91. Vinson, J. R. and Walker, J. M., «Ballistic Impact of Thin-Walled Composite Structures», *AIAA Journal*, **35**, 5, 875–878 (1997).
92. Focht, J. R. and Vinson, J. R., «Predicting Ballistic Penetration and the Ballistic Limit in Composite Material Structures», *AIAA Journal*, **40**, 11, 2366–2368 (2002).
93. Lee, B. L., Patts, H. M. and Mayer, A. H., «Penetration Failure of Fiber Composites vs. Monolithic Ductile Materials under Ballistic Impact», *Proc. of the 14th Tech. Conf. of Amer. Soc. for Composites*, 771–781, Dayton, OH (1999).
94. Patts, H. M., «Ballistic Impact Damage and Penetration Mechanics of Fiber-Reinforced Composite Laminates», PhD Thesis, Dept. of Engineering Science and Mechanics, The Pennsylvania State University (2000).
95. Florence, A. L., «Interaction of Projectiles and Composite Armor», Technical Report, AMMRC CR 69–15 (1969).

ГЛАВА 9

НЕТКАНЫЕ ПРОТИВОБАЛЛИСТИЧЕСКИЕ КОМПОЗИТЫ

Х. Л. Томас, Auburn University, США

9.1. Введение

Люди начали использовать защитную броню по крайней мере пять тысяч лет назад. Кожа и мех животных защищали одновременно и от холода, и от поражения оружием в бою. Древние цивилизации использовали кожу для защиты от холодного оружия, начиная по меньшей мере с 3000 г. до н.э. Приблизительно 700 лет спустя египтяне научились изменять свойства кожи кипячением и дублением. Она эффективно защищала от ударов дубинами и выполняет эту роль в некоторых культурах вплоть до настоящего времени [1].

Первым оружием в военных действиях были стрелы, мечи и копья, и броня следующего поколения защищала специально именно от этого оружия. Египтяне использовали броню для защиты от рубящего оружия начиная с 1500 г. до н.э. Первой формой такой брони была, видимо, одежда с нашитыми бронзовыми пластинами. Ассирийцы разработали чешуйчатую броню между 900 и 600 гг. до н.э. Она имела вид параллельных рядов небольших прямоугольных пластин, нашитых на одежду. Греки начали делать броню из бронзовых пластин, которые по форме соответствовали защищаемым частям тела. Кольчуга, по-видимому, была изобретена кельтами, но ее быстро переняли римляне и другие цивилизации.

С появлением в конце шестнадцатого столетия огнестрельного оружия броня должна была противостоять пулям большого калибра. Броня стала очень тяжелой, и ее вес увеличился до 50 кг. Кожаную одежду, которую до этого носили под броней, начали использовать без нее, потому что она давала подвижность. Это инициировало споры, что важнее: защита или комфорт и подвижность.

Защитные качества брони начали оценивать уже в четырнадцатом веке. К семнадцатому веку начали проводить баллистические испытания защитного снаряжения. На некоторой сохранившейся броне имеются метки баллистических испытаний.

Начиная с античности и до средних веков самую большую угрозу броне представляло огнестрельное оружие. Помимо этого, на поле битвы очень опасны были лук и арбалет.

Стандартный лук в средние века должен был пробивать нателную защиту с расстояния 30–50 ярдов, но деревянный или обитый металлом деревянный щит эффективно защищал от стрел. Кельты ввели в обиход большой лук в XIII веке. Это оружие было в некотором смысле первым намеком на более поздние магазинные винтовки. Большой лук мог выпустить одновременно до шести

стрел точно по целям, находящимся на расстоянии до 200 ярдов. В континентальной Европе арбалеты настолько эффективно поражали броню, что Церковь запретила их использование.

В конечном счете, рыцарские доспехи стали настолько прочными, что они смогли противостоять даже большому луку и арбалету. Это привело к необходимости дальнейшего развития поражающего оружия. Им стало огнестрельное оружие.

Огнестрельное оружие и черный порох были ввезены в Европу из Китая, где они получили широкое распространение уже в XII веке. Раннее огнестрельное оружие было не эффективнее луков, но позднее оно стало настолько мощным, что сделало нецелесообразным использование брони. Казалось, что борьба щита и меча была выиграна мечом, но во время Второй Мировой войны начался новый виток этой борьбы [2].

9.1.1. Современная броня

Британские Королевские Воздушные Силы и Воздушный Корпус армии США начали использовать защитные жилеты для летного состава уже в начале Второй мировой войны. Первая противобаллистическая броня защищала исключительно от шрапнели и осколков, но не от пуль. Эти бронежилеты содержали стальные пластины, размещаемые в многослойных нейлоновых бронепакетах, и защищали они лишь от относительно низкоскоростной шрапнели [3].

В 1950-е и в начале 1960-х гг. различные военные подразделения начали классифицировать броню по уровням защиты от реальной угрозы личному составу [4] (рис. 9.1).

9.1.2. Начало научных исследований поведения брони

Во время войны во Вьетнаме пехотинцы носили бронежилеты из керамики и нейлона, которые защищали от осколков и низкоскоростных снарядов.

Сегодня использование противобаллистических тканей и бронепластин для защиты от осколков и стрелкового оружия в армии и полиции стало обычной практикой. Военные стандарты оценки эффективности бронематериалов различались согласно конечным целям и зависели даже от подразделения военной службы,

Первые стандарты испытаний

- Американская армия
 - расстояние до мишени 5 футов;
 - контрольная пластина располагалась в 6 дюймах за мишенью;
 - пробитие контрольной пластины означало пробитие брони;
 - если контрольная пластина оставалась непробитой, считали, что броня выдержала испытания;
 - определяли максимальную скорость ударника, при которой не происходило пробитие.
- ВМС США
 - расстояние до мишени 5 футов;
 - контрольная пластина отсутствовала;
 - пробитие брони означало, что она не выдержала испытания;
 - если контрольная пластина осталась непробитой, считали, что броня выдержала испытания;
 - определяли максимальную скорость ударника, при которой не происходило пробитие;
 - если осколок пробивал броню, а снаряд не пробивал, считали, что броня выдержала испытания.

Рис. 9.1. Протокол первых военных стандартов испытания брони

но в целом эффективность материала оценивалась по его способности полностью остановить снаряд (рис. 9.1). Некоторые военные стандарты оценивали также деформацию мишени после удара.

Несмотря на очевидную ограниченность существовавших стандартов, довольно быстро стало очевидным, что ни один материал не может защитить от всех возможных баллистических угроз, оставаясь при этом неповрежденным.

Основные стандарты классификации бронезащиты, используемые производителями для сравнения качества тканей и волокон, действуют как в США, так и в Европейском союзе. Американский Стандарт Национального Института юстиции (NIJ) установил четыре уровня и два подуровня защиты. Эти уровни ранжируются от довольно низкоскоростных и легких снарядов на I уровне защиты до высокоскоростных тяжелых пуль на IV уровне. Сейчас действует стандарт NIJ 0101.04, хотя для произведенной ранее натальной брони все еще применяется более ранний стандарт 0101.03, который будет использоваться до тех пор, пока не закончится срок ее службы (табл. 9.1 и 9.2).

Таблица 9.1. Стандарт NIJ 0101.03, описывающий классы защиты индивидуальной брони

Уровень защиты	Калибр	Пуля	Масса (г)	Скорость (м/с)
I	.22 длинный винтовочный	Свинцовая	2,6	320
I	.38 особый	Закругленная, свинцовая	10,2	259
IIA	9 мм	С цельнометаллической оболочкой	8,0	332
IIA	.357 Магнум	С мягким наконечником, покрытым оболочкой	10,2	381
II	9 мм	С цельнометаллическим покрытием	8,0	358
II	.357 Магнум	С мягким наконечником, покрытым оболочкой	10,2	425
IIIA	9 мм	С цельнометаллической оболочкой	8,0	426
IIIA	.44 Магнум	Свинцовая с плоским наконечником	15,55	426
III	7,62 мм Винчестер	С цельнометаллической оболочкой	9,7	838
IV	.30-06	Бронебойная	10,8	868

Таблица 9.2. Стандарт NIJ 0101.04, описывающий классы защиты индивидуальной брони (http://www.nlectc.org/pdf/files/0101.04_RevA.pdf)

Уровень защиты	Калибр	Пуля	Масса (г)	Скорость (м/с)
I	.22 длинный винтовочный	Свинцовая	2,6	329
I	.380 АСР	С цельнометаллической оболочкой	6,2	322
IIA	9 м	С цельнометаллической оболочкой	8,0	341
IIA	.40 Смит и Вессон	С цельнометаллической оболочкой	11,7	322
II	9 мм	С цельнометаллической оболочкой	8,0	367
II	.357 Магнум	С полостью, покрытой оболочкой	10,2	436
IIIA	9мм	С цельнометаллической оболочкой	8,0	436
IIIA	.44 Магнум	С полостью, покрытой оболочкой	15,6	436
III	7,62 мм NATO	С цельнометаллической оболочкой	9,6	847
IV	.30-06	Бронебойная	10,8	878

Рекомендуемая последовательность выстрелов по мишени:

- Испытания брони I, IIa, II и IIIa уровней защиты требуют проведения двух выстрелов под углом 30° и четырех выстрелов перпендикулярно (под углом 90°) к плоскости мишени.
- Испытания брони III уровня защиты (от «мощной» винтовки) требуют шести выстрелов перпендикулярно плоскости мишени.
- Испытания брони IV уровня защиты (от бронебойных винтовочных пуль) требуют одного выстрела под углом 90° .
- Для брони всех уровней измеряется величина запреградной деформации поддерживающего блока пластилина марки Roma размером $24'' \times 24'' \times 4''$.

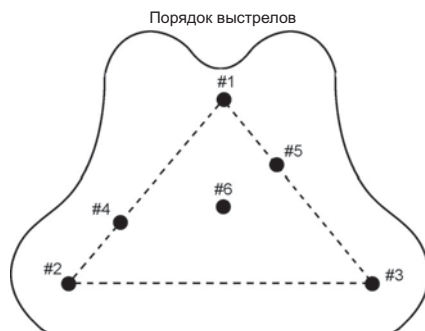


Рис. 9.2. Рекомендованные стандартом NIJ 0101.03 точки удара при баллистических испытаниях

В обоих стандартах NIJ броню испытывают с задним поддерживающим слоем пластилина марки Roma № 1, позволяющего оценить мощность воздействия, передаваемого телу при остановке пули. Американский стандарт допускает глубину запреградной деформации величиной 44 мм (рис. 9.2).

Броня различных уровней должна защищать от пуль различной энергии и мощности. При использовании брони важнейшей характеристикой пули является не ее энергия, а то, насколько хорошо она пробивает броню. Чем меньше пуля, тем больше ее энергия в расчете на единицу поверхности и тем больше ее пробивающая мощь (рис. 9.3).

Если пуля имеет тупой наконечник, то энергия диссипируется мишенью гораздо быстрее, чем в случае заостренных пуль. Пули, покрытые металлической оболочкой, лучше сохраняют свою форму и проникают глубже, чем мягкие свинцовые пули, и поэтому для брони они представляют большую опасность. Большое количество энергии, быстро высвобождающейся в броне при остановке пули, может представлять серьезную угрозу, если броня не может рассеять эту энергию.

Это иллюстрирует следующий пример. Если преступник стреляет в несущего службу полицейского, то в первую очередь необходимо, чтобы броня остановила пулю. Во вторую очередь, удар по телу остановленной пулей должен быть не слишком сильным. Некоторые типы пуль, например, .38 Special JHP, .45 ACP и .40 пистолета Смита и Вессона несут большую энергию и деформируются, нанося тяжелейшее повреждение. По этой же причине они очень легко останавливаются современными бронежилетами. Несмотря на это 9 мм пули с цельнометаллической оболочкой, пуля .357 калибра Магнума JHP и .44 калибра Магнума JHP/SJHP очень опасны. Шаровидная пуля пистолета Магнум имеет большую энергию и наносит сильный удар, даже если ее удалось остановить.

Еще более сильный удар наносят ружейные пули. Хотя мягкая нательная броня выше IIa уровня защиты останавливает шаровую дробь, энергия крупной дроби калибров 00 или 000 настолько велика, что может нанести сильную травму или даже убить носителя брони. Поэтому прилагаются усилия для уменьшения опасности удара при полной остановке пули.

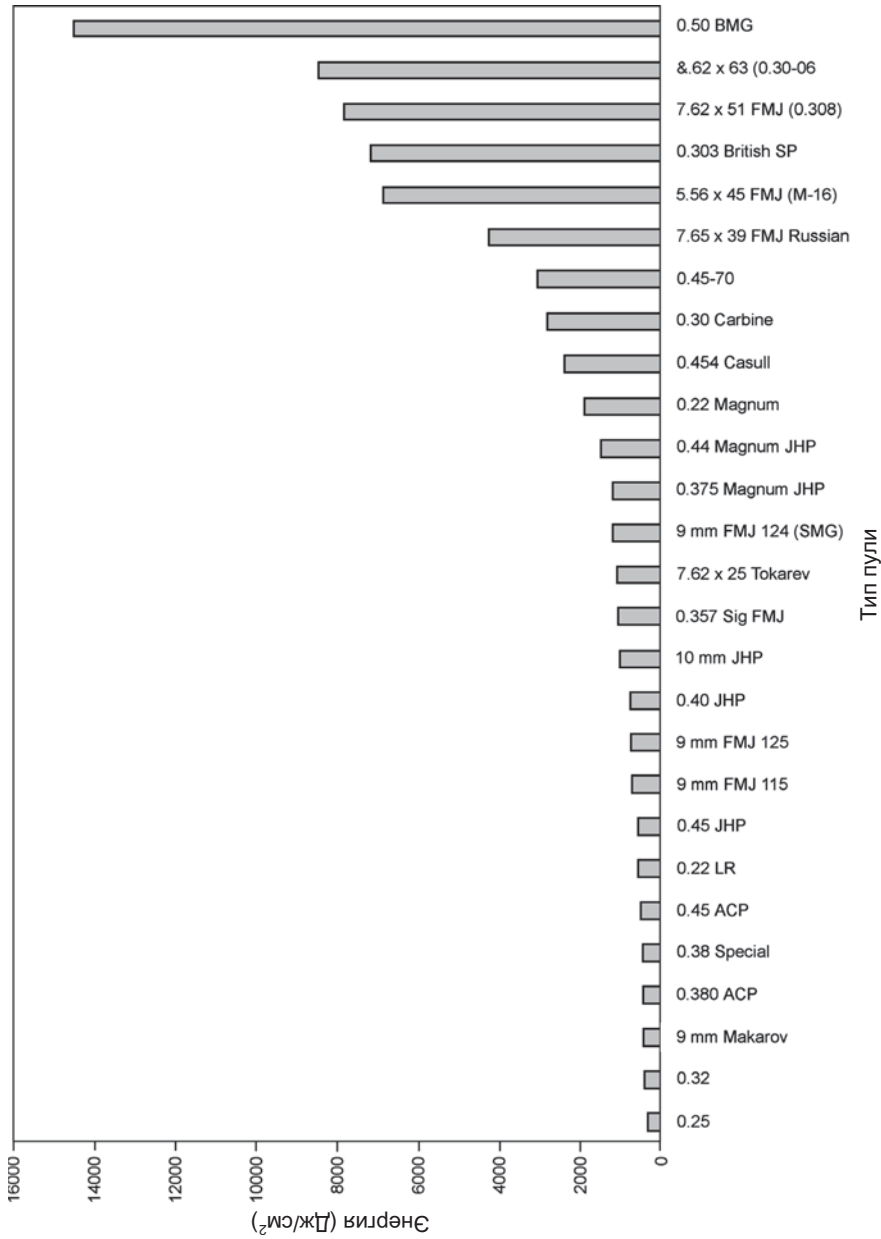


Рис. 9.3. Поверхностная плотность энергии различных боеприпасов

Пули калибра $7,62 \times 25$ мм и калибра 5,7 мм FN имеют очень небольшой размер, но они пробивают почти любую мягкую нательную броню. Они имеют высокую плотность энергии, обусловленную высокой скоростью, приличной массой и заостренной формой наконечника, на котором концентрируется вся смертельно опасная энергия. Поэтому эти пули гораздо опаснее, чем более медленные, но более массивные пули калибров .45 АСР или .40 Смита и Вессона. Винтовки калибра выше .22 Магнум требуют жесткой брони. Такая броня может состоять из металла, керамики, жесткого пластика или их комбинации, останавливающей любые пули, начиная от винтовки М-1 калибра .30, винтовочных .30-30 и до еще более мощных пуль. От термина «пуленепробиваемая» броня отказались и испытатели, и производители, предпочтя более корректный термин «баллистически стойкая» броня вскоре после отработки схемы испытания этих материалов.

Мрачная действительность соревнования меча и щита состоит в том, что независимо от того, насколько усердно проектировщик пытается защитить пользователя, всегда есть оружие, которое может нанести смертельное ранение несмотря на любую броню. Это останется правдой до тех пор, пока люди не изменят свою природу настолько радикально, что прекратят убивать и калечить своих собратьев.

Виды брони

В настоящее время используют три основных вида противобаллистических изделий военного назначения:

1. Бронежилеты.
2. Каски.
3. Бронезащита транспортных средств и конструкционная броня.

Баллистически стойкие жилеты защищают главным образом от шрапнели и осколков гранат. Защита от боевого стрелкового оружия в большинстве случаев является весьма проблематичной из-за высоких скоростей, большой мощности и твердости пуль. Хотя броня высокого уровня защиты жизненно важна, для длительного ношения в полевых условиях она громоздка и неудобна.

Бронезащита правоохранительных органов

Защитное снаряжение полицейских обычно предназначено для защиты от pistolетных пуль и острых предметов, которые могут использовать уголовники. Броня высокого уровня защиты годится для борьбы с организованной преступностью, террористами и массовыми беспорядками, но для постоянного использования она не предназначена. Полицейское обмундирование разработано для постоянного использования при часто возникающих опасностях.

При приобретении защитного обмундирования отделением полиции в США обычно приходится обращаться к представителям администрации, которые распоряжаются бюджетом города. К сожалению, большинство чиновников недостаточно знает тонкости баллистической защиты, чтобы успешно решать вопросы жизни и смерти полицейских. Реальные ежедневные опасности офицера полиции плохо известны представителям администрации, прессы и публики. Даже

сами полицейские часто не осведомлены о том, что защитные материалы реально могут и что они не способны сделать.

Поэтому стоит обсудить, какие уровни защиты обеспечиваются различными изделиями и как их нужно использовать в конкретных случаях.

9.2. Требования к защитным материалам и изделиям

Все баллистически стойкие материалы имеют общие особенности. Полимерные материалы легки и имеют высокие защитные характеристики, что обусловило постепенное вытеснение ими металлов и керамики. Более низкий вес брони обеспечивает большую подвижность и лучшую способность полицейского или военнослужащего выполнять свои обязанности.

Помимо малого веса броня должна быть относительно гибкой и иметь определенную теплопроводность. Жесткая, негнувшаяся броня неудобна даже при малом весе. Одежда, не пропускающая тепло и водяной пар, неприятна при ношении, и это является одной из основных причин того, что такую одежду на службе стараются не носить.

9.2.1. Традиционные подходы

Независимо от индивидуальных особенностей волокон, они должны формироваться в структуру, чтобы их можно было использовать в качестве брони. Средства индивидуальной защиты от баллистической угрозы теперь известны как среди профессионалов, так и в гражданском обществе. Как пользователи этих продуктов, так и в средствах массовой информации такие изделия называют «пуленепробиваемыми жилетами» или даже «кевларовыми жилетами». Те, кто необдуманно использует эти термины, не понимают, что никакой материал не может быть «пуленепробиваемым», и не знают, что такие материалы делают не только из волокон Кевлар фирмы DuPont.

Если эксперт скажет непрофессионалу, что гибкая нательная броня является текстильным изделием, он почти наверняка вызовет удивление и даже недоверие. Однако текстильными считают все изделия, сделанные из волокон. Большинство изделий, предназначенных для защиты от баллистической угрозы, теперь делают из тканей, производимых методами, которые уходят своими корнями в древность. В исследовательских лабораториях и на рынке имеются и новые изделия, методы получения которых появились лишь недавно и которые имеют уникальные характеристики, недостижимые для тканей.

Из наиболее распространенных текстильных методов — переплетения, вязания, получения нетканых материалов, нанесения на волокна матрицы и получения многослойных композитов лишь вязание не годится для изготовления баллистически стойких материалов.

Процесс ткачества состоит в чередующемся переплетении двух наборов нитей, ориентированных приблизительно под прямым углом друг к другу. Например, при производстве полотна нити основы поочередно разводятся в разные стороны, после чего между ними вставляют нить утка. После этого разведенные нити

основы меняют местами, и они зажимают введенную нить утка, после чего процесс повторяют, вновь вводя нить утка. Повторение этих операций позволяет получить ткань, которую извлекают из ткацкого станка, в него вставляют новые нити основы и утка, и процесс продолжают.

Технические требования описывают желаемый внешний вид или функциональные характеристики ткани. Они описывают, как должна делаться ткань.

Узлы – это производственный термин, описывающий заканчивающиеся нити основы. В США текстильные характеристики все еще даются в дюймах и фунтах и т.д. Качество ткани характеризуют количеством узлов нитей основы на дюйм полученной ткани. Аналогично описывают количество узлов нитей утка на дюйм ткани.

Все текстильные процессы имеют свои особенности, и все требуют определенных этапов обработки. Нить является элементарным составным элементом ткани. Все текстильные процессы требуют по крайней мере двух различных наборов нитей, подаваемых одновременно на ткацкий станок.

9.2.2. Комплексные нити

Почти во всех противобаллистических материалах используют в качестве элементарного компонента комплексные нити, а не отдельные волокна. Комплексная нить – это текстильный термин, описывающий группу волокон, из которых получают ткань. Недостаточно заявить, что нити являются первичным элементом, из которых делают тканые или вязаные изделия. Современное текстильное производство предложило ткачу возможность выбирать нити, различающиеся методами их производства. Эти методы зависят от типа используемых волокон, но и сами методы производства определяют особенности текстильного производства.

Нити в ткани характеризуют несколькими способами, большинство из которых зависит от типа используемых волокон. Все методы описания размера нити используют отношения массы (или веса) к длине нити.

В текстильной науке существует несколько количественных характеристик сечения нити. Они включают и отношение массы к единице длины, и обратные им величины (отношение длины к единице веса или массы). В индустрии синтетических противобаллистических волокон обычно используют отношение массы к длине. Наиболее обычными количественными характеристиками сечения нити являются:

- линейная плотность, измеряемая в единицах денье, определяемая как масса нити длиной 9000 м в граммах. Эти единицы предпочитают использовать производители искусственных волокон;
- линейная плотность, измеряемая в единицах текс, определяемая как масса нити длиной 1000 м в граммах. Эти единицы предпочитает использовать научное сообщество.

9.2.3. Нетканые материалы

Иглопробивание – это довольно простая операция, изменение технологических параметров которой позволяет варьировать характеристики материала. Непрерывные противобаллистические волокна рубят на короткие пучки, карди-

руют (т.е. очищают от мелких фрагментов волокон и грязи) и укладывают беспорядочно в плоскости листа, в результате чего формируется изотропный войлокообразный лист. Этот лист затем пробивают набором игл, которые проталкивают некоторое количество волокон перпендикулярно к плоскости листа. Эти волокна связывают материал лучше, чем традиционные переплетенные ткани.

В 1966 г. исследования Министерства обороны США показали, что баллистическая стойкость иглопробивной нетканой структуры на основе нейлоновых волокон достигает 80% от характеристик соответствующей ткани, будучи при этом втрое легче [5]. Такие материалы в специальных областях успешно используются и сегодня.

9.3. Выбор волокон

Нейлон имеет высокую удельную прочность (отношение предела прочности к весу), и при достаточном количестве слоев волокон он способен остановить осколки шрапнели. Поэтому в течение многих лет его использовали в баллистически стойких материалах.

Согласно [4] сообщению Службы главного врача армии при боевых испытаниях нового жилета из нейлона броня остановила приблизительно 65% всех ударников, 75% осколков и 25% пуль стрелкового оружия. В сообщении также указывалось, что броня снижала количество ранений туловища на 60–70%, а степень тяжести полученных ранений благодаря броне была уменьшена на 25–35%.

По мере развития полимерной науки были разработаны новые высокопрочные полиамидные, арамидные и сверхвысокомолекулярные полиэтиленовые (СВМПЭ) волокна. Степень защиты в расчете на единицу веса в результате этого сильно увеличилась. Такие структуры обеспечивают больший комфорт и менее заметны. В настоящее время нейлон для баллистической защиты не используют, потому что он по своим характеристикам уступает современным волокнам.

9.3.1. Арамиды

Арамиды принадлежат к семейству полиамидов, в которых амидные связи соединяют ароматические кольца (рис. 9.4). Такая химическая структура обеспечивает высокую жесткость полимерной цепи и, соответственно, высокую прочность и термостойкость волокон. В отличие от нейлона, арамидные волокна не термопластичны, и поэтому их приходится формовать из раствора серной кислоты или аналогичных растворителей.

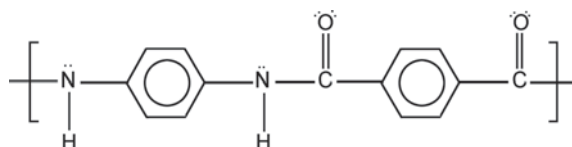


Рис. 9.4. Химическая структура параарамидных волокон (Stouffer, J., <http://web.umn.edu/~wlf/Synthesis/kevlar.html>)

Типичными арамидными волокнами, из которых делают противобаллистические ткани, являются Кевлар® фирмы DuPont и Twaron® фирмы Teijin. Компания DuPont разработала волокна торговой марки Кевлар®29 в начале 1970-х гг. Из них начали делать противобаллистические бронежилеты и каски. В средствах массовой информации название этого волокна стало синонимом противобаллистически стойких материалов. Кевлар® 129 появился в конце 1980-х гг. и выпускался в виде нитей с меньшей линейной плотностью для увеличения гибкости и комфорта. Его использовали для остановки шаровидных 9-мм пистолетных пуль с цельнометаллической оболочкой.

Сейчас в противобаллистических материалах используют волокна Кевлар® марки KM2. Из этих волокон делают бронежилет «Перехватчик» Вооруженных Сил США.

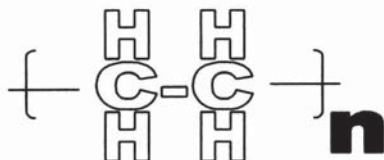
Фирма Teijin-Twaron производит несколько типов противобаллистических волокон Twaron®. Первое поколение волокон Twaron® Standart появилось в 1986 г. Последним поколением являются волокна Twaron® СТ Microfilament. Эти волокна очень тонкие, и при одинаковом весе нити они состоят из вдвое большего количества моноволокон, чем аналогичные нити, выпускавшиеся ранее. Нить Twaron®СТ Microfilament линейной плотности 930 тэкс состоит из 1000 волокон. При использовании этих волокон вес брони уменьшился на 41% по сравнению с эквивалентной броней на основе волокон Twaron® Standart.

9.3.2. Линейный сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ)

Легкие полиэтиленовые волокна получают совершенно иным технологическим методом. Полиэтилен требует специальной технологии формования, называемой гильформованием (рис. 9.5). Волокна состоят из очень длинных линейных молекулярных цепей, параллельная ориентация которых позволяет получить полимер с высокой степенью кристалличности. Эти волокна имеют очень низкую плотность и высокую удельную прочность, в 15 раз превышающую удельную прочность стали. В семейство СВМПЭ входят волокна Dyneema® фирмы DSM и Spectra® фирмы Honeywell.

Недостатки полиэтиленовых волокон обусловлены их термопластной природой, проявляющейся при повышенных температурах. Фирмы Honeywell и DSM

Химическая структура элементарного звена полиэтилена



Очень длинные цепи, высокая степень кристалличности

Рис. 9.5. Химическая структура СВМПЭ волокон

обнаружили, что после хранения волокон при повышенных температурах их характеристики при комнатной температуре несколько изменяются.

9.3.3. ПБО волокна

Очень перспективны противобалистические жесткоцепные кристаллические поли(р-фенилен-2,6-бензобисоксазолные) (ПБО) волокна (рис. 9.6). Это волокно выпускает фирма Toyobo в Японии под торговой маркой Zylon.

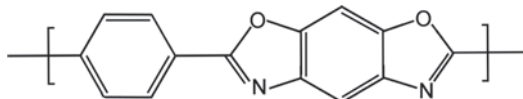


Рис. 9.6. Структура поли(р-фенилен-2,6-бензобисоксазола) (сокращенно ПБО Toyobo Company, Ltd., <http://www.toyobo.co.jp/e/seihin/kc/pbo>)

Согласно данным фирмы Тоубо модуль упругости ПБО выше, чем у углеродных, СВППЭ или арамидных волокон. По химической структуре это волокно похоже скорее на арамид, чем на СВМПЭ, и поэтому оно имеет более высокую термостойкость. Его удельный вес выше, чем у СВМПЭ, и поэтому акустический модуль упругости этого волокна ниже, чем у СВМПЭ.

9.3.4. Жидкокристаллические полимеры

Волокна Vectran выпускают в виде многофиламентной нити, получаемой из термopластичного жидкокристаллического (ЖК) полимера торговой марки Vectran®. Vectran® – это единственное производимое промышленно жидкокристаллическое волокно, формируемое из расплава ЖК полимера. Эти волокна пока еще не являются серьезным конкурентом на рынке противобалистических материалов, но в будущем при развитии технологии производства все может измениться.

9.3.5. Волокна M5

Поли{2,6-диимидазо[4,5-b4'5'-e] пиридинил-1,4(2,5-дигидрокси)-фенилен} (ПИПД) – весьма перспективный серьезный конкурент на рынке противобалистической защиты (рис. 9.7). Волокно разрабатывается фирмой Magellan Systems International, но в открытой продаже его еще нет. Испытания в лабораториях Сол-

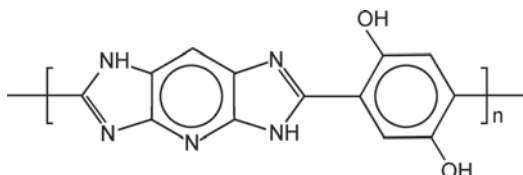


Рис. 9.7. Химическая структура волокна M5 (Magellan Systems International, LLC, http://www.m5fiber.com/magellan/m5_fiber.htm)

датского центра Natick армии США показали большую вероятность успешного внедрения этого высокопрочного волокна.

9.4. Непрерывные и рубленые волокна

Характеристики любого волокнистого материала зависят прежде всего от того, являются ли волокна непрерывными или же штапельными (т.е. короткими рублеными) (рис. 9.8 и 9.9). Волокна этих типов легко отличить по их длине. В нитях из непрерывных волокон длина каждого моноволокна равна длине всей нити. За исключением шелка, все нити этого типа являются искусственными. Интересно,



Рис. 9.8. Штапельное арамидное волокно (фотография автора)



Рис. 9.9. Шпуля непрерывных волокон (Toyobo Company Ltd., <http://www.toyobo.co.jp/e/seihin/kc/pbo>)

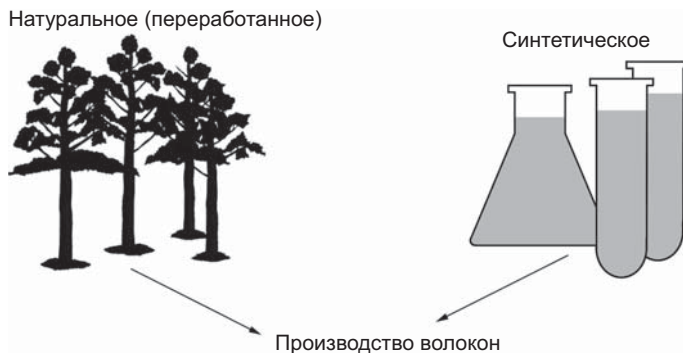


Рис. 9.10. Сырье для искусственных волокон

что шелк является единственным естественным волокном, которое успешно использовалось в противобаллистической броне.

Искусственные нити можно подразделить на искусственные нити из натурального сырья типа ацетатных, стеклянных, искусственного шелка и т.д. и на чисто синтетические типа полиэфирных, полиамидных, полиолефиновых и т.д. (рис. 9.10). Нити из непрерывных волокон большой длины наматывают на катушки или шпули.

Штапельные волокна имеют конечную длину и легко распознаются по этому признаку. Обычными примерами штапельных волокон, которые мы привыкли видеть с детства, являются хлопок и шерсть, а также синтетический ватин, используемый в подушках и стеганых одеялах. Хотя синтетические нити из синтетического и натурального сырья являются непрерывными, их можно разрезать на отрезки определенной длины.

9.4.1. Методы получения нетканых материалов

Методы производства волокнистых материалов, входящих в широкую категорию «нетканых» материалов, известны уже в течение десятилетий. Для создания противобаллистических структур используют далеко не все из них. По поводу определения, что является нетканым материалом, имеются разногласия даже среди профессионалов.

Например, неясно, можно ли считать неткаными материалами несколько сшитых вместе слоев войлока? Еще один пример. Если вязаная структура включает в себя нетканые материалы, нужно ли ее считать нетканой? Хотя такие вопросы на первый взгляд кажутся смешными, они являются предметом серьезных споров, потому что большие инвестиции компаний в рекламу и борьба за заказчика зависят от вопросов, которые на первый взгляд кажутся тривиальными и даже забавными.

Ассоциация промышленности нетканых материалов (INDA), обладающая определенным авторитетом в этой области, дала определение нетканого материала. Согласно справочнику нетканых материалов INDA [6] «нетканые материалы – это плоские, пористые листы, производимые непосредственно из отдельных волокон, из расплава полимера или из полимерной пленки. Их не делают переплетением

или вязанием, и при этом не требуется переработка волокон в нить». Некоторые эксперты не соглашались даже с таким определением нетканого материала.

Для удобства противобаллистические нетканые структуры мы определим как волокнистые структуры, состоящие не только из тканей, не только из вязаных материалов и не только из волокнистых композиционных материалов. Но и с этим определением некоторые специалисты не согласятся.

9.4.2. Волокна

В противобаллистических структурах для поглощения энергии удара обычно используют многофиламентные комплексные нити. Высокопрочные волокна должны образовывать сеть, распространяющуюся на всю широту и длину противобаллистической структуры. Форма нитей не зависит от трения между волокнами, и, как следствие, в них отсутствуют внутренне слабые места, в которые может быть направлен удар.

Слоистые ламинаты

Значительный класс противобаллистических материалов составляют многослойные волокнистые композиты. Поскольку эти структуры не являются ни тканями, ни вязаными, их иногда продают как нетканые материалы. На самом деле они представляют собой типичные многослойные волокнистые композиты на основе некоторой матрицы.

В слое все волокна уложены параллельно друг другу. Затем их склеивают матрицей для формирования непрерывной структуры. Матрица фиксирует положение волокон. Еще один такой же слой ориентируют под углом 90° . Продольные и поперечные слои склеивают и получают рулон поперечно ориентированного композита (рис. 9.11).

Производство рулонного материала по этой технологии запатентовано. Обычно этот материал называют «shield», что в переводе на русский язык значит «щит». По этой технологии можно делать материалы из всех типов непрерывных волокон, включая СВМПЭ, арамидные и ПБО волокна [7].

Холстопршивание

Холстопршивание является одним из способов сшивания нитей основы, иногда для соединения слоев войлока или волокнистых матов. Его иногда считают модификацией процесса вязания, но использующим меньшее количество нитей. Хотя в настоящее время в коммерчески производимых противобаллистических изделиях этот процесс не применяется, имеются причины полагать, что он может иметь существенные преимущества, объединяя устойчивость волокнистых матов в плоскости листа и изотропию нетканых материалов.

Холстопршивочные машины первоначально появились в странах Восточной Европы в эпоху холодной войны, но, несмотря на политику того времени, они распространились и на Запад. Кгста [8] различает «истинную» прошитую и вязаную структуры. Первая только подражает трехмерной текстильной системе, сохраняя два преимущественных направления распространения ударной волны.

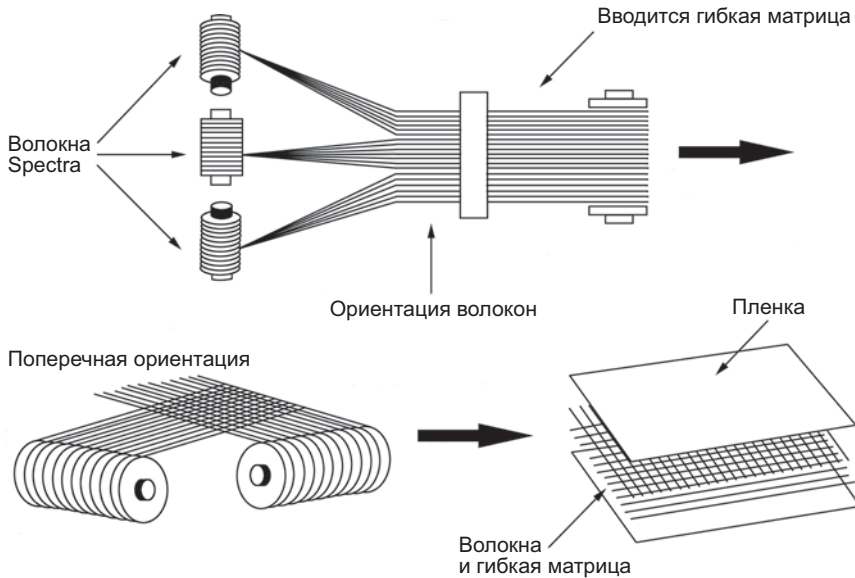


Рис. 9.11. Производство волокон Spectra Shield

Недостатками вязаных структур являются наличие петель, в которых имеется концентрация напряжений, приводящая к разрушению волокон при ударе. Таким образом, вязаные структуры могут иметь очень серьезные недостатки, что может препятствовать их реальному появлению на рынке.

Истинные прошитые структуры делают на машинах типа Maliwatt и Arachne [9]. Материалы этого типа традиционно используют для теплоизоляции, но есть серьезная надежда на их применение в качестве нетканых бронематериалов.

9.4.3. Штапельные волокна

Штапельные (короткие) волокна в противобаллистических нетканых структурах не использовали в связи с их очевидными недостатками по сравнению с непрерывными волокнами. С другой стороны, материал, состоящий из случайно ориентированных коротких волокон, на макроскопическом уровне является изотропным, что невозможно в случае непрерывных волокон. К тому же его можно сильно спрессовать, и плотность волокон в нем может быть выше, чем в многослойных тканых или композитных структурах.

Недостаток штапельных волокон состоит в том, что в производство они поступают в виде рыхлой и неоднородной массы. Обычно штапельные волокна упакованы в тюк, и перед производством нетканого материала они должны пройти несколько операций механической обработки.

Разрыхление и смешение

По определению, «в процессе разрыхления волокна разделяются на небольшие свободные пучки» [10]. Из-за больших давлений, требуемых для превращения свобод-

ноупорядоченной массы волокон в плотный тюк весом примерно 225 кг, увеличивается поверхность взаимного контакта волокон, и пучки волокон образуют связь.

Смешение является второй операцией приготовления штапельного волокна. Даже современные высокопрочные волокна имеют некоторый разброс физических свойств в различных партиях. Этот разброс уменьшается при смешении волокон различных партий. Самый передовой метод подготовки штапельных волокон для производства противобаллистических нетканых материалов включает стадию смешивания двух или нескольких типов волокон. Отметим, что состав смеси можно описывать как весовыми, так и объемными долями смешиваемых волокон. Обычно используют весовые доли.



Рис. 9.12. Игольчатый пластинчатый механизм помещает отделенные пучки волокон на вращающуюся конвейерную ленту (фото автора)

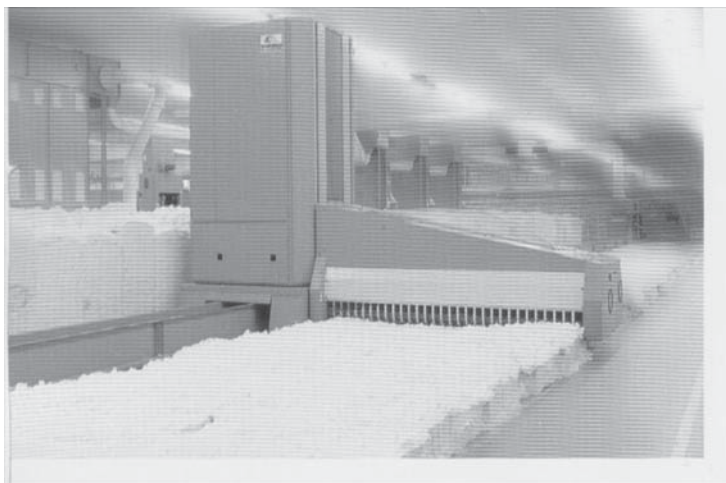


Рис. 9.13. Разрыхлительная машина, снимающая слои волокон

Разрыхлительно-трепальные машины делят на два основных типа.

1. В первом типе используется игольчатый пластинчатый вращающийся конвейер (рис. 9.12).
2. Во втором типе с поверхности пакета аккуратно снимаются тонкие слои рубленых волокон (рис. 9.13).

Сейчас используются оба метода, но из-за чрезвычайно высокой прочности противобаллистических волокон более привлекателен игольчатый конвейер.

Методы получения матов

После разрыхления и перемешивания волокон их помещают в форму, в которой достигается требуемая плотность или объем изделия (рис. 9.14). Кроме того, волокна нужно ориентировать в требуемом направлении с помощью машины, фиксирующей положение волокон.

Самый ранний и самый распространенный метод формирования волокон в мат является кардование. Кардочесальная машина первоначально была предназначена для создания толстой нити параллельных волокон из очищенных, перемешанных и разорванных волокон. Машины для выполнения этой задачи состоят из трех вращающихся барабанов, каждый из которых покрыт тонкой игольчатой сеткой (рис. 9.15).

Современные кардочесальные машины не совсем подходят для получения нетканого материала из баллистически стойких волокон, потому что они предназначены для получения пучков почти параллельных штапельных волокон при прядении нити. Тем не менее, это текстильное оборудование было первым применено для получения нетканых матов, и сейчас оно является традиционным оборудованием производства нетканых противобаллистических материалов. После-



Рис. 9.14. Прочесанные и смешанные штапельные волокна, подаваемые в форме мата (фото автора)

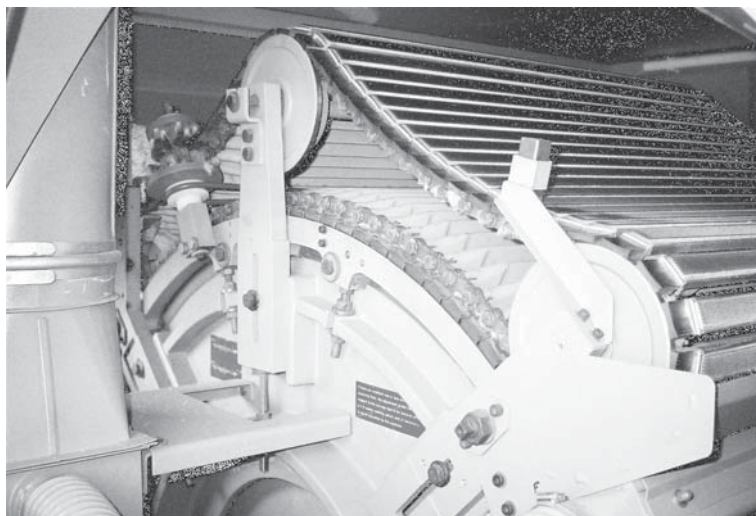


Рис. 9.15. Стандартная кардочесальная машина «с плоским верхом», показывающая игольчатую конвейерную ленту (фото автора)

дняя стадия этого процесса состоит в поперечной укладке тонких матов почти параллельных волокон в противобаллистическую структуру.

Поперечная укладка

В кардочесальной машине получают слои толщиной лишь в два — четыре волокна. Тонкая как паутинка структура может быть пригодной для получения нетканых материалов типа фильтровальных листов путем склеивания волокон, но они имеют слишком малую противобаллистическую стойкость. Для создания структуры с достаточным количеством волокон, ориентированных в различных направлениях и способных останавливать пули разной формы, требовался способ взаимной укладки слоев волокон.

Функции поперечного укладчика состоят в:

- 1) укладке необходимого количества слоев и формирования волокнистого мата требуемой поверхностной плотности;
- 2) укладке слоев прочесанных волокон под определенными углами, отличающимися от направления подачи кардочесальной ленты.

Эти функции выполняет устройство поперечной укладки, переводящее прочесанный слой с движущегося конвейера и укладывающее его на конвейер, движущийся в перпендикулярном направлении с более низкой скоростью. Это устройство позволяет накладывать друг на друга слои с различной толщиной и различными углами средней ориентации волокон, зависящими от разницы скоростей конвейеров (рис. 9.16).

Последующий контроль конечной толщины материала, однородности толщины и ориентации слоев может быть получен при полном давлении между конвейерами и приводными валами.

