

УДК: 623.44

DOI: 10.53816/20753608_2024_1_126

ЗАЩИТНЫЕ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ МЕХАНОАКТИВИРОВАННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ

PROTECTIVE STRUCTURES BASED ON MECHANICALLY ACTIVATE ENERGY COMPOSITES

Академик РАН М.В. Сильников¹, И.В. Гук¹, А.Ю. Долгобородов^{2,3},
чл.-корр. РАН А.И. Михайлин¹, чл.-корр. РАН Н.М. Сильников¹

¹АО «НПО Спецматериалов», ²Объединенный институт высоких температур РАН,
³ФИЦ ХФ им. Н.Н. Семенова РАН

M.V. Silnikov, I.V. Guk, A.Yu. Dolgoborodov, A.I. Mikhaylin, N.M. Silnikov

В работе приведены результаты испытаний принципиально нового класса противопулевой защиты, основанной на использовании реакционного материала в виде механоактивированных энергетических композитов (МАЭК). Описан метод изготовления образцов МАЭК с составами на основе алюминий-фторопласт. Приведены результаты баллистических испытаний защитных структур на основе МАЭК. Показаны преимущества применения МАЭК в защитных структурах.

Ключевые слова: МАЭК, баллистические испытания, бронезащита, алюминий-фторопласт, динамическая защита.

The article presents the test results of a fundamentally new class of bulletproof protection based on the use of a reactive material in the form of mechanically activated energetic composites (MAEC). A method for producing MAEC samples with compositions based on aluminum-fluoroplastic is described. The results of ballistic tests of protective structures based on MAEC are presented. The advantages of using MAEC in protective structures are shown.

Keywords: MAEC, ballistic tests, ballistic protection, aluminum-fluoroplastic, reactive armor.

Броневая защита традиционно делится на пассивную, динамическую и активную. Пассивная броня представляет собой высокопрочный материал, способный противостоять удару пули или снаряда [1]. Для этого главным образом используют броневую сталь, органопластики и композитные материалы с керамическим внешним слоем. Действие динамической брони основывается на идее встречного метания стальной пластины в сторону подлетающего снаряда зарядом взрывчатого вещества, расположенного на объекте защиты. Такая броня используется главным образом для защиты танков и другой бронированной техники. Наконец, активная броня

представляет собой систему, включающую в себя средства обнаружения подлетающего боеприпаса, систему управления и огневого поражения [2–4]. По сути, активная броня ближе к системам противовоздушной обороны, чем к традиционному бронированию.

Среди защитных конструкций систем пассивной брони можно выделить разнесенные конструкции с внешним дробяще-отклоняющим слоем из металлических листов или керамики [5, 6]. Использование таких конструкций позволяет добиться существенного снижения веса разнесенной брони. Помимо использования инертных материалов в дробящем слое

возможно использование химически активных материалов, реагирующих с образованием горячих продуктов, оказывающих на проникающий элемент термобарическое воздействие. Принципиальная возможность использования химически активных материалов на основе смесей металл-окислитель для создания защитных конструкций была продемонстрирована для разных составов, материалов мишени и скоростей соударения в [7, 8].

Скорости горения смесей твердых горючих и окислителей в значительной степени определяются эффективной поверхностью контакта реагентов и для составов на основе порошков из микронных частиц обычно не превышают 1 см/с. Однако для эффективного воздействия на высокоскоростные элементы типа сердечника пули такие скорости энерговыделения явно недостаточны. Одним из распространенных способов увеличения этой поверхности является совместная обработка порошков реагентов в шаровых мельницах. Использование энергичного смешения в современных вибрационных и планетарных мельницах позволяет получать высокоомогенные составы с компонентами, перемешанными на субмикронном и нано-уровне, — механоактивированные энергетические композиты (МАЭК). При получении МАЭК происходит не только смешение компонентов, но и механохимическая активация за счет создания дефектов кристаллической структуры компонентов [9–11]. МАЭК обладают высокими скоростями горения, а в некоторых случаях (например, для смесей алюминия и магния с фторопластом) возможно получение высокоскоростных детонационно-подобных режимов энерговыделения.

