

Материаловедение

УДК 623.451

ВЛИЯНИЕ ДЕМПФИРУЮЩИХ СВОЙСТВ СПЛАВОВ НА ПУЛЕСТОЙКОСТЬ

С.Е. Алексеенцева, И.В. Захаров

Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Рассмотрены процессы формирования ударных волн при выстреле и изменение интенсивности ударных волн. Выявлено влияние ударно-волнового эффекта при соударении пули с преградой и демпфирующей способности материала преграды на пулестойкость конструкции.

Ключевые слова: пулестойкость, демпфирование, броня, давление соударения, сквозное пробитие, ударные волны, огнестрельное оружие.

Разработка конструкции бронепреграды базируется на определении пулестойкости как способности преграды противостоять сквозному пробитию пулями и отсутствию при этом опасных для человека вторичных поражающих элементов (ГОСТ Р 51112-97 «Средства защитные банковские. Требования по пулестойкости и методы испытаний»). В данном понятии пулестойкости опасными вторичными элементами могут быть не только вторичное осколочное поле за броней, но и запреградное действие ударной волны, способной нанести динамический удар человеку и привести к заброневой травме, а также произвести останавливающее тактическое действие. Считается, что минимально необходимая характеристика убойного действия пули по живым целям без защитных средств – это кинетическая энергия около 30 Дж [1, 5]. Поэтому конструкция бронепреграды должна снижать запреградное действие ударных волн и оказывать демпфирующее действие за счет включения конструктивных элементов из специальных материалов или сплавов. В наибольшей степени это относится к индивидуальным средствам защиты, особенно для средств защиты 1-го и 2-го класса типа «мягкой» брони.

Международная классификация огнестрельного оружия включает большое разнообразие образцов стрелкового оружия, соответствующих по баллистическим характеристикам 1-му и 2-му классу защиты с диапазоном скоростей удара в интервале от 280 до 410 м/с (табл. 1).

Процесс соударения пули огнестрельного оружия с преградой характеризуется рядом параметров – прочностными и геометрическими характеристиками преграды и ударника, скоростью и углом соударения и др. Для оценки динамики ударного взаимодействия ударника с преградой необходимо учитывать их конструкцию и форму [1]; температурные поля, вязкость и пластические свойства материала пре-

*Светлана Евгеньевна Алексеенцева (к.ф.-м.н., доц.), доцент.
Игорь Владиславович Захаров, инженер.*

грады; распространение упругих, пластических и ударных волн; формирование областей деформирования и протекание процессов разрушения [2].

Т а б л и ц а 1

Баллистическая таблица средств поражения

Тип оружия	Калибр и тип пули	Начальная скорость, м/с	Масса пули, г	Класс защиты
Малокалиберная винтовка	5.6 БО	310	2.6	1
Револьвер «Наган»	7.62, свинец БО	280	7.2	
Пистолет Макарова	9.0 ОБ/ПС	310	6.2	
Пистолет «Вальтер-Олимпия»	22 LRHV Lead / 5.6 БО	320	2.6	
Револьвер «Смит и Вессон»	38 SpRN Lead	259	10.2	
Пистолет ПСМ	5.45, сталь ОБ/ПС	315	2.6	2
Пистолет АПС	9.0 сталь ОБ/ПС	340	6.0	
Пистолет ТТ	7.62, сталь ОБ/ПС	420	5.6	
Пистолет «Парабеллум»	9.0 Para FMJ / 9.0 ОБ	410	8.0	
Пистолет-пулемет UZI	9.0 Para FMJ / 9.0 ОБ	410	8.0	

Примечание: ОБ – оболочечная свинцовая пуля, БО – свинцовая пуля без оболочки, ОБ/ПС – оболочечная пуля с простым стальным сердечником.