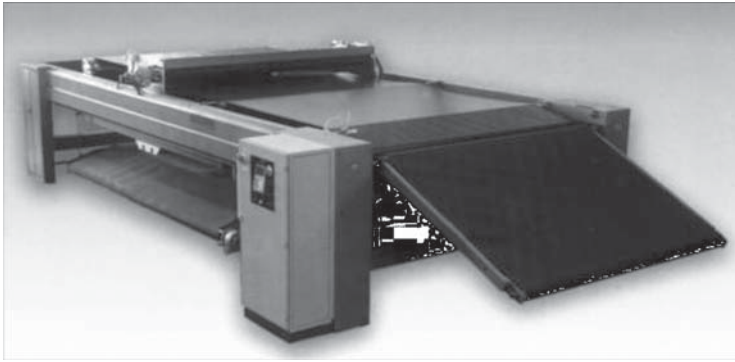


Рис. 9.16. Современное устройство поперечной укладки слоев (<http://www.nonwovens.net/photo26.htm>)

Иглопробивание

Иглопробивание является более простой операцией, чем ткачество. С его помощью могут быть получены материалы с разнообразными свойствами, определяемыми технологией процесса. Непрерывные волокна рубят на пряди, прочесывают и укладывают слоями под определенными углами, формируя квазиизотропный материал. Затем его упрочняют в поперечном направлении иглопробиванием. Иглы проталкивают через лист войлока некоторое количество волокон под углом 90° . Войлок останавливает осколки значительно лучше, чем традиционные ткани. Иглопробивание является довольно простой операцией, позволяющей путем изменения параметров процесса изменять свойства получаемого материала.

Свойства конечного продукта можно изменять, применяя иглы различной формы. Иглы решают множество задач, включая получение рельефа, изменение плотности материала, а также просто соединение слоев (рис. 9.17). Для произ-



Рис. 9.17. Различные пробивающие иглы (Groz-Beckert, http://gbu.groz-beckert.com/website/gbu/en/fn_innovations.html)

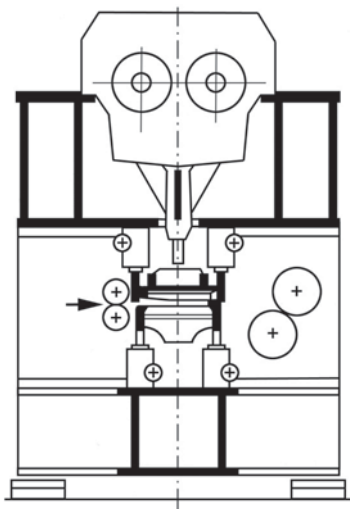


Рис. 9.18. Схема иглопробивной машины с «верхним прокалыванием» (Fehrer AG, <http://www.fehrerag.com/Fehrer/frame.htm>)

водства противобаллистических структур часто используют иглы с треугольным или четырехугольным звездообразным сечением.

Зубцы иглы могут различаться по форме, количеству и ориентации. Регулирование углов захвата волокон, глубины длины фрикционных контактов обеспечивается длиной зубцов, углом их ориентации и расстоянием между ними. Следующими параметрами, влияющими на конечные свойства материала, являются набор игл в игольной доске, скорость подачи волокнистого мата и частота прокалываний. Все эти факторы определяют количество сшивок на единицу площади материала.

Наконец, в иглопробивных механизмах, которые иногда называют игольными ткацкими станками, игольные доски пробивают материал сверху вниз, снизу вверх или в обоих направлениях одновременно (рис. 9.18).

Хотя противобаллистические и вспомогательные нетканые материалы могут формоваться за один проход через иглопробивную машину, часто используют двустадийный процесс, первый этап которого называют предварительным. С помощью этого процесса образуется сетка беспорядочно ориентированных волокон, удерживаемых вместе лишь силами взаимного трения.

9.5. Многослойные композиты

Противобаллистические композиты, получаемые укладкой однонаправленных слоев волокон, связанных полимерной матрицей, приобретают все более широкое распространение. В таких композитах со снарядом контактирует намного большее количество высокопрочных волокон, чем в тканых или вязаных материалах. Матрица также участвует в диссипации энергии, а композиционный материал способствует быстрому отделению оболочки от свинцовой сердцевины и сплю-



щиванию последней при ударе. По этому принципу сейчас работают два материала – Spectra Shield фирмы Honeywell и Dyneema UD фирмы DSM.

Эффективная диссипация энергии является основной причиной высокой противобаллистической стойкости материала. Композит должен эффективно реализовывать высокую прочность противобаллистических волокон. Этот принцип был выражен следующим образом [11]:

Ткань рассеивает энергию в областях пересечения нитей. Когда снаряд ударяет по поверхности ткани, энергия распределяется вдоль оси нити до следующей точки переплетения. Большинство тканей реализует от 60 до 80% прочности нитей. Приблизительно треть потерь прочности обусловлена повреждением нитей во время переплетения. Остальные потери прочности вызваны механическим взаимодействием между нитями основы и утка при растяжении. Высокая извитость нитей в ткани приводит к низкой реализации их прочности в ткани. Поэтому требуется компромисс между плотностью переплетения и прочностью ткани.

В материале Spectra Shield снаряд контактирует с гораздо большим количеством волокон, чем в ткани из-за малой толщины слоя. Смола препятствует раздвиганию снарядом волокон, и поэтому прочность волокон в этой структуре реализуется более эффективно.

В идеале, структура должна рассеивать энергию удара. Трение волокон является единственным механизмом, который может обеспечить поглощение энергии при распространении ударной волны растяжения в волокнистой системе. Оно обеспечивает лучшую диссипацию энергии в композитах, в которых имеется большое количество волокон, ориентированных в различных направлениях.

Скорость продольной волны растяжения определяет скорость, с которой волокно или структура могут передать и поглотить энергию деформации. Она может быть выражена формулой:

$$v = \sqrt{F/\mu},$$

где v – скорость продольной волны, F – сила, приложенная к волокну (со стороны снаряда), μ – линейная плотность, выраженная в кг/м.

В то же время, скорость продольной волны v выражается формулой:

$$v = \sqrt{E/\rho},$$

где E – модуль Юнга материала, ρ – плотность материала.

Решая эти уравнения совместно, находим условие оптимального рассеивания энергии удара:

$$F = \frac{E\mu}{\rho}.$$

Чем больше энергии отводит материал от точки удара, тем более эффективно диссипируется энергия. Иглопрокалывание структуры инициирует три процесса при ударе, а именно: удлинение, проскальзывание и разрыв волокон. Разработчики стремятся создать структуру, в которой оптимизирован каждый из этих механизмов для получения наилучших противобаллистических свойств.

9.5.1. Использование гибкой волокнистой брони

Самым традиционным примером применения брони из волокнистых слоистых композитов является «гибкие» бронежилеты с I по IIIA уровень защиты. В изготовленных этим методом изделиях используются как материалы Spectra Shield и Дупеема UD, содержащие только ориентированные полиэтиленовые волокна, так и композиционные материалы Goldflex компании Honeywell, состоящие из арамидных волокон и полимерной матрицы. Такая броня тоньше, чем аналогичные бронепакеты на основе ткани, причем ее обычно не прошивают.

Композиты на основе волокон ПБО и полимерных матриц также имеют очень высокие противобаллистические показатели. До настоящего времени об использовании волокон RPD в многослойных композитах не сообщалось, но очевидно, что это произойдет в ближайшее время.

9.5.2. Многослойная броня III уровня защиты

Одним из наиболее поразительных достижений является разработка брони из многослойных композитов, соответствующей III уровню защиты, т.е. защищающей от винтовочных пуль. Такую броню делают как из волокон Spectra, так и из волокон Дупеема. Исследования армии США и компании Honeywell позволили в начале 1990-х гг. разработать очень хороший материал для поддержки лицевых керамических пластин. Исследователи сообщили [12]:

И в тканых бронепакетах, и в многослойных волокнистых композитах наблюдается последовательное расслоение, срез пробки путем сдвига в сквозном направлении, и комбинированные типы сдвигового и растягивающего разрушения волокон, как в композитах на основе стеклянных и углеродных волокон. При низкой поверхностной плотности оба ламината имели близкие баллистические пределы. Однако при увеличении поверхностной плотности различия в значениях противобаллистического предела стали очевидными, причем многослойные композиты имели более высокие характеристики. Когда композиты подвергали повторному удару со скоростью ниже баллистического предела, наблюдалось постепенное расслоение вплоть до полного разрушения. При более низкой скорости снаряда увеличивалось суммарное количество ударов для полного пробития. Испытания показали, что композиты на основе волокон Spectra имеют более высокий баллистический предел и большее количество ударов до перфорации, если в качестве матрицы используют винилэфирную смолу, а не полиуретан. Менее эффективное поглощение энергии композитами на основе гибких полиуретановых матриц было отнесено на счет менее интенсивного расслоения. Совместно с результатами динамического механического анализа испытания показали, что жесткость матрицы оказывает важное влияние на противобаллистическую стойкость органопластиков на основе волокон Spectra.

9.6. История использования нетканой брони

Даже студентам очевидно, что использование нетканого материала позволяет избежать стадии машинного переплетения нитей. Отметим, что броню из нетканого



стеганого материала начали использовать по крайней мере со Средних веков. Британские историки установили, что усиление кольчуги викингов стеганой волокнистой подкладкой было секретом ее способности противостоять удару копья [13].

9.6.1. Результаты испытаний центра Natick армии США

Министерство обороны США провело испытание противобаллистических нетканых материалов в центре Natick, штат Массачусетс. Исследования были направлены на изучение возможности использоваться нетканых материалов в качестве брони. Они показали, что в некоторых случаях вес полученных иглопробиванием нетканых материалов может быть снижен втрое по сравнению с весом тканых материалов при сохранении уровня защиты. Однако эти исследования не позволили определить весь спектр возможного использования нетканых противобаллистических материалов [14].

9.6.2. Результаты британских исследователей

Материалы, полученные при помощи иглопробивной машины, были исследованы менее подробно, чем тканые и вязаные материалы. Hearle [15] предложил модель геометрической структуры материала, полученного иглопробиванием. Эта модель учитывает вертикальные пучки волокон, введенные в материал набором игл. Горизонтальная структура состоит из пучков волокон. Отдельные волокна проходят как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях.

9.6.3. Результаты различных независимых фирм

В настоящее время промышленно производится лишь несколько нетканых материалов, полученных иглопробиванием. Одной из причин этого является их большая толщина по сравнению с многослойными волокнистыми композитами и ткаными бронепакетами. Многие представители правоохранительных органов и военного ведомства предпочитают иметь более тяжелую, но тонкую броню, даже несмотря на немного лучшую защиту, которую обеспечивает нетканые материалы. Несмотря на это компании DSM (Нидерланды), National Nonwovens (Массачусетс, США) и Plainsman Armor (Алабама, США) производят такие изделия.

Компания DSM первой начала успешно выпускать иглопробивной нетканый материал, получивший название Fraglight или FR10. Эта броня состоит из штапельного волокна Дунеема, и ее используют в противоосколочных жилетах армий стран Европы. Исследователи фирмы DSM сообщили, что из-за истирания волокон противобаллистические характеристики первых моделей этого материала ухудшались со временем. В настоящее время продолжается дальнейшее улучшение свойств материала Fraglight.

Компания National Nonwovens также производит иглопробивной нетканый материал, который был сертифицирован для использования в коммерческих авиалайнерах. Материал фирмы Plainsman также успешно испытывался в этой роли, но в настоящее время его развивают больше для использования в натальной и транспортной броне.

Гибридная броня, состоящая из иглопробивной нетканой и тканой основы, разрабатывалась совместно компаниями Barrday (Канада) и TechTech Industries (США). Сейчас осуществляются испытания и вывод этого материала на рынок.

9.7. Использование нетканых противобаллистических материалов

Как указывалось в предыдущем параграфе, иглопробивная нетканая броня может применяться как отдельно, так и в сочетании с дополнительными усиливающими слоями. Во всех случаях нужно внимательно рассматривать как отдельные компоненты, так и совместную конструкцию всего изделия.

9.7.1. Чисто волокнистые материалы

Самый простой метод получения нетканого волокнистого материала состоит в использовании волокон одного типа, и именно таким образом делают почти все коммерческие противобаллистические материалы. Технологически это очень простой метод, не требующий сложного оборудования. При этом поведение волокон является предсказуемым, а процедура смешения достаточно проста.

Согласно одному из производителей нетканых материалов, они могут обеспечить IIIA уровень защиты кабины самолета от осколков [16]. Испытания показывают, что иглопробивные нетканые бронематериалы из волокон одного типа имеют перспективу применения в различных изделиях.

9.7.2. Многослойные материалы из волокон различного типа

Идея создания бронематериала из различных видов нетканых структур и обычных тканей была предложена в 1992 г. группой разработчиков из компании Allied Signal, обладающей технологией использования волокон Spectra [17]. Хотя такие материалы изучались различными военными организациями, научно-исследовательскими институтами и университетами, промышленное производство брони из гибридных тканых и поперечно ориентированных композитов из однонаправленных слоев (типа Shield) появилось только теперь. Иглопробивные нетканые материалы, состоящие из слоев различных волокон, промышленно пока не производятся.

9.7.3. Материалы из смеси волокон

Испытания, проведенные в университете Auburn, показали, что характеристики нетканых гибридных материалов на основе смеси арамидных и СВМПЭ волокон превышают характеристики материалов на основе волокон обоих типов. Предварительные результаты показали, что гибридный материал поглощает на 30% больше энергии, чем соответствующие материалы из волокон одного типа (рис. 9.19). В материале из смеси термопластичных и нетермопластичных волокон имеется дополнительный механизм диссипации энергии за



Поглощение энергии в смесях СВМПЭ и арамидных волокнах

- Энергия удара уводится от точки удара продольной волной деформации – передается арамидными и СВМПЭ волокнами
- Фибриллизация арамидных волокон
- Фазовый переход в СВМПЭ

Рис. 9.19. Механизмы поглощения энергии баллистического удара в гибридных арамид/СВМПЭ материалах

счет фазового перехода. Это позволило снизить поверхностную плотность материала.

Испытания гибридного нетканого материала, состоящего из 50% СВМПЭ и 50% арамидных волокон, показали, что при одинаковых противобаллистических характеристиках толщина такого материала значительно меньше, чем у соответствующего материала со 100%-ным содержанием арамидных волокон. Одно из объяснений наблюдаемого эффекта связано с различной линейной плотностью арамидных и СВМПЭ волокон. Линейная плотность СВМПЭ волокон была равна 5,5 денье, а арамидных – 1,5 денье. Вследствие более высокой линейной плотности СВМПЭ волокон при иглопробивании пористость смеси была выше, чем в материалы со 100%-ным содержанием арамидных волокон.

Баллистическая стойкость гибридного нетканого материала выше, чем материала со 100%-ным содержанием арамидных волокон. Она возрастает при увеличении количества слоев. Влияние количества слоев на баллистическую стойкость смесового материала было менее сильным, чем материала со 100%-ным содержанием арамидных волокон, и по мере возрастания количества слоев разница свойств гибридного материала и материала со 100%-ным содержанием арамидных волокон уменьшалась, но оставалась тем не менее значительной. Зависимость величины баллистического предела V_{50} от поверхностной плотности гибридного материала была аналогична зависимостям для материалов из чистых волокон обоих типов.

Дальнейшее изучение баллистической стойкости гибридных нетканых материалов продолжались с 1997-го по 2001 г. Полученные данные свидетельствовали, что характеристики возрастают при использовании СВМПЭ волокон линейной плотностью 5,5 денье или меньше. Было отмечено, что при ведении в материал волокон ПБО отрицательно сказываются низкие фрикционные характеристики этих волокон [7].

9.7.4. Защита от осколков

В 2002 г. полученные иглопробиванием гибридные нетканые материалы проходили баллистические испытания в лаборатории компании Honeywell в Петербурге, штат Вирджиния и в лаборатории Aberdeen Proving Grounds армии США. Эти материалы сравнивали с материалами на основе арамидных и ПБО тканей. Гибкую броню испытывали на противоосколочную стойкость согласно стандарту MIL-STR-662F. Результаты испытаний компании Honeywell приведены в табл. 9.3.

Таблица 9.3. Противоосколочная стойкость гибкой брони

Материал	Число слоев	Поверхностная плотность (кг/м ²)	V ₅₀ (м/с)
GF	25	5,81	586
AF + GF	2+23	5,81	575
GF + AF	23+2	5,81	593
AF	15	3,61	573

Обозначения: GF– композит, состоящий из нескольких слоев арамидных волокон; AF – гибридный нетканый материал.

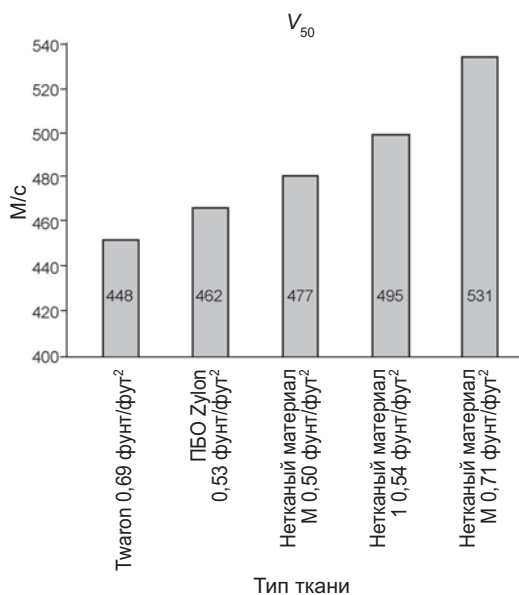
9.7.5. Испытания американской армии

Испытания гибридного нетканого материала проводили в 2002 г. с целью разработки противоосколочной защиты военного тягача LOSAT KEM. По техническому заданию, поверхностная плотность брони при скорости снаряда не менее 425 м/с не должна превышать 0,75 фунт/фут [2]. Испытания установили, что гибридный нетканый материал имеет большие преимущества по сравнению с ткаными материалами на основе арамидных и ПБО волокон (рис. 9.20).

9.7.6. Комбинирование нетканых и обычных материалов

Одним из направлений усовершенствования гибкой брони является разработка гибридных материалов, состоящих из волокон различных типов. Этот подход позволяет объединять преимущества различных противобаллистических волокон.

- Результаты испытаний армии США в Абердине
- Параметры:
 - Вес < 3,42 кг/м²
 - Скорость осколка > 425 м/с
- Нетканые материалы лучше тканых на основе арамидных и ПБО волокон
- История развития нетканых материалов
 - Исходный Kevlar-29 – 389 м/с
 - Исходный гибридный композит (СВМПЭ 2 сорта и Кевлар-29, 1991 г.) – 434 м/с



* Результат теста 31.08 – 1.09.2002 г.

Рис. 9.20. Противоосколочные характеристики гибридного нетканого материала

Совместное использование обычных тканых, поперечно ориентированных материалов марки Shield и нетканых материалов типа ArmorFelt имеет существенные преимущества при создании новых типов гибкой натальной брони. Результаты испытаний брони, соответствующей IIIA уровню защиты стандарта NIJ 0101.04, при выстреле из пистолета Магнум .44 калибра приведены в табл. 9.4, 9.5 и 9.6.

Таблица 9.4. Результаты испытания брони IIIA уровня защиты на основе многослойного арамидного композита

Образец	Материал	Тип пули	Скорость (м/с)	Пробитие	Запреградная деформация (мм)
1	24-слойный композит на основе арамидной ткани плотностью 5,57 кг/м ²	.44 Магн.	433	Частичное	47
2		.44 Магн.	438	Частичное	42
3		.44Магн.	442	Частичное	41
4		.44 Магн.	438	Частичное	42
5		.44 Магн.	442	Частичное	47
6		.44 Магн.	435	Частичное	49
Среднее значение			438		44

Таблица 9.5. Результаты испытания брони IIIA уровня защиты на основе многослойного арамидного волокна и 4 слоев гибридного нетканого материала

Образец	Материал	Тип пули	Скорость (м/с)	Проникновение	Запреградная деформация (мм)
1	19 слоев композита на основе арамидной ткани и 4 слоя нетканого материала, плотность 5,57 кг/м ²	.44Магнум	440	Частичное	39
2		.44Магнум	441	Частичное	38
3		.44Магнум	440	Частичное	37
4		.44Магнум	441	Частичное	43
5		.44Магнум	443	Частичное	35
6		.44Магнум	445	Частичное	42
Среднее значение			439		38

Таблица 9.6. Результаты испытания брони IIIA уровня защиты на основе многослойного арамидного волокна и 3 слоев смесового нетканого материала

Образец	Материал	Тип пули	Скорость (м/с)	Пробитие	Запреградная деформация (мм)
1	18 слоев композита на основе арамидной ткани и 3 слоя нетканого материала. Плотность 5,42 кг/м ²	.44Магнум	427	Частичное	40
2		.44Магнум	430	Частичное	39
3		.44Магнум	430	Частичное	39
4		.44Магнум	437	Частичное	40
5		.44Магнум	440	Частичное	38
6		.44Магнум	431	Частичное	37
Среднее значение			433		38

9.8. Перспектива развития нетканых материалов в будущем

Появление высокопрочных полимерных волокон привело к более быстрому развитию бронематериалов, чем предполагалось еще 35 лет назад. Дальнейшее развитие брони может быть связано с появлением новых материалов и нанотехнологий.

Использование преимуществ волокон различного типа приведет к появлению высокоэффективных средств противобаллистической защиты, вытесняющих стандартные материалы на основе отдельных волокон.

9.9. Литература

1. Warder, B., «History of Armor and Weapons Relevant to Jamestown», National Park Service, January 1995, <http://www.nps.gov/colo/Jthanout/HisArmor.html>
2. Thomas, H.L., «Armor and Materials for Combat Threat and Damage Protection», SAMPE 2005 Conference and Exhibition, Long Beach, CA, May 4, 2005.
3. «U.S. Body Armor (Flak Jackets) in World War II», http://www.olive-drab.com/od_soldiers_gear_body_armor_wwii.php
4. «Body Armor Development after World War II». http://www.olive-drab.com/od_soldiers_gear_body_armor_korea.php
5. Ipson, T.W. and Wittrock, E.P., «Response of Nonwoven Synthetic Fiber Textiles To Ballistic Impact», Technical Report No. 67-8-CM. U.S. Army Natick Laboratories, Natick, MA, July 1966.
6. *The Nonwovens Handbook*, INDA Association of the Nonwoven Fabrics Industry, New York, NY, USA, 1988.
7. Thomas, H.L., «Needle-Punched Non-Woven Fabric for Fragmentation Protection», 14th International Conference on Composite Materials, Society of Manufacturing Engineers, July 14–18, 2003.
8. Krcma, R., *Manual of Nonwovens*, Textile Trade Press, W.R.C. Smith Publishing Co., Atlanta, USA, 1971.
9. Totor, P.G., *Understanding Textiles*, Macmillan Publishing Co., New York, NY, USA, 1992.
10. Marvin, J.H., *Textile Processing*, Vol. I, State Dept of Education, Office of Vocational Education, Columbia, SC, USA, 1973.
11. Thomas, H.L. and Thompson, G.J., «Characteristics and Performance of Needle-punched Flexible Ballistic Personal Protection Fabric Constructed from High Performance Fibers», 4th International Textextil Symposium, Frankfurt, Germany, June 1992.
12. Lee, B. L., Song, J. W. and Ward, J. E., «Failure of Spectra Polyethylene Fiber-Reinforced Composites under Ballistic Impact Loading», *Journal of Composite Materials*, 28(13), 1202–1226, 1994.
13. Lent, C., Producer/Director, «Secrets of the Viking Warriors», National Geographic Channel, Darlow Smithson Productions.
14. Laible, R.C., *Methods and Phenomena, Ballistic Materials and Penetration Mechanics*, Elsevier Scientific Publishing Company, Inc., Amsterdam, 1980.
15. Hearle, J.W.S. and Purdy, A.T., «Report on Energy Absorption by Nonwoven Fabrics», Contract No. DAJA37-1-C-0554. European Research Office, United States Army, London, November 1971.
16. National Nonwovens, Performance Solutions E-News, Spring 2002, <http://www.nationalnonwovens.com/enews/performancecel.htm>
17. Cordova, D.S. and Kirkland, K.M., Armor Systems, US Patent 5,343,796, Sept. 6, 1994.

ГЛАВА 10

ПРОТИВОБАЛЛИСТИЧЕСКИЕ КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ ПРЕПРЕГОВ

А. Бхатнагар, Б. Арвидсон, Honeywell International Inc., США
В. Патаку, Bedford Materials Inc., США

10.1. Введение

Один из наиболее перспективных способов получения высокоэффективных противобаллистических материалов состоит в использовании препрегов. Препреги имеют повышенное трение с высокоскоростными снарядами, что уменьшает вес противобаллистического материала.

Основой легких баллистических материалов является высокопрочное волокно. Однако, единичные волокна не способны остановить снаряд, который может раздвинуть нити, не приводя к их разрушению. Для преодоления этого недостатка из волокон делают ткани (глава 8) или нетканые материалы типа войлока (глава 9). В этих материалах ударник взаимодействует с волокнами, ориентированными в двух направлениях. Из мягких волокнистых материалов шьют гибкие бронезилеты. Напротив, материалы на основе препрегов имеют жесткую форму, которую им придают с помощью соответствующих пресс-форм.

Во время баллистического удара воздействие материала на снаряд приводит к:

- его замедлению;
- деформированию;
- остановке;
- деформированию задней поверхности.

В броне при ударе напряжения концентрируются в относительно небольшой области вблизи места удара. В результате этого со снарядом контактирует лишь сравнительно небольшое количество волокон. Так как напряжения локализованы в узкой области мишени, запреградная деформация обычно достаточно велика. Однако введение в волокнистый материал полимерной матрицы, склеивающей волокна, позволяет улучшить его характеристики. Препреги могут иметь форму ткани, двуслойного поперечно ориентированного слоистого материала или войлока, полученного из пучков рубленых волокон. Противобаллистические препреги состоят из высокопрочных волокон и матрицы в форме тонкой пленки или клея, частично заполняющего межволоконное пространство.

Матрица является слабым компонентом композитов. Под действием высокоскоростного снаряда в ней образуются микротрещины или крейзы, объединение которых приводит к формированию макротрещин, а завершиться процесс соударения может разрушением композита. Матрица обеспечивает необходимое

поведение материала при баллистическом ударе. Она фиксирует волокна, что препятствует проникновению снаряда. При соударении матрица распределяет нагрузку между противобаллистическими волокнами, увеличивая сопротивление проникновению снаряда и срок службы изделия.

Благодаря матрице напряжения распределяются на некоторую область за пределами непосредственного контакта с пулей. Это позволяет получить более легкие и долговечные противобаллистические жилеты и каски. Препреги также увеличивают трение между снарядом и броней.

Другие преимущества препрегов состоят в:

- уменьшении степени повреждения волокон при ношении брони из-за отсутствия трения между ними;
- защите волокон от влаги;
- защите от бытовых жидкостей (кофе, содовой, кетчупа, приправы к салату и т.д.);
- защиты от абразивной пыли, песка и других частиц.

Кроме того, матрица фиксирует форму изделия и контролирует его стойкость к воздействию окружающей среды.

Использование препрегов для формования касок, грудных пластин и бронезащиты транспортных средств позволяет заметно снизить их вес по сравнению с изделиями, полученными мокрой укладкой. При изготовлении препрегов необходимо точно контролировать ориентацию волокон, долю и однородность распределения матрицы, ее течение и отверждение. Препреги позволяют получать изделия лучшего качества независимо от технической подготовки персонала, занятого формованием композита. Их можно произвести и хранить на складе, что уменьшает время выполнения заказа. В любой момент препреги можно отправить покупателю в любую часть мира.

Характеристики противобаллистических материалов зависят от содержания матрицы. Особенностью противобаллистических препрегов является малое количество матрицы, и поэтому их нежелательно делать методом мокрой укладки или поливом матрицы.

При изготовлении препрегов обычно используют жидкую матрицу, полностью увлажняя ею поверхность волокон. Чтобы добиться хорошей связи между волокнами, распределение матрицы должно быть однородным. Один из способов решения этой проблемы состоит в ее растворении в низковязкой жидкости. После пропитки волокон растворитель удаляют путем нагревания, и высушенный препрег на выходе из пропиточной машины содержит менее 1% растворителя. Это помогает увеличить время хранения и транспортировки препрега перед изготовлением конечного изделия. Это типично для всех препрегов независимо от химического состава матрицы и типа волокна.

Как упоминалось выше, из препрегов делают как гибкие, так и жесткие волокнистые материалы. Гибкую броню используют в бронежилетах, воротниках, противобаллистических одеялах и рулонных материалах защиты транспортных средств. Гибкие волокнистые изделия используют полицейские, сотрудники правоохранительных органов, телохранители и военнослужащие для защиты от pistolетных



выстрелов, осколков ручных гранат и взрывов под транспортными средствами. Жесткие волокнистые материалы используют для изготовления формованных противобаллистических касок и нагрудных пластин для бронежилетов всех родов войск.

10.2. Гибкая броня

Мягкую броню обычно изготавливают из высокопрочных волокон в виде ткани или нетканых материалов со слоем внешнего покрытия или без него. Противобаллистические ткани из арамидных и СВМПЭ волокон изготавливают на быстродействующих автоматизированных ткацких станках. Технология переплетения ткани относительно проста. Для предотвращения намокания во время переплетения на ткань наносится водоотталкивающее покрытие. Покрытие обычно наносят, опуская ткань в ванну и высушивая ее на оборудовании, аналогичном используемому для получения препрегов.

Новые нетканые и поперечно ориентированные материалы используют все шире из-за более высокой баллистической стойкости. Ламинированный слой обеспечивает скольжение смежных слоев композита в жилете, не сковывая таким образом движение военнослужащего. Преимущества нового материала заключаются в более высокой баллистической стойкости, в снижении запреградной деформации и повышении стойкости к многократным ударам. Противобаллистические жилеты из новых материалов не прострочены, и поэтому они тонкие и гибкие (глава 9).

Гибкую броню используют для остановки 9-мм пистолетных пуль с цельнометаллической оболочкой, Магнума 357, Магнума 44 и низкоэнергетных осколков гранат и артиллерийских снарядов. Гибкий волокнистый бронежилет состоит из нескольких слоев противобаллистического материала, которые несколько ограничивают движение тела. Однако хорошо скроенный жилет сгибается при движении, что не создает дискомфорта при передвижении.

Матрица в гибком бронежилете должна иметь высокое удлинение. Аналогично, ламинирующие пленки должны быть тонкими и имеющими высокое удлинение, чтобы обеспечить гибкость композита или ткани.

Препреги, используемые в мягких бронежилетах, имеют следующие особенности:

- довольно низкое содержание матрицы;
- высокое удлинение матрицы (> 200%);
- не сплошное покрытие волокон (содержание матрицы ниже 20%);
- отсутствие поперечной сшивки;
- наличие микропор;
- хорошая адгезия к волокнам.

10.3. Жесткая броня

Подобно мягкой броне, жесткую броню обычно делают из высокопрочных волокнистых тканых или нетканых материалов. Используют как арамидные, так и

СВМПЭ волокна. Матрицу обычно наносят с помощью одного из процессов, описанных ниже в разделе 10.9.

Полужесткую и жесткую броню формуют из препрегов следующими методами:

- в автоклаве;
- в пресс-форме;
- в вакуумном мешке;
- ручной выкладкой.

Все эти методы описаны в главе 11.

10.4. Препреги на основе термопластичных матриц

Термопластичные матрицы, используемые для получения противобаллистических препрегов, сильно отличаются от коммерческих термопластов типа полиэтилена и других технических полимеров. Такие термопласты являются одновременно и достаточно жесткими, и вязкими. Они обычно имеют высокое удлинение при разрушении, относительно небольшой модуль упругости и умеренную прочность. Термопластичные матрицы для противобаллистических композитов отличаются от матриц, используемых в композитах конструкционного назначения. В последних используют матрицы типа полиэфирэфиркетона (ПЭЭК), полифениленсульфида (ПФС) и полиэфиримида (ПЭА).

Термопластичные матрицы для противобаллистических композитов имеют следующие особенности:

- низкий молекулярный вес;
- высокое удлинение при разрушении;
- низкий модуль упругости;
- низкую прочность;
- высокую энергию разрушения;
- пониженную вязкость течения;
- низкую температуру плавления и размягчения;
- способность к растворению, в том числе и в воде;
- относительно слабую адгезию к волокнам;
- хорошую влагостойкость;
- хорошую химическую стойкость;
- большой срок хранения при комнатной температуре.

Термопластичные матрицы для противобаллистических препрегов могут иметь форму порошка, гранул, жидкости или готового к использованию раствора. Такие матрицы содержат аппреты и растворяются в органических растворителях или воде. Растворитель позволяет снизить вязкость матрицы, что упрощает пропитку волокон. Использование растворителей не всегда желательно по множеству причин: загрязнения окружающей среды, токсичности, горючести и т.д.

На использование органических растворителей требуется специальное разрешение и меры по рекуперации (т.е. извлечения) растворителя. Однако матрицы на основе растворителя имеют преимущества, благодаря которым они широко используются для получения препрегов:



- превосходное смачивание волокон;
- высокое объемное содержание полимера;
- повышение производительности производства препрегов;
- понижение температуры изготовления препрегов;
- однородная пропитка волокон;
- простота дополнительных процессов, например, нанесения ламинирующей пленки;
- долговечность;
- превосходная влагостойкость;
- длительное хранение.

Матрицы на основе водного раствора имеют следующие преимущества:

- экологическая чистота;
- не требуется рекуперации или разрешения на использование;
- возможность использоваться в неограниченном объеме;
- дешевизна воды;
- легкость хранения;
- легкость транспортировки.

При использовании водорастворимых матриц для удаления воды может потребоваться дополнительное оборудование и много энергии. При нанесении ламинирующей пленки в этом случае требуется обеспечить полное удаление влаги. Чтобы достичь объемного содержания матрицы выше 50%, необходимо, чтобы большая часть полимера присутствовала в виде агломератов, размер которых выше коллоидного размера. Отметим, что для получения противобаллистических препрегов используют и органические растворители, и воду.

10.5. Препреги для формования жесткой брони

Жесткая формованная броня останавливает пули, поглощает энергию низкоскоростных ударов и выдерживает механические нагрузки, возникающие в полевых условиях. Типичными изделиями из жесткой брони являются каски, нагрудные пластины, бронезащита транспортных средств и небольших самолетов.

Жесткая броня, используемая полицией, миротворческими силами и военным персоналом, предназначена для защиты от поражения пулями калибра 9 мм с цельнометаллической оболочкой из пистолетов Магнум 357 и Магнум 44. Жесткая броня, используемая военнослужащими, защищает от низко- и высокоскоростных винтовочных пуль и осколков ручных гранат и артиллерийских снарядов различного размера и формы.

Жесткая броня сохраняет форму при эксплуатации. Прежде всего, она должна обеспечивать противобаллистическую защиту, быть легкой, жесткой и долговечной. Эти требования определяют выбор препрегов.

Препреги на основе термореактивных матриц должны иметь следующие особенности:

- 1) низкое содержание матрицы (< 20%),
- 2) низкое содержание летучих веществ,
- 3) коммерческую доступность,
- 4) стабильность свойств при хранении в комнатных условиях,
- 5) относительно низкую адгезию между волокнами и матрицей,
- 6) частичное покрытие волокон матрицей (содержание матрицы меньше 20%),
- 7) регулируемую степень поперечных сшивок в полимерной матрице,
- 8) высокую противобаллистическую защиту,
- 9) хорошие механические свойства,
- 10) способность сохранять свои свойства при повышенной температуре (66°С),
- 11) разумную температуру стеклования T_g ,
- 12) негорючесть,
- 13) отсутствие липкости при формовании касок и других изделий сложной формы,
- 14) хорошую связь с передним слоем металла или керамики,
- 15) легкость механической обработки, сверления и покраски,
- 16) отсутствие микропор.

Препреги на основе термореактивных матриц должны иметь следующие особенности:

- 1) низкое содержание матрицы (< 20%),
- 2) высокое удлинение (> 100%),
- 3) регулируемое течение матрицы под высоким давлением,
- 4) относительно низкую адгезию между волокнами и матрицей,
- 5) частичное покрытие волокон матрицей (содержание матрицы меньше 20%),
- 6) высокую баллистическую стойкость,
- 7) хорошую связь с передним слоем металла или керамики,
- 8) низкую горючесть,
- 9) стабильность свойств при хранении в комнатных условиях,
- 10) отсутствие микропор,
- 11) минимальное проникновение матрицы в волокнистую основу.

Для получения жестких композитов используют как термопластичные, так и термореактивные матрицы. Выполнить все вышеупомянутые требования очень трудно. Поэтому приходится искать некоторого компромисса. Как только компромисс достигнут, разработчики пытаются устранить имеющиеся недостатки.

Если выбор матрицы сделан, следующий шаг при разработке препрега состоит в определении степени адгезионной связи волокон и матрицы, от которой зависит баллистическая стойкость, запреградная деформация, жесткость, долговечность и другие особенности брони. Связь зависит и от поверхностных свойств волокон, и от химического состава матрицы.

10.6. Поверхностные свойства противобаллистических материалов

От смачиваемости поверхности волокон жидкой полимерной смолой зависят свойства препрега. Поскольку матрица должна покрыть большую поверхность волокон, поверхностная энергия волокон имеет важное значение. Смачиваемость определяется поверхностным натяжением матрицы и поверхностной энергией волокон. Поверхностное натяжение выражается отношением силы к единице длины и измеряется в единицах дин/см.

Поверхностная обработка поперечно ориентированного препрега или тканого материала влияет на конечные свойства брони. Поверхностная обработка волокна должна обеспечить появление на ней полярных или химически активных групп, вступающих в реакцию с жидкой полимерной смолой. Она позволяет улучшить смачивание поверхности волокна и способствует усилению его связи с матрицей. Ткани могут обрабатываться после переплетения.

Поверхностное натяжение может быть определено измерением контактного угла капли, лежащей на подложке. Каплю помещают на поверхность и рассматривают через микроскоп для измерения угла контакта. Однако для волокнистого материала этот метод непригоден, поскольку он предполагает наличие плоской поверхности подложки. В таких случаях для качественного определения качества смачивания поверхности используют ряд различных жидкостей с калиброванными поверхностными натяжениями. Каплю помещают на волокнистый субстрат, и, если она имеет вид «бусинки», поверхностное натяжение подложки невысокое. Если же она растекается, то поверхностное натяжение жидкости низкое. Используя ряд жидкостей, можно получить оценку значения поверхностной энергии.

Быструю оценку смачиваемости поверхности волокон можно произвести методом Шарпи. По материалу проводят ручкой, и, если чернила растекаются, по-

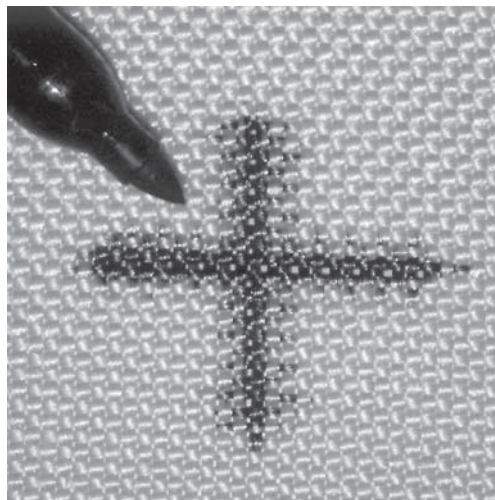


Рис. 10.1. Метод Шарпи

верхностная энергия волокнистого материала, видимо, будет достаточной и для пропитки матрицей (рис. 10.1).

10.6.1. Поверхностная обработка волокон

Главное различие между волокнами конструкционного и противобаллистического назначения состоит в уровне их поверхностной обработки. Для противобаллистических волокон не требуется столь же тщательная обработка поверхности, как в случае волокон конструкционного назначения, которые должны иметь очень хорошую связь с матрицей.

Волокна различного химического состава требуют оригинальной поверхностной обработки, и во всех случаях необходимо найти компромисс между коммерческой доступностью, стоимостью и качеством поверхностной обработки. Отметим, что образующиеся при обработке газообразные продукты перед выбросом в атмосферу должны очищаться, чтобы не представлять опасности для окружающей среды.

Ниже перечислены некоторые виды поверхностной обработки волокон, используемых для изготовления противобаллистических препрегов:

- промывка;
- химическая обработка;
- плазменная обработка;
- обработка коронным разрядом;
- ультрафиолетовая прививка.

Промывка

Нити или ткань пропускают через химический раствор, удаляющий излишек аппрета и вспомогательные вещества, наносимые на волокна перед переплетением ткани.

Ниже описаны процессы промывки, используемые в текстильном производстве.

1. Промывка ткани в воде при комнатной температуре.
2. Промывка ткани в растворе с $\text{pH} = 9,0-9,5$, состоящем из:
 - I. Nostapur концентрацией 0,1 г/л.
 - II. TSP концентрацией 0,5 г/л.
3. Промывка при 40°C.
4. Стирка при 40°C.
5. Стирка при 21°C.
6. Сушка волокон.

Таблица 10.1. Влияние очистки волокон на противобаллистические характеристики каски, изготовленной из препрегов Spectra® Style 903 с винилэфирной матрицей

Уровень очистки	Вес корпуса (фунт)	V_{50} осколок весом 17 г (фут/с)	V_{50} осколок весом 2 г (фут/с)
Контрольный (неочищенный)	2,55	2277	4152
Промытый частично	2,59	2408	4428
Промытый полностью	2,57	2378	4335

После промывки снова проверяют наличие остатков химикатов на волокнах. После чистки поверхностная энергия увеличивается, и это способствует увеличению трения со снарядом.

Табл. 10.1 показывает, что чистка приводит к увеличению защитных противоосколочных свойств каски. Оптимальная защита достигается в случае полуочищенных волокон. При этом увеличивается трение и уменьшается расслоение композита при ударе.

Химическая обработка

Хотя в настоящее время существует большой выбор методов химической обработки высокопрочных волокон конструкционного назначения с целью увеличения их адгезии с матрицей, ни один из них для противобаллистических композитов не используют. Это частично обусловлено химической структурой поверхности арамидных и СВМПЭ волокон, и частично — существованием других, менее сложных и более удобных способов непрерывной обработки волокон, тканей и войлочных материалов.

Плазменная обработка

Плазменная обработка осуществляется электрическим разрядом в вакуумной камере, заполненной кислородом или аммиаком. Электрический разряд возбуждается радиочастотным излучением, под действием которого в газе образуются электроны, ионы, свободные радикалы и неустойчивые частицы. Важное значение имеет выбор газа. Образующиеся электроны и свободные радикалы сталкиваются с поверхностью волокна, в результате чего разрываются полимерные цепи и образуются свободные радикалы. Процесс прекращают после определенного времени обработки, и вакуумный насос удаляет газы.

Плазма позволяет обрабатывать волокна и ткани в непрерывном режиме. Катушки с нитями (или рулоны противобаллистической ткани) находятся вне вакуумной камеры, а нити пропускают через реактор, в котором проводится их плазменная обработка при низком давлении газа. После обработки нити или ткани наматывают на приемные катушки, находящиеся за пределами вакуумной камеры (табл. 10.2).

Таблица 10.2. Влияние плазменной обработки на межслоевую прочность композита на основе СВМПЭ волокон

Обработка	Содержание матрицы (вес.%)	Прочность при межслоевом сдвиге (МПа)
Без обработки	34,6	5,7 ±0,3
Аммиачная плазма, 1 мин.	37,9	11,1 ±0,3
Аммиачная плазма, 2 мин.	37,6	11,8±0,6
Аммиачная плазма, 10 мин.	35,4	11, 8 ±1,9
Кислородная плазма, 2 мин.	35,3	6,6 ±0,6
Коронный разряд	35,2	7,0 ±0,8

Обработка коронным разрядом

Коронный разряд — это *низкоэнергетический* электрический разряд, которым обрабатывают волокна, ткани и нетканые материалы. Установка для обработки коронным разрядом не требует вакуумной камеры и камеры, заполненной аммиаком или кислородом. Волокна или ткани пропускают через коронный разряд и наматывают на приемные катушки. Коронный разряд обычно проявляется в виде маломощного свечения поверхности обрабатываемого материала. Насос удаляет выделяемые при обработке газы (табл. 10.3).

Данные табл. 10.3 показывают, что повышение интенсивности обработки коронным разрядом усиливает взаимодействие волокон и матрицы, проявляющееся уменьшении толщины панели, но баллистическая стойкость при этом снижается. Более высокий уровень обработки увеличивает адгезию, механическую жесткость и износостойкость, снижает степень расслаивания и величину запреградной деформации жестких бронепанелей. Поверхностная активность материала после обработки плазмой или коронным разрядом со временем снижается, но после достаточно интенсивной обработки через несколько дней состояние поверхности стабилизируется. Стабилизация достигается через несколько часов или дней в зависимости от интенсивности обработки и химической структуры волокна.

Таблица 10.3. Влияние коронного разряда на баллистический предел плоских формованных панелей на основе препрегов из ткани Spectra 903/винилэфир. Испытание осколками весом 17 гран согласно стандарту MIL-STD-662F

Уровень обработки	Количество слоев	Толщина (дюймов)	Вес (фунт/фут ²)	V ₅₀ (фут/с)
A	30	0,325	1,53	1845
2xA	30	0,323	1,53	1769
3xA	30	0,322	1,52	1754

Ультрафиолетовая прививка

Ультрафиолетовую прививку на поверхность волокна проводят пропусканием волокна или ткани через нагретую ванну с раствором прививаемого мономера, фотосенсибилизатора и растворителя. После смачивания волокон их пропускают через ванну с ацетоном, вымывая избыток смачивающей жидкости. После промывки ацетоном волокна пропускают через ванну, в которой при комнатной температуре на поверхность волокна наносят растворенный в ацетоне прививаемый мономер и фотосенсибилизатор. Эта ванна расположена непосредственно перед камерой, в которой производится облучение ультрафиолетом. Покрытые волокна проходят через кварцевую ультрафиолетовую трубку. Проточный поток азота в этой трубке обеспечивает охлаждение волокон и ограничивает доступ кислорода. После этого привитое ультрафиолетом волокно промывают в ацетоне и горячей воде (табл. 10.4).