Заманчиво было бы использовать МАЭК в области бронезащиты. При этом инициирование МАЭК с выделением высокотемпературных продуктов реакции непосредственно в месте столкновения ударника с преградой могло бы разрушить или дестабилизировать ударник,

тем самым снизив его пробивную способность. Во-первых, очевидно, что при использовании в бронезащите составы должны иметь малую поверхностную плотность, чтобы не утяжелять защитную структуру. Во-вторых, энерговыделение МАЭК не должно сопровождаться выделением большого количества газообразных продуктов с образованием ударной волны для предотвращения повреждений защищаемого объекта.

Целью настоящей работы является экспериментальная проверка возможности использования МАЭК в составе баллистической защиты при обстреле пулями калибра 7,62 мм с термоупрочненным сердечником со скоростями до 900 м/с.

Изготовление образцов МАЭК

Для получения МАЭК в данной работе использовалась технология, описанная в [9]. В качестве исходных компонентов использовались порошки алюминия АСД-6 (средний размер частиц около 4 мкм), фторопласт-4 Ф4-ПН (агломераты частиц от 2 до 200 мкм) и вольфрам (10–20 мкм). Смесей готовились в весовом соотношении компонентов: Al/Ф4 30/70, Al/W/Ф4 — 30/11/59 с небольшим избытком металлического горючего. Для смешения и активации смесей использовалась модернизированная планетарная мельница «Активатор-2SL». Объем барабанов — 250 мл, масса шаров — 300 г, масса загрузки смеси 15 г. Интенсивность обработки регулировалась изменением частоты электрического тока от 40 до 50 Гц с помощью инвертора Toshiba VFS11-4022PL. Для предотвращения перегрева обработку смесей проводили в инертной среде в присутствии жидкой добавки (гексан — 60 мл) при водяном охлаждении барабанов. Полное время активации составляло 15 мин.

Составы и физические характеристики использованных МАЭК приведены в табл. 1.

Таблица 1

Физические характеристики образцов МАЭК

№ образца	Состав образца	Плотность, г/см ³	Поверхностная плотность, г/см ²	Пористость, %
1	Al/Ф4 30/70	2,06	1,04	11,55
2	Al/W/Ф4 30/11/59	2,25	1,24	11,94

Для оценки вклада МАЭК в защитные свойства композиции были изготовлены и испытаны образцы защитных структур двух типов.

1. Алюминиевый лист Д16Т толщиной 1 мм + образец реакционного материала № 1 толщиной 5,05 мм + лист броневой стали СПС-43 толщиной 6,5 мм.

2. Алюминиевый лист Д16Т толщиной 1 мм + образец реакционного материала №2 толщиной 5,5 мм + лист броневой стали СПС-43 толщиной 6,5 мм + лист стали СПС-43 толщиной 3 мм. Между стальными листами был обеспечен воздушный промежуток 500 мм.

Образец МАЭК в оправке из пластмассы толщиной 1 мм был зафиксирован в центре стальной пластины при помощи клея. Алюминиевая пластина скреплена с остальными слоями при помощи скотча.

Проведение баллистических испытаний защитных структур с МАЭК

Испытания проводились обстрелом патронами 7Н13 с пулями ПП из винтовки СВД. Схема эксперимента представлена на рис. 1. Скорость пули фиксировали с помощью скоростемера РБ-1000, установленного на расстоянии 0,5 м от дульного среза. Для фиксации защитных свойств образцов использовали оптический скоростемер «РС-4М», установленный на расстоянии 0,3 м от образцов, а также набор картонных экранов свидетелей, установка которых показана на рис. 1.

