

## Список литературы

1. Бохан А.С., Куликов С.В., Лапичев Н.В. и др. Опыт отработки высокоскоростного метания стальных сферических элементов из ЛГУ. В сб. «Воздействие мощных потоков энергии на вещества». // М.: ИВТАН. 1992. с.156-163.
2. Kryukov P.V. Review of investigations under way on the large-scale TsNIIMASH ballistic facility // Int. J. Impact Engng. 1999. Vol.23. p.501-508.
3. Piekutowski A.J., Poormon K.L. Development of a three-stage, light-gas gun at the University of Dayton Research Institute // Int. J. Impact Engng. 2006. Vol.33. p.615-624.
4. С.С. Соколов, А.И. Панов, А.А. Воропинов и др. Методика ТИМ расчета трехмерных задач механики сплошных сред на неструктурированных многогранных лагранжевых сетках // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2005. Вып. 2. с. 37-52.
5. С.С. Соколов, А.А. Воропинов, И.Г. Новиков и др. Методика ТИМ-2D для расчета задач механики сплошной среды на нерегулярных многоугольных сетках с произвольным количеством связей в узлах // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2006. Вып. 4. с. 29-43.
6. Я.Б. Зельдович Я.Б., Ю.П. Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений // М. Наука. 1966г., 688с.
7. Г.В. Гаркушин, Г.Е. Иванчихина, О.Н. Игнатова и др. Механические свойства меди М1 до и после ударного сжатия в широком диапазоне длительности нагрузки. // Физика металлов и металловедение. 2011. т.111, №2, с.1-10.
8. С.С. Соколов. Феноменологическая модель кинетики развития поврежденности в твёрдых материалах при импульсных воздействиях // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2012. Вып. 4. с. 13-26.