Таблица 10.4. Прочность при межслоевом сдвиге органопластиков на основе СВМПЭ волокон

Обработка	Межслоевая прочность при сдвиге (МПа)
Необработанные волокна	10
Обработка плазмой	20
Волокна с УФ прививкой	30

10.7. Контроль механического натяжения препрега

Имеется целый ряд факторов, влияющих на степень однородности распределения матрицы. Одним из них является натяжение основы в процессе изготовления препрега.

Натяжением называют силу, возникающую в препреге на определенной стадии его изготовления. Регулируя силу натяжения, можно удлинять материал в зависимости от типа материала (тканого или нетканого), способа переплетения нитей, ширины полотна, температуры и т.д. Обычно при многократной обработке ткани ее натяжение рекомендуется сохранять. Контролировать этот процесс довольно сложно, однако оборудование работает лучше, если в процессе производства препрега натяжение поддерживается на постоянном уровне. Знание поведения препрега при натяжении позволяет увеличить производительность процесса его получения.

Натяжение ткани при изготовлении препрегов контролируется на входе и выходе. Для установки растягивающей силы важно знать прочность ткани и параметры натягивающего механизма. Натяжение должно быть таким, чтобы не было провисших или перетянутых участков ткани.

Скорость движения противобаллистического препрега при пропитке может быть выше, чем препрега конструкционного назначения. Это связано с более низким содержанием матрицы и меньшим количеством технологических стадий обработки по сравнению с препрегами конструкционного назначения. Производство препрегов управляется с помощью микропроцессора, который принимает сигналы от двигателей и сенсорных устройств машины, производящей препреги.

10.8. Сравнение препрегов противобаллистического и конструкционного назначения

Препреги противобаллистического и конструкционного назначения имеют некоторые различия:

- в противобаллистическом препреге матрица наносится не на все волокна;
- противобаллистические препреги имеют недостаток матрицы;
- содержание матрицы находится в диапазоне 10–20 вес.%;
- препреги не липкие;
- препреги конструкционного назначения хранят при температуре ниже 0°C;
- большинство противобаллистических препрегов имеют длительный срок хранения при комнатной температуре.

Сравнение свойств препрегов представлено в табл. 10.5.

10.9. Технология производства препрегов

10.9.1. Мокрая пропитка и сушка

Это один из самых простых методов изготовления препрегов состоит в непрерывном пропускании ткани или нетканого волокнистого материала через раствор матрицы. Излишек матрицы удаляют.

Таблица 10.5. Сравнение препрегов противобаллистического и конструкционного назначения

	Композиты конструкционного назначения	Композиты противобаллистического назначения
Волокна	ВМ углеродные, стеклянные S-2, арамидные	ПБО, СВМПЭ, арамидные, стеклянные S-2 и E-волокна
Содержание волокон	50–60 вес.%	80–90 вес.%
Матрица	Термопласты и термо-реактивные смолы, отверждаемые при высокой температуре	Термопласты и термо-реактивные смолы, отверждаемые при относительно низкой температуре
Содержание матрицы	40–60%	10–25%
Текучесть смолы	Хорошая	Ограниченная или полностью отсутствующая
Поверхность волокна, обработка	Интенсивная	Умеренная
Адгезия	Очень хорошая	Ограниченная для контроля расслоения
Структурная целостность	Замечательная	Относительно низкая
Баллистические свойства	Плохие	Замечательные
Растрескивание	Ограниченное	Интенсивное
Содержание пор	<1%	>5%
Пористость поверхности	Нет	Микропористая
Поглощение воды	Пренебрежимо малое	До 5%
Разрушение	Хрупкое	Вязкое
Гибридные композиты	Да	Да

В случае термопластичной матрицы ее конечное содержание в препреге зависит от следующих параметров:

- содержания матрицы в растворе;
- вязкости раствора при изготовлении препрега;
- напряжения растяжения ткани;
- стабильности температуры процесса нанесения матрицы;
- контролируемой влажности и температуры в зоне нанесения матрицы.

В случае термореактивной матрицы ее содержание зависит от следующих параметров:

- концентрации матрицы в растворе;
- вязкости раствора при изготовлении препрега;
- напряжения противобаллистической ткани;
- стабильности температуры при нанесении покрытия;
- контролируемой влажности и температуры в зоне нанесения матрицы (рис. 10.2).

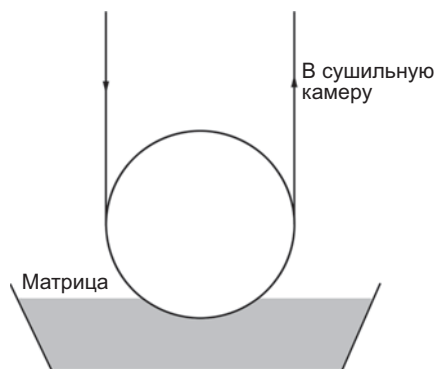


Рис. 10.2. Метод мокрой пропитки волокон

10.9.2. Нанесение матрицы с помощью ножа

Для удаления излишков матрицы с препрега в этом случае используют металлический нож, прижимаемый к движущейся ткани (рис. 10.3). Излишки матрицы возвращают в пропиточную ванну. Ножом может служить плоский, суженный или острый металлический прут. Зазор между ножом и противобаллистическим материалом определяет конечный вес матрицы.

Этот метод нанесения жидкой матрицы на полотно прост и не нуждается в особых навыках обслуживающего персонала (рис. 10.3).

10.9.3. Нанесение матрицы с помощью острого лезвия

В данном случае излишки матрицы удаляют не твердым ножом, а лезвием, прижимаемым к ткани. Этот метод используют для производства высоконаполненных препрегов на основе арамидных или стеклотканей и смесевой фенол/ПВБ матрицы. Вязкая матрица заполняет поверхностные углубления ткани, что позволяет получать гладкую поверхность для дальнейшего формирования жесткой брони.

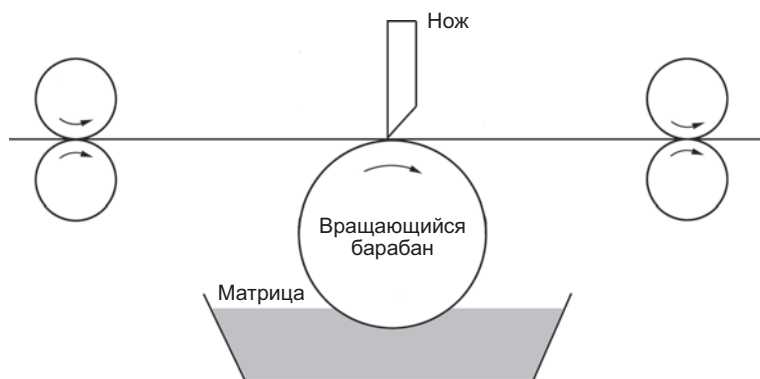


Рис. 10.3. Метод мокрой пропитки волокон

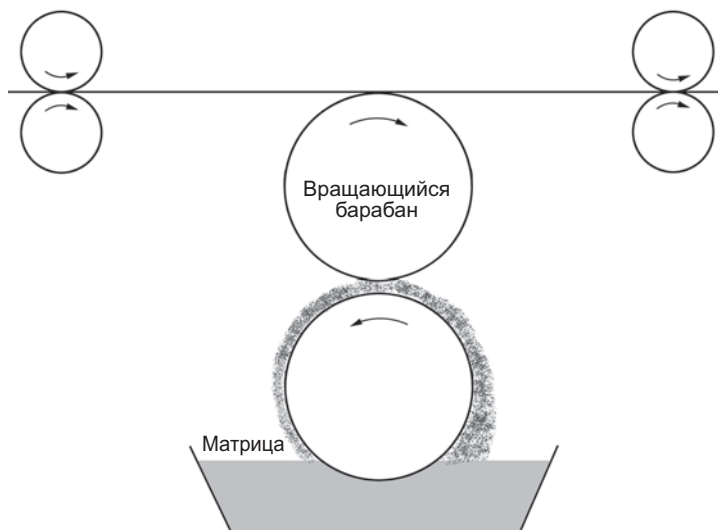


Рис. 10.4. Нанесение матрицы при помощи барабана

10.9.4. Валковое нанесение матрицы

Матрицу наносит барабан (валок), вращающийся в том же направлении, что и ткань. Пропиточный барабан практически не давит на ткань. Количество наносимой матрицы зависит от зазора между тканью и пропиточным барабаном, как показано на рис. 10.4.

10.9.5. Нанесение периодических полос матрицы

Для ограничения нанесения матрицы ее иногда наносят на одну из сторон ткани или нетканого противобаллистического материала в виде периодических полос. Метод нанесения полос матрицы на поверхность ткани позволяет уменьшить содержание растворителя, что увеличивает скорость процесса. Так как концентрация матрицы в растворе в этом случае выше, растворитель испаряется гораздо быстрее. Одновременно уменьшается количество энергии, требуемой для рекуперации растворителя.

Периодическое нанесение полос матрицы используют для изготовления препрегов на основе арамидных тканей и фенол/ПВБ матрицы, из которых формируют жесткие каски и бронепанели. Так как матрицу наносят только на одну сторону ткани, склеивание слоев достигается за счет растекания матрицы при высокой температуре.

Баллистическая стойкость формованных композитов возрастает из-за их расслоения.

10.9.6. Нанесение матрицы реверсивными барабанами

Нанесение матрицы реверсивно вращающимися барабанами является одним из наиболее распространенных методов пропитки противобаллистического материала.

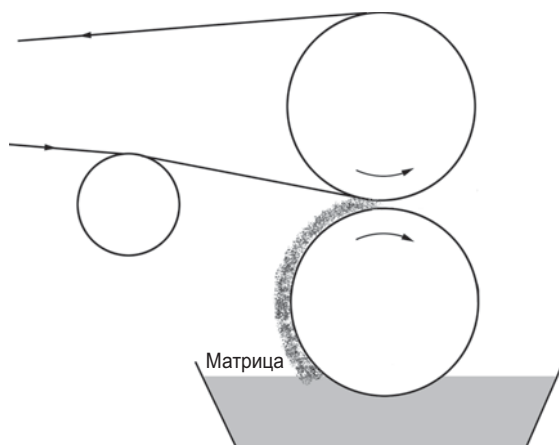


Рис. 10.5. Нанесение матрицы реверсивными барабанами

ла низковязкой матрицей. Из-за простоты, точности и высокой скорости процесса пропитку реверсивными барабанами выбирают для сильно разбавленных матриц.

Существует несколько вариантов нанесения матрицы реверсивно вращающимися барабанами, но все они имеют общие особенности. Во всех случаях матрица на смачивающий валок наносится с избытком, который удаляют с помощью второго вала. Избыток матрицы возвращают в пропиточную ванну. Как правило, смачивающий валок погружается в раствор матрицы. После прохождения барабанов на ткани остается тонкий слой матрицы (рис. 10.5).

10.9.7. Препреги с пленочной матрицей

В Европе и Северной Америке имеется широкий выбор полимерных матриц в виде тонкой непрерывной термореактивной или термопластичной пленки. Пленку наносят на ткань или однонаправленный слой нагреванием под давлением. Препреги с пленочной матрицей имеют следующие достоинства:

- контроль содержания матрицы с высокой точностью ($< 1\%$);
- содержание матрицы может быть менее 5 вес.%;
- высокая однородность препрегов, разброс содержания которой не превышает 0,5%;
- отсутствие летучих органических веществ и необходимости удаления избытка влаги при ламинировании;
- высокая скорость производства препрегов вследствие отсутствия стадий сушки и удаления летучих веществ;
- повышенный срок хранения;
- контролируемое смачивание волокон;
- превосходные баллистические свойства.

Такие препреги используют для формования касок и композитов, поддерживающих керамические пластины в средствах индивидуальной защиты и брони транспортных средств (рис. 10.6).

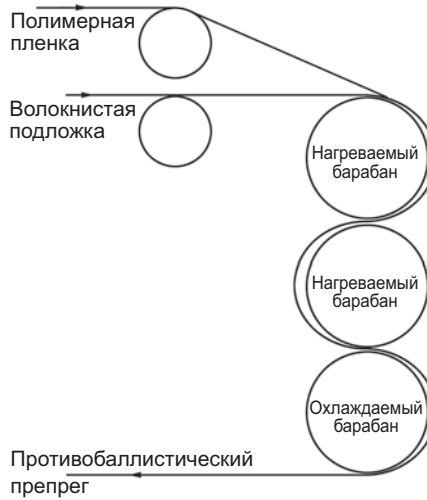


Рис. 10.6. Нанесение пленочной матрицы

10.9.8. Нанесение нескольких слоев матрицы

Несколько слоев матрицы наносят, если они должны выполнять несколько функций, например:

слой 1 представляет собой жесткую матрицу, обеспечивающую высокие конструкционные и баллистические свойства композита;

слой 2 обеспечивает негорючесть материала;

слой 3 обеспечивает прочную связь со слоем керамики;

слой 4 обеспечивает окраску композита.

При нанесении нескольких полимерных слоев первый из них не должен растворяться или разлагаться при наложении второго и последующих слоев (рис. 10.7).

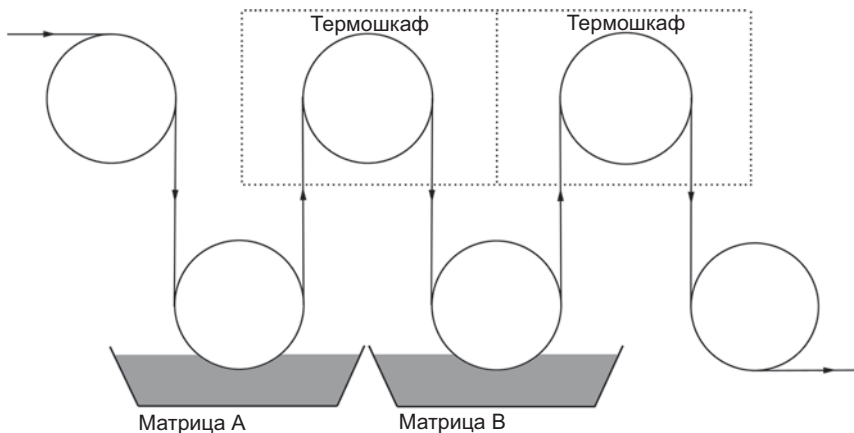


Рис. 10.7. Нанесение нескольких слоев жидких полимерных смол

10.10. Терморезактивные матрицы

10.10.1. Препреги на основе фенольной смолы

Фенольные матрицы используют в композиционных материалах уже более 90 лет. Фенольные смолы получают реакцией поликонденсации фенола и формальдегида.

Химия фенольных смол основана на двух идеях. Хотя в состав фенольных смол часто включается фенол, помимо него могут использоваться смолы, содержащие *p*-третбутилфенол, *p*-третамилфенол, *p*-нонилфенол и смеси крезолов и масел, получаемых из скорлупы ореха кешью. Свойства полимера могут варьироваться в широких пределах в зависимости от типа катализатора, молярных долей фенола и формальдегида, условий проведения реакции, последовательности добавления реагентов и условий растворения.

Фенольные матрицы широко используют в волокнистых композитах и конструкционного, и противобаллистического назначения. Наряду с невысокой ценой они обладают неплохими механическими свойствами, стойкостью к удару, теплостойкостью и негорючестью. В табл. 10.6 приведены составы смол для изготовления препрегов на основе стекловолокон, арамидной, СВМПЭ и ПБО тканей.

По экономическим причинам предпочтительна одностадийная пропитка ткани. Фенольные матрицы, используемые в противобаллистических препрегах, модифицируют синтетическими добавками, повышающими баллистическую стойкость или эластичность. В зависимости от типа и скорости ударника для противобаллистического материала на основе СВМПЭ или арамидных волокон в тканом или нетканом виде требуется свой состав матрицы. Приведенную в табл. 10.6 матрицу использовали в нескольких миллионах касок.

В зависимости от объемов производства и доступности оборудования фенольную матрицу можно наносить любым из вышеупомянутых методов. Растворитель удаляют нагреванием в больших сушильных камерах. После сушки вес матрицы составляет 15–20% веса ткани.

Большинство препрегов на основе арамидной ткани и фенольной матрицы окрашено в маскировочный зеленый или песочный цвет. В течение многих лет содержание матрицы в высушенном препреге поддерживалось на уровне 15–25 вес.%. Однако начиная с середины 1990-х гг. для повышения баллистических свойств содержание матрицы в арамидной ткани снизили, и теперь оно составляет 11–14 вес.%,

Таблица 10.6. Состав матриц в препрегах, используемых для формирования противобаллистических касок и бронепластин

Компонент	Весовые части	Процент твердого вещества
Поливинилбутил	868 (25% в этаноле)	47,2
Фенолформальдегид	100 (57% в этаноле)	12,4
Триметилфенол	267 (60% в этаноле)	34,8
Фталевый ангидрид	25,6	5,6
Метанол	51,2	0,0

хотя при этом композит стал более интенсивно расслаиваться и несколько увеличилось поглощение воды при дожде.

В Европе препреги для формования касок и жестких бронепластин изготавливают нанесением тонкой фенольной пленки на арамидную ткань. Содержание матрицы составляет приблизительно 11 вес.%. Баллистическая стойкость брони на основе данных препрегов значительно улучшилась. Однако, формованное изделие довольно пористое и матрица не покрывает всю его поверхность. Чтобы дождевая вода не могла проникнуть внутрь каски, такие изделия покрывают дополнительным защитным слоем. Если вода проникнет в каску, ее вес может увеличиться на 20%, а баллистические характеристики снизятся.

10.10.2. Винилэфирные матрицы

Винилэфиры являются термореактивными полимерами. Они представляют собой полимерную цепь с акрилатными ($R=H$) или метакрилатными ($R=CH_3$) концевыми группами $R-[O-C-C=C]$. Хотя винилэфирные матрицы иногда классифицируют как сложные полиэфиры, они являются типичными диэфирами, содержащими повторяющиеся этиловые группы. Винилэфирную смолу получают из промышленно выпускаемых эпоксидной или уретановой смол, сложных полиэфиров и т.д. Винилэфирные смолы имеют эпоксидную основу с различной молекулярной массой. Смолы с повышенной молекулярной массой характеризуются повышенной ударной вязкостью и эластичностью, низкой термостойкостью и плохой растворимостью.

Винилэфирные матрицы используют как в чистом виде, так и с добавками химически активного сомомера типа стирола, винилтолуола, триметилпропантриацилата или неактивного растворителя типа метилэтилкетона и толуола. Винилэфирные матрицы содержат двойные связи, которые вступают в реакцию в присутствии свободных радикалов под действием химического, теплового или светового источника. Отверждение происходит по свободнорадикальному механизму, включающему инициирование, рост цепи и окончание процесса. Отверждение винилэфирной матрицы характеризуется более низким экзотермическим эффектом и меньшей усадкой, чем полиэфирные смолы. Для противобаллистических композитов важны оба эти свойства.

При разработке композита и при незначительном объеме производства винилэфирную матрицу иногда наносят вручную. Однако, баллистическая стойкость композита максимальна, если содержание матрицы невысоко, а плотность сшивки ниже, чем в композитах конструкционного назначения. Содержание матрицы при ручном нанесении матрицы варьируется от 20 до 30% в зависимости от типа волокон и степени смачиваемости. При ручном нанесении матрицы трудно добиться ее низкого содержания, и поэтому в противобаллистической промышленности она практически не используется.

Альтернативой процессу ручного нанесения матрицы является использование препрегов. Противобаллистические винилэфирные препреги имеют низкое содержание матрицы. При правильно подобранном катализаторе отверждение происходит с невысоким экзотермическим эффектом, а плотность сшивки не

Таблица 10.7. Состав противобаллистического винилэфирного препрега (патент США 5,165,989)

Компонент	Весовые доли	Процент от полного веса
Винилэфирная матрица	50,00	99,96
РЕР 308	0,01	0,01
Трет-бутил-пербензоат	0,03	0,03
Ацетон	24,98	0,00
Изопропиловый спирт	24,98	0,00

очень высока. Такие препреги широко используют для изготовления жестких касок, нагрудных пластин и бронепанелей для защиты транспортных средств.

Из-за довольно широкого выбора винилэфирных смол различного состава, катализаторов отверждения и других добавок эти препреги постепенно вытесняют препреги на основе фенольных смол. Винилэфирные препреги имеют большее удлинение и большую липкость, требуемую для формования в автоклаве под высоким давлением изделий на основе арамидных или СВМПЭ волокон. Температурный диапазон отверждения винилэфирных препрегов составляет 75–120°С в зависимости от отвердителя.

Винилэфирные противобаллистические препреги имеют следующие особенности:

- низкое (5 вес.%) или высокое (30 вес.%) содержание матрицы;
- низкую или высокую липкость;
- негорючесть;
- возможность окрашивания;
- длительный срок хранения при комнатной температуре.

Контролируемая адгезия и усадка винилэфирной матрицы делают препреги на ее основе и арамидных или СВМПЭ волокон основным сырьем для изготовления противобаллистической брони. Винилэфирные препреги могут иметь тканую, поперечно ориентированную и нетканую основу из непрерывных или рубленых волокон.

Для вышеупомянутого состава рекомендуется метод мокрой пропитки.

Процедура пропитки препрегов винилэфирной смолой:

1. Приготовление раствора матрицы согласно составу, описанному в табл. 10.7.
2. Установка ткани или нетканого материала на раме, поддерживающей однородное натяжение в процессе изготовления препрега.
3. Погружение ткани в раствор матрицы при постоянном натяжении.
4. Продолжительная сушка волокон при температуре не ниже 75°С, чтобы содержание летучих веществ не превышало 1%.
5. Свертывание препрега в рулон, прокладывая его антиадгезивной пленкой, предотвращающей контакт слоев.

10.10.3. Полиэфирные смолы

Полиэфирные смолы представляют собой смесь химически активных полимеров и мономеров. Отверждение матрицы происходит путем раскрытия двойных свя-

зей. Наиболее часто для этого используют стирол. Он соединяется с раскрывающимися двойными полиэфирными связями, формируя прочную полимерную сетку.

Достоинством полиэфирных смол является их экономичность. Их широко используют при производстве лодок, деталей электрического назначения, деталей автомобилей, спортивного оборудования и панелей конструкционного назначения.

Подобно винилэфирным смолам, полиэфирные смолы имеют широкий выбор составов, отвердителей, добавок и т.д., что обеспечивает огромный спектр возможных конечных свойств. Матрицы имеют широкий диапазон удлинений и липкости, требуемых для противобаллистических материалов на основе арамидных или СВМПЭ волокон.

Широкий выбор отвердителей позволяет проводить отверждение материала в широком интервале температур, от 75°C до 120°C. Это позволяет использовать их как с термостойкими, так и с легкоплавкими волокнами.

Особенностями полиэфирных препрегов являются:

- возможность изменять содержание матрицы в широких пределах (от 5 до 30 вес. %);
- возможность изменения степени липкости препрегов;
- негорючесть;
- возможность окрашивания;
- длительный срок хранения при комнатной температуре.

Процедура пропитки препрегов полиэфирной смолой:

1. Приготовление раствора матрицы, как описано выше.
2. Установка ткани или нетканого материала на раме, поддерживающей однородное натяжение препрега.
3. Погружение ткани в раствор для пропитки матрицей при постоянном натяжении.
4. Высушивание волокон при температуре не ниже 75°C, чтобы содержание летучих веществ не превышало 1%.
5. Свертывание препрега в рулон, прокладывая его антиадгезивной пленкой, предотвращающей прямой контакт слоев.

10.10.4. Эпоксидные смолы

Эпоксидные матрицы широко используются в волокнистых композитах конструкционного назначения, например, в авиационной технике из-за их прочности, легкости и термостойкости. Достоинствами композитов на основе эпоксидных матриц являются отличные конструкционные свойства, например, высокая жесткость и низкая усадка, что делает их привлекательными бронематериалами.

Эпоксидные матрицы на основе бисфенола А и эпихлоргидрина бифункциональны и имеют эпоксидные группы на конце цепи. При полимеризации они сохраняют бифункциональность, а их молекулярный вес увеличивается.

Хотя эпоксидные смолы дороже других термореактивных матриц, они позволяют улучшить баллистические свойства композита. Их преимуществами являются высокие конструкционные свойства, химическая стойкость, простота окрашивания, хорошая связь с керамическими и металлическими материалами, стабильность размеров и т.д.

Выбор отвердителя (катализатора процесса сшивки) столь же важен, как и выбор эпоксидной матрицы. Тип отвердителя определяет срок хранения препрега, скорость отверждения, величину выделяемой теплоты и температуру формования. При выборе отвердителя необходимо учитывать все важнейшие свойства эпоксидной смолы. Отвердитель определяет тип образующихся химических связей и степень сшивки эпоксидной смолы. Высокая степень сшивки обеспечивает лучшие конструкционные характеристики, но относительно слабую баллистическую защиту.

Баланс конструкционных и баллистических характеристик достигается контролем степени химической сшивки и адгезии волокон.

Использование эпоксидной матрицы и правильный выбор отвердителя обеспечивают следующие свойства отвержденного композита:

- относительно высокую адгезию с волокнами;
- низкую усадку;
- высокие конструкционные свойства;
- хорошую баллистическую стойкость;
- хороший срок хранения при комнатной температуре;
- хорошую формуемость;
- отсутствие влаги при формовании;
- легкость окрашивания;
- хорошую связь с передним керамическим или металлическим слоем;
- легкую утилизацию отходов.

10.11. Термопластичные матрицы

Из-за возможности длительного хранения полная стоимость препрегов на основе термопластичных матриц меньше, чем в случае термореактивных смол. Эти препреги можно формовать повторно при высокой температуре и давлении. Изделия из термопластичных препрегов дешевле. Однако повторное формование и эксплуатация в экстремальных климатических условиях негативно влияют на срок службы таких композитов.

10.11.1 Акриловые матрицы

Акриловые смолы синтезируют из мономеров различных акриловых и метакриловых эфиров. Промышленные процессы проводят по свободнорадикальному механизму при высокой температуре в присутствии инициатора.

Акриловые матрицы используют в виде растворов и водных эмульсий. В обоих случаях вязкость подбирают так, чтобы получить невысокое содержание мат-

рицы. Акриловые матрицы имеют хорошую стойкость к ультрафиолетовому излучению и окислению. В акриловых эмульсиях обычно используют загустители, выбор которых позволяет оптимизировать реологические свойства раствора при невысокой концентрации смолы.

Жесткая формованная броня на основе термопластичной акриловой матрицы хорошо защищает от осколков, но сильно расслаивается при выстреле из пистолета. Некоторые проблемы могут быть решены смещением акриловой матрицы с добавками, обеспечивающими высокую адгезию.

10.11.2. Полиуретановые матрицы

Полиуретановые матрицы широко используют в промышленности из-за их эластичности, хорошей адгезии к различным волокнам, хорошей окрашиваемости, отличной связи с каучуком и металлами, высокой прочности при разрыве и раздире, высоких абразивных свойств и легкости использования в электроустройствах.

Большинство полиуретановых смол применяют в виде растворов на основе органических растворителей. По экологическим причинам все более популярными становятся полиуретановые водные дисперсии. Обычно они содержат небольшое количество воды. Объемное содержание матрицы в эмульсии достаточно высоко, и после сушки при комнатной температуре образуется непрерывная пленка. Если на субстрат наносится водный раствор полиуретановой смолы и высушивается при 97–140°C, это улучшает прочность связи, долговечность и адгезию к волокнам.

Одно- и двухкомпонентные полиуретановые матрицы используют очень широко. Однако лишь некоторые препреги на основе полиуретановых матриц имеют большой срок хранения при комнатной температуре. Вязкость водной эмульсии регулируют, изменяя количество дистиллированной воды. Раствор наносят на противобаллистические волокна и сушат в термокамере при повышенной температуре.

10.12. Смесевые термопластично-термореактивные матрицы

В последнее время появились противобаллистические препреги нового типа. Сначала на волокнистый материал наносят первый слой матрицы, обеспечивающий высокий уровень баллистической защиты, несмотря на относительно низкую прочность связи волокон. Затем наносят второй слой, который представляет собой тонкий непрерывный или дискретный слой пленки или жидкой матрицы. В него вводят антипирен, подавляющий горение препрега, и другие защитные добавки. В один из слоев матрицы может быть добавлена краска.

10.13. Другие методы производства препрегов

Отметим, что для производства противобаллистических препрегов не применяют некоторые методы, используемые для производства препрегов конструкци-



онного назначения, например, нанесение расплава или порошка, экструзия и распыление. По сравнению с конструкционными материалами, объемы производства противобаллистических препрегов невелики, однако область их применения расширяется, а технология их производства постоянно развивается.

10.14. Добавки в термопластичные и термореактивные смолы

Для придания препрегам определенных свойств в термопластичные и термореактивные матрицы часто вводят добавки. Иногда вводят сразу несколько добавок, например, красители и различные наполнители, улучшающие баллистические характеристики брони. Используя различные добавки, можно улучшить целый ряд характеристик материала. Например, повысить его ударную вязкость, снизить горючесть, газопроницаемость, сделать его более радиопрозрачным в луче радара, улучшить стойкость к воздействию ядерного облучения, увеличить биологическую и химическую стойкость.

10.15. Качество препрегов

Качество препрегов может быть проверено на любом этапе производства, хранения и подготовки материала. Далее приведены типичные методы контроля противобаллистических материалов.

10.15.1. Визуальный осмотр

Визуальный осмотр противобаллистических препрегов весьма прост. Эта процедура недорогая, занимает минимум времени и усилий, но может дать ценную информацию о качестве препрега без проведения дорогостоящих испытаний. При визуальном осмотре препрег разворачивают и пропускают через него свет. Невооруженным глазом отмечают и регистрируют любое изменение цвета, отсутствие волокон, изменение содержания матрицы, наличие грязи и т.д. Для количественной оценки используют шкалу цветов Гарднера (ASTM D1544) и показатель преломления (ASTM D 542-50).

10.15.2. Вес препрега

Проверка веса на соответствие спецификации может дать полезную информацию о качестве препрега. От рулона отрезают несколько образцов, взвешивают и сравнивают с паспортными данными. Отклонение веса в пределах 2% обычно считают допустимым.

10.15.3. Содержание матрицы

Концентрация матрицы в препреге может быть определена путем ее полного удаления. Для этого используют растворители типа ацетона, метилэтилкетона, толу-

ола и т.д. Образцы размером 15 × 15 см промывают 3–4 раза в свежем растворителе, высушивают, а оставшийся материал взвешивают, вычисляя содержание волокон и, соответственно, матрицы.

$$\text{Концентрация матрицы (\%)} = \frac{\text{Начальный вес образца} - \text{Конечный вес сухих волокон}}{\text{Начальный вес образца}} \times 100.$$

$$\text{Концентрация волокон (\%)} = \frac{\text{Конечный вес сухих волокон}}{\text{Начальный вес образца}} \times 100.$$

Если препрег частично отвержден или матрица состоит из смеси смол, эта методика может не работать.

10.15.4. Содержание летучих веществ

При производстве противобаллистических препрегов полимерную смолу обычно растворяют в большом количестве растворителя. Хотя практически весь растворитель удаляют из препрега путем сушки, одним из методов контроля является проверка содержания летучих веществ. Для этого из рулона вырезают небольшие образцы. Их нагревают в термокамере с циркулирующим воздухом до температуры 100–150°C. После этого образцы охлаждают до комнатной температуры, взвешивают и рассчитывают потерю веса:

$$\text{Концентрация летучих (\%)} = \frac{\text{Начальный вес} - \text{Вес высушенного образца}}{\text{Начальный вес}} \times 100.$$

Обычно испытывают три или более образцов одного вида. Аналогичные испытания проводят, используя методики ASTM D3539-76, MIL-G-83410 (USAF) и MIL-R-7575.

10.15.5. Плотность

Плотность (удельный вес) препрега может служить показателем качества партии и производственного процесса. Для формованных деталей и препрегов, которые не растворяются в определенных химикатах, для контроля плотности используют методики ASTM D792 (измерение плотности) и ASTM D1505 (градиент плотности).

10.15.6. Измерение вязкости

Это является обычным методом контроля качества препрегов конструкционного назначения, в которых содержание матрицы довольно высоко, а ее вязкость невелика. Однако, в противобаллистических препрегах содержание матрицы невелико и она может не стекать даже при высокой температуре. В таком случае это испытание провести не удастся, особенно в случае термопластичных матриц, вязкость которых после удаления растворителя очень высока.

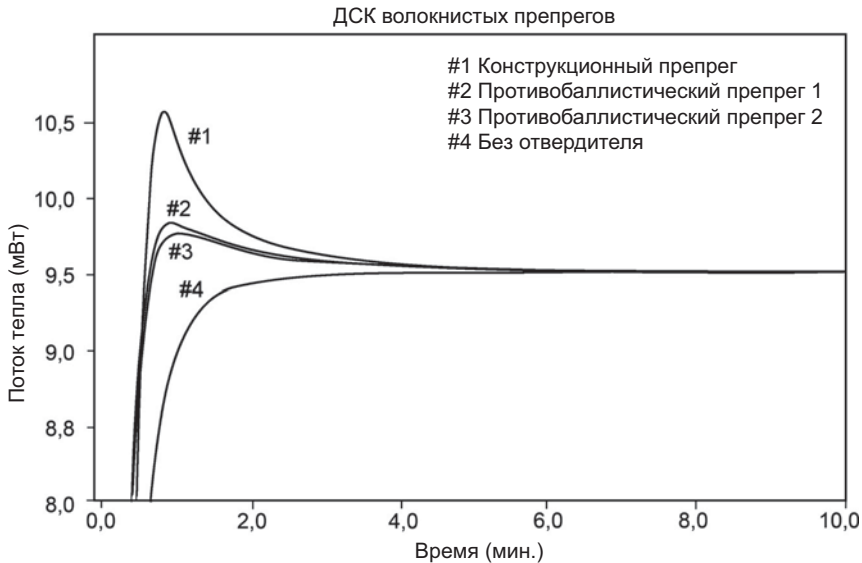


Рис. 10.8. Испытание методом дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК)

10.15.7. Дифференциально-сканирующая калориметрия (ДСК)

Дифференциально-сканирующая калориметрия — это довольно простой метод контроля качества, требующий очень малого количества препрега (рис. 10.8).

10.15.8. Инфракрасное излучение

Метод инфракрасного (ИК) контроля использует различия теплового потока в присутствии дефектов структуры. Образец нагревают и наблюдают за температурой поверхности с помощью чувствительного ИК радиометра. Каждый материал имеет свой ИК спектр излучения, пример которого приведен на рис. 10.9.

10.15.9. Механические испытания

Механические испытания препрегов проводят для проверки соответствия характеристикам, предъявляемым к противобаллистическим волокнистым композициям. Испытания используют для контроля качества и разброса свойств различных партий препрегов.

Из препрегов в условиях, рекомендуемых для данной матрицы, формируют пластины размером 30 × 30 см. Из пластины вырезают образцы размером, рекомен-

Таблица 10.8. Свойства противобаллистических материалов при изгибе (ASTM D790)

Материал	Матрица	Толщина (дюймов)	Вес (фунт/фут ²)	Прочность (ksi)	Модуль упругости (ksi)
A	X	0,21	1,00	1,38	185
A	Y	0,21	1,00	0,68	49
A	Z	0,22	1,00	12,4	2060

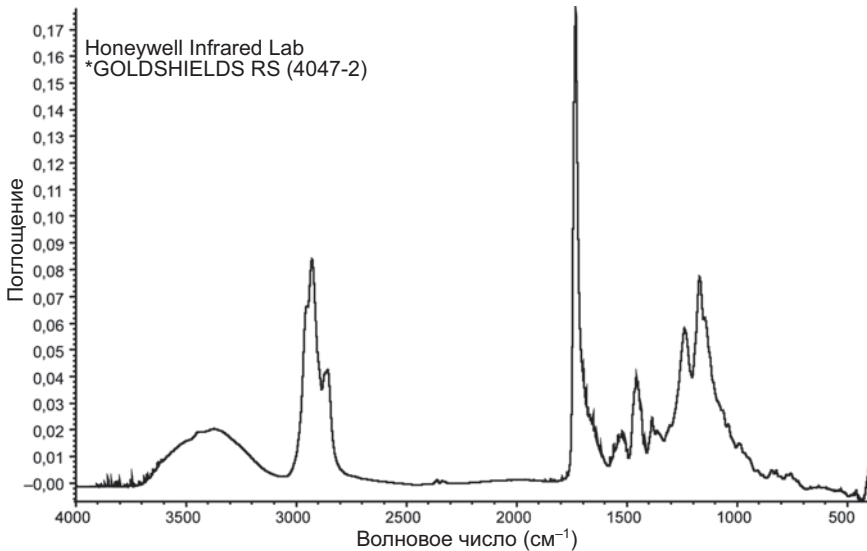


Рис. 10.9. ИК-спектр препрега

дованным стандартом ASTM D790. Отношение длины к толщине образцов равно 40 : 1. После этого определяют прочность при изгибе, модуль упругости при изгибе, а также предельный прогиб образца (табл. 10.8). Данные испытания проводят, если формованная броня будет использоваться в условиях растяжения (ASTM D 638) или сжатия (ASTM D).

10.15.10. Растровая электронная микроскопия (РЭМ)

Растровый электронный микроскоп используют для контроля распределения волокон в препреге, плотности их упаковки, выявления повреждения волокон при переплетении нитей или при изготовлении препрега, а также для оценки распределения матрицы в препреге. Метод используют и для определения наличия грязи. Несмотря на очень малый размер образцов, этот электронный микроскоп позволяет изучать микроструктуру препрега.

10.15.11. Баллистические испытания

Гибкие бронезилеты в зависимости от уровня защиты подготавливают и испытывают по методикам, описываемым стандартом NIJ 0101.04, а жесткую формованную броню – согласно стандарту MIL-STD-662F. Гибкие бронезилеты испытывают на калиброванной подложке пластилина № 1. Число слоев бронепакета размером 45 × 45 см подбирают так, чтобы остановить все рекомендуемые стандартом пули со скоростью V_0 (начальная скорость всех пуль). Испытывают минимум пять бронепакетов. На всех пяти образцах не должно быть полных пробитий при выстреле под углом 0° и 30°, а запреградная деформация не должна превысить 44 мм.

Жесткие бронепластины размером 30 × 30 см формуют в условиях, рекомендованных поставщиком сырья. Число слоев в бронепластине зависит от уровня балли-



стической угрозы. Для защиты от поражения бронебойными или высокоскоростными винтовочными пулями пластины должны иметь внешний керамический слой.

10.16. Хранение препрегов

Термореактивные матрицы обычно химически активны, и поэтому при комнатной температуре они имеют ограниченный срок хранения. Некоторые препреги содержат низкомолекулярные добавки, и поэтому их нужно хранить обязательно в оригинальной упаковке. Для увеличения срока хранения препреги хранят в морозильнике при температуре ниже 0°C. Это относится и к их хранению между различными технологическими операциями. Перед использованием препрег размораживают в комнатных условиях в течение нескольких часов. Это предотвращает образование конденсата.

В морозильнике рулоны препрегов должны быть четко маркированы и сложены так, чтобы не касаться друг друга и не деформироваться под собственным весом. Хранения рулонов в вертикальном положении следует избегать. Хранение препрегов на основе термопластичных матриц не требует выполнения столь же строгих условий. Их можно хранить при комнатной температуре в течение нескольких месяцев без потери свойств. Препреги и с термореактивной, и с термопластичной матрицей не должны подвергаться воздействию солнечного света, высокой температуры и химически активных веществ.

10.17. Перевозка препрегов

Препреги на основе термореактивных матриц складывают и перевозят в грузовике-рефрижераторе при температуре ниже 0°C, как и при хранении. Рулоны нужно складывать так, чтобы под весом других рулонов не изменялась их форма. Во время перевозки препреги не должны испытывать действие влаги, высокой температуры или света.

Препреги на основе термопластичных матриц можно перевозить в обычных грузовиках, однако при этом следует избегать воздействия высокой температуры и влаги.

10.18. Вторичная переработка препрегов

Производители высокопрочных волокон, препрегов и конечных изделий рассматривают возможность вторичной переработки препрегов по нескольким причинам:

- увеличение объемов производства противобаллистических материалов в десятки раз;
- объем отходов в некоторых случаях может достигать 20–25%;
- из волокон, матрицы и препрегов можно делать другие изделия;
- стоимость сырья довольно высока, и поэтому переработка отходов экономически выгодна;
- меньшее загрязнение окружающей среды.

Один из способов вторичной переработки состоит в разрезании препрегов на основе арамидных волокон и фенольной смолы и изготовлении тормозных прокладок.

10.19. Утилизация препрегов

Отходы препрегов химически активны, и их нужно уничтожать после отверждения матрицы. Для этого отходы помещают в термокамеру и нагревают так, чтобы температура превысила температуру отверждения матрицы и произошло ее полное отверждение. Затем отвержденные отходы охлаждают до комнатной температуры и проверяют на наличие неотвержденных участков. Полностью отвержденные отходы перерабатывают как твердые материалы.

При уничтожении отходов препрегов с термопластичной матрицей необходимо принимать меры по предотвращению возможного вымывания матрицы и попадания в питьевую воду.

10.20. Литература

- Gutoff, E. B. and Cohen, E. D., *Modern Coating and Drying Technology*, VCH Publishing Inc., 1992.
- Gutoff, E. B. and Cohen, E. D., *Coating and Drying Defects*, John Wiley and Sons, 1995.
- Lubin, G., *Handbook of Composites*, Van Nostrand Reinhold Company, 1982.
- Mohr, J. G., Oleesky, S. S. and Meyer, L. S., *SPI Handbook of Technology and Engineering of Reinforced Plastics/Composites*, 2nd edn, Robert E. Krieger Publishing Company, 1981.
- Skeist, I., *Handbook of Adhesives*, 3rd edn, Van Nostrand Reinhold, 1990.

10.21. Адреса поставщиков противобаллистических препрегов

1. Bedford Materials 7676 Allegheny Road Mann Choice, PA 15550 Tel+1 814623 9014 Fax+1 814623 9199 www.bedfordmaterials.com
2. Lewcott Corporation 89 Providence Road Millbury, MA 01527 Tel +1 508 865 1791 Fax +1 508 865 0302 info@Lewcott.com
3. Bryte Technologies Inc. 18410 Butterfield Blvd. Morgan Hill, CA 95037 Tel +1 408 776 0700 Fax+1 408 7760107 Bryte@brytetechnology.com
4. Cuben Fiber Corporation 4511 East Ivey Street Mesa, Arizona 85205 Tel +1 480 641 0438 Fax +1 480 641 0439 www.cubcnfiber.com

ГЛАВА 11

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ПРОТИБАЛЛИСТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

А. Ганнибал, Б. Вэйр, Composiflex, США

11.1. Введение

Броня должна останавливать пулю и снижать травматические последствия удара. Способность волокнистых композиционных материалов решать эту задачу зависит от множества факторов, например, типа волокон, концентрации матрицы и структуры материала. Технология производства зависит от всех этих факторов и от технологических требований.

Композиционный материал состоит из двух или нескольких компонентов. Например, композитом является бетон или печенье, покрытое слоем шоколада. Здесь будут рассмотрены лишь двухфазные композиты, состоящие из волокон и полимерной матрицы.

11.1.1. Матрицы

Матрица заполняет пространство между волокнами и придает композиту структурную целостность и жесткость. Полимерные матрицы делят на терморезактивные и термопластичные.

Терморезактивные матрицы

Терморезактивные смолы состоят из двух или нескольких жидких компонентов, которые при смешении в соответствующих пропорциях вступают в химическую реакцию и образуют поперечные сшивки, создающие материал с хорошими физическими и механическими свойствами. Хотя многие терморезактивные матрицы могут образовывать сшивки при комнатной температуре, обычно их отверждают при повышенной температуре. Терморезактивные матрицы не плавятся, и детали из них нельзя перерабатывать вторично.

Термопластичные полимеры

Термопласты состоят из длинных полимерных цепных молекул. При повышенной температуре они плавятся. При приложении давления или под действием вакуума смола может пропитывать пучки волокон.

11.1.2. Волокна

Волокна производят в виде нитей, наматываемых на катушки некоторого диаметра. Нити состоят из сотен и даже тысяч очень тонких волокон. Из них можно делать ткани или поперечно ориентированные препреги.

Композиты конструкционного назначения состоят из волокон и матрицы. Обычно они имеют не слишком хорошие бронезащитные свойства. Противобаллистические композиты имеют следующие отличия от конструкционных композитов:

- содержание матрицы в них обычно намного ниже и составляет 18–22 вес.%, в то время как в конструкционных композитах оно достигает 40–65 вес.%;
- в них обычно используют более эластичную матрицу, что делает конечный продукт менее жестким;
- они имеют меньшую адгезию между волокнами и матрицей;
- содержание пор в противобаллистических композитах довольно высоко;
- роль матрицы в них сравнительно ограничена;
- поперечно ориентированные композиты (0/90) имеют повышенные баллистические характеристики;
- однонаправленные композиты (0, 0, 0, 0... 0) имеют низкую баллистическую стойкость.

11.2. Композиты противобаллистического назначения

Все композиты состоят из нескольких компонентов.

11.2.1. Волокна

Вообще говоря, полимеры можно армировать почти любыми волокнами. Для баллистической защиты используют стеклопластики и органопластики на основе высокопрочных арамидных или полиэтиленовых волокон. Противобаллистические композиты часто делают из полиэтиленовых волокон, имеющих длинные полимерные цепи. Например, из волокон Spectra® фирмы Honeywell или волокон Дупеета® фирмы DSM, а также из арамидных волокон Kevlar® или Twaron®¹.