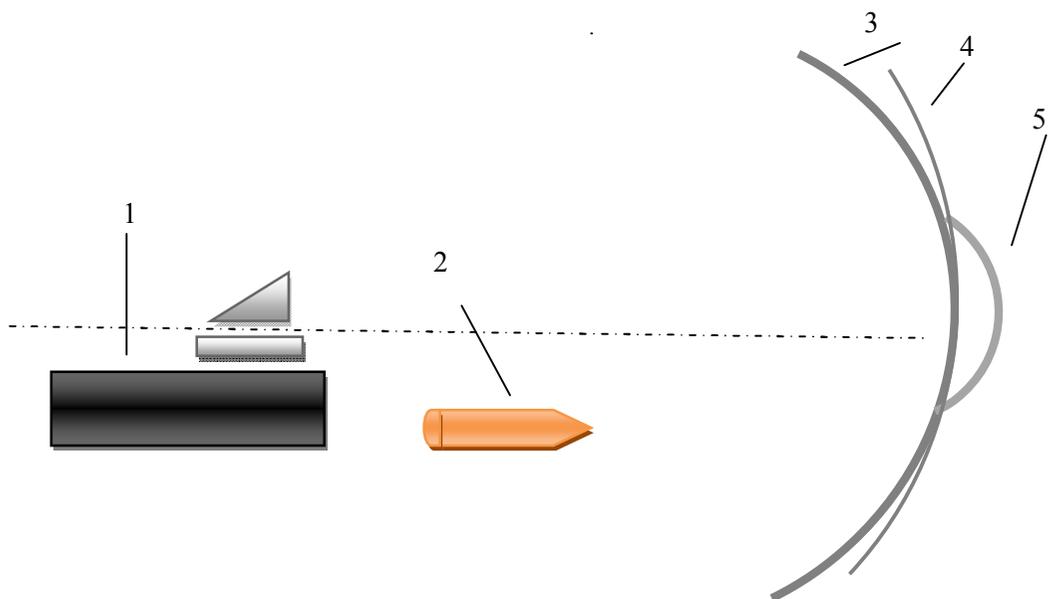
Модели взаимодействия пули с преградой в основном имеют целью выявить зависимости глубины пробития преграды от параметров преграды и пули. Дальнейшее создание пулестойких преград, обеспечивающих минимальное запреградное действие, нуждается в направленном детальном исследовании различных аспектов соударения, исследовании картины образования волн при полете пули и соударении пули с преградой.

Проведены сопутствующие экспериментальные исследования интенсивности воздушных ударных волн, их воздействия на преграду и за преградой.

Раскадровка полета пули оружия, соответствующего по баллистическим параметрам 1-му или 2-му классу защиты, а также образования ею ударных волн опубликована по материалам журнала *Guns and Ammo* [4]. Различные этапы процесса сняты американскими исследователями Л. Уокером и Д. Шенком с выдержками в полмиллионную долю секунды. Выстрел произведен из револьвера «Смит и Вессон», модель 29-го калибра со стволом Mag-Na-Ported длиной 63.5 мм, патрон .44 «магнум». Баллистические параметры выстрела даны в табл. 1. Открытая конструкция револьвера позволяет наблюдать выброс пороховых газов из дула и из зазора барабана.

Опережающие пулю пороховые газы, прорвавшиеся в зазор между пулей и стволом, формируют слабую ударную волну (рис. 1, поз. 5) в виде небольшой полусферы с проекцией на плоскость около десятка поперечников ствола.

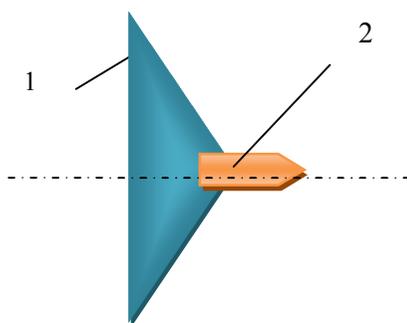
Как видно из рис. 1, при вылете за дульный срез ствола около 5 см пуля 2 еще толкается в донце и разгоняется избыточными пороховыми газами, вырвавшимися из ствола 1. Максимальное давление пороховых газов в канале короткоствольного оружия небольшое – для пистолета ПМ составляет 120 МПа. Так, перед пулей сформирована расширением пороховых газов, образовавшихся из сгоревшего основного порохового заряда гильзы, главная полусферическая ударная волна 3 диаметром в проекции около 10-12 см и практически слитая с ней вторичная волна 4, образованная оставшимся пороховым давлением за пулей.