## КОМБИНИРОВАННАЯ ПРОТИВОПУЛЬНАЯ И ПРОТИВОКУМУЛЯТИВНАЯ ЛЕГКАЯ БРОНЕЗАЩИТА

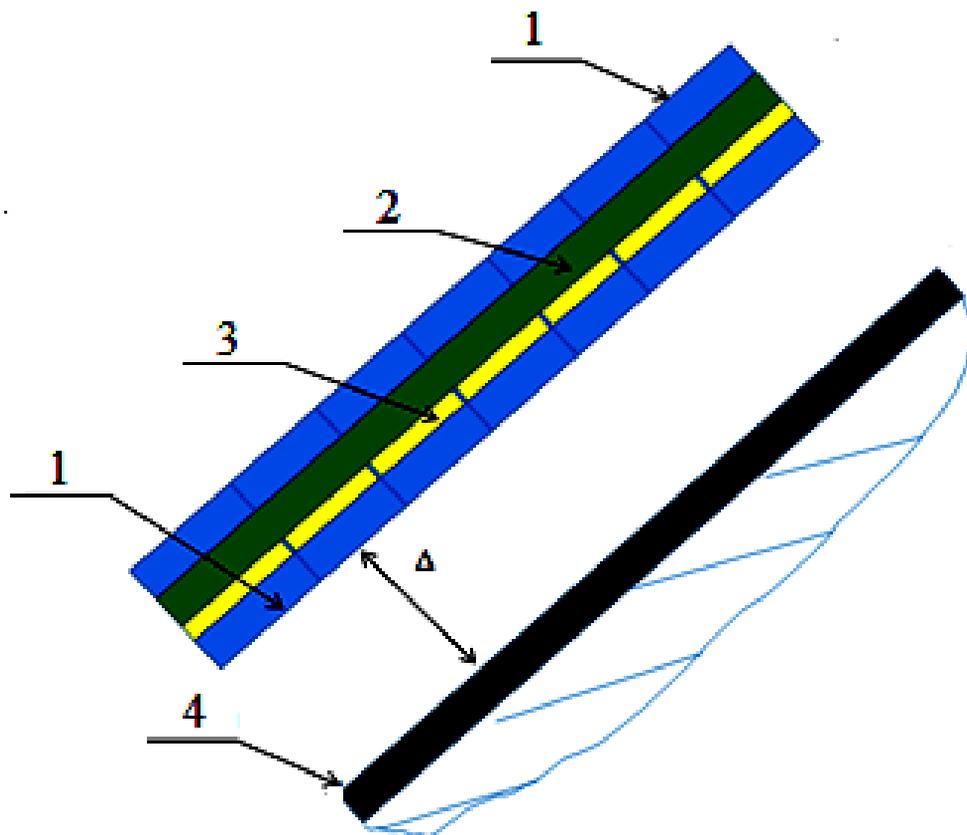
*И.Ф. Кобылкин, А.А. Горбатенко*

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Для защиты легкой бронетехники от кинетических и малокалиберных кумулятивных средств поражения (КСП) необходимо одновременное использование как противопульной бронезащиты [1], так и противокумулятивной динамической защиты (ДЗ) [2] с существенно уменьшенным уровнем ударного воздействия на защищаемый объект. Для обеспечения повышенной противопульной стойкости в настоящее время обычно используют керамико-металлические или керамико-композитные двухслойные преграды с лицевым керамическим слоем [3, 4]. Исполнению традиционной противокумулятивной ДЗ препятствует чрезвычайно интенсивное воздействие метаемых стальных пластин на объект защиты. В настоящей статье представлена структура объединенной комбинированной бронезащиты, обеспечивающей защиту, как от кинетических, так и от малокалиберных КСП, при приемлемом уровне воздействия на объект защиты (рис. 1).

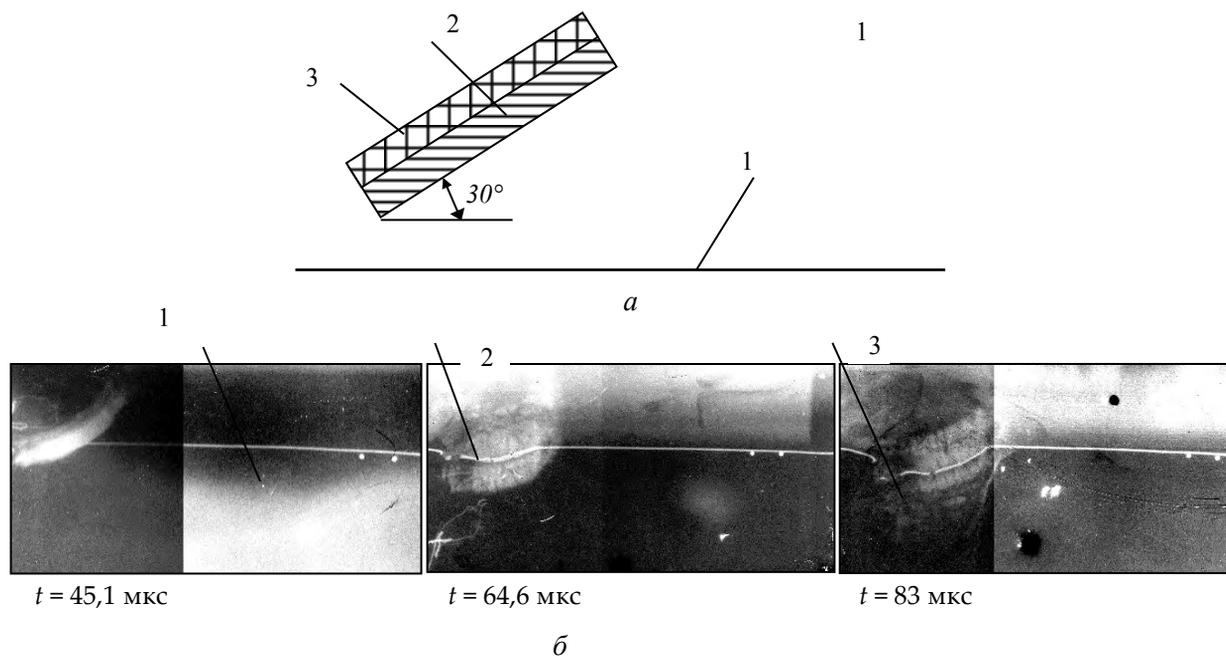
В работах [5, 6] было обосновано использование для противокумулятивной защиты легкой бронетехники ДЗ с керамическими обкладками. Экспериментально и теоретически было установлено, что метаемые взрывом керамические обкладки ДЗ вследствие диспергирования

оказывают существенно меньшее ударное воздействие на защищаемый объект по сравнению с металлическими обкладками, при этом сохраняется (а при равной массе элементов ДЗ даже повышается) уровень защищающей способности от действия кумулятивных струй (КС). Физическое объяснение уменьшения нагрузки на защищаемый объект состоит в том, что импульс действующей нагрузки вследствие диспергирования керамических пластин при взрывном метании растягивается, что и приводит к уменьшению его амплитуды.