При первых попытках создать легкую бронезащиту тела использовали шелк, однако из-за высокой стоимости она не получила широкого распространения.

Хотя шелковые волокна очень прочны и их удельная прочность при растяжении, т.е. отношение прочности к весу, достигает 5 г/денье, к настоящей революции в создании легкой брони привело появление синтетических полимерных волокон. Удельная прочность нейлона, который широко использовали во время вьетнамской войны, была равна 8 г/денье. Дальнейшая разработка новых волокон позволила создать сначала волокна Kevlar® с удельной прочностью 26 г/денье, а затем и волокна Spectra® с удельной прочностью 35 г/денье.

¹ И российских волокон СВМ, «Армос» и «Русар». — Прим. ред. перевода.

В природе встречаются и более прочные волокна. Например, паутина имеет даже большую удельную прочность, но делать ее промышленно не удается. Химики продолжают разрабатывать экономичные способы синтеза и производства высокопрочных волокон. Например, появление углеродных нанотрубок может явиться одним из наиболее эффективных направлений получения таких материалов.

Предел прочности характеризует стойкость материала к баллистическому удару, приводящему к появлению напряжений. Напряжение определяют делением приложенной силы F на поперечное сечение образца A :

$$F/A = \text{Напряжение.} \quad (11.1)$$

Предел прочности определяют как напряжение, при котором происходит разрушение материала. Обычно его выражают в Н/м^2 (Па) или Н/см^2 . Чем выше эта характеристика, тем выше прочность.

Для разрушения волокон их нужно удлинить, и мерой удлинения является деформация, определяемая как отношение величины удлинения к исходной длине волокна.

Kevlar 49 является высокопрочным волокном, состоящим из ароматических полимерных арамидных молекул (полиарамид часто сокращают до «арамида»). Волокна получают, растворяя арамид в специальном растворителе и вытягивая раствор через отверстие малого диаметра, называемое фильерой. Растворитель выдавливается из полимера и образуется волокно, удельная прочность которого приблизительно в пять раз выше, чем у стали. Полиарамид был синтезирован компанией DuPont в 1960 г., но волокна на его основе получили лишь в 1965 г., когда химик этой компании Стефани Кволек нашла для него эффективный растворитель. Фирма DuPont производит свои волокна под торговой маркой Kevlar®.

Приблизительно в то же самое время специалисты Akzo Inc., располагающейся в Голландии многонациональной фирмы, также нашли растворитель полиарамиды и зарегистрировали патент на изготовление волокна, который позднее (в 1984 г.) назвали Twaron®.

Волокна Kevlar® начали использовать вместо стальной проволоки при изготовлении радиальных шин, а затем их начали применять и в средствах индивидуальной бронезащиты. При нагревании волокна Kevlar® не плавятся, но пиролизуются (разлагаются). При увеличении температуры их прочность несколько снижается, но остается достаточно высокой и при повышенных температурах, что позволяет делать из них корпуса твердотопливных ракет.

Spectra® — это торговая марка синтетических высокомолекулярных полиэтиленовых (СВМПЭ) волокон, выпускаемых фирмой Honeywell¹. Особенности этих волокон являются низкий вес, высокая прочность, ударопрочность, стойкость к действию влаги и химически активных веществ, а также к истиранию.

¹ Дайнима — торговая марка полиэтиленовых волокон фирмы DSM (Dutch State Mines); Kevlar — торговая марка арамидных волокон фирмы DuPont; Тварон — торговая марка арамидных волокон фирмы Teijin-Twaron; Spectra — торговая марка полиэтиленовых волокон фирмы Honeywell.

Волокна Spectra® начали производить в 1985 г., и их первое успешное коммерческое применение состояло в изготовлении тросов, которые до этого делали из стали. Затем из них начали делать стойкие к порезам безопасные перчатки.

Для получения мягкой брони из волокон Spectra® делают ткань и гибкий поперечно ориентированный композиционный материал, называемый Spectra Shield®, появившийся в 1988 г. Из препрегов Spectra Shield® делают также каски, защитные покрытия антен радаров, сонары и другие изделия.

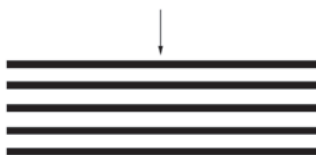
Волокна Spectra® получают методом гелеформования. Длинные молекулы полиэтилена, содержащие от 70,000 до 350,000 углеродных атомов, растворяют при повышенной температуре и пропускают через тончайшие отверстия, называемые фильерами. Выходящие из фильер волокна охлаждают, вытягивают, сушат и наматывают на катушки. В процессе формования молекулы полиэтилена ориентируются вдоль оси волокна.

В результате ориентации предел прочности волокон Spectra® увеличивается настолько сильно, что становится выше прочности арамидных волокон. Кроме того, плотность волокон Spectra столь мала (0,97), что они плавают. При одинаковом весе эти волокна в десять раз прочнее стали.

Однонаправленные слои Spectra Shield® делают параллельной укладкой нитей Spectra®, склеивая их эластичной матрицей Kraton (производимой компанией Shell Chemical). После этого два слоя укладывают в перпендикулярном направлении и склеивают. Полученный двуслойный материал закрывают с обеих сторон стойкой к истиранию пленкой и получают тонкий, гибкий лист Spectra Shield®, используемый для изготовления брони. Достаточно толстую жесткую броню делают поперечной укладкой нескольких слоев.

Важной характеристикой материала Spectra Shield® является высокая скорость звука, равная 12,3 км/с, с которой распространяется появившаяся при ударе волна напряжения. В результате этого энергия пули успеет распределиться на большую область брони. В течение 1–2 мс, за которые пуля останавливается броней и поддерживающим материалом, ее энергия распределяется и поглощается по всей панели (рис. 11.1).

Однонаправленный композит прочен в этом направлении



Но не в этом направлении

Рис. 11.1. Жесткость однонаправленного материала зависит от направления нагружения

Ткань Spectra® и материал Spectra Shield® загораются лишь при температуре 360°C; они менее пожароопасны, чем хлопковые и полиэфирные ткани, из которых шьют униформы полицейских. Огнестойкую броню делают, обшивая материал Spectra Shield® жаростойкой тканью. Ткань Spectra® плавится при температуре 150°C, причем при 70°C она сохраняет 94% начальных баллистических характеристик (в комнатных условиях). При этой температуре броня обжигает кожу менее чем за секунду, так что при столь высокой температуре бронематериал эксплуатироваться не может.

11.2.2. Структура

Из волокон можно сделать однонаправленный материал или ткань. Малую прочность слоя в поперечном направлении можно компенсировать двумя способами. В поперечно ориентированном композите волокна укладывают в двух направлениях, 0 и 90°, и материал очень прочен вдоль этих осей. Второй способ состоит в изготовлении ткани, что позволяет передавать напряжение в точках переплетения нитей (рис. 11.2 и 11.3).

11.2.3. Матрица

Для производства противобаллистических композиционных материалов используют различные матрицы. Согласно правительственной спецификации США стандартной является каталитически отверждаемая смесевая система, состоящая из 50% фенолформальдегидной и 50% поливинилбутиральной смол. Отметим, что концентрация матрицы оказывает большое влияние на свойства материала.

Полимеры используют для получения композитов очень давно. Например, уже аборигены Центральной и Южной Америки делали различные вещи из изоп-

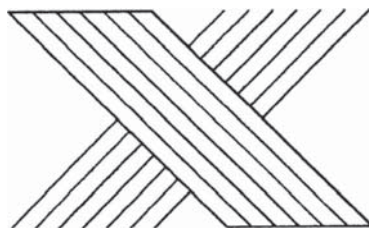


Рис. 11.2. Поперечно ориентированный слоистый композиционный материал

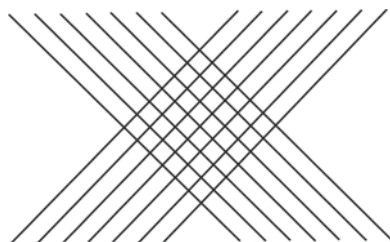


Рис. 11.3. Тканый материал

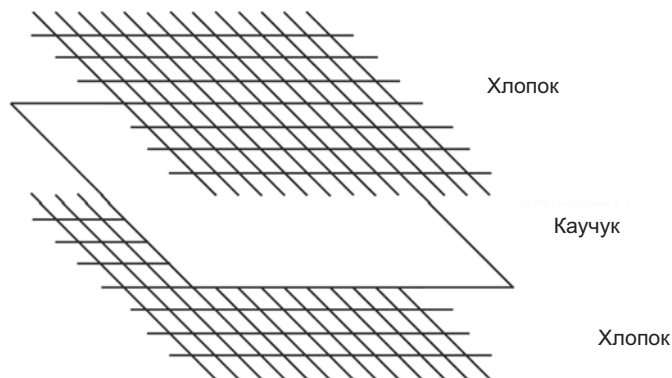


Рис. 11.4. Композит Макинтоша

ренового каучука. Полиизопрен является натуральным каучуком. Применяв его для получения плащей, Чарльз Макинтош создал один из первых композиционных материалов на основе натуральных полимерных волокон и натуральной полимерной матрицы (целлюлоза хлопка также является натуральных полимером).

Схема укладки слоев в сделанном Макинтошем композите показана на рис. 11.4. Благодаря каучуку этот материал водонепроницаем, а благодаря хлопку он удобен для ношения. Это является идеальной иллюстрацией того, как композит объединяет полезные характеристики составляющих компонентов.

Чтобы делать противобаллистические композиты, нужны более прочные волокна, чем хлопок. В армии США поняли это после окончания Второй мировой войны. Противобаллистические волокна имеют высокую прочность при растяжении, но относительно хрупки. В противобаллистических композитах каучук играет очень полезную роль, увеличивая прочность при сжатии. Искусственные матрицы делают это еще лучше. Каучук показал нам путь, как делать новые вещи.

В 1839 г. Чарльз Гудьер случайно открыл процесс вулканизации, состоящий в поперечной химической сшивке полимерных молекул. Вулканизация придает каучуку свойства, которых не имеет несшитый полимер. По существу, поперечносшитый полимер представляет собой одну гигантскую макромолекулу. В результате, был создан новый класс терморезистивных полимеров, поскольку поперечная сшивка молекул каучука представляет собой типичную термоактивированную химическую реакцию. Отметим, что несшитые материалы при нагревании становятся пластичными.

11.3. Пресс-формы

В получении противобаллистических композитов важную роль играют пресс-формы. Качество, стоимость и привлекательность деталей из композиционных материалов зависят от качества пресс-форм, при помощи которых их получили. Пресс-формы делят на трех основных типа:



1. Небольшие пресс-формы низкого давления.
2. Крупные пресс-формы высокого давления.
3. Крупные пресс-формы низкого давления.

11.3.1. Небольшие пресс-формы

Небольшие пресс-формы используют для изготовления прототипов противобаллистических деталей. Такие формы можно делать из следующих материалов:

- древесины;
- неармированных полимеров;
- стеклопластика;
- керамики;
- гальванированных стальных пластин;
- отпущенного механически обработанного металла.

11.3.2. Крупные пресс-формы высокого давления

Характеристики противобаллистического композита зависят от давления прессования. Значительного снижения веса средств защиты от винтовочных пуль можно достичь увеличением давления прессования. Из-за низкого содержания матрицы большой долговечности и структурной стабильности детали можно достичь лишь при высоком давлении прессования. Пресс-формы для изготовления таких изделий обычно делают из высокопрочной хромированной стали. Из таких композитов делают каски и противобаллистические пластины.

11.3.3. Крупные пресс-формы низкого давления

Крупные пресс-формы низкого давления используют для получения композита в автоклаве. Их обычно делают из сравнительно тонких стальных пластин, композитов, керамики и мягких металлов типа алюминия. Такие пресс-формы используют для изготовления изделий сложной формы. При изготовлении пресс-форм из твердой стали они оказываются слишком дорогими и тяжелыми. С их помощью делают пластины, поддерживающие лицевой слой бронекерамики или металла. Отметим, что материалы, сформованные при низком давлении, менее тверды и структурно стабильны, чем полученные при высоком давлении.

Из-за своего специализированного характера изготовление пресс-форм и инструментов для создания легкой брони превратилось в отдельную отрасль индустрии. Пресс-формы разрабатывают с помощью компьютера, который может использоваться и при их вытачивании.

11.4. Нагревание и охлаждение пресс-форм

Высокая температура требуется при изготовлении деталей из металлов, полимеров, композитов и многих других материалов. Гидравлический пресс можно нагревать с помощью плоских пластин, внутри которых находится электронагрева-

тель, или с помощью циркулирующего масла или горячего пара, пропускаемого через пресс-форму. Горячий пар используют, если на заводе уже применяют пар для обработки других материалов. Однако гораздо чаще формы нагревают маслом.

Во многих случаях требуется охлаждение композитов. Охлаждение пресс-формы под давлением гарантирует получение высококачественной поверхности и хорошие баллистические характеристики детали. Пресс-форму охлаждают, пропуская через нее водопроводную воду.

11.5. Извлечение детали

Пресс-формы покрывают герметиками и антиадгезивами, обеспечивающими быстрое извлечение детали и высокое качество поверхности. Кроме того, антиадгезив освобождает от необходимости часто чистить и ремонтировать пресс-формы.

Антиадгезив может иметь вид твердого, жидкообразного или аэрозольного вещества, содержащего силановые или силикановые группы. Выбор антиадгезива основан на его качестве, надежности, технических характеристиках и стоимости. Дорогой постоянно работающий антиадгезив в конечном счете может оказаться экономичнее более дешевого антиадгезива, но повреждающего деталь и саму форму.

11.6. Адгезия

Образование адгезионной связи осуществляется путем склеивания двух различных или одинаковых материалов. Термопластичный или термореактивный полимерный адгезив можно использовать для склеивания двух композитных ламинатов, неметалла и композита, металла и композита, а также керамики и композита. Имеется множество возможных комбинаций материалов, которые можно склеивать для получения брони, и большое количество соответствующих адгезивов.

Адгезивы, используемые для склеивания противобаллистических композитов, могут быть поделены на следующие типы:

1. *Клеи на основе растворителя.* В них могут использоваться различные растворители (в частности, вода) и полимеры типа эпоксидной или полиэфирной смолы, полиуретана и т.д. Они обеспечивают высокий уровень склейки, имеют небольшую вязкость и их легко использовать. Основными недостатками таких клеев являются не слишком большой срок хранения и загрязнение окружающей среды.
2. *Жидкие клеи.* Жидкие адгезивы могут состоять из одного или двух компонентов. Основой клея может быть эпоксидная смола, полиуретан, каучук или силикон. Они имеют более высокую вязкость, чем адгезивы на основе растворителя. Поэтому эти клеи не текут и их можно наносить на вертикальные поверхности. После нанесения на поверхность их нужно сравнительно быстро отверждать, в результате чего обеспечивается жесткая или гибкая склейка.

3. *Клеи, плавящиеся при нагревании.* Совершенно твердые адгезивы могут плавиться при нагревании. Плавящиеся и не имеющие растворителя клеи легко хранить и транспортировать. Кроме того, они обеспечивают чистоту. Основой клея может быть полиэтилен, насыщенный полиэфир, полиамид, а также смесь полимеров и наполнителей.
4. *Сухие полимерные пленки.* В настоящее время имеется несколько видов таких адгезивов, включая плавящиеся при нагревании. Они выпускаются в форме листов или непрерывных пленок. В них не используется растворитель, они имеют большой срок хранения, чисты, высокоэффективны и однородны по толщине. Основой адгезива может быть эпоксидная или фенольная смола, полиамид или каучук.
5. *Контактные адгезивы.* Часто используют липкие адгезивы, недостатком которых является небольшая прочность. Обычно их наносят путем распыления аэрозоля и приложения небольшого контактного давления к склеиваемым деталям. Основой адгезива часто является каучук или полиолефин.

11.7. Выбор клея

Эффективность адгезионного соединения зависит от типа склеиваемых материалов, типа адгезива и метода склейки. Здесь невозможно охватить все детали технологии склейки. Выбор адгезива определяется следующими факторами:

- типом склеиваемых материалов,
- состоянием поверхности материалов,
- требуемой прочностью склейки,
- назначением склеиваемых деталей,
- максимальной и минимальной температурой эксплуатации изделия,
- состоянием окружающей среды при эксплуатации,
- местоположением адгезива между деталями,
- другими факторами, ограничивающими тип адгезива.

11.8. Подготовка материала к формованию

Материалы противобаллистического назначения нарезают на куски определенного размера, иногда с помощью трафарета. При этом нужно проявлять осторожность, поскольку образование складок и перекрывание слоев ткани при укладке в пресс-форму нежелательно. Их можно частично избежать при выкладке вырезанных лоскутов ткани.

Разрезание. При разрезании арамидной ткани или ориентированного полиэтилена могут появиться некоторые проблемы, типичные для большинства тканей, и проблемы, характерные только для арамидных волокон. Если ткань не является симметричной (например, 24×24), изгиб нитей основы и утка различен, и при разрезании нужно учитывать направление ориентации основы. Направление основы в этом случае нужно учитывать и при выкладке слоев ткани.

11.9. Подготовка пресс-формы

На поверхность пресс-формы сначала накладывают антиадгезионную пленку, что позволяет легко извлекать изготовленную деталь. Форма не должна иметь дефектов, влияющих на качество получаемой детали или мешающих ее извлечению.

11.9.1. Ручная выкладка

Слои материала выкладывают на пресс-форму. Рис. 11.5 иллюстрирует процесс выкладки арамидной ткани на пресс-форму. Эта операция является одной из наиболее важных, так как расположение слоев оказывает решающее влияние на эксплуатационные характеристики изделия. Процесс выкладки материала на пресс-форму, вообще говоря, практически не зависит от типа используемой матрицы. Различие состоит в том, что при использовании жидкой матрицы ее нужно наносить на каждый слой ткани.

Рис. 11.6–11.9 иллюстрируют выкладку крупной детали (в данном случае, полового перекрытия самолета) с использованием термопластичной полимерной матрицы. Для плавления матрицы используют источник тепла.



Рис. 11.5. Выкладка ткани на пресс-форму каски



Рис. 11.6. Накладывание слоя на форму



Рис. 11.7. Размещение детали, перекрывающей разрез ткани



Рис. 11.8. Углы разглаживают для избежания образования складок и пустот

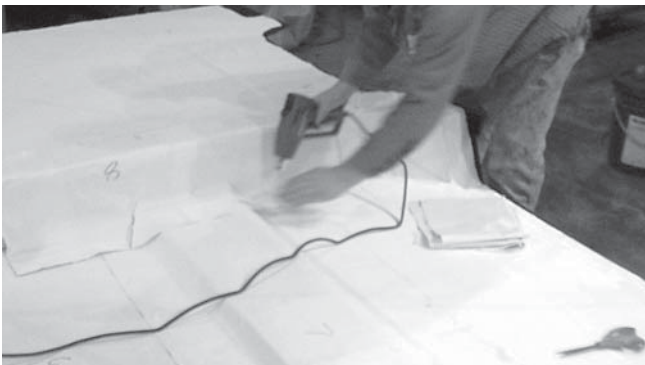


Рис. 11.9. Окончательная сборка путем локального прогревания

11.10. Противобаллистические структуры

Эффективность противобаллистической детали зависит от следующих факторов:

1. *Конструкции.* Использование лучших материалов (волокна и матрицы) и оптимальная схема укладки позволяют снизить вес и стоимость брони.
2. *Технологии.* Нужно использовать наиболее оптимальный метод изготовления детали. Технологические методы типа вакуумформования, прессова-

ния или формования в автоклаве используют в комбинации с соответствующими методами сборки — влажной выкладкой, выкладкой препрегов (на основе терморезактивных или термопластичных матриц), а также выкладкой сухой ткани и пленочной матрицы.

3. *Контроля производственного процесса*, обеспечивающего воспроизводимость характеристик изделия. Без воспроизводимости характеристик нельзя гарантировать требуемый уровень защиты изделия. Недостаточный контроль производственного процесса может привести к потенциально летальным исходам в полевых условиях. По этой причине предпочтительнее использовать препреги или пленочные матрицы.

11.11. Технология производства композитов

Весь потенциал легких противобаллистических композитов можно использовать лишь при использовании надлежащих технологических методов и инструментов. Выбор технологии производства зависит от множества факторов, например:

- 1) размера детали,
- 2) количества производимых единиц,
- 3) выбора и наличия противобаллистического материала,
- 4) концентрации матрицы,
- 5) стоимости сырья,
- 6) стоимости труда,
- 7) наличия нужного оборудования,
- 8) характеристик изделия:
 - (а) уровня баллистической защиты;
 - (б) допустимого веса;
 - (в) структурных требований и ударных характеристик;
 - (г) других условий:
 - 1) температуры эксплуатации;
 - 2) воздействия химических веществ при эксплуатации;
 - 3) влажности;
 - 4) воздействия горюче-смазочных веществ;
 - 5) прочих условий.

11.12. Методы производства

Ниже описаны типичные технологические методы производства композитов — ручная выкладка, вакуумформование, прессформование и отверждение в автоклаве.

11.12.1. Ручная выкладка

При производстве изделий из волокнистых композиционных материалов часто используют процесс ручной выкладки.

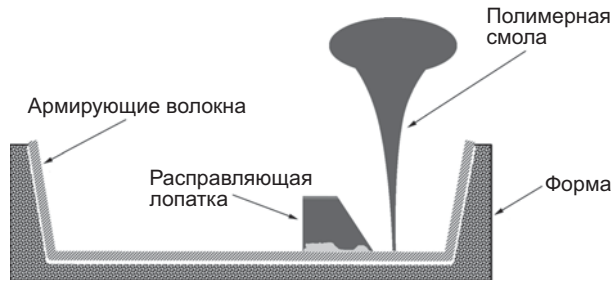


Рис. 11.10. Процесс ручной выкладки

Введение

Изделия из композиционных материалов часто делают методом ручной выкладки (или влажной ручной выкладки) слоев ткани, особенно если количество производимых деталей не слишком велико (рис. 11.10). Этот процесс применяют для производства деталей сложной формы, когда изготовление пресс-формы может быть проблемой. Так как ручная выкладка является самым простым технологическим методом, на ее примере удобно иллюстрировать общие принципы изготовления композита. Другими словами, принципы, которые применяются при ручной выкладке, в той или иной степени применимы и ко всем другим методам.

Определения

В этом процессе используется «открытая» форма, т.е. имеется не две, а лишь одна форма, на которую выкладывают слои волокон и матрицы. Деталь делают вручную. Процесс отверждения часто (но не всегда) проводят при комнатной температуре, а способ отверждения определяется типом используемой матрицы. Этот процесс называют ручной, или влажной, выкладкой. Так как процесс использует только одну форму, качество поверхности получаемой детали может быть различным.

Волокнистый материал (ткань, ровинг, рубленые волокна и т.д.) вручную укладывают на одностороннюю форму или арматуру (часто используют сетку или пену). Форма или арматура не должна иметь пыли, грязи и т.д. На волокна наносят матрицу с помощью лопатки, щетки, ручного ролика и т.д. Иногда матрицу просто льют на волокна и распределяют с помощью лопатки (рис. 11.11). Кроме того, волокна можно погрузить в ванну с жидкой матрицей, а затем выложить на форму. Так можно уложить большое количество слоев, и после отверждения матрицы можно извлечь деталь из формы. В зависимости от типа матрицы сухая деталь может быть отверждена полностью или частично. Сухую деталь можно переносить для доотверждения или для освобождения формы с целью выкладки следующего изделия.

В качестве матрицы в композитах противобаллистического назначения, как правило, используют эпоксидную композицию, состоящую из двух смешиваемых составляющих — эпоксидной смолы и катализатора реакции сшивки, который



Рис. 11.11. Нанесение эпоксидной матрицы на углеродные волокна

часто называют отвердителем. Отверждение представляет собой каталитическую химическую реакцию поперечной сшивки низкомолекулярного диэпоксида с диамином, в результате чего образуется жесткий полимер. Отверждение смолы дает очень прочную эпоксидную матрицу, связывающую соседние волокна. Ее недостатком является излишняя хрупкость.

Некоторые «за» и «против»

Влажная выкладка является самым простым технологическим методом создания композита, и это определенно является достоинством, когда производство лимитируется сложностью изготовления и ценой технологического оборудования. В композитах антибаллистического назначения нежелательна излишняя пропитка ткани матрицей, и способность жидких смол проникать через ткань может быть недостатком.

11.12.2. Формование в мешке

Введение

Хотя описанная выше влажная укладка слоев ткани часто оказывается достаточно хорошим технологическим методом, суровость условий работы брони требует лучшей интеграции матрицы и ткани, что возможно лишь при приложении давления. Формование в мешке изолирует отверждаемую структуру от кислорода воздуха (рис. 11.12).

Полученные этим методом композиты имеют более высокую удельную прочность (отношение прочности к весу). Если содержание матрицы излишне высоко, прочность композита невысока. С другой стороны, если содержание матрицы слишком мало, прочность материала также снижается, поскольку одни лишь волокна не обеспечивают требуемых характеристик материала. Давление обеспечивает лучшую пропитку волокон.



Рис. 11.12. Нанесение герметизирующей пленки при формировании в мешке

При нанесении матрицы в методе ручной выкладки ее содержание может быть излишне большим, превышая вес ткани, что нежелательно, поскольку прочность композита оптимальна при более низком содержании матрицы. Идея решения этой проблемы состоит в пропитке текстильных волокон жидкой смолой до укладки слоев. Этот процесс называют получением препрега. Он состоит в предварительном нанесении на волокна смолы и ее частичном отверждении. Это позволяет равномерно распределить матрицу по межволоконному объему и избежать появления областей с несклееными волокнами или излишком матрицы, что оптимизирует ее распределение в композите.

11.12.3. Формование в вакуумном мешке

При прессовании в вакуумном мешке (рис. 11.13) для консолидации слоев композита используют атмосферное давление. При этом из композита удаляется практически весь воздух и газы, выделяющиеся при отверждении матрицы.

Атмосферное давление составляет примерно 0,1 МПа, что соответствует давлению, создаваемому грузом весом 10 т на площади 1 м². В воздухе атмосферное давление действует одинаково на все поверхности детали. Если же одна из поверхностей панели находится в вакууме, а на другую поверхность действует атмосферное давление, то создается сжимающая сила величиной 10 т/м², что обеспечивает очень хорошую консолидацию волокон и матрицы.

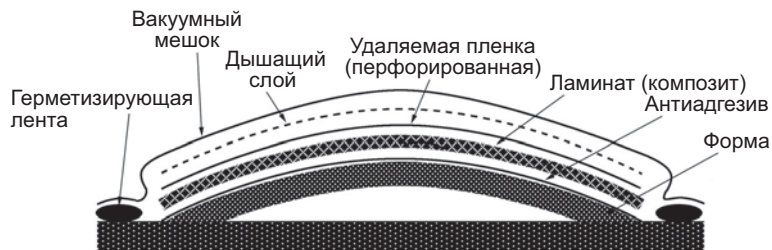


Рис. 11.13. Формование в вакуумном мешке

Вакуумформование

Из-за относительно низкой цены оборудования и большой гибкости метода вакуумформования (называемого также формованием в вакуумном мешке) им можно изготавливать детали самой разной формы и размера (рис. 11.14). Этим способом очень удобно делать каски, поскольку он обеспечивает равномерное давление на поверхность формы, чего трудно добиться другими методами.

11.12.4. Формование в мешке давления

Технология формования в мешке давления очень похожа на формование в вакуумном мешке. В этом случае герметичный мешок заполняют воздухом. Их главное отличие состоит в том, что в мешке давления величину прессующего давления можно изменять от нулевого до приблизительно 15 атм., что в 15 раз выше, чем при использовании вакуумного мешка. Таким образом, вакуумный мешок позволяет создать давление 10 Н/см^2 , а газовый мешок — до 150 Н/см^2 .

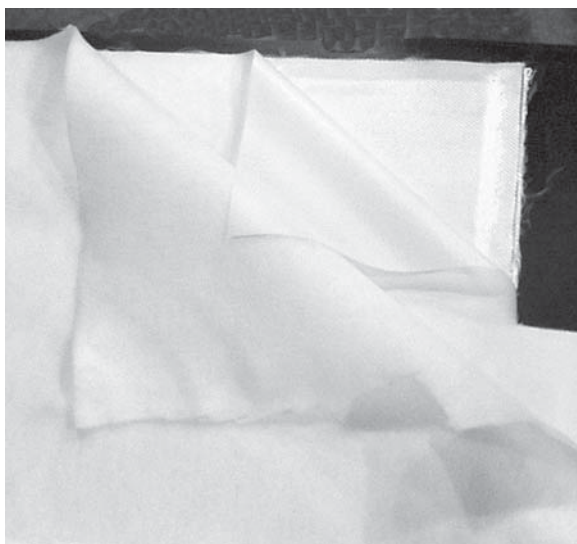


Рис. 11.14. Слои материала, помещаемые в вакуумный мешок

11.12.5. Влияние давления прессования

Свойства композиционного материала зависят от давления формования. К примеру, в некоторых случаях противобаллистический материал имеет прекрасные характеристики, если давление прессования равно 100 фунтов/фут², но его характеристики ухудшаются, если давление увеличить в три раза. Такое поведение можно объяснить тем, что для эффективного поглощения энергии пули необходимо значительное смещение волокон, которое уменьшается при увеличении количества матрицы в межволоконном объеме.

11.12.6. Прессформование

При формовании в прессе волокна и неотвержденную матрицу помещают в открытую форму, накладывают ответную часть формы, прикладывают внешнее давление и повышают температуру, чтобы изделие приобрело вид пресс-формы. Давление поддерживают до отверждения матрицы. При этом методе формования часто используют термопластичные или частично отвержденные терморезактивные матрицы. При приложении сжимающей силы только к одной поверхности давление увеличивается и на другой поверхности. Прессформование позволяет создавать достаточно крупные изделия сложной формы.

Этим методом можно делать высокопрочные композиты на основе термопластичных или терморезактивных полимеров и армирующих волокон в виде однонаправленных лент, тканей или беспорядочно ориентированных рубленых волокон. Преимуществом прессформования является возможность делать крупные детали сложной формы.

Преимущества прессформования

Основным преимуществом метода формования в прессе является возможность точного воспроизводства формы и характеристик деталей благодаря аккуратности контроля всех стадий процесса. Охлаждение детали можно ускорить путем охлаждения формы. Как правило, деталь можно извлекать из пресс-формы только после отверждения матрицы и охлаждения до температуры окружающей среды.

Форма состоит из двух частей, как показано на рис. 11.15. Рис. 11.16 иллюстрирует метод изготовления небольшой детали, в данном случае изогнутой нагруд-

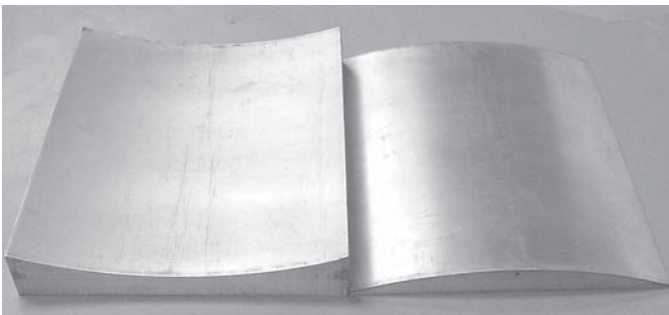


Рис. 11.15. Две соответствующие части пресс-формы

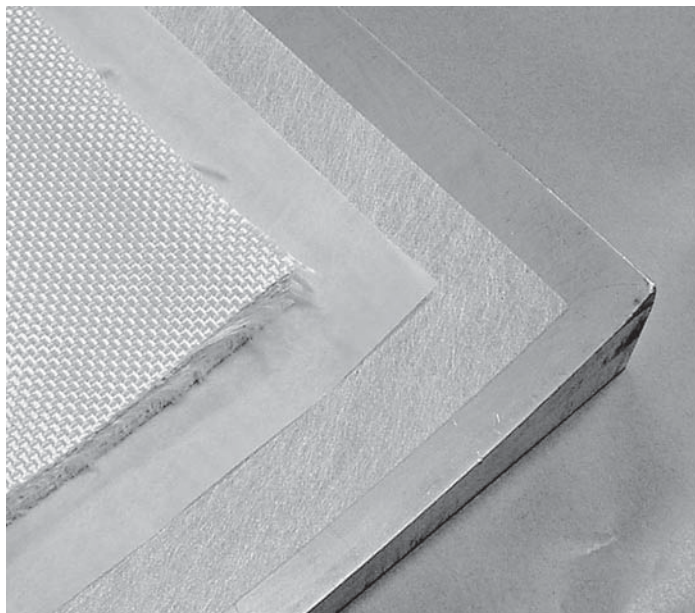


Рис. 11.16. Сборка детали на нижней вогнутой части пресс-формы

ной пластины из арамидной ткани. Основанием является нижняя вогнутая часть металлической пресс-формы, на ней лежит слой «дышащей» ткани, слой перфорированной пленки, пропускающей излишки смолы, и слои арамидной ткани.

Материал принимает вид пресс-формы еще до приложения давления (рис. 11.17). После этого накладывают верхнюю часть пресс-формы и помещают собранную систему в пресс для консолидации материала в соответствии с параметрами произ-

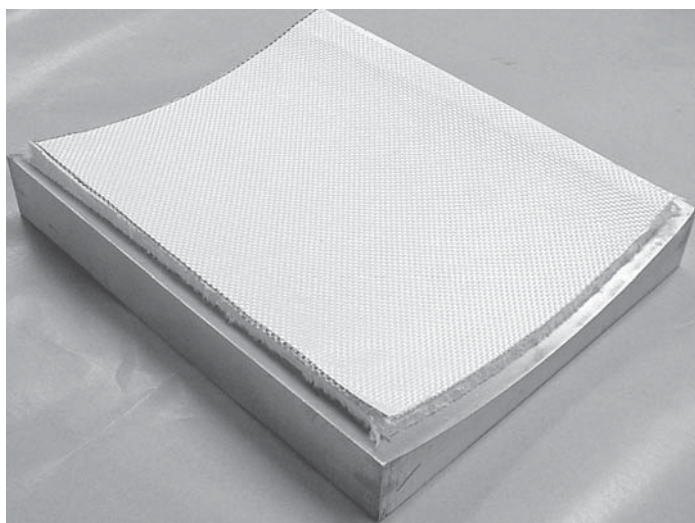


Рис. 11.17. Деталь, собранная на нижней вогнутой части пресс-формы

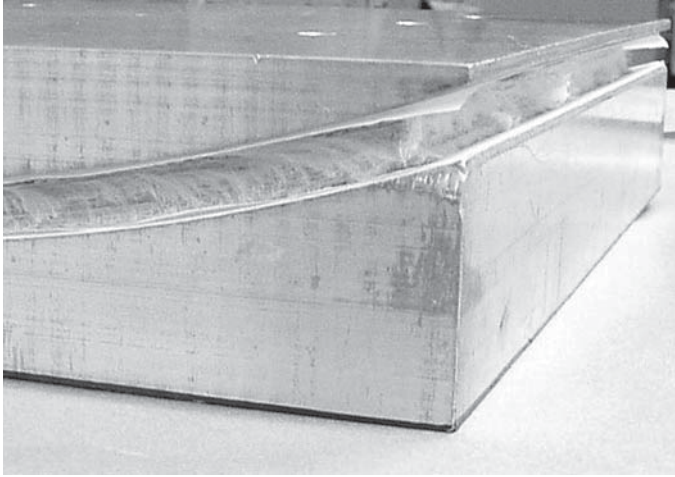


Рис. 11.18. Изготовление композита при помощи двух изогнутых частей пресс-формы

водства, предусмотренными для данной пары ткань/матрица (рис. 11.18). Этот процесс требует точного контроля температуры и давления, отсутствие которого может привести к фатальному ухудшению свойств изделия. Как отмечалось выше при обсуждении метода влажной выкладки, почти всегда важно избежать заполнения матрицей областей между нитями в ткани.

11.13. Пресс

При прессформовании, как следует из названия метода, используют пресс. Типичный пресс показан на рис. 11.19. Давление создается одним или несколькими

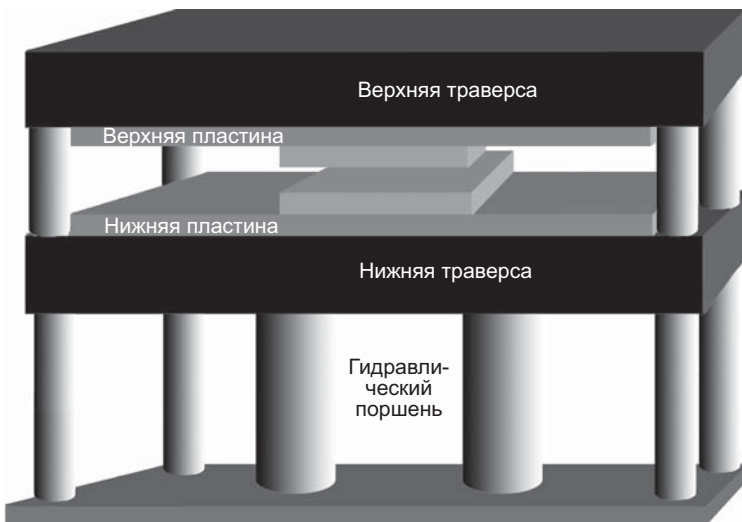


Рис. 11.19. Гидравлический пресс для формования композитов

Таблица 11.1. Производство композитов противобаллистического назначения в автоклаве и прессе высокого давления

	Автоклав (низкое давление)	Пресс
Давление	Низкое, 10–20 атм.	Высокое, 100–250 атм.
Объем производства	Высокий	Приличный
Стоимость изделия	Низкая	Выше
Качество поверхности	Хорошее со стороны формы	Хорошее с обеих сторон
Структурная жесткость	Хорошая	Превосходная
Инструменты и крепеж	Есть	Нет
Дополнительные слои при формовании	В случае керамического слоя отсутствуют	Есть
Баллистическая защита от осколков	Хорошая	Хорошая
Баллистическая защита от пистолетных пуль	Хорошая	Хорошая
Баллистическая защита от винтовочных пуль	Хорошая	Превосходная
С керамическим слоем	Превосходная	Превосходная
Запреградная деформация	Хорошая	Превосходная

ми гидравлическими поршнями. Верхняя и нижняя пластины нагревают маслом, водой или паром, что ускоряет течение матрицы под давлением. Пластины могут охлаждаться жидкостью, протекающей через те же трубки, что и при нагреве.

11.14. Сравнение формования в автоклаве и прессе высокого давления

Формование в автоклаве и в прессе высокого давления — это стандартные технологические методы получения композитов противобаллистического назначения. Доступно как новое, так и уже использованное недорогое оборудование для обоих типов формования. Управление и стоимость обслуживания этого оборудования также невысоко. В табл. 11.1 приведено сравнение главных особенностей этого оборудования.

11.15. Влияние давления формования

Баллистические характеристики композиционных материалов, особенностью которых является пониженное содержание матрицы, зависят от типа волокна, матрицы и условий формования. Более высокий уровень баллистической защиты требует лучших защитных характеристик композита. Примером влияния давления может служить жесткая формованная панель на основе материала Spectra Shield® Plus, свойства которой приведены в табл. 11.2.

Таблица 11.2. Влияние давления формования на баллистический предел V_{50}

Давление формования (psi)	V_{50} (фут/с) для пули M80
500	2230
1500	2360

11.16. Формование противобаллистических изделий

11.16.1. Формование касок

Каски имеют сложную геометрическую форму, однако исходные материалы производят лишь в виде тонких плоских пленок или рулонов ткани. Из-за несоответствия геометрической формы подготовка и разрезание листов играют важную роль. Если вырезаемые заготовки имеют круглую форму, будет много отходов. Если же использовать заготовки другой геометрической формы, критическим становится размещение каждого листа в нужном месте для получения одинаковой толщины каски и обеспечения высоких баллистических характеристик. Производители касок тратят много времени и усилий на оптимизацию формы заготовок.

Технология производства

Процесс изготовления каски осложнен ее непростой геометрической формой (рис. 11.20). Пресс производит давление в вертикальном направлении, а наиболее ответственными областями каски являются боковые стенки. Так как каски делают из плоских слоев ткани, придание им формы человеческой головы требует большого количества разрезов, сворачиваний и перекрытия каждого слоя.

Заготовку из противобаллистической ткани разрезают, как показано на рис. 11.21. Такие заготовки называют лепестковыми. Их форма обеспечивает необходимое

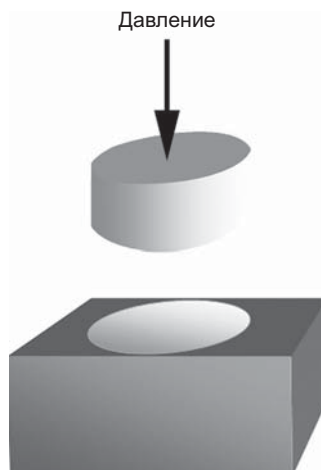


Рис. 11.20. Прессование каски

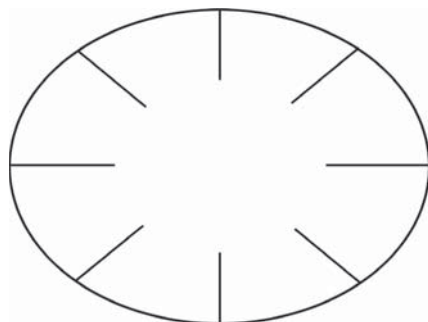


Рис. 11.21. Лепестковая заготовка

перекрывание лепестков, что обеспечивает защиту лобной и височной стороны головы.

Как правило, броня представляет собой слоистый материал. Заготовки должны перекрываться, а при наличии в них выреза или отверстия их нужно правильно ориентировать, так, чтобы отверстие было закрыто вставкой. Три накладываемые друг на друга заготовки показаны на рис. 11.22 и 11.23. Это приходится делать неоднократно.

Чтобы избежать излишней толщины каски в ее верхней части, в некоторых заготовках делают овальные вырезы, как показано на рис. 11.23. Это уменьшает

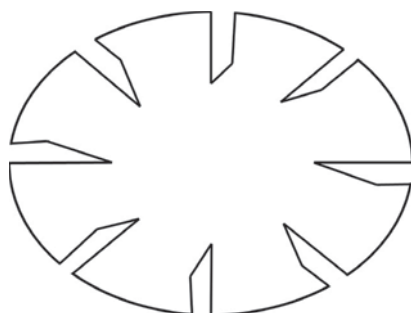


Рис. 11.22. Перекрывающиеся листовые заготовки

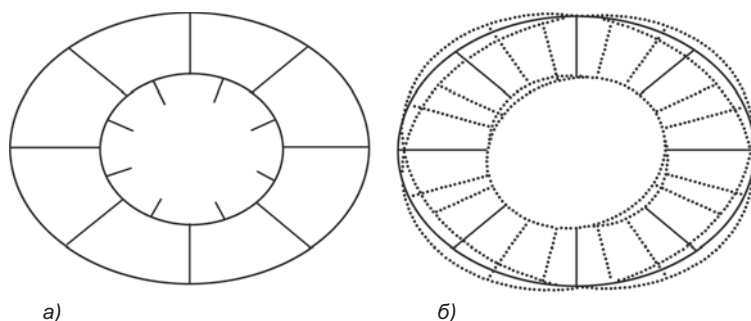


Рис. 11.23. Заготовка корпуса каски (а); наложение нескольких заготовок (б)



Рис. 11.24. Корпус каски после формования



Рис. 11.25. Обрезка кромки каски

вес изделия и позволяет получить одинаковую толщину каски. На рис. 11.24 показан корпус каски, сделанный этим методом. Чтобы сделать толщину еще более однородной, верх каски может быть усилен с помощью дополнительных деталей, которые укладывают между лепестковыми слоями.

После укладки слоев на пресс-форму заготовку прессуют, охлаждают и обрезают до придания конечного вида (рис. 11.25).

11.17. Переносные полицейские щиты

Переносные щиты используются полицией, чтобы успокаивать массовые волнения. Щиты должны защищать от выстрела из пистолета, а некоторые из них — и от винтовочных выстрелов. Щиты делают из различных материалов. Как правило, это материалы на основе арамидных и полиэтиленовых волокон. Переносные полицейские щиты изготавливают формованием в автоклаве или прессованием при высоком давлении.

11.17.1. Изготовление щитов

Изготовление щитов состоит из следующих операций:

- 1) выбора тканых препрегов или нетканых поперечно ориентированных материалов,
- 2) выбора оптимальной ширины материала, исходя из требуемой ширины щита,
- 3) размещения препрега на столе,
- 4) выбора количества слоев препрега исходя из требуемого уровня защиты,
- 5) перенесения заготовки на нагреваемую форму или в автоклав,
- 6) закрывания формы и приложения давления. При формовании в автоклаве слои укладывают на форму, находящуюся внутри него,
- 7) отверждения матрицы (включая охлаждение, если оно применяется),
- 8) открывания формы и извлечения заготовки,
- 9) обрезки кромки щита и проверки наличия поверхностных или внутренних дефектов,
- 10) вырезания окна в корпусе щита,
- 11) приклеивания или выдавливания надписей,
- 12) установки ручки на задней стороне щита,
- 13) покраски,
- 14) установки каучукового или металлического обрамления,
- 15) установки бронестекла.

11.18. Формование противобаллистических усиливающих вставок

Вставляемые противобаллистические пластины являются обязательным компонентом снаряжения персонала, участвующего в вооруженном конфликте или миссии по поддержанию мира. Бронепластины вставляют в гибкую рамку или карманы бронежилета. В зависимости от требуемого уровня защиты бронежилет может нести от одной до пяти вставных бронепластин.