Р и с. 1. Формирование ударных волн пороховыми газами:
1 – ствол оружия, 2 – пуля, 3, 4 и 5 – соответственно главная, вторичная, опережающая ударные волны

Таким образом, три ударные волны, образованные выбросами пороховых газов и практически слитые вместе, распространяются перед пулей, но их интенсивность в зависимости от расстояния неравнозначна и быстро падает, что хорошо видно из кадров уже на расстоянии 10 см от ствола и далее.

При удалении пули на расстояние примерно 1 м от среза ствола (рис. 2) пуля 2 выходит из облака пороховых газов и обгоняет их, при этом формируя собственную ударную волну 1, охватывающую ее в виде конуса. Максимальное давление ударной волны достигается на расстоянии 2.5 м от дульного среза. Далее с расстоянием волна сходит на ноль (по амплитуде, давлению, скорости).



Р и с. 2. Формирование собственной ударной волны пули:
1 – собственная ударная волна, 2 – пуля

Собственная ударная волна пули имеет максимальное давление на расстоянии 2-3 м от дульного среза оружия и начинает также значительно терять интенсивность непосредственно за интервалом стабильного скоростного режима – около 5 м за дульным срезом ствола.

Экспериментально оценивалось давление воздушных ударных волн за преградой при выстреле с дистанции 5 м пулями ПСТ из пистолета Макарова через отверстие в броне на инерционно-пневматическом устройстве ИЦ «Самара», оно имеет значение менее 1 атм.

Целесообразно рассчитать давление соударения пули с преградами, определяющее пулестойкость преград и запреградное действие пули.

Удар пули со стальным сердечником о сталь можно считать соударением тел из двух одинаковых материалов. Для данных пар соударений из одинаковых металлов скорость движения границы раздела «ударник – мишень» и равна половине значения скорости встречи ударника с мишенью. Между скоростью фронта ударной волны D в мишени и скоростью частиц за фронтом ударной волны по методу торможения существует зависимость [3] $D = c_0 + \lambda u$, где c_0 и λ – эмпирические константы.

Давление соударения p_2 и волновые скорости связаны зависимостью $p_2 = \rho u D$, где ρ – плотность материала мишени.

Таким образом, в момент удара пули ПСТ пистолета ПМ со сталью средней прочности давление соударения составляет 4.7 ГПа. При этом в стальной преграде возникает ударная волна, распространяющаяся со скоростью 4037 м/с. Давления соударения со сплавами из алюминия, титана, никеля имеют значения на порядок ниже [3].

Несмотря на невысокие скорости и малые массы пули для рассматриваемых классов оружия кинетическая энергия пули в соответствии с табл. 1 лежит в интервале от 125 Дж (малокалиберная винтовка) до 670 Дж (пистолет «Парабеллум» и UZI), давления соударения значительно превышают предел текучести используемых материалов бронепреград и соударение является неупругим. Так как соударение происходит в локальной зоне, а ударные волны, возникающие при соударении, распространяются под разными углами в преграде и за преградой, то может реализоваться демпфирование в различных областях материала преграды.

Основной задачей приведенных далее экспериментов было определить способность жестких броневставок из различных сплавов снижать запреградный эффект, а также попытаться определить меру зависимости данной способности от декремента затухания колебаний.

В литературных источниках не выявлено данных об очень высоких значениях амплитуд напряжений, таких, какие возникают при соударении пуль стрелкового оружия с преградами. Имеются данные о повышении способности некоторых классов материалов и сплавов к рассеиванию энергии динамических воздействий с напряжениями в несколько сотен МПа, за которым нивелируется дальнейшее увеличение способности к рассеиванию энергии колебаний в зависимости от роста напряжений [6]. Время взаимодействия пули с преградой (до нескольких миллисекунд) дает возможность проявить демпфирующую способность материалов преграды и внести вклад в пулестойкость конструкции в целом.