**Рисунок 1.** Структура комбинированной противоупульной и противокумулятивной защиты: 1 – дискретный слой керамики; 2 – подложка; 3 – слой ВВ с детонационными диодами; 4 – демпфер

За противоупульной защитой в предлагаемой комбинированной броне располагаются один или два ряда элементов ДЗ, состоящих из плоского заряда ВВ с детонационными диодами [7] и дискретной керамической пластины (рис. 1). Предполагается, что детонационные диоды будут управлять направлением распространения детонационной волны, пропуская ее только вверх по ЭДЗ, что позволит уменьшить массу детонирующего ВВ, а значит и ударное воздействие тыльной обкладки ЭДЗ на объект защиты. В качестве тыльной обкладки ЭДЗ выступает дискретный слой керамики. При взрывном метании керамические пластины разрушаются и образуется плотный поток фрагментов, который эффективно разрушает КС и в тоже время оказывает слабое воздействие на более удаленный защищаемый объект при соударении с ним. Для экспериментального подтверждения эффективности воздействия дисперсного керамического потока на кумулятивную струю было выполнено рентгенографирование процесса воздействия метаемой взрывом керамической пластины на неподвижную медную проволоку, имитирующую КС. Схема соответствующего эксперимента и полученные рентгенограммы приведены на рис. 2а и 2 б.



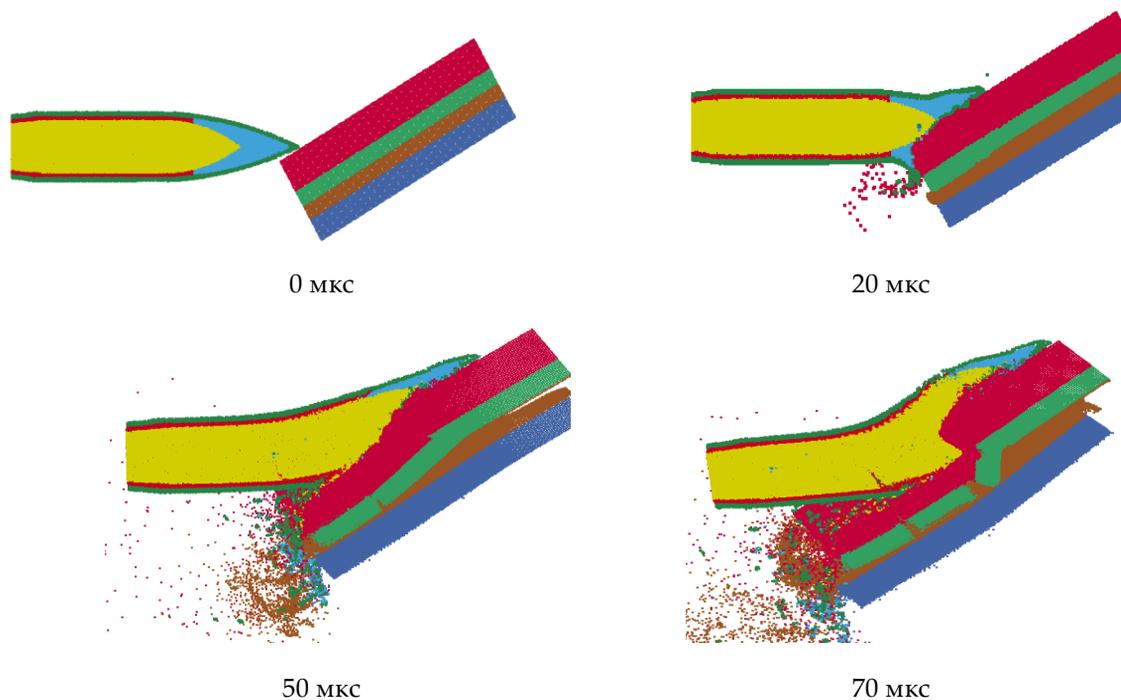
**Рисунок 2.** Схема эксперимента (а) и рентгенограммы процесса воздействия керамического потока на медную проволоку (б); а: 1 – медная проволока; 2 – метаемая керамическая пластина; 3 – метаемый заряд ВВ; б: 1 – медная проволока; 2 – керамический поток; 3 – поперечная волна в проволоке

Пластина из карбида кремния с размерами  $50 \times 50 \times 10$  мм разгонялась продуктами детонации скользящей детонации заряда пластичного ВВ ПБВВ–5А массой 23 г и металась на медную проволоку диаметром 1,8 мм, которая была натянута между двух опор под углом  $30^\circ$  к поверхности керамической пластины. Из анализа полученных рентгенограмм (рис. 2, б) можно сделать вывод о том, что поток керамических частиц интенсивно деформирует и разрушает проволоку, местами перерезая её. Максимальная скорость потока керамических частиц составила 558 м/с. Прогиб проволоки для времени  $t = 65$  мкс составил 2,44 мм, а для  $t = 83$  мкс – 5,11 мм. Боковая скорость проволоки составила 148 м/с. С учетом собственной скорости элемента КС равной 8000 м/с его боковая скорость в этих условиях уменьшится до 50 м/с.