11.18.1. Одиночные нагрудные пластины

Одиночные нагрудные вставные пластины формируют из композиционного материала Spectra Shield при высоком давлении. Даже без лицевого керамического слоя

Таблица 11.3. Поверхностная плотность нагрудных пластин из материала Spectrax Shield® Plus

Уровень защиты	Поверхностная плотность (фунтов/фут ²)
Уровень II	0,45
Уровень II	0,75
Уровень IIIA	1,10
Уровень III	3,80
Уровень IV	6,5–8,5 в зависимости от типа керамики

они могут обеспечивать IIA, II, IIIA и III уровни защиты по стандарту NIJ 0101.04 (табл. 11.3). Это является одним из преимуществ композиционного материала Spectra Shield. Нагрудные пластины III уровня защиты без лицевого керамического слоя примерно на 30% легче пластин с керамическим слоем. Процесс производства таких пластин состоит из следующих операций:

- 1) Размещения рулона Spectra Shield® на столе,
- 2) Определения требуемого количества слоев Spectra Shield®,
- 3) Перенесения заготовки на нагреваемую форму,
- 4) Закрывания формы и приложения давления,
- 5) Отверждения матрицы (включая охлаждение),
- 6) Открывания формы и извлечения заготовки,
- 7) Обрезки кромки пластины и проверки наличия дефектов,
- 8) Испытания через 48 час. согласно стандарту NIJ 0101.04 для определения баллистических характеристик пластин.

11.19. Нагрудные пластины с передним керамическим слоем

Нагрудные пластины с керамическим слоем предназначены для остановки высокоскоростных бронебойных пуль, соответствующих IV уровню защиты NIJ стандарта. Керамика дробит пули на фрагменты, а находящийся за ней композиционный материал останавливает осколки пули и разрушенной керамики. Для защиты от высокоскоростных винтовочных пуль композитную броню используют совместно с гибким жилетом.

11.19.1. Композитные нагрудные пластины с передним керамическим слоем

Чтобы создать эффективную защиту, керамические пластины часто усиливают поддерживающим композиционным материалом (рис. 11.26). Поддерживающий композиционный материал может быть изготовлен методом ручной выкладки ткани или препрегов.

Методы производства могут меняться, но лучшие баллистические характеристики всегда имеют пластины из композиционного материала, усиленного слоем керамики. В зависимости от типа матрицы композиты формуют в прессе или в автоклаве. При формовании в прессе форма состоит из двух частей.



Рис. 11.26. Керамика с подложкой из композиционного материала

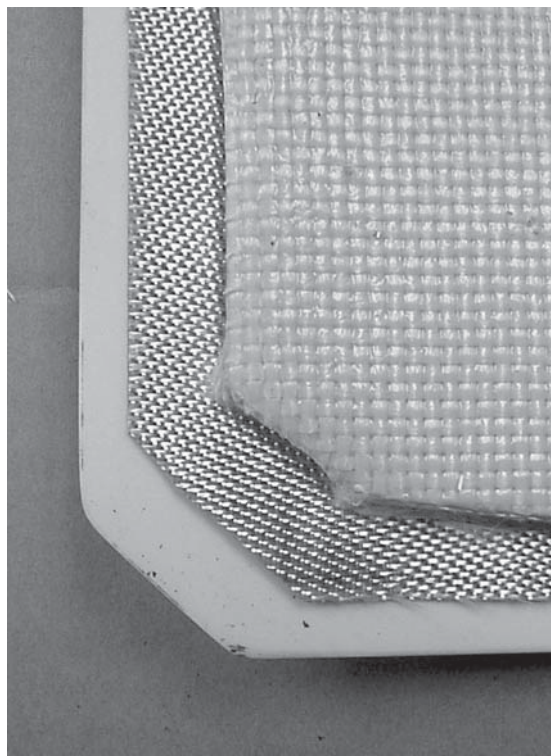


Рис. 11.27. Керамическая противобаллистическая пластина с подложкой из композиционного материала на основе стеклянных или арамидных волокон

На рис. 11.27 показана керамическая пластина из окиси алюминия, промежуточный слой из стеклопластика и предварительно сформованный слой органо-пластика на основе арамидных волокон. В зависимости от типа используемой матрицы эти три панели можно склеить с использованием вакуума в автоклаве или в печи.



Рис. 11.28. Сформованный поддерживающий композиционный материал, готовый к приклеиванию лицевой керамической пластины

После формования подложки из композиционного материала к ней приклеивают керамическую пластину (рис. 11.28). Из-за различия свойств композиционного материала и керамики между ними иногда приходится помещать промежуточный слой. Некоторые изготовители лицевую поверхность керамики покрывают еще одним слоем, защищающим керамику от нечаянного повреждения.

11.20. Механическая обработка композитов

После формования детали часто приходится резать, сверлить, полировать и красить.

11.20.1. Резание

Из-за чрезвычайно высокой прочности и абразивной стойкости высокопрочные волокна и ткани обычными методами режутся плохо. Сухие ткани можно резать ножницами с кромками из карбида, мощными ножницами или вращающимися резаками. Некоторые волокна можно резать горячим ножом или проволокой. Отвержденные композиты на основе препрегов и сформованные ламинаты можно резать также содержащей абразив струей воды, лазерным лучом, ленточным резаком или циркулярной пилой.

11.20.2. Сверление

Многослойные собранные панели на основе композиционных материалов рекомендуются сверлить сверлами Deep-Fiber-Cut фирмы International Carbide Corp.

или Core Drills, предотвращающими распушение волокнистого материала. Для точного сверления из-за пониженного содержания матрицы и относительно слабой адгезионной связи волокон и матрицы сверление требует надлежащих зажимов и крепежа. При сверлении глубоких отверстий сверло нужно часто извлекать из отверстия, чтобы удалить отрезанные пучки волокон и избежать перегрева композита. Слишком медленная подача сверла не снижает, а увеличивает разогрев материала.

Хорошее резание и сверление противобаллистических композитов требует навыка, достигаемого практикой. Квалифицированный работник, имеющий качественные режущие и сверлильные инструменты, делает такую работу достаточно хорошо.

11.20.3. Окончательная обработка

Окончательная обработка противобаллистических композитов состоит в удалении лишнего материала, заполнении матрицей промежутков между сухими волокнами, чистке и покраске.

Удаление излишков материала может быть выполнено различными методами, зависящими от типа волокна, матрицы, содержания матрицы, особенностей детали и требуемой окончательной обработки. При этом можно использовать резку следующими инструментами:

- штампом,
- острым ножом,
- ленточной пилой,
- горячим ножом,
- вращающимся переносным резаком.

11.20.4. Полировка

Формованные детали из композитов обычно имеют гладкую поверхность, воспроизводящую поверхность пресс-формы. Если поверхность пресс-формы не хромирована или используется уже достаточно долго, может потребоваться полировка, устраняющая мелкие дефекты. Самый простой метод состоит в полировке детали и заполнении оставшихся дефектов эпоксидной композицией. После отверждения смолы деталь полируют повторно.

11.20.5. Покраска

Поверхность детали из композита окрашивают или покрывают слоем пленки. Окраска является самым простым методом нанесения покрытия и поэтому используется очень широко как для крупных, так и для небольших деталей.

Краска изменяет цвет детали и обеспечивает защиту от ультрафиолета и влаги. Другими причинами окраски являются изменение трения, повышение химической стойкости, защита от воздействия электричества, скрытие дефектов формования и мест сочленения деталей.



Краску наносят после очистки поверхности детали от остатков антиадгезива формы, масла и грязи, появляющихся при формовании и обработке. При подготовке поверхности деталь сначала протирают растворителем. После грунтовой окраски ее тщательно высушивают на воздухе или в нагретой печи. После высыхания грунтовки ее окрашивают повторно. Для придания поверхности текстуры финишная краска может содержать частицы песка или другого наполнителя.

11.21. Заключение

Из-за малого веса и высокой прочности наиболее перспективными антибаллистическими материалами являются волокнистые композиционные материалы. Технология производства противобаллистических материалов играет важную роль в создании брони. Дальнейшее улучшение защитных характеристик будет происходить по мере усовершенствования материалов и технологии их производства.

11.22. Литература

American GFM – sales@agfm.com

Eastman, website www.eastmanww.com

Lubin, G., *Handbook of Composites*, Van Nostrand Reinhold Company, 1982.

Morena, J. J., *Advance Composite Mold Making*, Van Nostrand Reinhold Company, 1988.

Schwartz, S. S. and Goodman, S. H., *Plastics Materials and Processing*, Van Nostrand Reinhold Company, 1982.

Skeist, I., *Handbook of Adhesives*, Van Nostrand Reinhold Company, 1990.

ГЛАВА 12

НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ ПРОТИВОБАЛЛИСТИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Б.Р. Скотт, Научно-исследовательская лаборатория армии США

12.1. Введение

То, что сегодня считается новым, в действительности часто оказывается хорошо забытым старым. Это относится и к композитам, из которых делают различные виды противобаллистической брони. За 90 лет, прошедшие после Первой мировой войны, сфера применения брони не слишком изменилась, хотя современные боевые действия требуют все большей степени защиты при более низком весе брони и меньшем уровне производственных затрат. Композиционные материалы мало-помалу стали применять и в средствах индивидуальной защиты, для защиты летательных аппаратов, зданий, кораблей и наземных боевых машин. Они постепенно вытесняют сталь, алюминий и даже титановые сплавы благодаря более высоким баллистическим характеристикам, прогресс которых был подобен прогрессу в области конструкционных материалов.

Форма защитных изделий постепенно изменилась. Внешне пластины из волокнистой брони похожи на стальные, использовавшиеся в прошлом. Каски, которые раньше делали из хедфилдовской стали, теперь изготавливают из слоистых волокнистых материалов, которые обеспечивают более высокую степень защиты, снижение веса или же и то, и другое. На наземных и воздушных транспортных средствах те же материалы применяются в сочетании с металлами или облицовкой из керамических пластин. Индивидуальные бронесистемы включают панели, которые защищают туловище человека спереди и сзади. Dunstan [1] в своем обзоре истории развития брони описывает индивидуальную броню под названием Chemicо Body Shield, выпускавшуюся для британской армии во время Первой мировой войны и состоявшую из многих слоев ткани, отходов льна, хлопка и шелка, а также смолоподобного связующего вещества. Эта броня останавливала пистолетную пулю .45 калибра, имеющую скорость 91 м/сек. Особенно интересно, что в этой броне применялись те же материалы и технология, которые использовались древними ассирийцами еще 3000 лет назад.

В течение последних ста лет шел непрерывный поиск способов защиты от все более мощного оружия и методов решения других проблем, связанных с индивидуальными потребностями военнослужащих. Развитие боеприпасов и вооружения приводит ко все большей эффективности и убойной силе последних. Стремление обеспечить защиту отдельных военнослужащих и транспортных средств существовало как в военных, так и в гражданских кругах. Изобретались и внедрялись в производство новые материалы, которые часто изначально предназна-

лись для совершенно иных целей, но впоследствии были признаны бронематериалами, сохраняя при этом свою первоначальную конструкцию или геометрию. Сталь, алюминий и титан до сих пор остаются самыми распространенными бронематериалами для защиты наземных транспортных средств. Однако в области индивидуальных систем бронезащиты дело обстоит иначе. Высокопрочные волокнистые слоистые материалы в сочетании со слоями керамики доказали свою способность останавливать пули и осколки. При этом они легче аналогичной брони из металла. В настоящей главе мы попытаемся дать краткий обзор этих материалов и их использования в облегченной броне по состоянию на 2005 год. К сожалению, данный обзор будет несколько односторонним, что обусловлено близким знакомством автора только с бронесистемами, находящимися на вооружении армии США. Одновременно с этим автор должен избегать разглашения подробностей об уязвимых местах каких-либо систем бронезащиты. В США открытая публикация подобной информации не допускается, и можно с полным основанием предположить, что уровень секретности будет повышаться по мере роста эффективности отдельных видов брони и боеприпасов. Поэтому при дальнейшем изложении мы не будем приводить специфических боевых характеристик, и существующие бронесистемы будут описываться только в общих терминах.

Современные бронесистемы представляют собой комбинацию материалов, включающую передний слой из керамики или металла, за которым следует многослойный волокнистый композит и тканый бронепакет. Ниже мы приводим подробное описание этих материалов, однако следует подчеркнуть, что важны и другие моменты. Производство влияет не только на себестоимость, но и на эффективность брони. Поверхность раздела между керамикой и композитом определяет как поведение брони при ударе снарядом, так и степень поврежденности, что влияет на эффективность защиты при последующих поражениях. Конструкция системы определяет баллистические свойства, способы крепления, ремонта и способы усовершенствования брони. Структура брони определяется толщиной отдельных слоев, степенью их фиксации, наличием облицовочных слоев, ориентацией волокон, допусками размеров, адгезией и обработкой поверхностей, последовательностью и свойствами слоев. Важное значение имеет доступность материалов, особенно в случаях крупномасштабных военных поставок, которые необходимо осуществить в кратчайшие сроки. Таким образом, наилучшим не всегда оказывается самый легкий или обеспечивающий наивысшую степень защиты материал. Поставляемый промышленностью материал всегда является плодом некоторого компромисса между всеми перечисленными факторами.

12.2. Волокна

Теперь при производстве бронепанелей и щитов, которые ранее изготавливали преимущественно из стали и алюминиевых сплавов, используют преимущественно слоистые материалы на основе высокопрочных волокон. Прочность при растяжении приобретает особое значение в точках, где велики растягивающие нагрузки, например, на участке брони, примыкающем к месту удара. К сожалению,

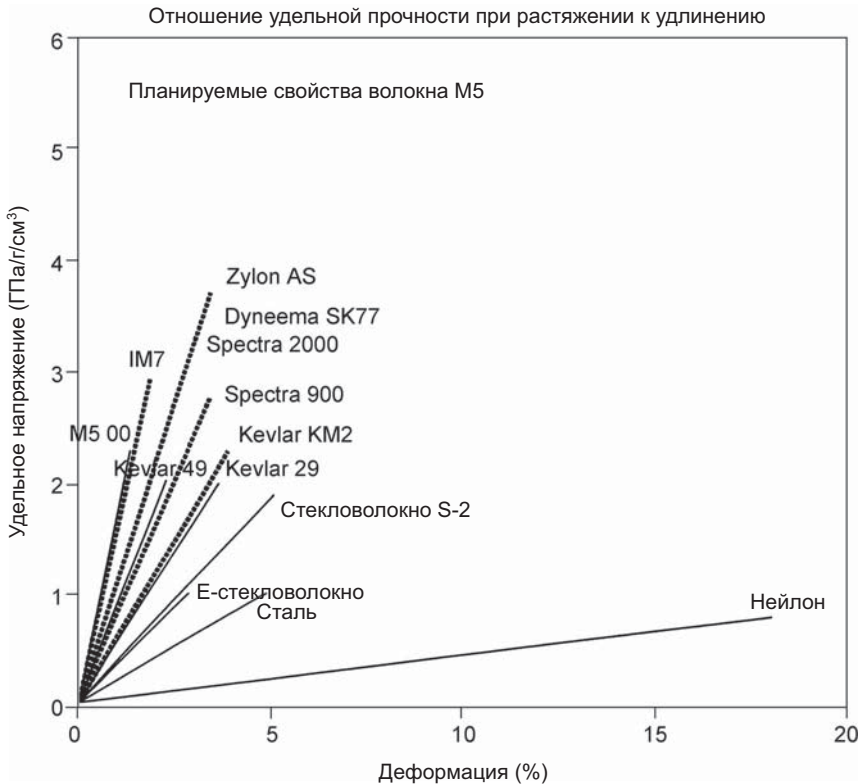


Рис. 12.1. Диаграммы деформирования при растяжении различных противобаллистических волокон

не все бронематериалы подвергаются лишь растягивающим нагрузкам. Хотя в первых обзорах [2, 3] основное внимание обращалось на оптимальную прочность при растяжении, жесткость и максимальное удлинение, на практике выбор брони не всегда обуславливается только перечисленными параметрами. Тем не менее, за последние шестьдесят лет благодаря внедрению нитей с повышенной прочностью при растяжении удалось добиться существенного улучшения свойств брони. Рис. 12.1 демонстрирует диаграммы растяжения некоторых волокон. По оси абсцисс отложено удлинение волокон, а по оси ординат — удельное напряжение при растяжении. На графике не представлены хлопок и другие текстильные материалы, применявшиеся в первых бронесистемах, хотя в отделяемом внутреннем композитном подшлемнике стальной каски М-1 времен Второй мировой войны использовалась именно хлопчатобумажная ткань. Помимо первых типов нейлона, арамидов (Kevlar, Twaron), стекловолокон (E и S) и СВМПЭ волокон (Spectra, Dyneema) на данном рисунке представлены характеристики графитовых и углеродных волокон с высокими удельными характеристиками.

Тенденции развития волокон становятся очевидными, если проследить, какие из них были внедрены в производство. Хотя среди конструкторов сохраняются разногласия по поводу того, какие свойства волокон являются наиболее важ-



ными, в целом при конструировании бронесистем в качестве основного параметра чаще всего используют удельный предел прочности при растяжении. Иногда таким параметром считают вязкость или удельную энергию деформирования при растяжении. Обычно волокна с высокой удельной прочностью при растяжении также имеют и высокую удельную жесткость. Высокая прочность и жесткость не всегда являются оптимальными свойствами противобаллистического материала. Высокую вязкость часто имеют материалы на основе волокон с меньшей жесткостью, но с более высоким удлинением при растяжении. Roylance *et al.* [4], видимо, впервые описали корреляцию баллистических характеристик композита и механических характеристик волокон. Как указывается в этой работе, учет одних лишь механических свойств волокон недостаточен для оптимального конструирования брони. На свойства брони влияют также ориентация волокон, распределение матрицы (в слоистых материалах) и свойства границы раздела между волокнами и матрицей. Свойства границы раздела определяют движение нитей при поперечном ударе и влияют на распределение нагрузки в отдельных нитях. Рис. 12.1 позволяет предположить, что оптимальными свойствами обладают волокна с наивысшей удельной прочностью и удлинением не менее 4%. Однако нужно учесть, что объем деформированного материала пропорционален скорости упругой ударной волны, которая пропорциональна корню квадратному из величины модуля упругости материала. Хотя энергия упругой деформации возрастает при снижении модуля упругости, объем деформированного материала при этом уменьшается, что требует компромисса между этими характеристиками материала.

Ниже мы приводим краткое описание материалов на основе волокон, представленных на рис. 2.1. Обсуждение не будет ограничиваться лишь прочностью и удлинением, и мы обсудим другие свойства, ограничивающие использование волокон. Как уже отмечалось, выбор оптимального бронематериала определяется не только механическими свойствами волокон. Другие характеристики волокон часто играют не менее важную роль. Например, способ укладки волокон. Первые противобаллистические слоистые композиты на основе нейлоновых, стеклянных и арамидных волокон чаще всего имели многослойную тканую структуру. Введение нетканого поперечно ориентированного многослойного композита на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) позволило добиться улучшения эксплуатационных характеристик. Кроме этого, свойства слоистых материалов зависят от типа матрицы, границы раздела матрицы и волокон и от толщины нитей. В литературе практически отсутствует сравнение свойств материалов на основе различных волокон при одинаковой структуре переплетения и одинаковой матрице. Оптимальные слоистые материалы имеют целый ряд различий, и тип волокон является лишь одним из них.

12.2.1. Неорганические волокна

Стекловолоконные волокна

В конце 1930-х гг. все большее распространение стали получать стеклянные волокна. Первоначально распространение получили волокна фирмы Owens-Corning Fiberglass из алюмоборосиликатного Е-стекла. Это сравнительно недорогое волок-

но широко используется для электро- и термоизоляции. Оно также применялось в первом противобаллистическом слоистом композите Dagon [5], появившемся в конце Второй мировой войны. Этот материал изначально представлял собой нетканый поперечно ориентированный слоистый композит, содержащий 25% полиэфирной матрицы. Постепенно он был заменен материалом на основе ткани из ровницы (некрученных нитей) и более пластичных полиэфирных и фенольных матриц. Позднее фирма Owens-Corning приступила к выпуску магнезиально-алюмосиликатных стекловолокон S-2 [6] с повышенной прочностью. Улучшенные свойства незамедлительно позволили использовать это стекловолокно в бронематериалах, где оно заняло место E-волокон. Хотя на сегодняшний день волокна S-2 во много раз дороже E-волокон, они остаются одними из самых дешевых противобаллистических волокон. Ткани из волокон S-2 производят в больших объемах и используют в противобаллистических слоистых композитах на основе полиэфирных, винилэфирных, эпоксидных и фенольных матриц. Типичное весовое содержание матрицы равно 20–30%. Благодаря высокой прочности при сжатии стекловолокна часто используют для изготовления деталей, несущих структурные нагрузки и одновременно обеспечивающих баллистическую защиту. Слоистые композиты на основе S-2 волокон служат для защиты от осколков на американских боевых машинах, кораблях и в военной авиации. Их также используют в качестве несущих панелей, к которым крепятся керамические лицевые пластины. Во многих работах была успешно продемонстрирована возможность замены стальных и алюминиевых деталей корпусов различных транспортных средств деталями из стеклопластика на основе волокон S-2. Тем не менее, цельнокомпозитные корпуса в промышленных масштабах пока еще не используются. Композиты на основе стеклянных S-2 волокон обладают многими преимуществами, например, коррозионной стойкостью, малым удельным весом, высокой баллистической эффективностью, меньшей опасностью поражения осколками брони при попадании снаряда, электро- и теплоизолирующими свойствами. С течением времени они могут найти применение при изготовлении крупных структурных блоков транспортных средств. Сейчас используют волокна различного диаметра, а также некрученые аппретированные нити, предназначенные для использования с эпоксидными смолами.

Волокна окиси алюминия

Волокна из окиси алюминия в небольших количествах выпускаются уже в течение многих лет. Они обладают высокой прочностью при сжатии и теплостойкостью, поэтому их используют в слоистых композитах, обеспечивающих достаточную жесткость при повышенных температурах. Примерами являются износостойчивые композиты с металлической матрицей, например, алюминием, магнием или свинцом. Такие волокна можно применять и для баллистической защиты, но из-за сравнительно высокой плотности, низкой прочности при растяжении и высокой себестоимости для изготовления брони их использовали очень мало.

Волокна карбида кремния

Эти волокна достаточно дороги. Их получают либо методом осаждения химических паров на подложку, либо пиролизом волокна-прекурсора. Они предназначе-



ны для эксплуатации в условиях высоких температур (до 1200° в различных средах). Баллистические испытания проводили на промышленно выпускаемых волокнах Nicalon, являющихся основой весьма дорогостоящих композитов, известных под названием «карбид кремния – карбид кремния» (SiC-SiC). Эти композиты делают осаждением матрицы из паров бета-SiC на волокна Nicalon (SiC). Хотя данный материал не обладает какими-либо выдающимися бронезащитными свойствами, его иногда применяют для защиты двигателей турбовинтовых самолетов, работающих при высокой температуре. Вследствие ограниченных объемов производства и относительно высокой стоимости волокно SiC не может использоваться для крупномасштабного выпуска брони. Это волокно имеет более высокую удельную прочность при растяжении, чем стеклянные E-волокна, но при этом оно довольно хрупко (предельная деформация при растяжении около 1%). Возможно, в случае значительного снижения себестоимости его можно будет использовать более широко, включая уже упомянутые композиты с небольшим содержанием терморезистивных или термопластичных матриц.

Алюмоборосиликатные волокна

Данные волокна выпускает фирма 3М под торговой маркой «Nextel» в виде ткани, широко применяемой для термоизоляции при высоких температурах (> 1200°С). В сочетании с арамидами многослойные структуры на основе данных волокон используют также для защиты космических аппаратов [8], которые на орбите могут подвергнуться воздействию объектов, летящих с гиперскоростями. Космический вакуум ограничивает возможность использования органических матриц, и поэтому указанные ткани используются «всухую» в сочетании с металлической оболочкой. Такое волокно сравнительно дорого, его удельная прочность более чем вдвое меньше, чем у стеклянных S-2 волокон, и поэтому его редко используют в обычной броне. В некоторых отношениях это керамическое волокно может играть роль стандартных керамических плит в двухкомпонентных бронесистемах. При этом оно сохраняет гибкость, ударпрочность и теплостойкость даже в весьма агрессивных средах.

Борное волокно

Это волокно используют в случаях, когда необходима высокая жесткость в условиях сжимающих нагрузок. Его изготавливают методом химического осаждения на вольфрамовое микроволокно, и поэтому оно очень дорогое. Его удельная прочность близка к аналогичному показателю E-стекловолокна, а низкое значение предельного удлинения роднит его с волокном Nextel, что ограничивает его применение в противобаллистических слоистых композитах. Объем производства данных волокон относительно невелик по сравнению с арамидными, стеклянными и полиэтиленовыми волокнами, и поэтому в качестве возможного бронематериала его рассматривают редко.

Углеродные и графитовые волокна

Различные методы позволяют производить углеродные волокна в больших объемах. Их применяют в областях, где требуются либо высокая жесткость, либо вы-

сокая прочность. Углеродное волокно [9] обычно получают пиролизом органических волокон-прекурсоров, например, целлюлозного или полиакрилонитрильного (ПАН) волокна. Таким способом получают волокна с достаточно высоким модулем упругости и высокой прочностью, однако для этого часто требуется стадия частичной графитизации при температурах около 2000°C. Дальнейшая графитизация повышает степень кристалличности волокон, которые в этом случае именуют «графитовыми». В альтернативном процессе производства используют пековые мезофазные волокна, из которых пиролизом получают графитовые волокна с очень высоким модулем упругости. Пековые углеродные волокна имеют меньшую прочность при растяжении. На рис.12.1 представлена диаграмма растяжения высокопрочных углеродных IM7 волокон, имеющих средний модуль упругости. Предполагается, что такие волокна обладают оптимальными свойствами для использования в противобаллистических материалах.

Хотя удельная прочность этих волокон аналогична соответствующим характеристикам других современных противобаллистических волокон, их предельное удлинение (1,8%) ниже, чем у конкурирующих с ними арамидных и полиэтиленовых волокон. Ранее предлагалось использовать данные волокна в виде тканей совместно со стандартными противобаллистическими матрицами, однако такая структура может оказаться не вполне подходящей для этих довольно хрупких волокон. Вполне возможно, что невысокие баллистические свойства этих волокон объясняются их повреждением в процессе тканья. Cunniff [10] сообщил о привлекательных баллистических характеристиках волокна M5 (M5 00 на рис. 12.1). В своей работе он испытывал поперечно ориентированный слоистый композит на основе волокон M5. Возможно, прежде чем окончательно отказаться от использования углеродных и графитовых волокон в противобаллистической броне, имеет смысл направить усилия на попытку разработки таких материалов.

Хрупкость углеродных волокон компенсируется их высокими характеристиками при сжатии. Большая прочность при сжатии обеспечивает большую прочность при изгибе слоистого композита, что может оказаться как преимуществом, так и недостатком бронематериала. При высоком значении модуля упругости слоистый углепластик будет иметь высокий импеданс. Это свойство полезно для контроля развития растягивающих нагрузок, которые образуются на границах раздела при отражении волн сжатия. Располагаясь за керамической облицовкой, углепластик способствует удержанию осколков керамики после ударного воздействия. Большая жесткость на изгиб ограничивает расслаивание керамической пластины и углепластика, что улучшает эффективность прилегающих участков брони, которые могут подвергнуться повторному удару. Потенциальная жесткость углепластика обусловлена высокими характеристиками углеродных волокон как при сжатии, так и при растяжении. В гибридных волокнистых композитах углеродные волокна могут вводиться для придания материалу жесткости, если он излишне податлив. Углеродные и стеклянные волокна могут использоваться в слоистых композитах, от которых требуются одновременно высокие баллистические и конструкционные характеристики.



12.2.2. Органические волокна

После появления в конце 1930-х гг. синтетических текстильных волокон (рейона и нейлона) химики непрерывно создавали новые волокна со все более возрастающими прочностью и жесткостью. В 1960-х гг. был синтезирован класс полимеров, получивших название «арамиды» [11]. Мы не будем описывать химическую структуру всех видов арамидных полимеров и остановимся только на тех из них, из которых броня уже либо производится, либо может делаться в будущем.

Вероятно, самым известным противобаллистическим волокном в настоящее время является Kevlar®. Это волокно было выпущено фирмой DuPont в 1971 г. и нашло применение в броне на основе тканей и слоистых композитов [12]. Высокие прочность и модуль упругости этих волокон позволили снизить вес брони при сохранении ее защитных свойств. Первые два сорта этих волокон с линейной плотностью 200 и 400 денье соответственно получили названия Fiber В и PRD 49. Через год фирма DuPont перешла на производство волокон с более высокой линейной плотностью (1000 и 1500 денье), переименовав их в Kevlar 29 и Kevlar 49.

По оценке автора настоящей статьи, за последние 34 года на производство противобаллистических материалов ушло более 18 000 т волокон Kevlar, из которых изготавливали каски, бронезилеты, подшлемники, подложки керамических панелей, противоосколочные завесы и многое другое. Улучшение механических свойств волокон Kevlar и оптимизация конструкции тканых материалов, границы раздела волокон и матрицы, а также свойств матрицы позволили снизить вес индивидуальной брони и повысить степень защиты от все более мощных боеприпасов.

Поли(р-фенилен терефталамид) синтезируют путем реакции поликонденсации диамина р-фенилендиамина и терефталойлхлорида в амидном растворителе. Полученный полимер растворяют в серной кислоте. В результате образуется анизотропный жидкокристаллический раствор, из которого при течении через фильеры формируются волокна. Технологический режим процесса подбирают таким образом, чтобы получить волокно с определенными механическими свойствами. В изделиях противобаллистического назначения требуется эффективное поглощение энергии осколков или пуль. Подход, принятый государственными ведомствами США, предусматривает повышенную «вязкость» данных волокон. В ответ на эти требования фирма DuPont разработала волокно Kevlar KM2®, которое имеет повышенные вязкость и удлинение при разрыве. Одновременно была снижена линейная плотность нитей с 850 до 600 и 400 денье, что позволило перейти к производству более качественных тканей. Подробности изменения структуры слоистых композитов приводятся ниже. Отметим лишь, что эффективность многослойной композитной брони на основе волокон Kevlar 29 возросла примерно на 15%, что явилось прямым результатом повышенной вязкости волокон Kevlar KM2.

С волокнами Kevlar конкурирует Twaron®, выпускаемый в Нидерландах фирмой Teijin. Это волокно было разработано фирмой Akzo Nobel и теперь продается во всем мире в том же товарном виде, что и Kevlar. Один из новых видов этого волокна производится под маркой Twaron СТ [13]. В нем используются более тонкие волокна с линейной плотностью 0,84 текс, в то время как линейная плотность

волокон Kevlar равна 1,5 денье. При одинаковых механических характеристиках волокон уменьшение их толщины позволяет повысить баллистическую эффективность брони. Как отмечалось выше, баллистические характеристики брони зависят от конструкции слоистого композита, и уменьшение толщины волокон позволяют получить более тонкую ткань.

Арамидные волокна Technora® производит японская фирма Teijin Limited. По сообщению Yang [2], данный ароматический сополиамид в настоящее время используют для производства автомобильных шин. В отличие от волокон Kevlar, его изготавливают из изотропного раствора и вытягивают при высокой температуре, что обеспечивает высокую степень кристалличности и ориентации. Его прочность при растяжении аналогична прочности волокон Kevlar, но более высокое удлинение (4,3%) обеспечивает большую баллистическую эффективность даже по сравнению с КМ2. Yang [2] сообщает, что баллистические испытания данного волокна не выявили увеличения бронезащитных свойств. В действительности наблюдалось даже их снижение. Другие исследователи пришли к аналогичным выводам, поскольку данное волокно так и не нашло сколько-нибудь широкого применения в противобаллистических материалах. Возможно, имеет смысл повторить такие испытания, обратив внимание на структуру бронематериалов.

В последние годы на Западе в небольших количествах стали появляться арамидные волокна российского производства (Армос, СВМ, Русар, AuTxHt). В англоязычной литературе о них имеется мало информации, и часть ее была получена из Интернета. Поскольку оценка их свойств из-за недостаточного количества образцов была затруднена, к опубликованным характеристикам следует подходить с осторожностью. На приводимые данные могут оказывать влияние различия в методах испытаний, числа волокон в нити и степени кручения нитей. Плотность полимеров составляет 1,43–1,47 г/см³, что характерно для всего класса арамидов, со значительными вариациями у сополимеров или различных гомополимеров. Опубликованные значения предела прочности волокна «Русар» равны 3,3 ГПа, а предельное удлинение 3,0%, что свидетельствует о несколько меньшей вязкости, чем у волокна Kevlar КМ2®. Опубликованное значение предела прочности AuTxHDTE составляет 4,2 ГПа при предельной деформации 2,3%, что может говорить о потенциально более высоких баллистических характеристиках этого волокна. Однако окончательный вывод можно будет сделать только на основании испытаний. При этом для корректного сравнения свойств волокон необходимо обеспечить идентичность конструкции мишеней.

За последнее десятилетие в промышленности России многое изменилось. Во времена СССР ежегодное производство данных волокон предположительно составляло примерно 1800 т. В настоящее время объем их производства, скорее всего, несколько ниже, причем упор делается на военные нужды. Следует ожидать консолидации российских производственных мощностей. Переход к конкуренции на свободном рынке должен повлиять на работу остающихся в руках государства предприятий, особенно в условиях нынешней финансовой стабильности и наличия независимых источников сырья. В этой области грядут большие перемены.



Yang [2] суммировал данные об известных ароматических волокнах, многие из которых производятся в промышленных масштабах. Автор отмечает интересный факт, что не все предлагаемые волокна обладают наивысшей прочностью. В частности, прочность полиазаметина MePPD-ТА равна 38 г/денье, сополиамида PPD/DMeBPS-Т – 31 г/денье, а у выпускавшегося в свое время ароматического полиэфира Ekonol – также 31 г/денье. Таким образом, все они имеют более высокую удельную прочность, чем Kevlar КМ2. Разумеется, баллистические испытания волокон, производство которых прекращено, проблематичны. Дальнейшее изучение баллистических свойств этих волокон могло бы явиться общим направлением работ по усовершенствованию волокон. Альтернативой этому может оказаться возврат к снятым с производства волокнам с целью оценки их баллистического потенциала.

ПБО, ПБТ, ПБИ и АВ ПБО являются ароматическими гетероциклическими полимерами с высокими значениями прочности при растяжении и жесткостью. Yang [2] описывает разработку этих волокон вплоть до внедрения в производство. ПБИ волокна используют в огнезащитных костюмах, но их прочность ниже многих других волокон, что исключает их применение в броне. Три остальных типа волокон были разработаны фирмой SRI Research International в рамках программы создания новых полимеров по заказу ВВС США. Опытное производство волокон РВО было начато фирмой Dow Chemical в середине 1990-х гг., однако потом они с американского рынка исчезли. Фирма Toyobo (партнер Dow Chemical по совместному японскому предприятию) приобрела лицензию на выпуск волокон ПБО и теперь в ограниченных количествах предлагает их под торговой маркой Zylon (производственные мощности фирмы составляют 400 т в год). Выпускаются два сорта этих волокон, а именно Zylon-AS и Zylon-НМ, причем первое имеет рекордную удельную прочность. Результаты баллистических испытаний брони на основе волокон ПБО приводит Sunniff [14]. Перспективны как ткани, так и слоистые композиты на их основе. Нехватка производственных мощностей и недавно выявленное ухудшение свойств во влажных условиях при повышенных температурах [10] порождают сомнения в перспективе практического применения волокон ПБО в бронематериалах.

Волокна М5 из жесткоцепного полимера ПИПД [15] были относительно недавно разработаны фирмой Akzo Nobel, которая продала лицензию на их производство фирме Magellan International Limited. Благодаря водородным связям, связывающим полимерные молекулы в перпендикулярном направлении, волокно имеет не только высокую прочность при растяжении, но и неплохую прочность при сжатии. На рис. 12.1 приведены ожидаемые свойства этих волокон в перспективе. Оценка в 9,5 ГПа может оказаться завышенной, и предполагаемое значение деформации при разрыве в 2% может понизить баллистические характеристики этих волокон до уровня высокопрочных графитовых волокон. При баллистическом ударе волокнам М5 может быть свойственна хрупкость, но этот недостаток, вероятно, можно устранить, изменив структуру слоистого композита и используя более пластичную матрицу. Даже если бы прочность этих волокон осталась на уровне арамидов, М5 благодаря своей прочности при сжатии позволи-

ли бы создать слоистый композит, армированный одними лишь этими волокнами, устранив необходимость гибридизации. Предварительные испытания показали, что воздействие ультрафиолетовых лучей и влаги при высоких температурах ухудшает свойства М5 меньше, чем ПБО [10].

Высокая прочность при сжатии, определяемая путем изгиба, свидетельствует о потенциале использования данных волокон в конструкционных материалах, где они могут конкурировать с углеродными и графитовыми волокнами. Результаты баллистических испытаний полученных в лабораторных условиях поперечно ориентированных композитов представлены в [10]. Несмотря на сравнительно невысокие механические свойства, этот композит вполне успешно выдержал баллистические испытания. Расширение опытного производства волокон М5 в Ричмонде, штат Вирджиния, должны закончиться в начале 2005 г. Появились сообщения об улучшении механических свойств этих волокон [10], и весьма вероятно улучшение их баллистических свойств.

Сверхвысокомолекулярные полиэтиленовые (СВМПЭ) волокна представляют собой относительно недавнюю (середины 1980-х гг.) разработку фирмы DSM, в которой используется процесс гельформования. Появление на рынке этих весьма прочных волокон под марками Dyneema в Европе (DSM) [16] и Spectra в США (фирма Allied, теперь Honeywell) [17] позволило частично заменить арамидные волокна во многих видах брони. Безусловно, частично это было вызвано более высокой прочностью при растяжении. Прочность при растяжении волокон Dyneema SK77 составляет 4,0 ГПа, модуль упругости 140 ГПа, а деформация при разрыве — 3,7%. Волокна Spectra 2000 фирмы Honeywell имеют близкие характеристики: прочность при растяжении 3,7 ГПа, модуль упругости 132 ГПа и деформацию при разрыве 2,9%. Плотность волокон обеих марок равна 0,97 г/см³. Это означает, что их удельные характеристики выше, чем у других имеющихся на рынке волокон.

Как уже отмечалось, баллистическая эффективность брони определяется не только свойствами волокон. Она зависит также и от структуры волокнистого материала. Характеристики слоистого композита зависят от геометрии волокон, строения нитей, характеристик границ раздела, кручения нитей, толщины слоев, последовательности их укладки, типа, количества и распределения матрицы, параметров ткани и методов производства. Очевидной тенденцией производства брони, следующей из анализа объемов ее производства, является все более широкое использование арамидных волокон в виде тканей. СВМПЭ волокна используются преимущественно в форме поперечно ориентированных многослойных композитов. Различия в типе смол, толщине слоев и адгезии будут обсуждаться ниже. Не существует ясности относительно того, какая доля баллистических свойств определяется свойствами волокон, а какая — всеми прочими факторами.

12.3. Сравнение тканых и нетканых материалов

В современных слоистых бронекompозитах обычно используют волокна в двух основных видах. Оба вида использовались для производстве брони, начиная с конца Второй мировой войны [1, 3]. Это многослойные композиты на основе ткани и

поперечно ориентированных однонаправленных слоев волокон. В композитах обоих типов использовали одни и те же термореактивные матрицы. Их применяли для изготовления касок и нагрудных пластин военных летчиков и морских пехотинцев. Нейлоновые ткани использовали в противобаллистических защитных одеялах в сочетании с полиэфирной смолой — для производства бронепанелей, а в сочетании с фенольной смолой — для подшлемников. Из поперечно ориентированных стеклопластиков на основе полиэфирной смолы производили индивидуальную броню, защищающую туловище военнослужащего. В 1960–70-х гг. тяжелые стеклоткани корзинного переплетения постепенно заменили однонаправленный *Doron* в качестве подложки керамических панелей [18–20].

После выпуска на рынок волокна *Kevlar*[®] в 1971 г. [12] в броне стали использовать в основном арамидные ткани. Их структура была аналогична нейлоновой ткани. Баллистические свойства улучшились еще больше после оптимизации линейной плотности, типа переплетения и плотности ткани, а также поверхностной обработки волокон [21, 13, 25]. Было установлено, что баллистическая эффективность улучшается при снижении линейной плотности нитей, а также при оптимизации других параметров, не связанных с ее структурой. Эти тенденции не являются универсальными. Обнаружились значительные различия во взаимодействии таких бронематериалов с жесткими стальными осколками и с мягкими пистолетными свинцовыми пулями. Аналогично, оптимальные параметры тканого безматричного материала могут отличаться от оптимальных параметров многослойного поперечно ориентированного композита такой же поверхностной плотности.

Теоретический анализ влияния строения материала на его баллистическую эффективность можно найти в работах [4, 3, 22, 23]. Было высказано предположение, что в местах пересечения нитей частично отражаются волны деформации, распространяющиеся от точки удара. Следовательно, плотность пересечений должна оказывать влияние на распределение деформации вдоль нитей, участвующих в удержании снаряда. Согласно этой гипотезе при снижении плотности пересечений нитей следует ожидать снижения веса бронепакета. При меньшей плотности пересечений деформация вблизи точки удара будет уменьшена, в результате чего длительность растяжения до локального разрыва ткани возрастет. В текстильной промышленности используют понятие коэффициента покрытия, характеризующего долю поверхности, полностью покрытой волокнами. При коэффициенте покрытия 100% обеспечивается взаимодействие максимального количества волокна со снарядом. Материалы с высоким коэффициентом покрытия (тканые или из однонаправленных волокон) обладают наибольшей деформационной энергоемкостью непосредственно в месте удара снаряда. В таких материалах также ограничено боковое смещение нитей вблизи точки удара. Обе эти причины способствовали усовершенствованию брони, структура которой стала включать множество слоев легкой ткани с высоким коэффициентом покрытия. Отметим также, что прочность волокон в ткани зависит от способа переплетения нитей. Прочность выдернутых нитей часто измеряют в процессе разработки ткани, т.е. еще до начала ее промышленного производства. Предприятие-производитель может

изменять степень крутки, состояние поверхности и отделку нитей, чтобы в производстве ткани свести к минимуму их повреждаемость.

Фирма Allied после появления СВМПЭ волокон Spectra в середине 1980-х гг. вернулась к материалам с однонаправленной структурой [23]. Материалы марки «Spectra shield» представляют собой поперечно ориентированные однонаправленные слои очень тонких волокон, склеенных эластомерной матрицей Kraton® фирмы Shell. Эти материалы делают укладкой очень тонких лент волокон, что потребовало наложения большого числа слоев, чтобы вес композита оказался достаточным для остановки снарядов. Сочетание тонких однонаправленных слоев высокопрочных волокон и эластомерной матрицы позволило создать весьма совершенный бронематериал, эффективно останавливающий высокоскоростные винтовочные пули. Помимо фирмы Honeywell теперь аналогичные бронематериалы производят и другие компании, например, DSM [16], Park Technologies и FMS. Сообщается, что за счет введения этих материалов было достигнуто 30%-ное уменьшение веса или улучшение защитных свойств бронезилетов и композитных бронепанелей [16].

Улучшение баллистических свойств потребовало определенных компромиссов. Производственные затраты при наложении большего количества слоев могут превышать затраты на изготовление материалов на основе сравнительно тяжелых тканей. Структура переплетения материала, жесткость матрицы и ее адгезия к волокнам также влияют на баллистические свойства. В отличие от тканей, однонаправленным слоям волокон не свойственна начальная нелинейная область на диаграммах напряжение—деформация. Однако такая нелинейность весьма характерна для тканей при распрямлении изогнутых нитей. Тканые материалы вначале более податливы, что увеличивает их удлинение при разрыве. При взаимодействии со снарядом бронематериал частично повреждается. Гибкому материалу часто свойственен большой прогиб в области удара. Для однонаправленных систем характерен большой размер области повреждения. Такие повреждения могут включать расслоение, которое влияет на статические свойства структуры. Поперечное смещение обратной стороны бронепанели часто оказывается столь значительным, что может вызвать серьезную травму. В зависимости от свойств снаряда и скорости удара в ограниченном диапазоне этих параметров одна конструкция брони может оказаться эффективнее другой. Технологические параметры изготовления композита также оказывают влияние на его эксплуатационные характеристики. В последующих разделах мы рассмотрим этот вопрос.

В системах индивидуальной бронезащиты ограниченное применение нашел еще один тип нетканых материалов. Речь идет об обработанных иглами нетканых материалах типа войлока, первоначально делаемых из нейлона, а затем и из волокон Kevlar [3]. Результаты исследований войлоков на основе различных волокон опубликованы в [26]. Автор сообщает о преимуществах размещения войлока между основными противобаллистическими слоями и телом человека, что ограничивает запреградную деформацию и снижает опасность травмирования. При выборе материала для индивидуальной брони определяющим параметром остается его вес. Сами по себе войлоки остаются одним из самых легких материалов, способ-



ным останавливать сравнительно низкоскоростные осколки. К сожалению, современная тенденция развития средств поражения заключается в росте доли высокоскоростных мелких осколков, от которых один лишь войлок защитить не может. Другой недостаток войлоков [3] заключается в их склонности поглощать и удерживать влагу. Эта проблема частично решается помещением войлока во влагонепроницаемый мешок или обработкой нитей водоотталкивающим покрытием. Оба способа могут отрицательно повлиять на комфортабельность брони или ее баллистические свойства, и поэтому войлоки пока не получили широкого распространения.