Вид первой защитной структуры после испытаний приведен на рис. 2, а. Наблюдается пластическая деформация внешнего алюминиевого слоя и следы реакции на поверхности пробитого пулей стального листа. При пробитии

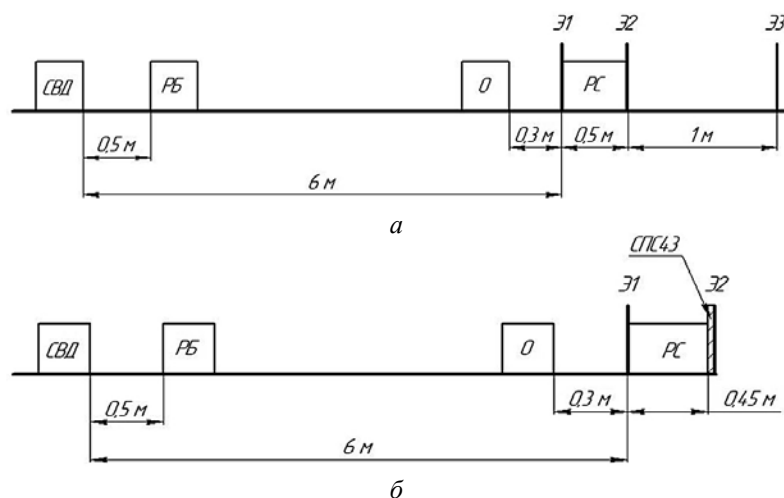


Рис. 1. Схемы испытаний образцов: а — для образца № 1; б — для образца № 2.

Условные обозначения: СВД — винтовка СВД; РБ — регистратор баллистический «РБ-1000»; О — образец защитной композиции; РС — регистратор скорости «РС-4М»; Э1, Э2, Э3 — бумажные экраны свидетели; СПС43 — стальная пластина СПС-43 толщиной 3 мм



Рис. 2. Образец 1 после испытаний: а — вид со стороны удара; б — сердечник пули, застрявший в защитном кожухе оптического скоростемера

образца защитной структуры № 1 пуля была дестабилизирована и остановлена в рамке регистратора скорости РС-4М, выполненного из листа малоуглеродистой стали Ст3 толщиной 5 мм (рис. 2, б). Угол смещения траектории полета пули составил 14° . Вид контрольных бумажных экранов приведен на рис. 3.

На первом бумажном экране, отстоявшем от стальной опорной пластины на 300 мм, хорошо видны следы горения МАЭК, вынесенного при прохождении пули в запреградное пространство. Экран непосредственно под местом попадания пули был сожжен, в отличие от четкого отверстия при выстреле по броневому листу без МАЭК. Следы копоти от горения МАЭК неоднородны и рассеяны по всей площади разлета осколков. Диаметр разлета осколков пули на первом бумажном экране составил 100 мм. На втором экране, расположенном на расстоянии 500 мм от первого, диаметр разлета осколков составил 190 мм, а на третьем диаметр разлета осколков составил 370 мм. Конус разлета осколков при пробитии образца защитной композиции составил 45° .

При испытании второго образца алюминиевая пластина Д16Т, закрывавшая образец МАЭК, была сорвана при прохождении реакции. На ней образовались три трещины разме-

ром около 100 мм под углом 120° (рис. 4, а). Тыльный прогиб пластины составил примерно 30 мм. Диаметр разлета осколков пули составил 160 мм на первом бумажном экране и 200 мм на втором экране. Конус разлета осколков при пробитии образца защитной композиции составил 28° . Установленная за вторым экраном пластина из броневой стали СПС-43 толщиной 3 мм не была пробита (рис. 4, б). Многочисленные следы осколков пули на стальном экране имели глубину до одного миллиметра.

При испытаниях первого образца зафиксировать скорость полета пули за преградой не удалось, так как пуля была дестабилизирована и попала в защитную рамку регистратора скорости. Запреградная скорость для второго образца относится к облаку осколков пули. Результаты испытаний образцов толщиной 6,5 мм стали СПС-43 были получены в других экспериментах и приведены в табл. 2 для справки.