Так, проведены эксперименты по определению демпфирующей способности бронепакетов с точки зрения снижения запреградного эффекта. Конструкция пакета включает многослойную «мягкую» броню из баллистической ткани 1-го класса защиты с броневставкой из различных сплавов металлов. Обстрел брони производился с расстояния 5 м из пистолета ПМ оболочечными пулями со стальным сердечником ПСТ. В экспериментах в направлении от дульного среза ствола по линии прицеливания в качестве лицевого слоя в пакете располагался жесткий металлический лист, затем – «мягкая» броня. Имитатор мягких тканей – пластилиновый блок, укрепленный непосредственно за бронепакетом. Доказательством наличия значительного за-

преградного эффекта «мягкой» брони является исходный эксперимент по обстрелу «мягкой» брони 1-го класса без жесткой вставки, в результате которого после обстрела пулями из пистолета Макарова по нормали в имитаторе образуется воронка глубиной 20-25 мм и диаметром около 40-50 мм, причем «мягкая» броня в целом не имеет сквозного пробития. Данный объем воронки принят как 100 % заброневоего эффекта в данной серии экспериментов.

Демпфирующие свойства сплавов оценивались по группам. Первая группа сплавов, которая использовалась в экспериментах в качестве жесткой броневставки, – это стали: конструкционная строительная Ст.3, нержавеющая 17X18H9, сталь 25 + инструментальная Х6ВФ.

Конструкционная строительная сталь Ст.3 широко используется в конструкциях стационарных защитных сооружений, является легко свариваемой, удобной для монтажа конструкций. Ст.3 имеет в составе 0.2 % С, 0.2 % Si, 0.5 % Mn. Механические свойства: предел прочности $\sigma_B = 450$ МПа, предел текучести $\sigma_T = 250$ МПа, относительное удлинение 30 %, ударная вязкость $a_n = 78$ Дж/см² [7].

Коррозионно-стойкая сталь аустенитного класса 17X18H9 за счет высокого содержания никеля обладает высокими вязкопластическими характеристиками. Сплавы с большим содержанием никеля – одни из наиболее стойких к ударным нагрузкам. В состав 17X18H9 входят 0.13-0.21 % С, 17-19 % Si, 1-2 % Mn, 8-10 % Ni. Механические свойства проката: предел прочности $\sigma_B = 588$ МПа, предел текучести $\sigma_{0.2} = 210$ МПа, относительное удлинение 35 %.

Пакет из стали Х6ВФ и стали 25 сформирован с целью обеспечить рассеяние энергии на лицевом твердом слое (сталь Х6ВФ) и прочность при взаимодействии со следующим слоем (сталь 25). Инструментальная сталь Х6ВФ имеет высокую прочность, твердость. Х6ВФ включает 1.05-1.14 % С, 5.5-7 % Cr, 1.1-1.5 % W, 0.5-0.7 % V, имеет механические свойства: предел прочности $\sigma_B = 880$ МПа, ударная вязкость KCU = 90 Дж/см², твердость 59 HRC_Э.

Сталь 25 обеспечивает необходимую прочность и пластичность (предел прочности $\sigma_B = 470$ МПа, относительное удлинение 23 %, ударная вязкость KCU = 49 Дж/см², твердость 143-179 НВ), имеет в составе 0.25-0.3 % С, 0.25 % Cr, 0.17-0.37 % Si, 0.5-0.8 % Mn. Результаты приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Результаты обстрела бронепакета со стальной жесткой вставкой пулями ПСТ из ПМ

Марка стали	Толщина листа, мм	Характер поражения	Запреградный эффект, %	Логарифмический декремент затухания δ , %
Ст.3	2.4	Сквозное пробитие	6-9	0.5-1.2
17X18H9	2.5	60% непробитие	0	0.25-2
Х6ВФ +	0.5	Разрушение		–
Сталь 25	2	Непробитие	0	0.2-0.7

Из табл. 2 видно, что в меньшей степени снижает запреградное действие низкопрочная сталь Ст.3, несмотря на большую толщину. Логарифмический декремент затухания колебаний для всех сплавов, определенный по данным [6], взят для поперечных или изгибных колебаний, которые имеют место при взаимодействии с пулей.

В целом ферромагнитные стали с увеличением концентрации углерода (с 0.15 % С) снижают внутреннее трение. Для стали Х6ВФ предположительно имеется невысокий декремент затухания, так как высокотемпературная обработка до получения высокой твердости обычно приводит к значительному снижению декремента до долей процента [6].