Войлоки способны останавливать осколки с относительно невысокой скоростью, если имеются волокна, ориентированные вдоль траектории полета осколков. Характер прогибания войлоков существенно отличается от прогибания как тканых, так и поперечно ориентированных композитов. В войлоке образуется более узкая и глубокая вмятина, что может оказаться нежелательным для индивидуальной брони, поскольку это повышает запреградную деформацию и опасность травмирования.

12.4. Противобаллистические матрицы и препреги

Однонаправленные слои волокон склеивают полимерной матрицей. Композиты противобаллистического и конструкционного назначения различаются типом полимерной матрицы, свойствами границы раздела и структурой армирования. Свойства слоистых композитов обоих классов зависят от их структуры. В работе [27] описывается корреляция баллистических свойств и жесткости слоистых композитов. Наивысшие баллистические свойства имеют слоистые композиты со сравнительно низкой жесткостью при изгибе. Жесткость композита при изгибе зависит от модуля упругости матрицы, осевой жесткости волокон, количества и структуры слоев, распределения матрицы и адгезии между волокнами и матрицей. В меньшей степени изучено влияние на поперечную жесткость межслоевого армирования (Z-образного сшивания). Однако оно позволяет повысить межслоевую прочность (при растяжении и сдвиге) до значений, превосходящих свойства чистой матрицы.

Уже давно стала понятна связь баллистических характеристик и свойств волокон при растяжении. В первых противобаллистических слоистых композитах использовали фенольные или полиэфирные матрицы, массовая доля которых была чуть менее 25%. Позднее в качестве матрицы стали использовать и более податливые эластомеры. Их использовали в касках, нагрудных пластинах и подложках бронепластин, поддерживающих керамический лицевой слой. Оптимальное содержание матрицы определяли опытным путем. Жесткость на изгиб таких композитов ниже, чем у слоистых материалов конструкционного назначения. Более низкое содержание матрицы также способствует снижению жесткости материала. Пониженное содержание матрицы приводит к увеличению доли волокон, что улучшает баллистические свойства композита, поскольку именно волокна играют главную роль в процессе ударного воздействия.

Miner [21] приводит обзор экспериментальных результатов испытания материалов на основе волокон Kevlar®. Эпоксидные матрицы имеют высокий модуль упругости, но их баллистические свойства оказались плохими. Помимо модуля упругости матрицы на баллистические и конструкционные характеристики оказывают влияние ее содержание, смачиваемость и жесткость волокон. Все бронесистемы должны удовлетворять некоторому набору требований, в том числе и к конструкционным характеристикам. Во многих случаях приходится искать компромисс между баллистическими свойствами и необходимостью ограничить поперечное прогибание композита, поддерживающего керамическую облицовку, особенно в условиях множественных ударов. В литературе описаны примеры использования эластомерных матриц, в которых конструкционные свойства по большей части не учитывались [28–30].

В последнее время появились полимеры, которые позволили повысить уровень баллистических свойств, правда, без серьезного учета конструкционных требований. В органопластиках на основе арамидных тканей до сих пор нередко используют фенольные смолы, пластифицированные каучуком (поливинилбутиральным), но их весовую долю снизили до 10–12% (шлем АСН) по сравнению с начальными 15–20% (шлем PASGT). Метод получения препрега изменился от нанесения барабаном раствора матрицы до использования частично отвержденной полимерной пленки. Фирма Allied [31] разработала модифицированную винилэфирную матрицу с низкой температурой отверждения, подходящую для формования касок из СВМПЭ волокон Spectra®. Таким образом, в настоящее время на основе тканей и термореактивных смол старого типа созданы препреги с улучшенными баллистическими характеристиками.

Помимо модифицирования процесса нанесения матрицы изменения коснулись и поверхностной обработки волокон. Riewald *et al.* [32] описывают разработку нового препрега на основе волокон Kevlar, из которого теперь изготавливают высокоэффективные шлемы для экипажей боевых машин, а также современную каску АСН.

Помимо разработки более деформативного волокна Kevlar КМ2® с пониженной линейной плотностью нитей (850 денье), из которых делают легкую ткань (31 × 31 нитей на дюйм [2]), существенным нововведением стало локальное нанесение фторполимера на поверхность ткани. Такая «граница раздела с модифицированным сцеплением» способствует усиленному расслаиванию материалу при баллистическом ударе. Она также может ограничивать смачивание препрегов при классическом нанесении матрицы методами накатки, погружения в раствор или напыления жидкости. Этот прием особенно полезен для тонких тканей с низкой поверхностной плотностью.

Последние тенденции в технологии получения слоистых материалов состоят в использовании высокопрочных волокон в сочетании с очень податливыми термопластичными матрицами. В начале 1980-х гг. матрицы из каучука, силиконового эластомера [28–30] и термопластов с низким модулем упругости наносили в виде покрытия для ткани, из которых затем прессовали многослойные пластины. Такие «податливые» слоистые композиты имели более высокие баллистические

свойства по сравнению с аналогичными волокнистыми композитами на основе классических термореактивных смол.

Позднее в 1980-х гг. фирма Allied Chemical разработала новый материал на основе волокон Spectra и термопластичного эластомера Kraton® и выпустила композит «Spectrashield», состоявший из нескольких поперечно ориентированных однонаправленных слоев. Из него изготавливали и гибкую, и жесткую формованную броню. При равном весе системы с низкомолекулярными матрицами более эффективны из-за способности слоистых композитов к прогибанию при ударе. Из-за высокой податливости и склонности к расслаиванию такие композиты сильно прогибаются вплоть до наступления разрушения. Как отмечалось выше, это может негативно отражаться на способности брони предотвращать травмирование и поддерживать керамический слой в случае множественных попаданий пулями. Термопластичные матрицы низкой термостойкостью не всегда можно применять, если броня может подвергаться даже кратковременному воздействию высоких температур. Термостойкость, горючесть и ползучесть при сравнительно небольших нагрузках могут ограничивать сферу применения этого вида броне-материалов.

Значительное улучшение свойств слоистых материалов в последнее десятилетие связано с появлением препрегов типа «shield», выпускаемых фирмами DSM, Honeywell и Park Technology, а также тканей, покрытых термопластичной матрицей, поставляемых широким кругом производителей. Несмотря на определенные ограничения, связанные с патентным правом, имеется возможность разнообразного сочетания многочисленных пленок, смол и текстильной продукции с целью создания брони. При отсутствии одного из таких составляющих его можно заменить на другой компонент без существенного ухудшения эксплуатационных свойств изделия. К сожалению, даже сейчас мы не можем предсказать результат такой замены, так что перед принятием решения о внедрении брони в производство необходимо изготовить прототип брони и провести стандартные баллистические испытания.

12.5. Керамические и другие облицовочные материалы

За исключением средств индивидуальной защиты личного состава, все прочие виды брони изготавливаются по большей части из металла. В гусеничных боевых машинах и на военно-морских судах раньше преимущественно использовали сталь и алюминиевые сплавы, поскольку в этом случае снижение веса брони не играло первостепенной роли. Положение стало меняться во время Второй мировой войны благодаря появлению искусственных волокон (полимерных нейлоновых и неорганических стеклянных). В течение последующих десятилетий на рынок были выпущены более прочные волокна, которые в конечном счете начали применять для изготовления брони, защищавшей от пуль и осколков и более легкой, чем аналогичная броня из металла. По мере совершенствования брони возрастала и поражающая способность различных снаря-

дов. Осколки от взрывных устройств приобретали все большую скорость, а сердечники бронебойных пуль становились все тверже, и поэтому одной лишь брони из волокнистых композитов оказалось недостаточно. Было очевидно, что бронематериалы должны обладать той же твердостью, что и снаряды, защиту от которых они призваны обеспечить. Твердость низкоуглеродной стали и алюминиевых сплавов постоянно возрастала. Уже в 1918 г. сообщалось [33], что слой твердой эмали толщиной 1,6 мм на стандартной стальной броне повышает ее способность останавливать пули. Аналогичное эмалевое покрытие использовалось в немецких танках во Второй мировой войне. Во время войны армия США испытывала возможности стекла [34] для защиты от снарядов с зарядом направленного действия. Позже, в 1950-е гг. [35], делались попытки заменить некоторые виды стали на более эффективные стекла. В качестве твердой облицовки в 1945 г. военно-морской врач капитан 3-го ранга А.П. Уэбстер [18] предложил использовать оконное стекло в соединении с доронем. Для испытаний использовали винтовочные пули 0.30 калибра. До этого для повышения степени защиты от высокоскоростных осколков и винтовочных пуль перед слоями кожи и шелковых и нейлоновых тканей предлагалось использовать сталь и алюминиевые или титановые сплавы. При меньшем собственном весе сочетание стекло/композит обеспечивало ту же степень защиты, что и металл. По этой причине конструкторы систем индивидуальной защиты и других видов брони проявляли неослабевающий интерес к керамике.

Cook [36] запатентовал броню, состоящую из слоя окиси алюминия на слоистом материале дорон. После публикации его работы в 1963 г. многие исследования в США были направлены на изучение механизма остановки снаряда броней и на дальнейшее комбинирование материалов с целью снижения веса и повышения эффективности [18–20]. Wilkins [37] сочетал экспериментальные исследования и расчеты методом конечных разниц Лагранжа для изучения принципов работы облегченной брони. В этой работе отмечается, что броня сначала останавливает переднюю часть снаряда, но после накопления повреждений его задняя часть пробивает раскрошенный материал. Керамические плиты из окиси алюминия приклеивали к основанию из алюминия или слоистого стеклопластика на основе E-волокон. Исследовалось влияние соотношения масс керамики и подерживающей панели, и описывались свойства керамических материалов, имеющих различную плотность, твердость, модуль упругости и вязкость. Ясная корреляция между механическими свойствами и баллистической эффективностью установлена не была. Тем не менее, имеются указания на то, что материалы с высокой прочностью при сжатии и твердостью, а также малой плотностью имеют повышенную баллистическую эффективность. Помимо выявления потенциально эффективных керамических материалов, Wilkins классифицирует их в зависимости от механических свойств и величины баллистического предела. Наивысшие места в его классификации занимают карбид бора горячего прессования, карбид кремния и окислы бериллия, за которыми следуют те же самые материалы в спеченном виде. Stiglich [38] привел похожую классификацию потенциальных бронематериалов, но без результатов баллистических испытаний. Другим важ-

ным критерием отбора он считал доступность материалов. Он высказал предположение, что повышенную эффективность могут иметь керамические материалы с градиентами свойств и неплоской геометрической формой.

Результаты более поздних исследований баллистических свойств керамики представлены в материалах многочисленных научных симпозиумов по этой проблеме [39–41]. Существенно возросло значение стоимости и доступности материала, поскольку в транспортных средствах требуется броня с повышенным уровнем защиты и пониженным весом, и все это при значительной защищаемой площади. Даже производство нагрудных панелей небольшого размера привело к перегрузке производственных мощностей из-за больших объемов заказов (30 000 комплектов в месяц только для бронесистемы Interceptor). Gooch [42] приводит обзор фирм-производителей противобаллистической керамики и описывает ее применение в конструкции боевых машин. Вследствие большого спроса на керамику предпочтение часто отдается менее дорогим материалам, в которых связь микрокристаллов достигается недорогими технологическими методами спекания или химической связи, которые вытесняют более эффективную керамику горячей штамповки. В меньшей степени изучены композиты на основе керамических волокон и металлической и керамической матрицы, однако они обладают потенциально более низкой себестоимостью и большей вязкостью, что в конечном счете должно привести к вытеснению ими более дорогих B_4C , SiC и TiB_2 горячей формовки. Сравнительно новой тенденцией разработки брони стала инкапсуляция керамических плиток в баллистически эффективной матрице. Керамические плитки можно помещать в металлическую матрицу методомковки или литья. Такие плитки можно помещать в композиционные материалы на основе металлической или керамической матрицы. Свойства границы раздела между слоями керамики и подложки, поперечные размеры плиток, степень ограничения движения их граней, а также свойства лицевых пластин — все эти факторы влияют на эксплуатационные характеристики брони. При разработке бронесистемы помимо технологических факторов должны учитываться проблемы крепления бронепластин и их себестоимость.

Для баллистических испытаний необходимо связать передний керамический слой с поддерживающим материалом. Синергизм свойств этих двух сильно различающихся материалов позволяет получить оптимальную броню. В некоторых случаях, и, в частности, для защиты от пуль с закругленной головкой, предпочтение отдается конструкциям с тонким керамическим слоем и более толстым слоем подложки. Для защиты от бронебойных пуль с твердым сердечником наряду с более жесткой подложкой требуется более твердый и толстый слой керамики. Обеспечение защиты от множественных попаданий пуль обоих видов может потребовать большей податливости соединения слоев и одновременно большей жесткости структуры в целом. Поскольку керамика не подходит на роль несущего компонента, ее должен играть поддерживающий слой. Конструкция брони транспортных средств зависит от способа крепления, монтажа и даже требований к качеству дорожного покрытия. Все эти факторы влияют на эффективность керамической брони.

12.6. Технология производства

Методы изготовления брони столь же стары, как и история техники. Классический метод состоит в создании армированных композитов на основе тканей и терморезактивных смол типа фенольной или полиэфирной. Каски, подложки керамических нагрудников и противоосколочные бронепанели изготавливали методом прессования при повышенной температуре из препрегов (тканей с частично отвержденной матрицей). Для их изготовления стальные формы выдерживали при определенной температуре вплоть до полного отверждения матрицы, после чего давление снимали. Давление формования обычно составляет 300–3000 psi. Плоские пластины обычно формовали при более низком давлении, а каски – при давлении не менее 2000 psi. Попытки формования касок при пониженном давлении, например, в вакуумном мешке или в автоклаве приводили к снижению баллистических свойств. Самые современные процессы изготовления композитов, например, методы инъекции матрицы или вакуумной пропитки для противобаллистических слоистых композитов не годятся, поскольку в них доля матрицы не должна превышать 20%. Эти процессы годятся только для изготовления слоистых структур с весовой долей матрицы выше 50%. Исследования показали, что давление формования почти не влияет на баллистические характеристики композитов на основе препрегов с пониженным содержанием терморезактивной матрицы. Необходимость в высоком давлении обусловлена низким содержанием матрицы и искусственным снижением смачиваемости волокон в противобаллистических препрегах. Повышенное давление необходимо также для устранения складок и снижения пористости материалов с плохо текущей матрицей.

Alesi [43] приводит результаты испытания перспективных материалов на основе терморезактивных и термопластичных смол. Испытывались плоские пластины и каски. Формование осуществляли при температуре от 120 до 145°C в автоклаве при давлении 75 psi и в стальных пресс-формах при давлении 2500 psi. Автор отметил, что в образцах плоской формы увеличение давления приводит к снижению прочности склейки слоев, определяемой методом раздира. Производство [44] материалов Spectrashield и Dyneema UD показало, что баллистические свойства улучшаются при сравнительно высоких давлениях формования (2500 psi). Чтобы исключить повреждения волокон, необходим тщательный контроль условий формования. Из приведенных наблюдений можно сделать следующие заключения. Более низкое сопротивление расслоению предполагает большую податливость при остановке снаряда. Высокая податливость при изгибе способствует высокой баллистической эффективности.

Alesi [43] описывает попытки изготовления шлемов из материалов на основе различных волокон и термопластичных матриц. Выпускавшийся в середине 1980-х гг. материал «ХР» представлял собой ориентированную полипропиленовую ленту. После выкладки слоев ленты в различных направлениях каску прессовали при повышенной температуре, а затем охлаждали до комнатной температуры при постоянном давлении. Полученный материал имел хорошие баллистические свойства, но был излишне податлив. Для повышения износостойкости на сердцевину

из материала ХР перед прессованием укладывали поверхностные слои стеклопластика или органопластика на основе волокон Kevlar и фенольной матрицы. Позднее был разработан материал, состоящий из волокон Kevlar и фенольной матрицы, пластифицированной ПВБ.

Недавние разработки материалов на основе термопластичных матриц позволили снизить вес брони, хотя при этом обычно ухудшались ее конструкционные свойства. Как отмечалось выше, препреги марки Spectrashield состоят из термопластичных СВМПЭ волокон и термопластичной эластомерной матрицы. Каски изготавливали из поперечно уложенных однонаправленных слоев и термопластичной матрицы. Ранее для этого использовали также и арамидные ткани.

Материалы на основе термопластичных матриц требуют иной технологии производства, чем в случае терморезактивных матриц. Перспективные матрицы и соответствующие процессы производства рассмотрены в статье [45]. Консолидация изделия ограничена не кинетикой процесса отверждения, как в случае терморезактивных матриц, а теплопроводностью материала. Термопластичные материалы поддаются повторной переработке и ремонту. Поскольку отверждение в этом случае не лимитирует продолжительность цикла формования, формование деталей можно осуществлять очень быстро. Например, нормальный цикл формования каски PASGT из органопластика на основе волокон Kevlar и фенольной ПВБ матрицы составляет приблизительно 20 мин. Термоформование, применяемое фирмой Sato Ringstad A/S Norway, с использованием предварительно формованного материала из волокон Kevlar и нейлоновой матрицы (TEPEX) [46], предположительно занимает менее 5 мин., включая предварительное формование. Эта технология используется при производстве касок, находящихся на вооружении норвежской армии.

Существенное преимущество материалов на основе термопластичных матриц заключается в потенциальной способности придавать плоским препрегам сложную форму, избегая тем самым множественных наложений и необходимости обрезки материала. Такая способность может быть достигнута изменением структуры ткани так, чтобы возможна была большая сдвиговая деформация, или посредством предварительной обработки волокон. Последняя возможность была реализована в 1990-е гг., когда был выпущен материал LDF [47], состоящий из длинных рубленых сильно выровненных волокон и термопластичной матрицы. Материал делали из различных волокон, включая стеклянные, углеродные и арамидные. Этот класс материалов позволяет использовать различные технологические методы, включая вакуумформование и формование при низком давлении. К сожалению, баллистические свойства слоистых LDF композитов всегда оказывались хуже, чем у аналогичных материалов на основе непрерывных волокон. Описанная система может оказаться приемлемой, когда требуется достижение компромисса между весом, защитными свойствами и сложной формой изделия.

12.7. Новые противобаллистические материалы

Слоистая броня впервые появилась во время Второй мировой войны. Впоследствии ее начали использовать очень широко вследствие того, что она гораздо лег-

че брони из обычной стали. Gooch [42] приводит подробный обзор применения керамической брони в военной области за последнее десятилетие. В этой работе наряду с керамическими материалами описаны также и поддерживающие пластины из волокнистого композита.

12.7.1. Бронезащита транспортных средств

Диапазон транспортных средств, требующих надлежащей защиты, простирается от боевых машин пехоты до авиации и средств защиты личного состава. Броню из композиционных материалов используют также и на военно-морском флоте. В большинстве случаев речь идет о пластинах и оболочках, армированных арамидными, углеродными, стеклянными или СВМПЭ волокнами, которые используют в комбинации с металлами. На военном транспорте в основном все еще используют сталь и алюминий, однако постепенно начинают применять и облегченные материалы. Противоосколочный защитный слой представляет собой армированный тканью композит с огнестойкой термореактивной матрицей. Такой материал крепится с внутренней стороны боевых машин с алюминиевым корпусом для снижения опасности поражения личного состава при пробивании снарядом корпуса машины. Детали из композитов могут быть составной частью основной брони, причем они особенно эффективны для защиты от осколков, возникающих при взрывах гранат, мин, артиллерийских снарядов и все чаще встречающихся в последнее время самодельных взрывных устройств. В конструкции боевой машины «Брэдли» применяются слоистые материалы на основе волокон S-2 и Kevlar. Противоосколочный слой устанавливают также на боевых машинах M113, Paladin и M9 ACE. Машина Stryker (усовершенствованная LAV) оборудована внешней броней, включающей опорные плиты из стеклопластика. Аналогичным образом используют композиционные материалы и в армиях других стран. Автор знаком с ними в меньшей степени и поэтому должен извиниться за то, что не включил их в приведенный список. Следует также отметить, что повсеместно ведутся широкомасштабные НИОКР с целью создания слоистых композитов, способных заменить металлы в роли конструктивных и бронезащитных материалов. В рамках программ AGS, CAV, AFV, CRUSADER и FCS эти материалы испытывали на предмет замены ими металлических деталей с целью снижения веса боевых машин.

Большая часть американских колесных небронированных или легкобронированных машин, находящихся сейчас в Ираке, оснащена монтируемыми бронеконструкциями. Эти бронеконструкции включают стальные, алюминиевые и титановые плиты, а также керамические панели с подложкой из композитов. Вероятно, по мере возрастания мощи боеприпасов слой композитов на обратной стороне брони будут делать все более толстым. Уже рассматривается вопрос о повышении степени защиты бронемашин (например, Stryker) за счет установки на внешней стороне бортов бронепластин с керамическим слоем.

При разработке бронезащиты вертолетов и самолетов от поражения стрелковым оружием и осколками задача снижения веса стоит очень остро. Такая броня часто представляет собой сочетание высокотвердого V_4C холодной штамповки с

поддерживающими их панелями из волокнистого композита, что напоминает конструкцию нагрудных пластин бронезилетов. Такая броня может быть вмонтирована в днище, переборки или в спинки сидений пилотов. В некоторых транспортных самолетах для оснащения днища и переборок керамическими бронепанелями применяют системы петель и крючьев. Эксплуатационные характеристики летательных аппаратов зависят от веса машины, и поэтому соображения себестоимости отходят на второй план перед необходимостью максимального облегчения веса брони. Одна из особенностей авиационной брони состоит в том, что она рассчитана на меньшую плотность огня из автоматического оружия и меньшую вероятность множественного поражения. Это связано с тем, что противнику намного труднее добиться кучности стрельбы по быстро движущемуся объекту, что во многих случаях позволяет снизить вес брони.

До настоящего времени композиты, используемые на транспортных средствах, обычно включали в себя терморезистивные матрицы со средней конструкционной жесткостью. Для защиты от осколков и не слишком скоростных деформируемых снарядов можно создать более легкую броню на основе гибких слоистых композитов. В случае тканых материалов повышения баллистической эффективности можно добиться, вообще отказавшись от использования матриц. Противоскольные бронезилеты и завесы («одеяла») применяют для защиты транспортных средств и личного состава. Такие «одеяла» подвешивают на самолетные переборки и укладывают на днище и спинки сидений наземных транспортных средств. Желательно, чтобы подобная броня легко устанавливалась и демонтировалась, а также удобно складировалась. Из-за вибрации машины важное значение приобретает устойчивость такой брони к износу и воздействиям окружающей среды. «Одеяла» изготавливают из нейлона и волокон Kevlar, однако при этом особое внимание необходимо уделять обеспечению водонепроницаемости, так как вода может привести к снижению защитных свойств. Что касается стеклянных волокон, то они оказались недостаточно износостойчивыми, а от использования СВМПЭ пришлось отказаться вследствие сравнительно низкого кислородного индекса (т.е. легкой возгораемости) полиэтилена.

12.7.2. Системы бронезащиты личного состава

Для защиты личного состава предпочтительна гибкая броня. При ее конструировании следует учитывать удобство длительного ношения в неблагоприятных внешних условиях. Согласно оценкам, около четырех миллионов касок PASGT [48] и двух миллионов противоскольных жилетов PASGT из волокон Kevlar, поступивших на вооружение армии США после внедрения этого волокна в 1970-х гг., позволили спасти жизни многих американских военнослужащих. Бронезилеты на протяжении последних тридцати лет постоянно совершенствовались, и теперь они в состоянии обеспечить защиту от поражения осколками, pistolетными и автоматными пулями. Повышение уровня защиты сопровождалось снижением веса и повышением уровня комфортности. Улучшение эксплуатационных свойств было достигнуто благодаря внедрению более прочных и высокодеформативных волокон Kevlar KM2, оптимизации способа переплетения нитей и улучшению

конструкции бронежилетов. Для изготовления жилета Ranger Body Arмог использовали нити Kevlar KM2 с линейной плотностью 850 денье, а современный тактический жилет Interceptor [49] изготавливают из волокон Kevlar KM2 с линейной плотностью 600 или 400 денье.

При разработке жилета Interceptor были опробованы и другие материалы, например, арамидные волокна Twaron, СВМПЭ волокна Spectrashield и Dyneema, а также ПБО волокна Zylon. Теперь бронесистема Interceptor включает керамические пластины, обеспечивающие частичную защиту от винтовочных пуль. Вставные пластины размещают в карманах на передней и задней сторонах бронежилета для защиты от поражения жизненно важных органов. Сообщается, что в настоящее время существует 24 комбинации керамики и подложки из композиционного материала, соответствующие различным уровням защиты. В число керамик входят B_4C и SiC горячего прессования, спеченные SiC и Al_2O_3 , а также B_4C и SiC , полученные методом химического спекания. В отличие от ранних керамических панелей размером 2×2 дюйма, современные керамические вставки представляют собой единую пластину двойной кривизны. Это позволяет устранить стыки отдельных панелей и облегчает сборку бронежилета. Подложки из композитного материала обычно изготавливают из материалов Spectrashield или Dyneema. Поддерживающие пластины различные фирмы производят разными технологическими методами (вакуумформованием, формованием в автоклаве, прессованием в металлической форме и т.д.). Имеются данные, что эффективность этих бронесистем настолько высока, что на сегодняшний день на поле боя военнослужащие по большей части страдают от ранений только тех частей тела, которые не прикрыты бронежилетом. Ранения конечностей оказались под пристальным вниманием конструкторов, предлагающих изготавливать из тех же материалов дополнительные детали, прикрывающие следующие по степени уязвимости места человеческого тела.

Обсуждение современной брони было бы неполным без упоминания касок. Наиболее массовое применение противобаллистические композиты получили именно в производстве касок PASGT. Только в США их было выпущено более четырех миллионов, и примерно столько же было произведено во всех остальных странах. Вес каски составляет около 1,6 кг, и поэтому с самого начала делались попытки сделать ее более легкой при сохранении уровня защиты. Эта каска заменила [43] более старую модель M1, имевшую стальную оболочку и внутренний нейлоновый слой. Ее делают из волокон Kevlar, который превосходит материалы на основе нейлоновых, стеклянных и ХР волокон. Этот органопластик позволил увеличить площадь защищаемой области и улучшить защитные свойства, а вес каски по сравнению с моделью M1 не увеличился. Следующей целью разработчиков стало снижение веса каски при сохранении защитных характеристик. При использовании слоистого органопластика на основе арамидных волокон и сохранении площади защищаемой поверхности единственным способом снижения веса является уменьшение толщины каски.

Облегченная модель каски PASGT была разработана в 1989 г. Ее толщина уменьшилась на 15%, а баллистическая стойкость возросла. Повышение баллис-

тической эффективности было обусловлено несколькими причинами: повышением прочности и деформации при растяжении волокон КМ2, снижением адгезии между слоями препрега, а также использованием более тонкой ткани. Данную каску теперь используют при изготовлении касок для экипажей боевых машин, например, основного боевого танка М1 и боевой машины «Брэдли» (BFV). Позднее, в 1990-е гг., велась разработка еще более легкого варианта каски PASGT для морской пехоты США. Была поставлена задача добиться снижения веса каски на 25% при сохранении уровня баллистической защиты. Разработка композитов на основе материала Spectrashield и волокон Kevlar с термопластичной матрицей показала, что решение этой задачи возможно, однако ни один из разработанных образцов не был одобрен из-за недостаточных конструктивных характеристик и износостойчивости. Тем не менее, для морской пехоты недавно было начато производство облегченной каски на основе более прочных волокон Twaron и фенольной смолы. По сравнению с опытными образцами вес каски был несколько увеличен. Американская армия рассматривает также вопрос о создании боевой каски нового поколения АСН [50]. Спецификация позволяет разработчикам использовать любые новые материалы, удовлетворяющие большому списку эксплуатационных требований, однако до настоящего времени применяли лишь высокопрочный Kevlar марок КМ2 и К129 в сочетании с термореактивной матрицей, доля которой была понижена. Американское Военное ведомство финансирует и другие программы по созданию новых касок, целью которых также является снижение веса при сохранении уровня защиты. Одна из таких программ называется «Боец армии будущего», в рамках которой рассматриваются перспективы использования слоистых волокнистых композитов на основе термопластичных матриц. Помимо повышения баллистической эффективности большое внимание уделяется также проблеме защиты неприкрытых участков тела человека, таких как лицо, передняя часть шеи и верхняя часть спины. Таким образом, внешний вид будущего боевого шлема может сильно отличаться от современной каски.

12.7.3. Применение в строительстве

После террористических актов сентября 2001 г. научно-исследовательские организации и фирмы-производители стали уделять повышенное внимание вопросам укрепления зданий, а также увеличению прочности конструкции самолетов. Слоистые композиты стали использовать в конструкциях внутренних дверей и багажных контейнеров гражданских самолетов. Вследствие весовых ограничений в обоих случаях использовались облегченные материалы с высокими баллистическими свойствами. В отличие от средств индивидуальной защиты или авиационной техники, в строительстве ограничений по весу не существует. Здесь выбор материалов определяется в первую очередь себестоимостью, доступностью, долговечностью и возможностью укрепления здания.

Философия решения задачи создания более прочного здания состоит либо в возведении более массивных строений, устойчивых к воздействию взрывной волны, либо в исключении возможности проникновения террористов внутрь зданий за счет упрочнения дверей, окон или стен, которые должны выдержать любую по-

пытку проникновения. С целью повышения устойчивости зданий к взрывам испытывали сравнительно тяжелые ткани из стеклянных, арамидных и углеродных волокон, которые накладывали вручную мокрым способом на существующие стены. Обертывание или покрытие колонн композиционными материалами может повысить способность жизненно важных элементов здания выдерживать повышенные нагрузки. Связь этих структурных элементов может быть улучшена с помощью высокопрочных материалов. С этой целью проводят испытания стекловолокон различного вида, начиная с тканых и нетканых материалов и кончая материалами с произвольно расположенными рублеными волокнами. В качестве матрицы использовали полиэфирные и эпоксидные смолы, а также жидкие цементные растворы.

Если требуется добиться защиты здания от винтовочных пуль, можно использовать материалы, разработанные для защиты личного состава и транспортных средств, даже если решение этой задачи потребует значительно большего объема материала. Специальный армированный бетон может обеспечить защиту от огня из любого стрелкового оружия. Однако, если речь идет об укреплении уже существующего здания, может возникнуть необходимость установки панелей из более легких или более удобных в монтаже материалов, особенно если они должны размещаться на верхних этажах. Вместо высокоэффективной керамики горячего прессования для замены каменных плит и гипсовых панелей можно использовать уже имеющиеся стройматериалы, например, укладываемые на пол керамические плитки или металлы в сочетании с подложками в виде дешевых слоистых композитов из E-стекла или листовой стали. Желательно избегать перестройки зданий, не рассчитанных на несение веса брони, и поэтому соображениями уменьшения веса полностью пренебречь нельзя. Другим важным фактором при выборе подходящего материала является возможность обработки и монтажа бронеплит с помощью обычных строительных инструментов. Если площадь укрепляемого помещения невелика или доступ к нему неудобен, важное значение приобретает возможность складывания или свертывания материала в рулон и его переноски на место монтажа. С учетом всех этих вопросов в скором времени следует ожидать появления на рынке новых материалов, приспособленных к нуждам строительства.

12.8. Прогноз развития волокнистых бронематериалов

Текущий спрос на броню для защиты личного состава и транспортных средств, связанный с военными действиями в Ираке, привел к росту производства арамидных, СВМПЭ, ПБО и даже стеклянных S-2 волокон, производства обычных стальных бронеплит и экзотических типов противобаллистической керамики (B_4C и SiC). Фирмы DuPont (Kevlar), Tejin (Twaron), DSM (Dyneema), Honeywell (Spectra) и Toyobo (Zylon) объявили о намерении увеличить мощности производства всех этих волокон. Как и во время прошлых военных конфликтов, такой спрос может иметь циклический характер. На этот раз, однако, существенное отличие заключается в том, что характер военных и террористических угроз стал быстро

меняться. Сегодня уже недостаточно усовершенствовать броню после отдельного террористического нападения. Создается впечатление, что террористы вместе с нами смотрят вечерние выпуски новостей и моментально вносят изменения в свои взрывные устройства в зависимости от того, насколько хорошо срабатывает защита. В будущем в любую минуту может возникнуть срочная необходимость в любом, даже самом уникальном, типе брони.

В условиях вооруженных конфликтов армии будущего смогут воспользоваться облегченными боевыми машинами, доставляемыми в район боевых действий с помощью авиации. Если не возникнет новых угроз, первоочередная задача НИОКР при разработке брони будет заключаться в замене существующей брони более легкими системами, обеспечивающими аналогичный или даже более высокий уровень защиты. Одна из практических целей состоит в создании такой брони на базе материалов, объем производства которых будет достаточен для полного удовлетворения спроса. Задача долгосрочных исследований должна заключаться в оценке новых или уже существующих материалов в новых сочетаниях.

Потенциал рынка материалов, увеличивающих прочность зданий, пока не поддается оценке. Сами по себе требования качества и объемы производства не позволяют провести повсеместное переустройство зданий. Возможно, по мере возрастания рисков отдельные здания будут соответствующим образом переоборудованы. Вероятно, основное внимание будет направлено на использование материалов с наименьшей стоимостью в сочетании с новаторскими экономичными методами строительства.

12.9. Литература

1. Dunstan, S., *Flak Jackets: 20th Century Military Body Armour*, Martin Windrow (ed.), Osprey Publishing Co., London, 1985.
2. Yang, H.H., *Kevlar Aramid Fiber*, John Wiley & Sons, New York, 1993.
3. Laible, R.C., «Ballistic materials and penetration mechanics», Chapter 4 in *Fibrous Materials, Volume 5 of Methods and Phenomena: Their Applications in Science and Technology*, Elsevier Scientific Publishing, New York, 1980.
4. Roylance, O.K., Wilde, A.F. and Tocci, G., *Textile Research*, 43, 34, 1973.
5. «DORON», Military Specification, Insert, Body Armor, Mil-I-17368C(MC), November 23, 1977.
6. S-2, Zentron, Advanced Glassfiber Yarns, LLC production information, Pub. No. LIT-2000-061, -081, August 2000, August 2002.
7. «Ballistic Protections Using CERASEP and SEPCARBINOX», lightweight armor brochure, Societe Europeenne De Propulsion, Suresne, France, 1988.
8. Christiansen, E.L., «Protecting Spacecraft-Insulating Tiles Against Meteoroids», NASA Tech Brief MSC-21846, Houston, 1990.
9. *Hercules Graphite Fibers and Prepregs*, 150–14, Rev. 2, Magna Utah, 1990.
10. Cunniff, P., Auerbach, M.A., Vetter, E. and Sikkema, D.J., «High Performance «M5» Fiber for Ballistics/Structural Composites», *Proceedings of the 23rd Army Science Conference*, Orlando, 2002.
11. Yang, H.H., *Aromatic High Strength Fibers*, Wiley Interscience, New York, 1989.

12. Alesi, A.L., Halpin, B.M., Lewis, R.W. and Thomas, G.R., *Review of the Application of Kevlar Fibers to Composite Structures*, US Army Materials and Mechanics Research Center, AMMRC MS 74–11, October 1974.
13. Bottger, C., *New Developments with Twaron for Personal Protection*, PASS 2000.
14. Cunniff, P., «The Performance of Poly(Para-Phenylene Benzobizoxazole) (PBO) Fabric for Fragmentation Protective Body Armor», 18th Int. Symposium on Ballistics, San Antonio, November 1999.
15. Hageman, J.C.L., van der Horst, J.W. and De Groot, R.A., «An ab initio Study of the Structural and Physical Properties of a Novel Rigid-Rod Polymer: PIPD», *Polymer*, 40, 5, 1313, 1999.
16. Jacobs, M.J., *New Performance Levels with Dyneema UHMWPE Fibers and Dyneema Uni-Directional Ballistic Products*, PASS 2004, The Hague.
17. Bhatnagar, A., *New Technologies and Materials for Military Helmets and Body Armour*, PASS 1998.
18. Wong, A.K. and Berman, I., *Lightweight Ceramic Armor, a Review*, Army Materials and Mechanics Research Center, AMMRC MS 71–1, April, 1971.
19. Rugger, G. and Fenter, J.R., «Ceramic Composite Armor», *Kirk-Othmer Encycl. Chem. Tech.*, 2nd ed., 1971.
20. Wilkins, M.L., «Third Prog. Rept. of the Light Armor Program», UCRL-50460, Lawrence Radiation Laboratory, Univ. of California, Livermore, CA, July 1968.
21. Miner, L., *A Guide to Designing and Preparing Ballistic Protection of Kevlar Aramid*, DuPont Advanced Composites, E-98164, E85875-2, Armor Handbook, 1989.
22. Cunniff, P.M., «Dimensionless Parameters for Optimization of Textile-based Armor Systems», *Proc. 18th Int. Symp. on Ballistics*, San Antonio, 1999.
23. Lyons, W.J., *Impact Phenomena in Materials*, MIT Press, Cambridge, 1963.
24. Harpell, G.A., Kavech, S., Palley, I. and Prevorsek, D.C., US Patent 4623574, Ballistic Resistant Composite Article, November 18, 1986.
25. Schut, T.B. and Tejani, N., *Tailored Offerings in Kevlar and Nomex for the Modern Soldier*, PASS 2004.
26. Thomas, H.L., *Needle-Punched Non-Woven Fabric for Fragmentation Protection*, PASS 2004.
27. Scott, B., «A Penetration Mechanics Study of Compliant Laminates», *Proceedings of the 32nd SAMPE International Technical Conf.*, Boston, November 2000.
28. Morrison, C.E. and Bower, W.H., «Factors Affecting the Ballistic Impact Resistance of Kevlar Laminates», *Advances in Composite Materials*, 1, Pergamon Press, Paris, 1980.
29. Rupert, N.L., Rowe, E.E. and Hall, C.J., «DDG993 Material Characterization Program; Ballistic Evaluations», US Naval Surface Weapons Center Report NSWC TR 81–296, July 1981.
30. European Patent, 0049014B1 (June 4, 1986) A. Capra (to LASAR S.p.A.).
31. Prevorsek, D., *Development and Optimization of a Spectra Fabric Resin System*, US Army MTL TR 90–13, March 1990.
32. Riewald, P.O., Folgar, F., Yang, H.H. and Schaughnessy, W.F., «Lightweight Helmet from a New Aramid Fiber», *Int. SAMPE Technical Conf*, Vol. 23, Lake Kiamesha, NY, 1991.
33. Rolston, R.F. and Diinleavy, J., «Breakthrough in Armor», *Space/Aeronautics*, 50, 1, July 1968.
34. Pugh, E., «Protection against Shaped Charges», Carnegie Institute of Technology, NDRC Report No. A384, November 1945.

35. Riffin, P.V., «Silaceous Cored Armor, A Critical Review», US Watertown Arsenal Report, WAL 710/1068, DTIC, AD0368255, 1956.
36. Cook, R.L., *Hard Faced Ceramic and Plastic Armor*, US 3509833, Goodyear Aerospace, Akron, OH, May 1970 (submitted 1963).
37. Wilkins, M.L., «Mechanics of Penetration and Perforation», *Int. J. Engng Sci.*, 16, 11, 793, 1978.
38. Stiglich, J.J., «A Survey of Potential Ceramic Armor Materials», US Army AMMRC MS 68–04, March 1968.
39. «Ceramic Armor Materials by Design», *Ceramic Transactions*, 134, American Ceramic Society, Ohio, 2002,
40. *Personal Armor System Symposium*, PASS, The Hague, Netherlands, September 2004.
41. *Ceramic Engineering & Science Proceedings*, 23, 3, 2002.
42. Gooch, W.A., «An Overview of Ceramic Armor Applications», *Ceramic Transactions*, 134, American Ceramic Society, Ohio, 3, 2002.
43. Alesi, A.L., Ames, R.P., Gagne, R.A., Litman, A.M. and Profti, J.J., «New Materials and Construction for Improved Helmets», US Army AMMRC MS 75–9, November 1975. ADA018958.
44. Anon., *Manual for Dyneema Ballistic Panels*, DSM High Performance Fibers BV, The Netherlands.
45. Chang, I.Y. and Lees, J.K., «Recent Development in Thermoplastic Composites: A Review of Matrix Systems and Processing Methods», *J. of Thermoplastic Composite Materials*, 1, July 1988.
46. Effing, M., Hopkins, M.W. and Beyeler, E.P., The Tepex System: Cost Effective High Volume Production of Parts and Profiles for Recreation, Protection and Transportation Markets», *Proceedings of the SAMPE Technical Conf.*, 1994.
47. Medwin, S.J., Pratte, J., Effing, M. and Beyeler, E., «LDF-Reinforcement: The Revolution Making Cost-Effective Complex Shaped Thermoplastic Composite Structures», *Werkstoffe und Konstruktion*, 6, I, 1992.
48. MIL-H-44099A (1986) *Military Specifications – Helmet, Ground Troops and Parachutists*, US Government Printing Office, 1986.
49. Purchase Description, Body Armor, Multiple Threat/Interceptor, CO/PD 00-02B, March 2003.
50. Performance Specification, Helmet, Advanced Combat US Army Research Development and Engineering Command, Natick Soldier Center, January 2005.

ГЛАВА 13

ПРИМЕНЕНИЕ ЛЕГКИХ ПРОТИВОБАЛЛИСТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

А. Бхатнагар, Honeywell Inc., США

Д. Лэнг, Armor Holdings Inc., США

13.1. Введение

Военные, полиция и другие силовые структуры используют легкие волокнистые противобаллистические материалы для защиты от пуль и осколков уже в течение многих лет. Бронежилеты и каски из волокнистых материалов спасли тысячи жизней. Бронежилеты из волокнистых материалов гибки, легки и имеют маскировочную окраску. Каски из волокнистых композитов обеспечивают намного более высокий уровень защиты и легче, чем стальные каски, которые использовались во время Первой и Второй мировых войн.

Первым неметаллическим защитным изделием был бронежилет зенитчиков во время Второй мировой войны. Однако наиболее ярким изделием этого типа была чисто композитная каска, разработанная для армии США. Более современными изделиями являются каски и бронежилеты с усиливающими нагрудными пластинами, используемые военнослужащими США, Великобритании и других стран в Афганистане и Ираке.

Критерием успеха нового бронематериала являются количество произведенных из него изделий и количество спасенных жизней. Особенности средств индивидуальной защиты из легких противобаллистических материалов являются:

- повышенный уровень защиты;
- пониженный вес;
- повышенная гибкость;
- повышенная защита от многократных пулевых выстрелов.

Применение этих материалов для защиты транспортных средств дает следующие результаты:

- уменьшение веса транспортного средства;
- увеличение маневренности;
- уменьшение количества деталей брони;
- уменьшение расхода топлива;
- увеличение срока службы транспортного средства.

В этой главе рассматривается применение облегченных бронематериалов в изделиях военными, полицейскими, правоохранительными органами и миротворческими силами ООН.

13.2. Армия США

13.2.1. Каски

Каска PASGT

Во время военных действий первейшей задачей является защита головы. Каска должна иметь минимальный вес и обеспечивать при этом максимальную защиту от различных пуль и осколков.

В начале 1970-х гг. Министерство обороны США инициировало разработку облегченных касок из волокнистых материалов. Основными результатами этой работы явились повышение уровня баллистической защиты, увеличение внутреннего объема каски для улучшения вентиляции и размещения средств связи, увеличение защищаемой поверхности головы, снижение веса и улучшенная эстетичность. В начале 1980-х гг. такие каски начали поступать в армию США (рис. 13.1). Во время холодной войны в армию США поступало четверть миллиона таких касок в год. Впервые каски из чисто волокнистых материалов использовались армией США во время интервенции в Гренаду.

Особенности касок армии США

- Форма каски соответствует стандарту PASGT;
- материал каски:
 - арамидная ткань с фенол/ПВА матрицей;
 - матрица: смесь из 50% фенолформальдегидной и 50% поливинилбутиральной смол;



Рис. 13.1. Каска военнослужащего США. Публикуется с разрешения АНИ

- размер касок: четыре размера;
- вес каски:

– размер	XS	S	M	L
– максимальный вес (г)	1418	1447	1504	1617;
- цвет каски: оливково-серый 34087 в соответствии со стандартом FED-STD-595. Для улучшения экстерьера внешнее покрытие каски текстурировано частицами песка или измельченной скорлупой грецких орехов;
- комплектация: система подвески и подбородочный ремень, соответствующие спецификации MIL-H-44099;
- уровень защиты: баллистический предел V_{50} каски не менее 610 м/с при испытаниях согласно стандарту MIL-STD-662 путем удара осколком весом 17 гран, соответствующим стандарту MIL-P-46593.

13.2.2. Бронежилет *Interseptor*

Армейские бронежилеты RBA 1994 г. выпуска имели вес 24 фунтов и были разработаны в Центре армии США в Натике, штат Массачусетс. Эти бронежилеты были довольно тяжелыми, и была поставлена задача разработать более легкий бронежилет. Новый бронежилет *Interseptor* начали производить в 1999 г.

Тактический бронежилет *Interseptor* делают из очень тонкой арамидной ткани. Конструкция жилета позволяет прикреплять к его передней и задней частям гранаты, портативную радиостанцию и пистолет (рис. 13.2). Этот бронежилет является гибкой модульной системой, защищающей от различных баллистических угроз и состоящий из основы и усиливающих вставок. Вставки делают



Рис. 13.2. Бронежилет *Interseptor*. Публикуется с разрешения Point Blank



гибкий бронезилет жестким. В зависимости от уровня баллистической угрозы можно увеличить или уменьшить вес бронезилета, а также изменить подвижность тела.

Уровень защиты

Бронезилет разработан для защиты от следующих баллистических угроз:

- осколков;
- многократных выстрелов пистолетными пулями с цельнометаллической оболочкой.