Противопульная стойкость керамико-металлической брони оценивалась с использованием аналитической модели пробивания керамико-металлических преград [3], а оптимизация их структуры осуществлялась расчетным путем [4, 8] исходя из достижения максимальной скорости пробития при фиксированных значениях поверхностной плотности. Некоторые результаты расчетов представлены в таблице 1. Минимальной погонной массой обладают защитные структуры на основе карбида бора, но вследствие его высокой стоимости в комбинированной защите предлагается использовать двухслойные преграды на основе карбида кремния. Для защиты объекта от бронебойных пуль калибром 12,7 мм толщина керамического слоя должна составлять 7 мм. В качестве подложки была выбрана пластина из титанового сплава ВТ23 толщиной 3,6 мм. Именно такая структура обладает минимальной погонной массой.

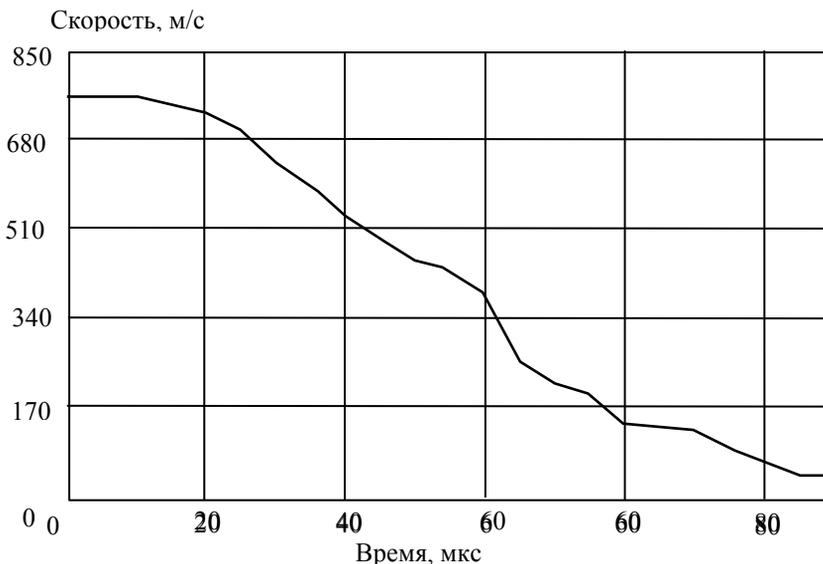
**Таблица 1.** Расчетные характеристики керамико-металлической защиты от действия пули Б-32 калибра 12,7 мм

Ceramics	Материал подложки	Толщина керамики / подложки, мм	Предельная скорость пробития, м/с	Погонная масса, кг/м <sup>2</sup>
SiC	Сталь 44	7,7 / 2,1	838	40,6
	АМг6	8,4 / 6,5	837	43,5
	В95	8,2 / 6	837	42,5
	ВТ23	7 / 3,6	837	37,8
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Сталь 44	6,8 / 2,5	838	46
	АМг6	7,5 / 7,7	837	49,4
	В95	7,3 / 7,1	837	48,2
	ВТ23	6,2 / 4,2	837	42,8
В <sub>4</sub> С	Сталь 44	8,6 / 1,9	836	36,2
	АМг6	9,5 / 5,5	839	38
	В95	9,3 / 5,1	838	37,1
	ВТ23	8 / 3	839	33,2