Демпфирующие свойства сплавов на основе алюминия используются в различных аппаратах, работающих в условиях повышенной вибрационной нагрузки, ударов, циклических изменений температуры. В сплавах, содержащих 35-45 % Zn, наблюдается наиболее высокое демпфирование (декремент затухания 7-10 %). В экспериментах в качестве броневставок применялись конструкционные алюминиевые сплавы: деформируемый АД31, высокопрочный В95.

Алюминиевый деформируемый сплав АД31 имеет в составе <0.5 % Fe, 0.3-0.7 % Si, <0.15 % Ti, <0.1 % Cu, 0.4-0.9 % Mg, <0.2 % Zn. Механические свойства проката: предел прочности $\sigma_B = 250$ МПа, предел текучести $\sigma_T = 210$ МПа, относительное удлинение 13 %.

Высокопрочный алюминиевый сплав В95 включает 5-7 % Zn, 1.8-2.8 % Mg, 1.4-2 % Cu, 0.1-0.25 % Cr. Листовой В95 имеет предел прочности 500 МПа, технический предел текучести 450 МПа, относительное удлинение 12 %. Результаты испытаний даны в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Результаты обстрела бронепакета с алюминиевой вставкой пулями ПСТ из ПМ

Марка сплава алюминия	Толщина листа, мм	Характер поражения	Запреградный эффект, %	Логарифмический декремент затухания δ , %
АД31	4	Сквозное пробитие	15	1-1.2
В95	4.5	80% сквозное пробитие	0	0.2-0.4
В95 +	2	Сквозное пробитие	5-6	0.2-0.4
АД31	2			

Более высокие демпфирующие показатели наблюдаются у сплавов алюминия с содержанием Ti, Fe и более низкие с цинком и магнием [6]. Для данных сплавов прочность и толщина преграды дают более значительный эффект в снижении запреградного действия ударной волны.

Конструкционные титановые сплавы широко используются в качестве индивидуальных средств бронезащиты, так как обладают малым удельным весом и высокими показателями вязкости разрушения, прочности и пластичности. В экспериментах применялись сплавы ВТ9 и ВТ20.

Титановый сплав ВТ9 содержит в составе: 5.8-7 % Al, 2.8-3.8 % Mo, 0.2-0.36 % Si, 0.8-2.5 % Zr, имеет механические свойства: предел прочности $\sigma_B = 1200$ МПа, относительное удлинение 6 %, относительное сужение 20 %, ударная вязкость $a_H = 0.3$ МДж/м².

Сплав ВТ20 включает в состав 5.5-7 % Al, 0.5-2 % Mo, 0.8-1.8 % V, 1.5-2.5 % Zr. Механические свойства: предел прочности $\sigma_B = 932-1128$ МПа, предел текучести $\sigma_{0.2} = 834$ МПа, относительное удлинение 10 %, относительное сужение 25 %, ударная вязкость $a_H = 0.5$ МДж/м². Результаты испытаний на способность снижать запреградный эффект приведены в табл. 4.

Результаты обстрела бронепакета со вставкой из титановых и никелевого сплавов пулями ПСТ из ПМ

Марка сплава	Толщина листа, мм	Характер поражения	Запреградный эффект, %
BT9	2	Сквозное пробитие	0
	3	Непробитие	0
BT20	2	Сквозное пробитие	3-5
XH77TiOр	2	Непробитие	0

Декремент затухания титановых сплавов BT9 и BT 20 не исследовался, но в целом титановые сплавы имеют невысокое его значение – до 0.13 % в чистом титане при изгибных напряжениях, которое снижается при повышении легирующих компонентов, таких как молибден и алюминий. Для сплавов с обратимым мартенситом значение декремента может повышаться на порядок и более.

Из табл. 2-4 видно, что пробитие преграды и снижение запреградного действия не коррелируют, так как и при пробитии жесткого листа может быть обеспечена защита от запреградного волнового воздействия.