Баллистические испытания

- испытания осколками проводят согласно стандартам испытания бронезилетов;
- испытания 9-мм пулями проводят согласно стандарту NIJ 0101.03.

Другие испытания включают:

- испытания на стойкость к поражению грибками согласно стандарту MIL-STD-810E;
- испытания на надежность;
- испытания на долговечность.

Размеры бронезилета Interceptor

Имеется пять размеров бронезилета: очень малый (XS), малый (S), средний (M), большой (L) и очень большой (XL).

Материал бронезилета Interceptor

Ткань делают из тонких высокопрочных арамидных нитей. В комплект бронезилета входят усиливающие вставки для защиты шеи и паха. Бронезилет допускает подвешивание к нему дополнительных грузов. Для более надежной защиты груди застежки жилета расположены справа. При необходимости можно быстро освободиться от вставных пластин, дернув за одну из лент.

Средний вес гибкого тактического бронезилета равен 3,8 кг.

13.2.3. Защитная вставка SAPI

SAPI представляет собой нагрудную пластину, вставляемую в мягкий бронезилет, для обеспечения защиты от высокоскоростных пуль. Эта вставка является частью бронесистемы (рис. 13.3). Ее производство было начато в конце 1990-х гг.

Размеры и вес

Вставки SAPI имеют различный размер и вес в зависимости от их состава.

Толщина

Толщина вставных бронепластин должна быть постоянной. Допустимая толщина равна $0,85 \pm 0,125$ дм.



Рис. 13.3. Защитная вставка SAPI. Публикуется с разрешения АНІ

Уровень защиты

Вставные бронепластины, защищающие от поражения мощными винтовками, испытывают в сочетании с гибким бронежилетом Interceptor при помощи следующих боеприпасов:

- боеприпасов НАТО 7,62 × 51 винтовки М80;
- советских боеприпасов калибра 7,2 × 54 мм;
- пуль калибра 5,56 мм винтовки М855 США.

Материалы

Вставная бронепластина SAPI состоит из следующих компонентов:

- керамической монопластины двойной кривизны из карбида бора или карбида кремния;
- клеящего слоя;
- формованной пластины из поперечно ориентированных слоев органопластика на основе волокон СВМПЭ;
- черной нейлоновой ткани, защищающей поверхность керамики и композита.

Керамическая пластина может покрываться также вспененным или другим материалом, защищающим от случайного удара.



Технология изготовления вставных бронепластин

ФОРМОВАНИЕ В АВТОКЛАВЕ

Вставные бронепластины формуют в автоклаве. Для этого поперечно ориентированный материал на основе СВМПЭ волокон укладывают на слой керамики, покрытой клеем. Затем эту систему закрывают вакуумным мешком и проводят вакуумирование. Полностью вакуумированный пакет с частично спрессованным материалом помещают в автоклав для отверждения матрицы при высокой температуре под давлением. Отвержденную пластину оборачивают черной водоотталкивающей нейлоновой тканью и вновь прикладывают давление. После этого шлифуют кромки пластины до получения гладкой поверхности, и на передней и задней сторонах пластины печатают необходимую информацию.

ФОРМОВАНИЕ В ПРЕСС-ФОРМЕ

Слоистый композит делают в пресс-формах двойной кривизны, соответствующих форме керамической пластины. После этого на поверхность керамики наносят клей для соединения с пластиной из композита на основе волокон Spectra Shield. Острые кромки шлифуют и наносят соответствующую информацию на переднюю и заднюю поверхности пластины.

Испытания

Бронепластина, помимо баллистических, проходит следующие испытания:

- испытание на стойкость к грибковой инфекции согласно стандарту MTL-STD-810E;
- определение надежности;
- определение срока службы.

Бронесистема Interceptor со вставленными пластинами весит около 7,5 кг, из которых вес тактического бронезилета составляет 3,8 кг и по 1,8 кг весит каждая из двух вставок.

13.2.4. Бронезилет и каска SPEAR

Система индивидуальной бронезащиты SPEAR предназначена для сил специального назначения. Программа SPEAR была инициирована в 1991 г., причем финансирование в основном проводилось Министерством обороны США, в том числе и спецназом Флота и Воздушных сил. В настоящее время производятся значительные закупки бронезилетов и касок спецназом армии США (USSOCOM).

Система SPEAR состоит из следующих элементов:

- бронезилета и системы несения нагрузки,
- легкой дождевой накидки,
- каски с системой связи,
- легкой защиты от ядерного, биологического и химического оружия,
- краткого описания системы,
- защиты от лазерного и баллистического поражения,
- модуля идентификации цели,
- модуля физиологического обслуживания.

Уровень защиты

- защита от множественного поражения осколками,
- защита от выстрела 9-мм пистолетной пулей с цельнометаллической оболочкой.

Поверхностная плотность системы не превышает 1,1 фунт/фут².

Толщина не превышает 0,350 дм.

Баллистические испытания

- испытание осколками проводят по методике SPEAR;
- испытания пулями калибра 9 мм проводят согласно стандарту NIJ 0101.04.

Вторая часть испытаний включает:

- воздействие высокой и низкой температуры;
- воздействие машинного масла и бензина;
- воздействие морской воды;
- воздействие различных погодных условий;
- воздействие грибковой инфекции согласно стандарту MIL-STD-810E;
- определение надежности;
- определение срока службы.

Размеры бронежилета SPEAR

Производит бронежилеты пяти размеров: очень малый (XS), малый (S), средний (M), большой (L), очень большой (XL).

Материал бронежилета SPEAR

Высокопрочные арамидные волокна.

Формованные вставки

Формованные вставки SPEAR, обеспечивающие IV уровень защиты, состоят из следующих слоев:

- монолитного керамического слоя на основе карбида бора или карбида кремния;
- клея;
- основы из композита, формируемого из препрегов поперечно ориентированного СВМПЭ или арамидной ткани. Вставка покрывается и формируется с черной нейлоновой тканью.

Бронежилет SPEAR с противобаллистическими вставками испытывают в соответствии со стандартом NIJ 0101.03 для IV уровня защиты. Производят минимум два выстрела в точки на расстоянии 4 дюйма. При выстреле 9-мм пулей заградная деформация не должна превышать 44 мм.

Каски SPEAR

Каски SPEAR имеют форму, обеспечивающую встроенную систему связи.

ФОРМА

Каска *SPEAR* представляет собой модифицированную каску PASGT с уменьшенной областью защиты головы.

БАЛЛИСТИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ

- Проводятся испытания множественным поражением осколками.
- Проверяется защита от поражения 9-мм пулями согласно стандарту NIJ 0101.04.

МАТЕРИАЛ КАСКИ SPEAR

Препрег линейной плотностью 840 денье на основе арамидной ткани и фенольной смолы.

МЕТОД ФОРМОВАНИЯ

Формование в пресс-форме при высоком давлении и температуре.

13.3. Европейский военный бронезиелет

13.3.1. Каски

В начале 1990-х гг. во Франции и других странах Европы были инициированы программы по замене стальных касок на легкие каски из волокнистых компози-



Рис. 13.4. Каска военнослужащего ООН, сделанная из поперечно ориентированного слоистого композита на основе СВМПЭ волокон. Публикуется с разрешения компании Honeywell International Inc.

тов. Первоначально ими предполагалось обеспечить синие береты французских войск ООН в Боснии. Программа завершилась разработкой высокоэффективной легкой каски, имеющей большее внутреннее пространство для лучшей вентиляции и размещения устройств связи, с расширенной областью охвата головы, низким центром тяжести и хорошей эстетикой (рис. 13.4).

Особенности европейской каски

- Форма каски: PASGT или аналогичная ей;
- материал каски: поперечно ориентированный композит на основе СВМПЭ волокон во Франции и препреги на основе арамидной ткани, ламинированной слоем фенольной смолы, в других странах;
- размер касок: два размера — средний и большой;
- цвет каски: синий цвет войск ООН или зеленый военный. Для улучшения внешнего вида каски имеют дополнительное текстурированное покрытие, наполненное частицами песка;
- комплектация: подбородочный ремень и система подвески;
- уровень баллистической защиты: баллистический предел V_{50} европейской каски был увеличен с 550 до 680 м/с согласно стандарту STANAG 2920. В некоторых странах Европы проводят испытание 9-мм пулей скоростью 430 м/с, причем запреградная деформация не должна превышать 30 мм.

13.3.2. Европейский гибкий бронезилет военнослужащих

В начале 1990-х гг., наряду с разработкой облегченных касок из композитов в Европейском союзе была инициирована программа по увеличению степени защиты бронезилета от осколков, pistolетных и снайперских пуль.

Гибкий бронезилет с карманами для жестких формованных вставок из волокнистого композита представлен на рис. 13.5. Жилет состоит из слоев стеганой арамидной ткани с линейной плотностью 1100 тэкс. Гибкий бронезилет испытывали осколками и 9-мм пулями со скоростью 430 м/с. Максимально допустимая запреградная деформация равна 25 мм. Для снижения травмоопасности рекомендуют уменьшить запреградную деформацию путем использования внутреннего мягкого подслоя.

13.3.3. Европейские противобаллистические жилеты и усиливающие вставки

Для защиты от снайперских винтовок испытывали различные материалы с керамической облицовкой. Нетканый поперечно ориентированный материал Spectra Shield позволил снизить вес бронезилета более чем на 30%. В 1993 г. французская армия закупила 5000 таких бронеккомплектов. Эта система позже была принята на вооружение и в других европейских и азиатских странах.

Гибкий бронезилет состоит из 110 слоев арамидной ткани полотняного плетения поверхностной плотностью 190 г/м². Гибкий жилет испытывали 9-мм пу-



Рис. 13.5. Европейский бронезилет, усиленный жесткими формованными вставками. Публикуется с разрешения компании Honeywell International Inc.

лями скоростью 430 м/с, а максимально допустимая запреградная деформация была равна 30 мм. Гибкий жилет имеет карманы, куда вставляют формованные пластины, обеспечивающие защиту от винтовочных пуль.

Противобалистический комплект состоит из:

- изогнутой нагрудной пластины;
- плоской наспинной пластины;
- небольшой пластины защиты паха;
- формованной пластины защиты шеи.

Поверхностная плотность

Поверхностная плотность всех формованных пластин равна 17–20 кг/м².

Поверхность защиты

Защищаемая поверхность составляет около 0,25 м².

Испытания

Формованные пластины испытывают на подложке из пластилина при помощи многократных винтовочных выстрелов. Жесткие формованные пластины испытывают вместе с гибким бронежилетом. Требования состоят в необходимой оставке пули, а запреградная деформация не должна превышать 22 мм. Вставные пластины вставляют в карманы противоосколочного бронежилета.

13.4. Войска азиатских стран

13.4.1. Каски войск стран Южной Азии

Военный персонал в странах Южной Азии в настоящее время носит дешевые каски из тонкой стали или стеклопластика на основе полиэфирной смолы. Эти каски имеют хорошую стойкость к низкоскоростному удару и довольно низкие баллистические характеристики.

Некоторые страны этого региона приобретают или формуют у себя каски на основе высокопрочных СВМПЭ или арамидных волокон. Каски различных компаний испытывают согласно существующим спецификациям.

13.4.2. Бронежилеты войск стран Южной Азии

Во многих южноазиатских странах разработку бронежилета только начали. Основные характеристики этих жилетов подобны европейским. Обычно это гибкий бронежилет с карманами для жестких вставных волокнистых пластин. Гибкий бронежилет состоит из простроченных слоев воздухопроницаемой арамидной ткани. Его испытывают 9-мм пулями со скоростью 430 м/с, а максимально допустимая запреградная деформация равна 25 мм. Для снижения травматичности и уменьшения запреградской деформации используют внутренний мягкий слой.

Вставные пластины

Защита обеспечивается двумя пластинами, а именно:

- изогнутой нагрудной пластиной;
- плоской задней пластиной.

Противобаллистический материал

Нетканый поперечно ориентированный материал на основе СВМПЭ волокон.

Формование

Формование в пресс-форме при высоком давлении.

Баллистические испытания

Баллистические испытания состоят из многократных винтовочных выстрелов высокоскоростными винтовочными пулями с поддерживающим слоем из пластилина. Жесткие волокнистые пластины испытывают вместе с гибким бронежи-



летом. Пуля должна быть остановлена, а запреградная деформация не должна превышать 22 мм. Противобаллистические пластины закладывают в предусмотренные карманы гибкого жилета.

13.4.3. Каски стран Южной Азии

Военный персонал этого региона носит противобаллистические каски различного типа. В некоторых странах пользуются касками, изготовленными по новой технологии, а в других странах переходят от касок на основе нейлоновой ткани и фенольной смолы к каскам из высокопрочных арамидных или СВМПЭ тканей.

13.4.4. Жилеты стран Южной Азии

Большинство азиатских стран Тихоокеанского региона закупает гибкие бронежилеты с жесткими формованными волокнистыми вставками. Основные характеристики этих жилетов подобны европейскому бронежилету. Основой гибкого бронежилета является арамидная ткань толщиной 1000 денье, разработанная для остановки 9-мм пули со скоростью 430 м/с. В каждой стране устанавливают свой предел травмоопасности. В Тайване приняли стандарт NIJ 0101.04, и предельная величина запреградной деформации равна 44 мм. Гибкий бронежилет испытывают также модельным осколком весом 17 гран. Величина баллистического предела V_{50} , измеряемого согласно стандарту MIL-STD-662F, должна быть не менее 450 м/с.

В этих странах не используют мягкую противотравматическую подкладку, а передняя и задняя вставные пластины имеют искривленную поверхность.

Баллистические испытания

Пластины защищают от множественных выстрелов из высокоскоростных винтовок.

Внешний вид

Вставная пластина состоит из двоякоизогнутого керамического слоя из карбида кремния, приклеенного к подложке из арамидной ткани или поперечно ориентированного СВМПЭ композита.

Испытания

Испытания проводят на пластилиновой подложке согласно стандарту NIJ 0101.04. Испытание жестких волокнистых пластин проводят вместе с гибким противоосколочным бронежилетом, баллистический предел V_{50} которого должен быть не менее 450 м/с.

Материал

Формованные пластины делают из нетканых поперечно ориентированных СВМПЭ препрегов.

Метод формования

Двоякоизогнутые пластины формуют в пресс-форме под давлением.

Другие испытания

Другие испытания пластин включают:

- испытание на воспламеняемость при температуре 120°C;
- испытание падающим низкоскоростным ударником согласно стандарту MIL-STD-810;
- испытание путем падения пластины на пол;
- температурные испытания при –50 и +75°C;
- испытание температурным скачком;
- испытания погружением в машинное масло и солевой раствор;
- испытания на противогрибковую стойкость.

13.5. Баллистическая защита полиции

13.5.1. Каски для полицейских

Полицейские каски предназначены для защиты от пистолетных пуль. Обычно их окрашивают в черный цвет, чтобы отличить от зеленых касок военнослужащих (рис. 13.6). Последние предназначены для защиты от поражения осколками снарядов.

Помимо цвета каски военнослужащих и полиции имеют и другие различия:

- полицейские каски предназначены для ношения в течение короткого срока и не имеют пространства для воздушного потока между головой и каской;
- полицейские каски имеют подкладку для смягчения силы удара при попадании пуль;
- полицейские каски имеют светопрозрачную защиту лица.

Противобаллистические полицейские каски испытывают по стандарту NIJ 0106.01. В последний раз этот стандарт был изменен в 1981 г., и в настоящее время разрабатывают новый стандарт испытаний.

Согласно стандарту NIJ 0106.01 противобаллистические каски имеют I, II и III уровни защиты. Каска IIIA уровня защиты в данной классификации отсутствует. Одной из основных причин является высокая энергия пули пистолета Магнум .44 калибра. Некоторые медики считают, что удар такой пули даже при ее остановке каской ломает шею.



Рис. 13.6. Полицейские пулезащитные каски с прозрачной защитой лица. Публикуется с разрешения Tung Gwo



Рис. 13.7. Бронежилет полицейского. Публикуется с разрешения компании АНІ

13.5.2. Бронежилеты правоохранительных органов и полиции

Жилеты правоохранительных органов и полиции (рис. 13.7) изготавливают в соответствии со стандартом NIJ 0106.01, согласно которому бронежилеты делят на 7 уровней защиты. Степень баллистической угрозы зависит от конструкции, формы, калибра, массы, угла удара и скорости пули. Из-за широкого разнообразия пуль и патронов броня, защищающая от одного вида пуль, может не остановить другие пули того же калибра, отличающиеся строением или формой.

Согласно стандарту NIJ 0106.01 бронежилеты делят на I, IА, II и IIIА уровни защиты.

- Уровень I обеспечивает минимальную защиту.
- Уровень IА обеспечивает защиту от низкоскоростных пуль пистолета Магнум 357 и более высокоскоростных 9-мм пуль.
- Уровень II защищает от высокоскоростных пуль Магнум 357 и 9-мм пуль.
- Уровень защиты IIIА обеспечивает самый высокий уровень защиты от Магнума 44 и высокоскоростных 9-мм пуль.

Для изготовления этих жилетов применяют противобаллистические тканые и нетканые материалы на основе арамидных, СВМПЭ и ПБО волокон. Большинство бронежилетов, изготавливаемых в США, состоят по крайней мере из двух или трех различных материалов. Такие жилеты являются комбинированными, и в них используются лучшие характеристики каждого материала, чтобы увеличить гибкость и обеспечить высокую баллистическую защиту и комфорт.

При закупке всегда имеется выбор гибких жилетов. Выбор делают из нескольких видов жилетов:

- недорогие бронежилеты из тканей на основе нитей большой линейной плотности;
- высокотехнологичные жилеты, состоящие из комбинации высокопрочных тканых и нетканых поперечно ориентированных слоистых материалов на основе СВМПЭ, арамидных или РВО волокон;
- самые высокотехнологичные жилеты состоят из легких тканей и нескольких типов нетканых материалов на основе СВМПЭ, арамидных или РВО волокон.

13.5.3. Малогабаритные щиты

Во время массовых волнений полиция использует малогабаритные щиты (рис. 13.8), способные защитить от пистолетных пуль. Существуют щиты, защищающие и от винтовочных пуль. Малогабаритные щиты, защищающие от пистолетных пуль, делают из препрегов поперечно ориентированного слоистого или тканого композита на основе СВМПЭ или арамидных волокон. Формуют щиты ручной выкладкой в автоклаве или пресс-форме.



Рис. 13.8. Переносные щиты для противостояния массовым беспорядкам. Публикуется с разрешения компании Honeywell International Inc.



Типичные значения веса малогабаритных щитов без ручки, пуленезащитного стекла и светового маячка представлены ниже:

<i>Уровень защиты</i>	<i>Поверхностная плотность (фунт/фут²)</i>
IIA	0,6–0,8
II	0,8–1,0
IIIA	1,0–1,5
III	3,5–6,5
IV	6,5–7,5

В некоторых моделях щитов для увеличения жесткости, улучшения окрашиваемости и придания негорючести на передней и задней частях имеется тонкое металлическое покрытие.

13.5.4. Взрывозащитные покрывала

Взрывозащитные покрывала предназначены для саперов, разминирующих мины или самодельные взрывные устройства.

Взрывозащитные покрывала делают из нескольких слоев противобаллистических материалов, покрытых сверхпрочным, пламяустойчивым нейлоновым покрытием с ручками для переноса. Некоторые изготовители взрывозащитных покрывал также выпускают круги безопасности, сделанные из слоев противобаллистического материала, который накладывают на взрывное устройство для устранения прямого контакта и обеспечения безопасности работы. При взрыве такого устройства круг безопасности направляет взрывную волну вверх, а взрывозащитное покрывало задерживает осколки. Для крупных взрывчатых устройств одновременно могут использоваться два или более кругов безопасности.

Хотя взрывозащитные покрывала делают из нескольких слоев материала, их можно уложить в компактный, легко переносимый мешок. Взрывозащитные покрывала имеют следующие особенности:

- их делают из высокопрочной ткани или поперечно ориентированных слоев арамидных или СВМПЭ волокон;
- конструкция одеяла зависит от типа противобаллистического материала. Многослойные тканые бронепакеты прострачивают, что предотвращает образование складок. В случае поперечно ориентированных композитов сшивается только кромка;
- размер взрывозащитных покрывал изменяется от $1,5 \times 2,0$ м до $2,0 \times 2,0$ м. Существуют покрывала других размеров, обеспечивающие необходимый уровень защиты транспортных средств;
- вес: 10–15 кг;
- уровень защиты: баллистический предел V_{50} при испытании осколком весом 17 гран равен 400–600 м/с.

Взрывозащитные покрывала используют также для защиты дверей полицейских автомобилей и транспортных средств правоохранительных органов и военного персонала.



Рис. 13.9. Устройство «Mitigator» для уничтожения бомб цилиндрической формы

13.5.5. Устройства для уничтожения бомб цилиндрической формы

Часто правоохранные агентства вызываются для уничтожения взрывных устройств в форме трубы. Существуют устройства (рис. 13.9), уменьшающие силу взрыва и улавливающие образующиеся осколки. Эти устройства делают из препрегов на основе поперечно ориентированных слоев СВМПЭ волокон.

Одно из таких устройств называется Mitigator. Его разработали для техников канадской Королевской полиции. Оно весит 70–100 фунтов и сделано из противобаллистического СВМПЭ материала для улавливания осколков взрывных устройств цилиндрической формы размером 2–12 дюймов, содержащих до 225 г взрывчатки. В этих целях используют также роботы, имеющие дополнительные устройства в виде колес и рук.

13.6. Бронированные транспортные средства

Военные действия зависят от поддержки танков, бронированных наземных транспортных средств, грузовых самолетов и вертолетов. Транспортные средства перевозят военнослужащих, снабжение и боеприпасы. Специально разработанные транспортные средства могут вести огонь подобно танкам и военным вертолетам.

Противобаллистические материалы, используемые в наземных транспортных средствах, ограниченно применяют и внутри танков, чтобы при поражении неприятелем удержать осколки. Однако приоритетом является разработка легкого, мобильного грузового бронированного транспортного средства, использующего современные противобаллистические материалы. Разработка таких наземных боевых транспортных средств, бронированных вертолетов и военных самолетов находится на ранних стадиях проектирования.

В этой главе описаны только разрабатываемые бронированные транспортные средства, в которых применяются высокопрочные волокнистые композиты.

13.7. Бронированные наземные и воздушные транспортные средства

13.7.1. Боевая машина пехоты «Страйкер»

«Страйкер» (рис. 13.10) является первым бронированным транспортным средством, поступившим на вооружение армии США после танка «Абрамс» в 1980-х гг. По сравнению с тяжелыми танками «Абрамс М1-А1, М1-А2» и БМП «Брэдли М2» «Страйкер» имеет устройства ночного видения, улучшенную аппаратуру, он мобильнее, подвижнее и имеет большую скорость разворота.

БМП «Страйкер» применяют в Ираке. При весе 19 т он имеет радиус действия 300 миль и максимальную скорость 60 миль/час. Команда из двух человек перевозит командира и восемь человек пехоты, высаживает их и обеспечивает огневое прикрытие из стрелкового оружия и гранатометов. БМП не предназначена для тяжелого боя, но используется при быстрой атаке.

Броня БМП «Страйкер»

Главную угрозу боевым машинам пехоты «Страйкер» представляют пули высокоскоростных винтовок и противотанковые ракетные снаряды. «Страйкер» менее уязвим к выстрелам из стрелкового оружия и огнеметов, чем БМП семейства М113. Команда и машинное отделение «Страйкера» защищены от выстрелов из бронебойного оружия. «Страйкер», как и «Брэдли», имеет возможность использования дополнительной брони, накладываемой поверх основной брони. Как и «Брэдли», БМП «Страйкер» не предназначена для передвижения с дополнительной броней. Когда необходимо, на стоящую машину устанавливают дополнительную броню. Броня «Страйкера» способна противостоять тяжелому пулеметному и артиллерийскому огню. Усиленное дно защищает от взрыва мин.

Устройство брони

1. Внешняя бронезащита: модульные бронепанели, состоящие из керамического слоя и композита на основе арамидной ткани.



Рис. 13.10. «Страйкер»

2. Крыша: формованный композит на основе арамидной ткани.
3. Внутренняя отделка: формованный стеклопластик из волокон S2.
4. Бронированный ребристый каркас, защищающий от взрыва гранат.
5. Стальная решетка, защищающая от удара противотанковыми ракетными снарядами.

Испытание брони

Испытываются одновременно внешнее металлическое покрытие БМП и броня из композиционного материала.

13.7.2. Быстроходное многоцелевое колесное транспортное средство

Быстроходное многоцелевое колесное транспортное средство проектировали с целью защиты жизни пассажиров (рис. 13.11). Колесные транспортные средства предназначены для перевозки солдат в городах и за их пределами. Они не разрушают асфальт и могут использоваться в колонне совместно с транспортными средствами с более мощной броней. Быстроходное многоцелевое колесное транспортное средство с бронированным верхом признано одним из наиболее современных транспортных средств, позволяющим увеличить гибкость передвижения.

В настоящее время большое количество быстроходных многоцелевых колесных транспортных средств, находящихся на вооружении, бронировано не полностью. Однако в наличии имеются дополнительные противобаллистические съемные комплекты (рис. 13.12). На основе ходовой части машины созданы различные версии бронированного транспортного средства, которые могут использоваться для определенных целей. Выпускаются модификации этой машины М1109, М1114 и М1116.



Рис. 13.11. Бронированные двери из СВМПЭ. Публикуется с разрешения компании АНІ



Рис. 13.12. Установленные бронированные двери из СВМПЭ. Публикуется с разрешения компании АНІ

Уровни защиты

Основную угрозу для быстроходных многоцелевых колесных транспортных средств представляют многократные удары высокоскоростными винтовочными пулями, противотанковыми и противопехотными минами. В большинстве таких транспортных средств используется стальная броня. Однако небольшое количество машин имеет броню из высокотехнологичных противобаллистических материалов. Министерство обороны США делает все для облегчения машин, используя композиты на основе арамидных, СВМПЭ и стеклянных волокон.

13.7.3. Боевые системы будущего

В октябре 2002 г. компания United Defense Industries Inc. представила два прототипа «боевых транспортных средств будущего» на торговой выставке в Вашингтоне. Крупные секции этого транспортного средства, сделанного из легких волокнистых композитов, смогут перевозить грузовые самолеты С 130. Эти транспортные средства будут поставляться на вооружение начиная с 2008 г.

Боевое транспортное средство будущего FCS-W

Это транспортное средство бронируют новым материалом, состоящим из высокопрочного алюминия, волокнистого композита и керамики.

Боевое транспортное средство будущего FCS-T

Это транспортное средство было совместно разработано Великобританией и США. Оно весит 16 т и может доставляться грузовыми самолетами С 130 на поле боя без дополнительной подготовки. Корпус этого транспортного средства сделан из высокопрочного алюминия, усиленного волокнистым композитом и керамикой.

Особенности

Особенностями этих транспортных средств являются:

- использование керамики на подложке из волокнистого композита;
- увеличенный уровень баллистической защиты;
- возможность ремонта в полевых условиях;
- снижение веса более чем на 35% по сравнению с традиционной металлической броней.

13.7.4. Экспедиционные боевые транспортные средства

С 1998 г. Морской корпус США разрабатывает экспедиционную боевую машину (рис. 13.13). Это бронированное саморазвертывающееся водоплавающее гусеничное транспортное средство, имеющее защиту от ядерного, биологического и химического поражения.

Экспедиционное боевое транспортное средство имеет длину 336 дюймов, ширину 144 дюйма и высоту 83 дюйма. В снаряженном боевом виде данный транспорт весит приблизительно 38 т и имеет скорость движения 20 узлов в море и 25 миль в час на земле. Его вводят на вооружение в 2006 г.

Требования к броне

- Защита от мощных пуль с упрочняющим сердечником.
- Защита от осколков с расстояния до 15 м.

Керамика имеет подложку из облегченного органопластика на основе СВМПЭ волокон.

13.7.5. Корпуса транспортных средств

Впервые новые материалы (алюминий) начали применять в европейских бронированных боевых машинах в начале 1960-х гг. Боевые бронемшины были разработаны «Агентством по развитию и исследованию защиты» (DERA) совместно с



Рис. 13.13. Экспедиционная боевая машина. Публикуется с разрешения компании Honeywell International Inc.



его партнером Vickers. Боевая бронемашина имеет корпус из стеклопластика, а не из традиционного алюминия или стали.

Броню боевой машины делали из препрегов на основе стеклянных волокон фирмы Hexcel и эпоксидной смолы фирмы Ciba. Этот композит повышает выживаемость элементов конструкции машины. Ее собирают на заводе Vickers в Лидсе, Великобритания.

Корпус боевой машины изготовлен из композита на основе стеклянного E-волокна и эпоксидной смолы фирмой Vosper Thornycroft. Корпус является одним из самых крупных и толстых производимых когда-либо из композита изделий данного типа. В наиболее толстых сечениях корпуса укладывают до 70 слоев стеклянных волокон.

Противобаллистические материалы боевых машин

Броня из композиционных материалов увеличивает не только защиту от стрелкового и артиллерийского оружия, но и уменьшает степень поврежденности транспортного средства, увеличивая выживаемость экипажа.

Вес и скорость боевых машин

Корпус боевого транспортного средства из композиционного материала весит приблизительно 6 тонн, а общий вес машины составляет примерно 24 т при максимальной скорости около 75 км/час.

Другие преимущества

Другие преимущества композитных материалов состоят в следующем:

- высокой коррозионной стойкости при повышенной влажности и в солевом растворе;
- уменьшенной заметности в луче радара;
- возможной меньшей визуальной заметности;
- пониженной термозаметности;
- уменьшенной акустической заметности;
- простоте производства;
- легкости обслуживания;
- уменьшенном уровне шума внутри и вне транспортного средства.

Кроме того, ученые DERA уверены, что в транспортных средствах будущего возможно дальнейшее уменьшение веса.

13.7.6. Бронированные вертолеты

Нижняя часть вертолетов требует броневой защиты от выстрелов с земли из легкого оружия. Поскольку фюзеляж вертолетов должен быть легким, его дно легко поражается выстрелами снизу. Легкая броня для низа вертолетов используется уже несколько лет. В самолетах броню размещают внутри корпуса, однако из-за более низкой скорости вертолетов ее можно устанавливать и снаружи (рис. 13.14). Некоторые российские вертолеты имеют броню, укладываемую на пол. Однако



Рис. 13.14. Бронированный вертолет. Публикуется с разрешения компании Honeywell International Inc.

это неудобно, поскольку для установки и удаления брони необходимо снимать сидения.

Баллистическая защита вертолетов

Вертолетная броня должна защищать от удара:

- имитатора осколка 30-го калибра;
- бронебойной пули винтовки M2 50-го калибра (12,7 мм).

Устройство вертолетной брони

В зависимости от уровня баллистической защиты и из-за ограничения веса вертолетная броня состоит из следующих слоев:

- монолитных пластин поперечно ориентированного органоластика на основе СВМПЭ волокон, полученных в пресс-форме при высоком давлении;
- внешнего слоя керамики со следующей конструкцией:
 - монопластины или нескольких небольших пластин из карбида бора или карбида кремния;
 - клеящего слоя;
 - подложки, сформованной из препрега на основе арамидной ткани или поперечно ориентированных волокон СВМПЭ.

Броня вертолета обычно состоит из слоя органоластика на основе арамидной ткани или поперечно ориентированного СВМПЭ композита, к которому в автоклаве или пресс-форме при высоком давлении приклеены пластины карбида бора. Все детали брони покрыты износостойкой нейлоновой тканью, которая препятствует разлету высокоскоростных осколков при баллистическом ударе.

Испытание брони

Жесткие формованные панели испытывают как автономную броню путем определения V_{50} согласно методике MIL-STD-662F.

Другие требования

Броня вертолета проходит также следующие испытания:

- на износостойкость;
- способность выдерживать экстремальные температуры -50 и $+65^{\circ}\text{C}$;
- высотные испытания;
- стойкость к воздействию технических жидкостей;
- озоностойкость;
- стойкость к воздействию различных погодных условий;
- вибростойкость;
- стойкость к воздействию песка и пыли.

13.7.7. Бронированные сидения вертолета

Бронированное сиденье вертолета предназначено для защиты летчиков и пассажиров (рис. 13.15). Имеется целый набор легких бронированных сидений из композиционных материалов, снабженных системой подвески, ослабляющей удар при крушении вертолета, что увеличивает вероятность выживания пилота. Современные вертолеты проектируют так, чтобы смягчить силу удара и предотвратить смятие кабины. Тем не менее, нагрузки, которые испытывают пассажиры при крушении, могут превышать уровень их физиологический выносливости.

Кресло пилота может быть как небронированным, так и бронированным, защищающим от многократных выстрелов бронебойными винтовочными пулями.



Рис. 13.15. Бронированное сиденье вертолета. Публикуется с разрешения компании АНІ

Конструкция вертолетного сиденья

Ударопрочное сиденье состоит из бронированного кресла, установленного на раме из легкого сплава. Сиденье разрабатывают в соответствии с конструкцией кабины. Оно может быть дополнено передвижной панелью, обеспечивающей защиту с боковых сторон.

Требования к прочности

Бронированные компенсирющие удар сиденья пилота и стрелка вертолета разрабатывают в соответствии с требованиями спецификации FAR/JAR, часть 29 или MIL-S-58095, а также требованиями огнестойкости стандарта FAR, часть 25.853 b.

Система ослабления энергии разработана так, чтобы уменьшить передаваемый пассажиру импульс удара с 50 до 20 г.

Баллистическая защита

Бронированные сиденья команды предназначены для защиты от бронебойных пуль М2. Облегченная броня является стандартной защитой экипажа большинства боевых вертолетов.

Противобаллистические материалы

Противобаллистические материалы для сидений вертолета могут состоять из:

- полученных в пресс-форме при высоком давлении монолитных пластин из поперечно ориентированного органопластика на основе СВМПЭ волокон;
- керамического внешнего слоя со следующей конструкцией:
 - монопластины или нескольких небольших керамических пластин из карбида бора или карбида кремния;
 - клеевого слоя;
 - формованной подложки на основе препрега из арамидной ткани или поперечно ориентированных слоев волокон СВМПЭ.

Изготовление сидений вертолета

Сиденья из композита обычно формуют в автоклаве из арамидной или СВМПЭ ткани и лицевого слоя керамики из карбида бора. Пластины покрывают износостойкой нейлоновой тканью, которая предотвращает разлет осколков при баллистическом ударе.

Другие требования

Сиденья вертолета должны удовлетворять ряду других требований, описанных в стандарте Министерства обороны MIL-STD-810. К ним относятся вибростойкость, стойкость к действию песка и пыли, удара, солевого тумана, влаги, высокой и низкой температуры, а также достаточная механическая прочность.

Сиденья обеспечивают безопасность и комфорт во время полета, защищают членов экипажа от перегрузок и выстрелов неприятеля. Бронированное сиденье должно легко устанавливаться в кабине вертолета, создавая прекрасную защиту.

13.7.8. Вертолет «Пума»

В 1987 г. швейцарские Военно-воздушные силы заказали три вертолета «Супер-Пума» с увеличенной грузоподъемностью. После этого появилась возможность обобщения опыта эксплуатации в полевых условиях и технического обслуживания этих машин. «СуперПума» оборудована двумя двигателями и может использоваться для многих военных и гражданских целей (например, помощи в бедствии). В случае опасности и экстренного приземления «СуперПума» оборудована современными средствами защиты двух пилотов.

Целью программы «Пума» 1998 г. была разработка бронированного вертолета «Пума» для миротворческих и военных операций. Некоторые компании в Европе, Великобритании и США закупают бронированные вертолеты «СуперПума». Вертолет «Пума» оснащен сменной броней. Для быстрой и легкой установки бронепанелей используют несколько технических методов, не требующих сверления отверстий в полу вертолета.

Бронепанели вертолета «Пума» защищают от различных пуль. Типичная поверхностная плотность брони, останавливающей осколки большого калибра и винтовочные пули, изменяется от 5,5 до 7,5 фунт/фут² в зависимости от типа керамики, волокнистой подложки и технологии производства бронепанелей.

Баллистическая защита «Пумы»

Броня предназначена для защиты от многократных ударов различными винтовочными пулями.

Конструкция брони вертолета «Пума»

Бронепанели делают следующим образом: режут большую формованную панель, монтируют керамические плитки и затем подрезают их водоструйным ножом по форме панели.

Керамический слой состоит из карбида кремния или карбида бора. Размер плитки обычно равен 100 × 100 × 4 мм или 100 × 100 × 6 мм. Подложку делают из препрегов поперечно ориентированного СВМПЭ или арамидной ткани на основе фенольной смолы. При поверхностной плотности брони 32 кг/м² ее полный вес равен:

- пол кабины – 42 кг;
- пол салона – 155 кг.

13.7.9. Грузовой самолет C 130

Четырехдвигательный турбовинтовой самолет «Геркулес C 130» является основным транспортным средством ВВС США (рис. 13.16). Этот самолет способен приземляться и взлетать с короткой и неровной взлетно-посадочной полосы, перевозить людей и грузы. Его используют и в качестве боевой машины, танкера, са-



Рис. 13.16. Самолет С 130, ведущий пулеметный огонь. Публикуется с разрешения компании Honeywell International Inc.

нитарной машины, при пожаротушении и для наблюдения за погодой. Имеется более 40 версий «Геркулеса», которые используют более чем в 50 странах.

Из истории

Поставки С 130А Министерству обороны США начались в декабре 1956 г., а первых моделей С 130В — в апреле 1959 г. Новейшая модель — С 130Н. Броня грузового самолета способна выдержать многократные удары высокоскоростных винтовочных пуль.

Броня и комплектация С 130

В самолете С 130 используют облегченную броню с керамической облицовкой. Различные компании США и Великобритании поставляют бронированные сиденья и бронепанели с керамической облицовкой для С 130. Полы С 130 оборудованы броней с керамической облицовкой для защиты персонала от выстрелов с земли. Комплекты брони С 130 включают защиту кабины, сидений пилотов, салона, корпуса радара, сосудов с жидким кислородом и дверей для выброса парашютистов.

Баллистическая защита С 130

Бронепанели предназначены для защиты от многократных поражений различными пулями и осколками снарядов. Типичная поверхностная плотность брони, защищающей от осколков большого калибра и винтовочных пуль, изменяется от 5,5 до 7,5 фунт/фут² в зависимости от используемой керамики, подслоя композита и технологии производства панелей.

Устройство брони С 130

Крупные бронепанели формуют в автоклаве. Затем их разрезают на более мелкие детали, монтируют на них керамические плитки и затем подрезают водоструйным ножом по форме детали.

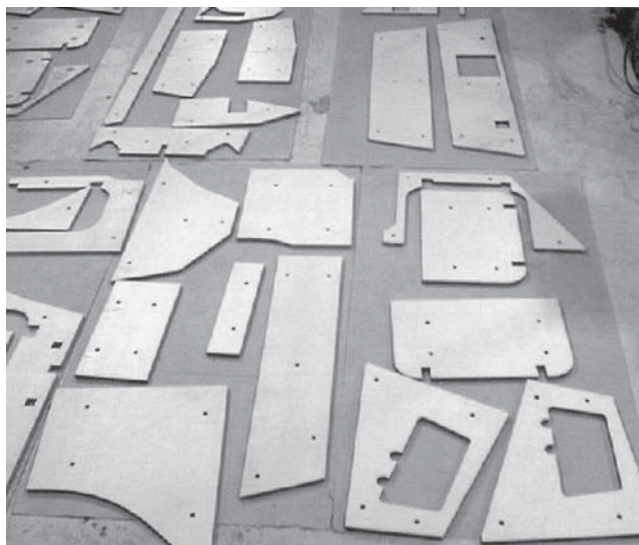


Рис. 13.17. Бронированные детали транспортных средств. Публикуется с разрешения компании АНІ

Керамический слой состоит из карбида кремния или карбида бора. Размер плиток обычно равен $100 \times 100 \times 4$ мм или $100 \times 100 \times 6$ мм. Подложку делают из препрегов поперечно ориентированного СВМПЭ или арамидной ткани на основе фенольной смолы.

Комплекты брони боевых самолетов С 130 являются сменными и модульными, допускающими возможность замены в случае позреждения или особых условий окружающей среды.

13.7.10. Бронекомплекты самолета

Имеющиеся в наличии бронекомплекты кабины и пола пригодны для использования в самолетах типа Chinook МН-47, Blackhawk МН-60 и Super Huey УН1Н. Некоторые производители предлагают комплекты брони, разработанные специально для защиты от многократных выстрелов из определенного оружия. На рис. 13.17 представлены комплекты брони с описанными свойствами, используемые в самолетах и вертолетах. Соединения бронепанелей разработаны так, чтобы предотвратить поражение снарядами в этих местах. Это достигается соединением брони внахлест и креплением панелей болтами к металлической конструкции.

Комплекты брони разработаны для защиты от множественных ударов. Типичная поверхностная плотность брони, защищающей от осколков большого калибра и от винтовочных пуль, изменяется от 5,5 до 7,5 фунт/фут² в зависимости от используемой керамики, композитного подслоя и технологии производства панелей.

Баллистическая защита

Бронепанели предназначены для защиты от многократных ударов осколками большого калибра и различными высокоскоростными винтовочными пулями.

Изготовление брони

Крупные бронепанели формуют в автоклаве. Затем их разрезают на более мелкие детали, монтируют на них керамические плитки и затем подрезают их водоструйным ножом по форме детали.

Керамический слой состоит из карбида кремния или карбида бора. Размер плиток обычно равен $100 \times 100 \times 4$ мм или $100 \times 100 \times 6$ мм. Подложку делают из препрегов поперечно ориентированного СВМПЭ или арамидной ткани на основе фенольной смолы.

13.7.11. Бронированные транспортные средства

Обстрелы транспортных средств инициировали потребность в создании бронированных автомобилей и других транспортных средств. Высокопоставленные лица в деловых и правительственных кругах нуждаются в бронированных транспортных средствах, обеспечивающих высокую мобильность при максимальной защите от пуль. Традиционная стальная броня обеспечивает невысокий уровень защиты, и транспортные средства на ее основе довольно тяжелы. Объем двигателя и система торможения в таких машинах модифицированы для приспособления к большому весу. Это уменьшает скорость транспортного средства и комфорт при повороте.

Вес брони

Табл. 13.1 демонстрирует вес прозрачной и непрозрачной брони транспортных средств. Современная броня на основе СВМПЭ и арамидных волокон гораздо легче стальной брони и обеспечивает при этом достаточную защиту от пуль в городских условиях. В настоящее время вес бронированных транспортных средств минимален, если используется броня на основе СВМПЭ волокон. В этом случае нет необходимости менять двигатель или систему торможения. Таким образом, после установки брони на основе СВМПЭ волокон транспортное средство обеспечивает первоначальный комфорт и мобильность в экстренных случаях (рис. 13.18).

При использовании облегченной брони транспортное средство легко модернизировать для увеличения уровня защиты при появлении новой баллистической угрозы. Влага, химические вещества, высокая температура, холод и другие условия окружающей среды не влияют на свойства облегченной брони. Бронированные транспортные средства предназначены для защиты от различных ви-

Таблица 13.1. Вес прозрачной и непрозрачной брони транспортных средств

Материал	Вес брони (кг)	
	9 мм с ЦМО	АК-47
Прозрачная броня 3,25 м ²	87	168
Непрозрачная броня 4,18 м ²		
Сталь	102	146
Арамидная ткань и фенольная матрица	33	123
СВМПЭ Spectra Shield®	20	77



Рис. 13.18. Бронированный автомобиль полиции. Публикуется с разрешения компании BMW

дов пуль, включая 9-мм пули с цельнометаллической оболочкой, 357 Magnum, 44 Magnum, АК-47, пули НАТО, бронебойные и снайперские пули.

Требования к броне

Перед заказом бронированного транспортного средства с компанией, производящей броню, должны обсуждаться следующие вопросы:

- какая часть транспортного средства требует бронирования?
- уровень защиты;
- возможность обслуживания;
- требования к характеристикам транспортного средства;
- необходимость изменения тормозной системы;
- требования аттестации;
- эргономические вопросы;
- другие требования.

Части транспортного средства, подлежащие бронированию

Капот, радиатор, стекла, стойки, крыша, потолочные балки, багажник, задняя часть сиденья, двери, пол, дверные замки и петли, топливный бак, система подачи топлива, тормозная система и др.

13.7.12. Наземные судна на воздушной подушке

Наземные боевые судна на воздушной подушке предназначены для транспортирования оборудования, грузов и солдат Военно-воздушных и десантных сил от судна до берега и вдоль берега.

Наземные суда на воздушной подушке имеют высокую скорость и способны перенести 60–75 т полезного груза (рис. 13.19). Броня этих транспортных средств основана на арамидных волокнах и имеет поверхностную плотность

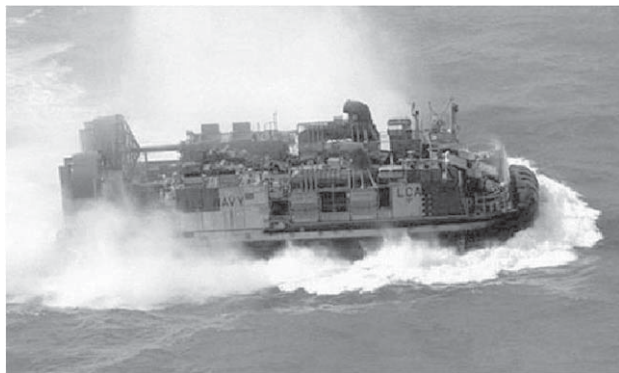


Рис. 13.19. Выход на сушу судна на воздушной подушке

13 фунт/фут². Новейшая броня на основе СВМПЭ материалов и керамического слоя из карбида бора весит 9 фунт/фут². Новая броня способна остановить пули энергией 50 калорий с упрочняющим сердечником из карбида вольфрама.