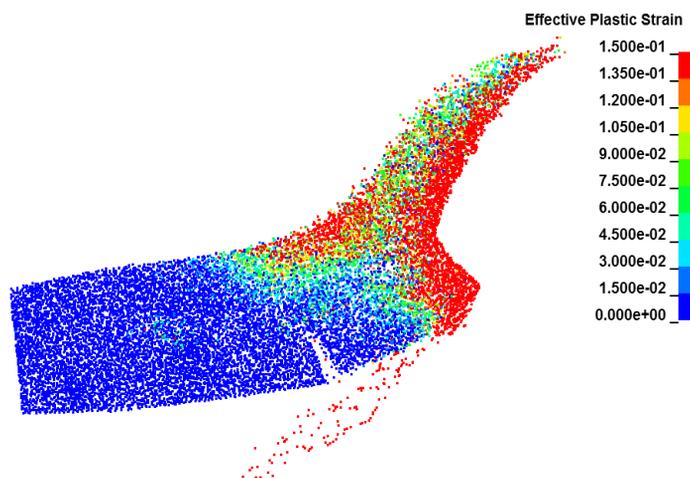


**Рисунок 3.** Стадии проникания пули в комбинированную бронезащиту

Для подтверждения выбранных характеристик бронезащиты было выполнено численное моделирование процесса взаимодействия бронебойной пули Б32 калибра 12,7 мм с комбинированной броней под углом 60°. Моделирование проводилось в программном пакете Ls-Dyna методом SPH. На рис. 3 представлены результаты расчета.



**Рисунок 4.** Зависимость скорости сердечника от времени



**Рисунок 5.** Распределение эффективных пластических деформаций по сердечнику в момент времени равный 70 мкс (максимальные пластические деформации для материала сердечника задавались равными 0,08)

В процессе проникания сердечник интенсивно тормозится (рис. 4) и разрушается (рис. 5), а на последних стадиях проникания при  $t > 60$  мкс остатки сердечника разворачиваются на угол от  $5^\circ$  до  $14^\circ$ , что способствует дополнительному торможению сердечника, а значит и увеличению противопульвной стойкости преграды.

#### Список литературы

1. Кобылкин И.Ф., Селиванов В. В. Материалы и структуры легкой бронезащиты. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 191 с.
2. Частные вопросы конечной баллистики / [Кобылкин И.Ф.] и др. // Под ред. В.А. Григоряна. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006.

3. Кобылкин И.Ф., Горбатенко А.А. Аналитическая модель пробивания керамико-металлических защитных преград и их оптимизация // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение. 2017 № 3. С. 54-65.
4. Кобылкин И.Ф., Пробивание двухслойных преград с внешним керамическим слоем и оптимизация их структуры // Физика горения и взрыва.– 2017, т. 53, № 4.– с. 126-133.
5. Кобылкин И.Ф., Горбатенко А.А. Сравнительное изучение защищающей способности элементов динамической защиты с пониженным воздействием на объект защиты // Инженерный журнал: наука и инновации, 2015 г, вып. 4. URL: <http://engjournal.ru/catalog/mech/mlgp/1391.html>.
6. Кобылкин И.Ф., Горбатенко А.А. Численное моделирование взаимодействия кумулятивных струй с динамической защитой // Сборник докладов международной конференции XVII Харитоновские тематические научные чтения. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2015. С. 593-598.
7. Кобылкин И.Ф. Передача детонации в тонких слоях ВВ через сплошные и перфорированные перегородки. Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны // Сборник докладов международной конференции XVII Харитоновские тематические научные чтения. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2015. С. 5-9.
8. Кобылкин И.Ф., Горбатенко А.А. Защищающая способность керамического слоя легкой комбинированной брони при ударном воздействии пуль под углом // Сборник тезисов докладов международной конференции XIX Харитоновские тематические научные чтения. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2017. С. 239-240.

## COMBINED BULLETPROOF AND ANTICUMULATIVE LIGHTWEIGHT ARMOR

*I.F. Kobylkin, A.A. Gorbatenko*

BMSTU, Moscow, Russia

In order to protect armored vehicles from kinetic and small-caliber shaped-charge ammunition (SCA) it is necessary to use bullet-resistant armor [1] as well as shaped-charge-resistant explosive reactive armor (ERA) [2] with significantly reduced level of shock impact loading on protected object. It is common to use ceramic-metallic or ceramic-composite double-layer target with ceramic outer layer to achieve enhanced bullet-resistance [3, 4]. The usage of the traditional ERA is constrained by significant impact of the driven steel plates on the protected object. In present paper, a structure of conjoined combined armor is described. The armor protects vehicles from kinetic energy projectiles as well as from small-caliber SCA and preserves the affordable level of shock impact on protected object (fig. 1).

The usage of shaped-charge-resistant ERA with ceramic outer layers was substantiated in papers [5, 6]. It is experimentally established that due to dispergation explosive driven ceramic liner, used in ERA, reduce impact loading on protected object in comparison with metallic liners but the level of protection from cumulative jet is preserved and even increased in case of identical mass of the metallic and ceramic plates. The prolonged impulse of the explosive driven ceramic plates leads to a reduction in its amplitude, and this is a physical explanation to a lower impact loading on the protected object.