Сплавами с высокодемпфирующими свойствами являются сплавы магния и сплавы, имеющие марганцево-медные и никель-кобальтовые составляющие (логарифмический декремент затухания ~25 % у сплава НИВКО-10 с 72 % Co и 23 % Ni). При условии равенства у конструкционных материалов таких характеристик, как предел прочности, предел текучести и др., данные сплавы лучше показывают себя в условиях ударного нагружения: снижается чувствительность к локальным повреждениям, резко падает напряжение от ударного нагружения. Никель-титановые сплавы могут достигать значений логарифмического декремента затухания колебаний 10-15 % [6].

Никелевый жаропрочный сплав XH77TiOр имеет высокие прочностные и вязкопластические характеристики, содержит в составе 19-22 % Cr, 2.3-2.7 % Ti, 0.55-0.95 % Al, 4.0 % Fe, 0.06 % C, <0.01 % Se, механические свойства: предел прочности $\sigma_B = 980$ МПа, предел текучести $\sigma_{0.2} = 640$ МПа, относительное удлинение 20 %, ударная вязкость KCU = 49 Дж/см². За счет содержания титана данные сплавы являются дисперсионно твердеющими. Испытания сплава XH77TiOр в качестве вставки в бронепакете, как видно из табл. 4, выявляют высокие показатели как по пробитию, так и по снижению запреградного действия пули ПСТ пистолета Макарова. Логарифмический декремент затухания данного сплава повышается с повышением температуры и достигает при 600 °С около 4 % и выше. Испытания на пулестойкость данного сплава в качестве самостоятельной брони также демонстрируют неплохие показатели снижения запреградного эффекта (около 5 % в сравнении с «мягкой» броней).

В представленной работе сделан анализ процесса формирования ударных волн при выстреле пули из стрелкового оружия, соответствующего 1-му классу по баллистической таблице, и дана оценка ударно-волнового воздействия на бронепреграду. Сделан расчет давления соударения пули для данного типа оружия с преградами из сталей. При анализе степени влияния демпфирующей способности сплавов на пулестойкость (при равенстве толщин преград) выявлено, что конкурирующими процес-

сами являются прочностью и способностью сплавов гасить колебания. Максимальное снижение запреградного эффекта при минимальной толщине бронепреграды возможно при высоких прочностных характеристиках и высоких значениях декремента затухания колебаний – это высокопрочные сплавы и стали с высоким содержанием демпфирующих элементов. Результаты экспериментального исследования способности материалов бронепреграды к снижению запреградного эффекта при выстреле пулями ПСТ пистолета Макарова используются при разработке индивидуальной брони 1-го и 2-го класса защиты.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Калашиников В.В., Алексеенцева С.Е.* Исследование влияния конструкции пули на процесс пробивания стальной преграды // Вестник СамГТУ, Сер. Технические науки. Самара. – №2 (24), 2009. – С. 99-104.
2. *Lambert J.P.* Ballistic Research Laboratory, ARBRL – MP-02828 (AD B027660 L), 1978.
3. *Орленко Л.П.* Физика взрыва и удара. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 304 с.
4. *Холмогорова Н.* Пока моргнет глаз // Оружие. – №3. – 1997. – С. 38-39.
5. *Данилин Г.А., Огородников В.П., Заволокин А.Б.* Основы проектирования патронов к стрелковому оружию. – СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2005. – 374 с.
6. *Фавстов Ю.К., Шульга Ю.Н., Рахитадт А.Г.* Металловедение высокодемпфирующих сплавов. – М.: Металлургия, 1980. – 272 с.
7. *Гуляев А.П.* Металловедение. – М.: Металловедение, 1986. – 544 с.

Статья поступила в редакцию 8 сентября 2011 г.

INFLUENCE OF DAMPING PROPERTIES OF ALLOYS ON BULLET-PROOFNESS

S.E. Aleksentseva, I.V. Zacharov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

The processes of forming of shock waves at a shot and passing of bullet with supersonic speed and change of intensity of shock waves are considered. The role of shock-wave effect in bullet-proofness of construction is shown by bullet hitting a barrier. Influence of damping capacity of material of barrier is deduced on bullet-proofness.

Keywords: *bullet-proof, damping, armour, collision pressure, through punching, shock waves, firearm weapon.*