13.7.13. Броня судов на воздушной подушке

Типичный вес формованных бронепластин для остановки винтовочных пуль, соответствующих III уровню защиты стандарта NIJ, равна 18,5 кг/м², а для обеспечения IV уровня защиты в зависимости от типа керамики и типа пули ее вес может достигать 32 кг/м².

13.8. Адреса по Интернету

Honeywell	www.spectrafiber.com
Teijin	www.twaron.com
DSM	www.dsm.com
DuPont	www.kevlar.com
Ceradyne	www.ceradyne.com
Saint-Gobin Ceramics	www.ceramicmaterials.saint-gobain.com
CoorsTek	www.coortek.com
Cercom	www.cercominc.com
Armor Holding Inc.	www.armorholdings.com
O'Gare-Hess & Eisenhardt	www.armorholdings.com/mobile/ogara.html
Point Blank	www.pointblankarmor.com
Ares Protection	www.aresprotection.com
Raibentex	www.rabintex.com
Plasan SaSa	www.plasansasa.com
ArmorWorks	www.armorworks.com
Composiflex	www.composiflex.com14

ГЛАВА 14

ФОРМОВАННАЯ БРОНЯ С ВНЕШНИМ КЕРАМИЧЕСКИМ СЛОЕМ

Ж.М. Саламе, Б. Кефелек, ARES Protection, Франция

14.1. Введение

Разработка керамики для защиты от баллистических угроз имеет долгую историю. Керамическая композитная броня вначале предназначалась для защиты от поражения пулями со свинцовым сердечником, а позднее и мощными бронебойными. Расширение использования керамики для защиты от стрелкового оружия (вплоть до бронебойных винтовочных пуль калибра 14,5) и оружия большего калибра (начиная с 20 мм пушек) объясняется ее высоким потенциалом. Две главные причины здесь заключаются в ее баллистической эффективности и низкой стоимости. Керамические материалы имеют значительно более высокие защитные качества, чем металлическая броня того же веса. Помимо этого, керамика позволяет использовать подложку из недорогих материалов, например, стеклопластика, стали и алюминия, что приводит к снижению стоимости брони.

Керамические материалы, которым можно придавать различную геометрическую форму (квадратные, прямоугольные, шестиугольные панели и монолитные плиты, используемые для изготовления индивидуальной брони), можно соединять с подложкой из композиционных материалов на основе высокоэффективных полиэтиленовых или арамидных волокон.

При столкновении с керамикой снаряд разрушается, а высокая прочность керамики при сжатии позволяет ей выдержать возникающую при ударе нагрузку. В материале снаряда появляется текучесть, и в конечном счете он разрушается на мелкие фрагменты. Подложка брони останавливает эти осколки и смягчает опасность получения травмы от удара.

Однако броня с керамическим лицевым слоем имеет и недостатки, главными из которых являются ее недостаточные ударо- и виброустойчивость. Хрупкость керамики преодолевают за счет усовершенствования производственного процесса, улучшения конструкции брони и повышения характеристик поддерживающего волокнистого композита.

Необходимость в защите от баллистических ударов приобретает все большее значение. Угрозы поражения на поле боя все возрастают (например, вследствие более частого использования бронебойных пуль и снижения удельной доли боеприпасов со свинцовым сердечником), что влияет на выбор керамической брони. Поэтому керамика продолжает играть важную роль на рынке бронематериалов.

В настоящей главе мы старались показать, каким образом удалось преодолеть недостатки керамической брони и в какой степени она может быть приспособлена к специфическим требованиям различных систем индивидуальной защиты и защиты транспортных средств. Разумеется, при одинаковом уровне баллистической угрозы каждая система защиты имеет свои ограничения, и поэтому конструкция керамической брони должна обладать достаточной гибкостью и приспособляемостью.

14.2. Типы керамики

Имеющиеся на сегодняшний день многочисленные виды керамических материалов изготавливают преимущественно из искусственного, а не природного сырья. Это объясняется отсутствием природных материалов, обладающих желаемыми свойствами, и сложностью производственных процессов, требующих, чтобы свойства сырья удовлетворяли весьма строгим критериям. В результате часто возникает необходимость в добавках, например, полимерных. Важно иметь в виду, что развиваются не только сами материалы, но и технология производства, конструкция брони и области ее применения.

Конечные свойства материала зависят от различных факторов. Например, от давления формования, степени спекания и наличия химической связи между частицами керамики. Чтобы обеспечить высокие и стабильные баллистические характеристики, процесс должен быть контролируемым. Процессы получения керамики можно разделить на менее дорогостоящие (металлокерамика) и более дорогостоящие (керамика горячего прессования). Использование дорогой керамики оправдано, когда главным критерием выбора материала является возможность снижения веса в расчете на единицу поверхности (например, карбид бора или карбид кремния). Окись алюминия можно использовать, когда лимитирующим фактором оказывается стоимость материала, а не его вес.

В настоящей главе мы даем краткое описание свойств керамических материалов, нашедших широкое применение при изготовлении облегченной брони. Перечисленные выше соображения указывают на некоторые различия керамических материалов. Поэтому мы предпочли описать свойства керамики в рамках применения в качестве брони, а не чисто научное описание их механических свойств, которые могут существенно отличаться у различных фирм-производителей.

14.2.1. Окись алюминия

До настоящего времени керамика из окиси алюминия (Al_2O_3) остается наиболее популярным керамическим материалом, что объясняется превосходным соотношением высоких эксплуатационных свойств и низкой стоимости (табл. 14.1).

Керамическая окись алюминия имеет хорошие баллистические свойства. Ее используют как для защиты от пуль малого калибра (5,56 мм), так и от снарядов крупных калибров (35–105 мм). Для улучшения механических свойств керамики в нее вводят определенные добавки (например, двуокись циркония).



Таблица 14.1. Свойства окиси алюминия

Средняя плотность	(г/см ³)	3,6–3,9
Содержание окиси алюминия	%	90–99
Поглощение влаги	%	0
Твердость по Викерсу	МПа	1200–1500
Вязкость разрушения	МПа м ^{1/2}	3–5
Прочность при изгибе	МПа	330–380
Прочность при сжатии	МПа	≥ 2000
Модуль упругости	ГПа	270–370

Таблица 14.2. Свойства карбида кремния

Средняя плотность	(г/см ³)	3,1–3,3
Поглощение влаги	%	0
Твердость по Викерсу	МПа	2000–2600
Вязкость разрушения	МПа м ^{1/2}	2–5*
Прочность при изгибе	МПа	≥ 350
Прочность при сжатии	МПа	≥ 2500
Модуль упругости	ГПа	≈ 380–450*

* *Примечание:* зависит от производителя и технологии производства.

Окись алюминия является наименее хрупким и самым дешевым современным керамическим материалом, что важно для большинства видов брони. Однако она имеет серьезный недостаток, заключающийся в сравнительно большом весе. Ее выпускают в виде изделий разнообразной формы, а получают ее в основном методом прессования в форме или спекания.

14.2.2. Карбид и нитрид кремния

Эти керамики используют все чаще, когда требуется снизить вес изделия. Средние значения механических свойств этих материалов приведены в табл. 14.2.

SiC

Существует два основных метода получения карбида кремния. В первом связь частиц SiC достигается путем протекания химических реакций. Для этого в сравнительно крупнозернистый компактируемый порошок карбида кремния добавляют углерод и металл, который в вакуумной печи плавится. Часто вместо металла используют кремний, который реагирует с углеродом и образуется SiC. Второй метод состоит в спекании порошкообразного SiC с помощью неокисных добавок. Часто также используют стандартные процессы формования керамики, при которых температура спекания достигает 2000°C и выше.

SiN

Выпускают три основных типа нитрида кремния: химически связанный нитрид кремния, нитрид кремния горячего прессования и спеченный нитрид кремния. Химически связанный нитрид кремния изготавливают путем проведения хими-

Таблица 14.3. Свойства карбида бора

Средняя плотность	(г/см ³)	2,4–2,5
Содержание В ₄ С	%	90–99
Поглощение влаги	%	0
Твердость по Викерсу	МПа	2800–3200
Вязкость разрушения	МПа м ^{1/2}	2,5–3
Прочность при изгибе	МПа	400–420
Модуль упругости	ГПа	≈ 450

ческой реакции компактированного порошка кремния и азота. Нитрид кремния горячего прессования и спеченный нитрид кремния имеют лучшие физические свойства, что позволяет использовать их в случаях, требующих более высоких эксплуатационных характеристик. Как и керамику из окиси алюминия, нитрид кремния выпускают в виде изделий самой различной геометрической формы.

14.2.3. Карбид бора

Средние значения механических свойств карбида бора приведены в табл. 14.3.

По твердости карбид бора В₄С занимает третье место среди всех известных человечеству материалов (после алмаза и нитрида бора с кубической структурой — кристаллической решеткой). Этот материал имеет небольшой вес, но его недостатком является хрупкость. Кроме того, В₄С чрезвычайно дорог.

14.3. Форма изделий из керамики

14.3.1. Плоские пластины

Плоские пластины могут иметь квадратную, прямоугольную или шестиугольную форму. Их размеры могут варьироваться от квадратов размером 20 × 20 мм вплоть до прямоугольников длиной 200 мм и более. По механическим свойствам прессованные пластины обычно весьма однородны. Наиболее уязвимыми точками брони являются стыки пластин.

Толстые и тонкие пластины

Длина и ширина тонких пластин ограничены их толщиной. Можно изготовить тонкую пластину (3–4 мм), размеры которой будут примерно соответствовать размеру бронепанели (10 × 12 дюймов), но при этом она будет очень хрупкой и может разбиться при транспортировке или эксплуатации, даже при наличии композитной подложки.

Толстые пластины могут достигать размеров 100 мм и даже 300 мм. Они предназначены для защиты от поражения снарядами крупного калибра. Большая толщина затрудняет достижение однородных механических свойств пластины.

Малые, большие и монопластины

Геометрическая форма и особенно площадь деталей из керамики оказывают решающее воздействие на их баллистические свойства. Чем крупнее пластина, тем

больше энергии она способна поглотить и тем меньше энергии вынуждена рассеивать поддерживающая подложка из композита.

С другой стороны, чем шире керамическая пластина, тем меньше ее стойкость к многократным ударам. В этом случае механическая стойкость к низкоскоростным ударам также оказывается пониженной.

Небольшие пластины шириной 20 мм очень хороши в случае, когда необходимо обеспечить максимальную степень защиты от множественных попаданий. При ударе керамика разрушается на меньшей площади, что ограничивает распространение трещины, однако в этом случае снижается и уровень рассеяния энергии. В результате броня оказывается более тяжелой, так как для увеличения диссипации энергии удара ее приходится оснащать тяжелой подложкой. Традиционный способ снижения веса в этом случае заключается в установке между керамической пластиной и подложкой прокладок, задача которых состоит в снижении пробивающей силы осколков снаряда.

С другой стороны, крупные керамические пластины эффективны для остановки снарядов крупных калибров от 20 до 105 мм. Для максимальной диссипации энергии следует использовать пластины большого размера. Разумеется, пониженная стойкость к множественным попаданиям нежелательна, но ограниченная точность стрельбы из орудий требует стойкости к многократным ударам только при дистанциях менее 300 м.

Монопластины обычно используют в системах индивидуальной бронезащиты. В этом случае толщина пластины мала по сравнению с ее длиной и шириной. Такие пластины весьма хрупки, что компенсируется за счет использования соответствующей подложки.

Правильность геометрической формы и величина допусков при изготовлении керамики также играют важную роль для обеспечения хорошей склейки керамики и подложки, что позволяет достичь наилучшей баллистической стойкости.

В любом случае, ключевым фактором обеспечения однородности габаритов и механических свойств керамики остается уровень технологических «ноу-хау» фирмы-производителя.

14.3.2. Керамика особой геометрической формы

Как уже отмечалось выше, керамика может иметь различную форму — от квадратных и шестиугольных пластин (плоских или изогнутых) до шаровидной, цилиндрической и т.д. Это может быть связано как с весом, баллистическими или механическими свойствами изделия, так и с соображениями маркетинга. Керамическая деталь должна иметь определенные свойства, и особые формы помогают решать различные проблемы, например, защиту от множественных попаданий, создание брони сложной трехмерной формы или достижение высокой ударной стойкости.

Шарообразная форма

Пластины и шары поглощают энергию удара различным образом. При одной и той же толщине шары теоретически позволяют снизить вес брони на 50% по сравнению с пластиной. На практике, даже если керамические шары сильнее изме-

няют направление полета пули, для того чтобы компенсировать отсутствие керамики между ними, их диаметр должен быть увеличен примерно на 30%. Некоторые разработчики предлагают укладывать шары в несколько слоев (обычно не более двух). Однако реально достичь снижения веса и стоимости брони за счет использования таких систем так и не удалось.

Цилиндры

Вертикально расположенные цилиндры ведут себя аналогично шарам, поскольку между ними имеются пустоты, которые не могут участвовать в диссипации энергии. Однако цилиндры обладают большей прочностью на сжатие, а в некоторых случаях и большей баллистической эффективностью.

Шары и цилиндры невелики по размерам. Их общий недостаток заключается в наличии слабых мест между ними, там, где имеется недостаток керамики. До настоящего времени наилучшим способом устранения этого недостатка является улучшение конструкции подложки (например, благодаря использованию волокон).

Пластины сложной геометрической формы

Монопластины сложной геометрической формы могут иметь различный размер. Используют и пластины небольшого размера (50 × 50 мм), и одиночные нагрудные вставки размером 250 × 300 мм.

Керамические пластины формируют под давлением или просто под действием собственной силы тяжести. Для обеспечения заданных габаритов и однородной механической структуры во время спекания важно контролировать внутренние напряжения и усадку порошка.

Монопластины сложной кривизны являются самым популярным видом индивидуальной брони, поскольку их изготовление не требует дорогостоящего оборудования, а при правильном выборе и хорошей склейке с подложкой они позволяют получить броню наименьшего веса. Их главным недостатком остается хрупкость, значительно сокращающая срок эксплуатации.

Некоторые производители выпускают также керамические вставки большой толщины, которые крепят на подложку, состоящую лишь из нескольких слоев ткани. Так они добиваются снижения стоимости брони, которая, однако, оказывается чрезмерно хрупкой и теоретически подлежит замене после одноразового использования. По оценкам армий некоторых стран, 50% их индивидуальных бронесистем подлежат замене после однократного использования или даже просто после хранения на складе.

14.4. Подложка из облегченных композиционных материалов

Подложка является вторым по значимости элементом, позволяющим добиться оптимальных свойств брони. Обычно в качестве материала подложки в облегченных бронесистемах используют стекло- и органопластики, что объясняется их легкостью, превосходными механическими свойствами и легкостью обработки, позволяющей придать им почти любую форму. Диапазон их стоимости весьма

широк. Стеклопластик является самым дешевым, а органопластик на основе высокопрочных полиэтиленовых СВМПЭ волокон – самым дорогим (приблизительно в десять раз дороже стеклопластика).

Тем не менее, выбор материала подложки в большой степени зависит от мощности снаряда. Действительно, броня на основе керамики и подложки из волокнистого композита, предназначенная для защиты от пуль калибром 5,56 или 7,62 мм, не может защитить от поражения тяжелыми снарядами калибра 20–30 мм.

14.4.1. Стекланные волокна

Стекловолокна обладают худшими механическими свойствами, но зато они самые дешевые из всех противобаллистических волокон. В броне используют два вида стекловолокон (Е и S2 волокна). Механические и баллистические свойства S2-волокон близки к арамидным, но они несколько дешевле. Во многих случаях выбор типа стекловолокон обусловлен требованиями к жесткости, сложности формы и влагостойкости материала. При использовании без керамики его баллистические характеристики стеклопластика близки к стали, однако жесткость ниже, а стоимость выше.

Что касается керамической брони, то сталь или алюминий часто являются более привлекательными подложками, чем менее жесткий стеклопластик. Поскольку жесткая подложка улучшает баллистические свойства керамики, композиты здесь не всегда являются оптимальным материалом.

Тем не менее, стеклопластики все еще применяются для усиления керамических бронепанелей, поскольку им легко придать сложную форму, они позволяют снизить вес и упростить конструкцию брони по сравнению с тонкими сварными металлическими листами.

14.4.2. Органопластики на основе арамидных тканей

Одним из преимуществ тканых материалов является их способность останавливать осколки. Арамидные волокна обладают хорошими механическими свойствами. Используют арамидные нити, состоящие из различного количества волокон в нити и соответственно имеющие различную линейную плотность, начиная от наиболее тонких и эффективных с показателем 400 текс и до 3400 текс, в случае не слишком строгих требований к весу брони. Ткани с перпендикулярным переплетением 0/90° до сих пор обеспечивают максимальную баллистическую эффективность, несмотря на большие усилия по разработке более сложных многоосных тканей. Арамидные ткани являются самым распространенным материалом подложек для керамической брони. В них высокие баллистические характеристики сочетаются со сравнительно низким весом и неплохой жесткостью. Далее, хорошие противотравматические свойства обеспечивают им преимущество перед полиэтиленовыми тканями, которые имеют более низкую поверхностную плотность, но менее эффективно защищают от травм.

Важно подчеркнуть, что чисто арамидные тканые материалы не способны остановить винтовочную пулю (калибра 5,56 мм и пулю НАТО калибра 7,62 мм).

Однако в сочетании с керамическим лицевым слоем тканый арамидный броне-пакет действует как сеть, улавливающая осколки (керамика разрушает пулю, а подложка останавливает оставшиеся фрагменты). Этот механизм работы связан со свойствами ткани и собственно волокна.

14.4.3. СВМПЭ ткани

За последние три десятилетия удалось добиться значительного прогресса в повышении механических свойств волокон из длинноцепных линейных полимеров. Важное место здесь занимает сверхвысокомолекулярный полиэтилен. По сравнению с арамидными волокнами ориентированные СВМПЭ волокна имеют более высокие механические свойства и меньшую плотность.

Как ни странно, ткань из 100% СВМПЭ обладает практически теми же свойствами, что и арамидная ткань. Ткани из СВМПЭ не имеют сколько-нибудь значительных преимуществ перед арамидными тканями: их баллистическая эффективность примерно одинакова, а стоимость выше. Более того, полимерные композиты из СВМПЭ ткани обладают меньшей жесткостью и не столь эффективны в роли основы, поддерживающей керамический слой.

Тем не менее, ткани из СВМПЭ в отдельных случаях позволяют снизить вес и уменьшить поглощение влаги. Без керамики они довольно эффективно останавливают осколки.

14.4.4. Многослойные СВМПЭ композиты

Поперечно ориентированный (0/90°) композиционный материал характеризуется тем, что в нем нити не переплетаются, а укладываются параллельно друг другу. Волокна СВМПЭ (Spectrav и Dyneemav) пропитываются различными полимерными смолами. При использовании каучукообразной матрицы получают мягкий композит, а при использовании фенольной смолы получают более жесткий композит. Важно подчеркнуть, что волокна СВМПЭ чувствительны к температуре. Хотя они плавятся примерно при 140°C, композиты на их основе начинают размягчаться уже при 50–60°C. Поэтому композиционные материалы на основе новых более жестких смол, менее чувствительных к изменению температуры, возможно, позволят достичь приемлемого компромисса в этом отношении.

На сегодняшний день многослойные композиты, состоящие из поперечно ориентированных слоев однонаправленных волокон, обеспечивают наилучшее соотношение веса и баллистических свойств при защите от различных видов оружия. Это единственные материалы, способные останавливать винтовочные пули вроде 7,62 мм М80 или 7,62 мм АК-47 при плотности 17 кг/м². Безусловно, самым привлекательным свойством многослойных материалов (Spectrav и Dyneemav) является их малый вес.

С другой стороны, эти материалы не лишены определенных недостатков, например, ухудшения механических свойств при высоких температурах. При использовании многослойного композита в роли подложки под керамику механи-



ческие свойства особенно важны, так как жесткость подложки является определяющим фактором обеспечения высокой баллистической эффективности брони.

Общие свойства керамики и композитов на основе СВМПЭ и арамидных волокон

Основное преимущество брони из керамики и композитной подложки по сравнению с броней из стали заключается в ее значительно меньшем весе (обычно в 2–3 раза). Возможность снижения веса является важнейшим фактором при выборе материала брони, даже если принять во внимание хрупкость керамики и, следовательно, худшие защитные свойства.

14.4.5. Многослойные органопластики на основе арамидных волокон типа gold shield

В настоящее время существуют и многослойные композиты на основе однонаправленных слоев арамидных волокон. Однако для использования в качестве подложки для керамики их свойства оказались хуже, чем у органопластиков на основе СВМПЭ волокон.

Следует иметь в виду, что броня из керамики и арамидов была создана совсем недавно, и делать определенные выводы по отношению к ним пока преждевременно. Действительно, первоначально они предназначались для мягкой брони (бронезилетов, защищающих от pistolетных пуль), и лишь в последнее время их стали применять в сочетании с жесткими матрицами для изготовления подложек для керамики в средствах индивидуальной защиты и для бронезащиты транспортных средств.

14.5. Технология производства брони с керамическим лицевым слоем

Для склеивания слоя керамики и подложки используют в основном два метода:

- склеивание в автоклаве (при давлении от 3 до 20 атм.);
- склеивание в прессе (при давлении от 3 до 100 атм. и выше).

Автоклав обеспечивает хорошую связь подложки и керамики сложной кривизны, поскольку позволяет равномерно распределять давление по обеим поверхностям композитов, препятствуя растрескиванию керамики. Склеивание в прессе оптимально для плоских и изогнутых пластин большого и малого размера. Этот процесс требует дорогостоящего оборудования, например, пресс-форм, в то время как автоклавный процесс существенно дешевле.

В обоих случаях используют комбинированное действие давления и высокой температуры. Давление влияет на свойства подложки, особенно в случае материала СВМПЭ типа Shield. Температуру обычно поддерживают в диапазоне от 120 до 150°C, а весь цикл отверждения матрицы длится приблизительно один час в зависимости от толщины панели и скорости нагрева и охлаждения.

Во время процесса склеивания керамики и подложки главное внимание следует обращать на:

- повреждения керамической пластины;
- смещение керамических пластин, вызывающее образование зазора между ними;
- наличие контакта между керамикой и подложкой, который должен быть как можно более плотным (например, благодаря использованию соответствующей матрицы).

14.5.1. Средства индивидуальной бронезащиты личного состава

Керамика находит широкое применение в средствах индивидуальной защиты личного состава, поскольку она позволяет добиться не только значительного снижения затрат (по сравнению с системами, состоящими только из СВМПЭ), но и обеспечивает защиту от поражения бронебойными пулями небольшого калибра. Это обусловлено тем, что керамический слой способен разрушить стальной сердечник пули, что не под силу одному лишь органопластику.

Однако керамическая облицовка брони имеет серьезный недостаток, а именно: хрупкость и, как следствие, низкую способность выдерживать множественные баллистические удары. Производители ведут большую работу по повышению ударостойкости керамики и ее способности обеспечивать защиту от множественных попаданий. Эту задачу они решают путем выбора оптимальной подложки и обеспечения ее связи с керамикой.

Жесткие формованные композитные пластины с лицевым керамическим слоем

Обычно керамическая облицовка состоит либо из одиночной пластины, либо из множества соединенных друг с другом небольших пластин, образующих плоскую или изогнутую поверхность.

Следует отметить, что размер керамических элементов влияет на характер разрушения и самой керамики, и снаряда. Чем больше керамическая пластина, тем больше энергии она поглощает и, следовательно, тем меньше энергии приходится поглощать подложке.

Чем больше энергии поглощает керамика, тем больше она повреждается и тем больше площадь области растрескивания. Поэтому использование керамики с запасом толщины позволяет уменьшить толщину подложки, но при этом уменьшается ее способность выдерживать многократные баллистические удары. Что еще важнее, броня становится слишком хрупкой и может не обеспечить защиты.

Вследствие этого структуры, состоящие из большого числа пластин (небольших квадратов, шестиугольников и прямоугольников), более эффективно защищают от множественных попаданий, поскольку распространение трещин ограничено размером керамических элементов. Однако небольшие керамические пластины поглощают меньше энергии. Кроме того, небольшие пластины под нагрузкой могут сдвигаться, что приводит к повышению ударных характеристик.

Размер пластин зависит от характера баллистической угрозы. Чем мощнее удар, тем больше должна быть керамическая пластина. С другой стороны, уменьшение поглощения энергии керамикой может быть компенсировано за счет уве-



личения толщины подложки, поглощающей остальную энергию удара. Это приводит к повышению общего веса брони в расчете на единицу площади. Следует заметить, что качество подложки является важнейшим параметром, который должен находиться под строгим контролем.

Таким образом, применение небольших керамических пластин приводит к:

- повышению защищенности от случайного низкоскоростного удара в процессе эксплуатации брони;
- повышению степени защиты от множественных баллистических поражений;
- увеличению толщины подложки;
- увеличению веса системы.

Как уже отмечалось, идеального бронематериала не существует. Любой материал, керамический или волокнистый, имеет свои недостатки, которые приходится преодолевать за счет использования других материалов:

- V_4C – самая легкая керамика, однако она также и самая хрупкая и дорогая;
- полиэтиленовые волокна – самые легкие, но они имеют низкую термостойкость и высокую скорость ползучести;
- арамидные волокна позволяют добиться компромисса между весом и стоимостью, но не в состоянии обеспечить защиту от высокоскоростных пуль со свинцовой сердцевинкой;
- керамические монопластины обладают наивысшим энергопоглощением, но слишком хрупки;
- керамические шарики обеспечивают наивысшую степень защиты от множественных баллистических поражений и случайных низкоскоростных ударов, но приводят к возрастанию веса брони.

Броня с керамической облицовкой и гибкой подложкой

На протяжении последних лет работа по созданию гибких видов брони велась повсеместно. В этой области существует несколько разработок, которые либо не были сертифицированы, либо остались недоступными для широкого круга пользователей. В настоящее время единственным коммерчески производимым изделием является Ceraflex. Броня торговой марки Ceraflex производится на основе существующих противобаллистических материалов, причем она имеет гибкую связь керамики с подложкой. Это позволяет достичь наилучшего соотношения между весом, уровнем защиты, стойкостью к множественным попаданиям, а также себестоимостью. Керамическую облицовку делают из множества керамических пластин, лежащих на гибкой прокладке, под которой располагается подложка из арамидных, полиэтиленовых или стеклянных волокон, но может быть и металлическая структура из стали или алюминия.

Гибкую броню испытывали на соответствие различным стандартам, в том числе и стандарту NIJ 0101.04 («баллистическая устойчивость индивидуальной брони для защиты личного состава»). Улучшение свойств волокон и керамики должно проложить путь к новым разработкам и дальнейшему повышению эффективности гибкой брони. Что касается использования гибкой брони для защи-

ты транспортных средств, то пока оно не вызывает большого интереса, поскольку задача состоит не только в поглощении кинетической энергии снаряда, но и в снижении степени деформации при взрыве.

Каски с керамическим лицевым слоем

Аналогичным образом обстоит дело и с касками, имеющими керамическую облицовку. Каска должна не только защищать от баллистической угрозы (обычно от осколков), но и обладать достаточной прочностью, чтобы выдерживать случайные удары при выполнении повседневных боевых задач. Некоторые производители разработали монолитные изогнутые корпуса, прикрывающие переднюю и боковые поверхности каски. В большинстве случаев керамику поддерживает корпус каски из арамидной ткани. Следует вновь подчеркнуть, что монопластина способна остановить снаряд только в случае, если она не была повреждена до этого (например, при выполнении предыдущего боевого задания).

Преодолеть указанный недостаток и улучшить эксплуатационные характеристики позволяет гибкая керамическая защита, изготовленная из множества небольших керамических пластин. Отметим, что установка дополнительной керамики на каску, весящую до 1 кг, приводит к ее утяжелению более чем вдвое, что приемлемо только при выполнении краткосрочных боевых заданий, связанных с повышенными баллистическими угрозами.

Использование материала Shield, состоящего из полиэтиленовых волокон и жесткой матрицы, является лучшим способом удержания веса каски на приемлемом уровне при одновременном повышении уровня защиты от поражения винтовочными пулями. Каски этого типа уже запущены в производство, хотя и в весьма ограниченных количествах.

Биомедицинские последствия использования таких касок исследовались несколькими врачами, однако ясные выводы о степени защиты головы от травм данными касками пока сделаны не были. Полагают, что наилучшее решение состоит в достижении наибольшей степени защиты при ограничении веса каски определенным уровнем. Это особенно касается касок округлой формы, при которой удар под некоторым углом требует значительно меньшего поглощения кинетической энергии.

14.5.2. Бронезащита транспортных средств

Большинство транспортных средств в Вооруженных Силах США уже оборудовано броней с керамической облицовкой, начиная от легких полноприводных автомашин 4 × 4, грузовиков, бронетранспортеров и кончая боевыми машинами пехоты. Защита, обеспечиваемая керамической броней, в большой степени зависит от свойств снаряда и его кинетической энергии.

Наземные транспортные средства

Разнообразные баллистические угрозы подробно описаны в стандарте Stanag 4569. Обычно наибольшую угрозу для боевых машин пехоты и бронетранспортеров пред-

ставляют бронебойные снаряды калибра 20–30 мм. В танках керамическая броня используется реже, и она не всегда необходима. Механические свойства мощных снарядов (скоростью 1300 м/с) обусловлены наличием тонких упрочняющих стержней, изготовленных из высоковязких сплавов вольфрама или аналогичных металлов (уранового ряда). Заряд гранатомета (класса РПГ7) представляет собой снаряд с высокоскоростной кумулятивной струей меди (скоростью 4–7 км/с).

Броня с керамической облицовкой эффективна для защиты от первой из названных угроз, но не от кумулятивных снарядов, для защиты от которых необходим многослойный материал.

На сегодняшний день в этом случае используют крупные и толстые керамические плиты из окиси алюминия Al_2O_3 толщиной от 20 до 90 мм в зависимости от угла попадания снарядов, в комбинации с композитами или металлами (алюминий/титан/сталь). Такие системы конкурируют с металлической броней, оснащенной промежуточными слоями. В расчете на единицу поверхности они тяжелее более чем вдвое. Чем выше кинетическая энергия, тем меньше эффективность такой системы в расчете на единицу веса по сравнению со слоистой металлической броней, оснащенной промежуточным слоем. Высокоскоростной снаряд вызывает мощную ударную волну, которая может отразиться и повредить участки связи с керамикой. Это ведет к снижению эффективности при множественных попаданиях, и поэтому для ее сохранения необходима специальная конструкция брони, обеспечивающая жесткую фиксацию керамических плит в первоначальном положении.

Важнейшим требованием к бронезащите транспортных средств является высокая стойкость к низкоскоростному удару. Безопасность брони обеспечивает поверхностная отделка керамики, обычно посредством ее инкапсуляции в резину или металл.

Самолеты и вертолеты

В этой области приоритетом является снижение веса. Для защиты от всех пуль со свинцовой сердцевинной наилучшим материалом остается СВМПЭ материал типа Shield, обладающий наименьшим весом при обеспечении необходимой баллистической защиты.

Для защиты от бронебойных пуль калибра 5,56 и 7,62 мм применяют керамику с небольшим удельным весом. Наилучший комплекс свойств обеспечивает использование SiC и особенно B_4C , несмотря на их более высокую стоимость. В этом случае броня может обеспечить защиту от поражения бронебойными пулями вплоть до калибров 12,7/14,5. Из-за большой дистанции стрельбы защита от множественных попаданий не является приоритетной задачей. Однако вибростойкость и ударная стойкость брони (для днища летательных аппаратов) очень важны при эксплуатации аппарата. Поскольку вибрация передается через точки крепления бронепанелей, надежное крепление очень важно. Обеспечение размещения груза и ходьбы по керамическим панелям, не снижая их баллистические свойства, является довольно сложной задачей. Для уменьшения деформации керамических деталей под нагрузкой перспективными могут оказаться тонкие и же-

сткие материалы, например, легкие металлы или углепластики, играющие роль внешней защитной оболочки в многослойной структуре.

К броне также предъявляют требование возможности легкого демонтажа при выполнении небоевых задач, вследствие чего способ крепления брони не должен быть чрезмерно сложным. Кроме того, следует принять во внимание трудность внесения изменений в конструкцию самолетов и вертолетов, поскольку ни одно отверстие в корпусе (для крепления болтов) не может быть просверлено без согласия фирмы-изготовителя.

Корабельная броня

В этой сфере приоритетной задачей также является снижение веса. Для защиты от любой свинцовой пули наилучшим материалом остается СВМПЭ Shield, формируемый при высоком давлении, поскольку он не только легкий, но и влагостойкий (в отличие от чувствительных к влаге арамидных волокон).

Для отражения более серьезных баллистических угроз (бронебойных пуль и снарядов) хорошее соотношение эксплуатационных характеристик и себестоимости достигается при использовании керамики из окиси алюминия. При этом может быть обеспечена защита от поражения бронебойными пулями вплоть до калибров 12,7/14,5. Как и в случае авиационной брони, защита от множественных попаданий на кораблях не играет большой роли. Корпус корабля является важной частью его брони. Обычно корпус изготавливают из стеклопластика или алюминия, жесткость которых может способствовать прочному креплению бронеплит, а в отдельных случаях служить и одним из слоев многослойных сэндвич-структур.

Важное значение имеет остойчивость корабля при движении с высокой крейсерской скоростью, и поэтому вибрация брони должна быть исключена. Распределение бронеплит на корпусе корабля также должно быть тщательно продумано, чтобы не нанести ущерба плавучести. Вся эта работа должна проводиться под контролем фирмы-кораблестроителя. Очевидно, что керамика может сильно повлиять на остойчивость корабля и, следовательно, на безопасность экипажа.

14.6. Испытания брони с керамической облицовкой

14.6.1. Винтовочные пули

В табл. 14.4 представлены некоторые типы боеприпасов различного калибра. Пули можно подразделить на три группы, различающиеся по своей структуре:

- пули со свинцовой сердцевинкой. Они могут быть остановлены броней, на 100% состоящей из волокнистых материалов (например, СВМПЭ Shield);
- пули с сердечником из мягкой стали, обладающие большей пробивной силой, но не являющиеся бронебойными. Они также могут быть остановлены чисто волокнистой броней, например, могут быть остановлены пули автомата Калашникова АК 47 калибра 7,62 × 39;
- бронебойные пули с твердым упрочняющим сердечником. Этот тип пуль встречается все чаще. Он обладает большей пробивающей силой за счет наличия твердого сердечника.

Таблица 14.4. Типы боеприпасов

Тип снаряда	Название боеприпасов
Пистолетные и револьверные пули	9 мм, 357 Magnum, 44 Magnum, ...
Охотничьи боеприпасы	12 калибр, .300 Винчестер, 7,64, ...
Винтовочные боевые пули	5,45, 5,56 (M113), 7,62 (АК), ...
Боевые пулеметные пули	12,7 мм, 14,5 мм, осколки (12,7 и 20 мм, ...)
Боевые снаряды (пушки)	снаряды калибром 20 и 30 мм, ...

Чисто волокнистые материалы не способны останавливать бронебойные пули. В этом случае используют передний керамический слой, который крепят к волокнистой подложке. Керамика разрушает сердечник на мелкие фрагменты, которые затем останавливаются волокнистой подложкой.

14.6.2. Бронебойные пули

Калибр бронебойных снарядов довольно широк, начиная от пуль калибра 5,56 мм и заканчивая снарядами калибра 135 мм. Их главной чертой является наличие сердечника, который играет более важную роль, чем скорость полета снаряда. Сердечники изготавливают из различных твердых материалов, например, высокопрочной стали, карбида вольфрама, вольфрамовых сплавов и урана (при испытаниях последний используют редко по причине опасности для здоровья). Например, бронебойная пуля калибром 7,62 мм с сердечником из карбида кремния имеет пробивную силу, почти соответствующую снаряду калибром 12,7, который почти в десять раз тяжелее.

Для защиты от бронебойных пуль важное значение имеют свойства керамики, особенно ее твердость и вязкость, что подталкивает фирмы-производители к совершенствованию своей продукции.

14.6.3. Стандарты испытаний

Баллистические испытания систем индивидуальной бронезащиты проводят согласно стандартам NIJ (США) и PSDB (Великобритания), а броню транспортных средств испытывают согласно стандартам EN 1063 и Stanag 4569. Эти четыре стандарта дополняют друг друга и применимы для широкого ряда боеприпасов.

Стандарты описывают баллистические испытания, однако, чтобы избежать повторения предыдущих глав, мы приводим лишь важнейшие их рекомендации. Главными моментами, на которые следует обратить особое внимание, являются:

- точное описание боеприпасов, а именно структуры и скорости пуль;
- минимальная дистанция стрельбы, обеспечивающая стабильность полета пули;
- для брони с керамической облицовкой важное значение имеет расстояние от края пластины до точки удара и расстояние между точками попаданий. Оно обычно составляет 25–120 мм для винтовок, 50–200 мм для калибров 12,7/14,5 и 300 мм или более для снарядов калибра 20–30 мм. Эти характеристики определяются требованиями заказчика в зависимости от сферы применения брони и специфики выполняемых задач;

- последовательность выстрелов. Она имеет важнейшее значение, поскольку влияет на результаты испытаний. Например, стрельба сначала в край образца, а затем в его центр дает иные результаты, чем стрельба в обратной последовательности при сохранении расстояния между точками удара.

Считается, что структурная жесткость бронематериалов может сильно влиять на однородность свойств. Жесткая панель обеспечивает значительно лучшую защиту от множественных попаданий, чем панель, становящаяся все мягче и мягче. Например, жесткие металлы обеспечивают лучшую защиту от множества выстрелов, чем броня из внешнего керамического слоя с подложкой из волокнистого композита, который легко расслаивается.

Средства индивидуальной баллистической защиты

Спецификой баллистических испытаний индивидуальной брони является присутствие крупного пластилинового или желатинового блока, поддерживающего бронепластину или бронезилет. Поддерживающий блок позволяет измерять деформацию тыльной поверхности образца, вызывающую травму. Подобные материалы не могут считаться надежной моделью человеческого тела и в основном являются инструментом, позволяющим сравнивать поглощение энергии различными бронематериалами. Особое внимание следует обратить на состав и состояние пластилина, поскольку его свойства зависят как от состава, так и от температуры.

Важно отметить, что мягкий пластилин значительно повышает способность керамической пластины выдерживать множественные попадания, поскольку подложка в этом случае деформируется в меньшей степени, чем без пластилина.

Новые спецификации включают испытания материала вблизи края бронепластины и обстрел под углом в 30° , что позволяет выяснить, действительно ли керамический слой соответствует всей защищаемой поверхности. Это имеет важное значение для улучшения качества керамической брони, которую часто испытывают лишь путем удара в центр бронепанели, и при этом она не выдерживает многократные удары.

Традиционно считается, что бронебойные пули разрушают керамическую облицовку на большей площади, чем мягкие свинцовые пули. Поэтому стандарты предусматривают минимум 3–6 выстрелов свинцовыми пулями по каждой бронепанели. Однако развитие керамических материалов позволяет им выдерживать до 12 и более попаданий. Это свидетельствует, что броня стала лучше выдерживать близкие попадания пулями и попадания вблизи край панели, обеспечивая тем самым лучшую защиту.

Бронезащита транспортных средств

При испытании брони транспортных средств ее устанавливают на раме, причем за образцом оставляют пустое пространство, что значительно увеличивает площадь отслаивания керамического слоя от волокнистой подложки.

Приводим основные рекомендации по испытанию брони пулями калибра 5,56 мм и 7,62 мм:

- крепление (рис. 14.1):
 - панель устанавливают на металлической раме так, чтобы она была закреплена в четырех углах,
 - образец должен заходить за кромки рамы по меньшей мере на 20 мм,
 - предпочтительнее расположить панель между двумя листами алюминия толщиной 5/10 мм, находящимися на расстоянии 150 мм от панели, что позволит определить степень дробления передней и задней поверхностей панели;
- при испытании брони с волокнистой подложкой с тыльной стороны системы не следует помещать какой-либо жесткий материал. В противном случае керамика не будет расслаиваться, а количество поглощаемой энергии уменьшится.

14.6.4. Метрология

- Температура испытаний:
 - постоянная температура $20 \pm 5^\circ\text{C}$;
 - испытания при экстремальных температурах $+80$ и -40°C .
- Дистанция стрельбы:
 - 10–20 м для винтовок и охотничьих ружей;
 - 25–100 м для артиллерийских орудий.
- Расположение точек удара:
 - 50 мм между точками удара или от края рамы при стандартных испытаниях (до 25–30 мм для мелкокалиберных пуль).
- Измерение скорости полета снарядов:
 - замеры скорости производят в нескольких метрах от лицевой поверхности образца.
- Угол обстрела:
 - угол 0° (для мощных снарядов с большой пробивающей силой), 30° , 45° и 60° – обычно максимальный угол.
- Последовательность выстрелов:
 - мишень обычно испытывают боеприпасами одного типа. Однако допускается использование и нескольких видов боеприпасов, если деформация тыльной поверхности образца не влияет на результаты близких попаданий.
- Результаты и критерии оценки:
 - испытания считают успешными, если снаряд застрял в испытываемой панели или если он не пробил алюминиевую фольгу, расположенную на расстоянии 150 мм за образцом.

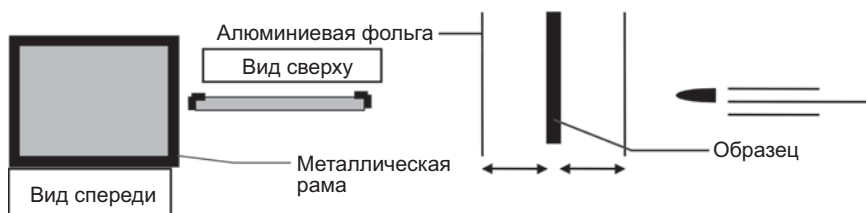


Рис. 14.1. Крепление панели при испытаниях

- При описании результатов баллистических испытаний должны быть указаны:
 - 1 – тип снаряда или пули;
 - 2 – скорость;
 - 3 – условия стрельбы: температура в градусах Цельсия, расположение мест попаданий, углы обстрела;
 - 4 – тип оружия;
 - 5 – дистанция стрельбы;
 - 6 – результаты каждого выстрела: сквозное пробитие мишени; остановка снаряда; остановка снаряда в промежуточном слое; остановка в керамическом слое.

14.7. Баллистические характеристики материалов с передним керамическим слоем

Поверхностная плотность (вес в расчете на единицу поверхности) облегченной брони с керамической облицовкой приводятся в табл. 14.5, а данные о весе и стоимости брони, защищающей от пуль калибра 7,62 × 54 снайперской винтовки Драгунова российского производства, даны в табл. 14.6.

Работа по совершенствованию материалов неустанно продолжается, и улучшение качества сырья и технологии производства ежегодно приводят к снижению веса брони еще на несколько процентов. При этом, однако, баллистические угрозы также постоянно возрастают.

Таблица 14.5. Баллистические свойства (Ares Protection 2004)

Боеприпасы (попадание под углом 0°)	фунт/фут ²
5,56 × 45 НАТО; 7,62 × 51 НАТО; 7,62 × 39 АК47; 7,62 × 54 винтовки Драгунова	3–5,5
Бронебойные 7,62 × 39 АК47; 5,56 × 45; 7,62 × 51 (P80/PPI); 300 винч.; 868S; 7,62 × 54 бронебойные винтовки Драгунова, 3006 M2	5,2–7,2
7,62 × 51 FFV Bofors (WC)	10,2–11,3
Бронебойные калибра 12,7 и 14,5 В32 20 мм	15,4
25 мм APDS угол удара 60° (на 40 мм алюминиевой конструкции)	22,5
25 мм APDS угол удара 45° (на 40 мм алюминиевой конструкции)	39

Таблица 14.6. Сравнение характеристик различной брони, предназначенной для защиты от поражения пулями калибра 7,62 × 54 снайперской винтовки Драгунова. Приводится по публикации: Natick – 18th International Symposium on Ballistics, San Antonio, TX, 15–19 November 1999

Система	Поверхностн. плотность керамики (фунт/фут ²)	Поверхностн. плотность композита (фунт/фут ²)	Общая поверхностн. плотность (фунт/фут ²)	Стоимость системы (\$)
Стальной прокат			15	100
Окись алюминия/стеклопластик S2	7,0	2,5	9,7	250
Карбид кремния/ Kevlar 29	5,8	2,4	8,4	646
Карбид бора/Kevlar	4,3	2,0	6,5	1115

Производство книг на заказ
Издательство «Техносфера»
тел.: (495) 234-01-10
e-mail: knigi@technosfera.ru

Реклама в книгах:

- модульная
- статьи

Подробная информация о книгах на сайте
<http://www.technosfera.ru>

Легкие баллистические материалы
Под ред. Ашока Бхатнагара

Компьютерная верстка – В.В. Павлова
Дизайн книжных серий – С.Ю. Биричев
Дизайн – А.В. Войткевич
Корректор – М.Г. Емельянова
Выпускающий редактор – А.Ю. Филатова

Формат 70x100/16. Печать офсетная.
Гарнитура Ньютон.
Печ.л. 24,5. Тираж 3000 экз. (1-й завод 1000 экз.) Зак. №
Бумага офсет №1, плотность 65 г/м².

Издательство «Техносфера»
Москва, ул. Краснопролетарская, д.16, стр.2

Отпечатано в ОАО «Областная типография «Печатный двор»
432049, г. Ульяновск, ул. Пушкарева, 27