Дистанция между дульным срезом и образцом была 5,7 м. На этой дистанции угол подхода пули к преграде может отличаться от нормали, поскольку пуля еще не стабилизирована. Однако исследование прострела чистого листа 6,5 мм показывают, что снижение запреградной скорости пули при обстреле по нормали составляет 228 м/с, а при угле 30° от нормали — 206 м/с. Как

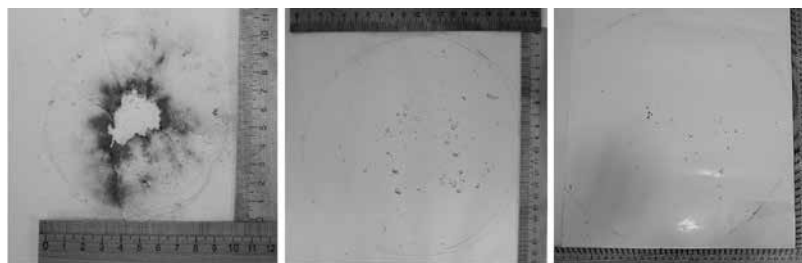


Рис. 3. Первый, второй и третий контрольные бумажные экраны после испытаний образца № 1

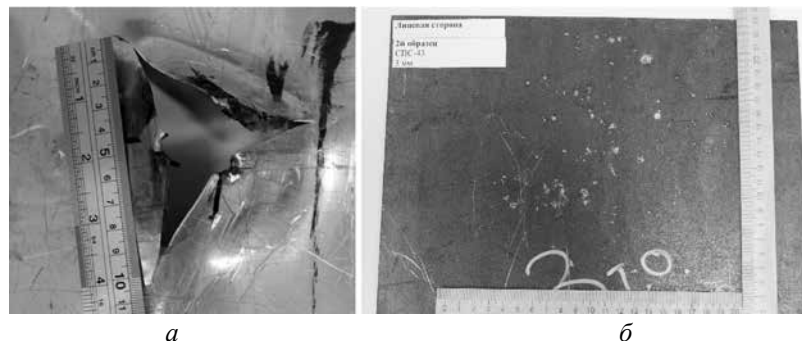


Рис. 4. Результаты испытаний образца 2: а — разрушение наружного алюминиевого листа; б — следы осколков пули на стальном экране

Таблица 2

Снижение скорости пули при пробитии образцов

№ образца	Скорость полета пули v , м/с		Снижение скорости, м/с
	начальная	запреградная	
1	845	—	—
2	818	231	587
	893	665	228

видно, изменение угла подхода пули в пределах 30° снижает запреградную скорость в пределах 10 %, что существенно меньше наблюдаемого при использовании МАЭК эффекта.

Образцы МАЭК по поверхностной плотности эквивалентны соответственно стальным листам толщиной 0,13 мм и 0,16 мм. Эта эквивалентность относится лишь к поверхностной плотности, но не к прочностным свойствам. Образцы МАЭК имеют практически пренебрежимо по сравнению с броневой сталью прочность, и их вкладом в бронестойкость испытываемой композиции можно в первом приближении пренебречь. Это же можно сказать и о вкладе алюминиевого листа толщиной 1 мм. Поэтому можно считать, что баллистическая стойкость испытанных образцов без учета эффектов действия МАЭК в пределах погрешности близка к стойкости обычного стального бронелиста толщиной 6,5 мм.

Вклад МАЭК в бронестойкость при пробитии броневое листа для образца 1 (алюминий — фторопласт) связан с изменением траектории сердечника пули, а для образца 2 (алюминий — вольфрам — фторопласт) — с его дроблением.

Протекание реакции при воздействии пули на МАЭК приводит к деформации и трещинообразованию во внешнем алюминиевом слое образцов. Характер повреждения алюминиевого слоя зависит от скорости протекания реакции и количества высвобождаемой энергии и может служить характеристикой эффективности защитных структур, включающих в себя МАЭК.

Заключение

МАЭК является перспективным материалом для использования в схеме разнесенного бронирования для защиты от легкого стрелкового оружия.

Литература

1. Анастасиади Г.П., Сильников М.В. Работоспособность броневых материалов. СПб.: Астерион. 2004. 624 с.
2. Сильников М.В. Активная защита подвижных объектов на основе новых физических принципов // Защита и безопасность. 2010. № 3(54). С. 16–17.
3. Сильников М.В., Лазоркин В.И. Активная защита стационарных объектов. СПб., 2021. 508 с.
4. Сильников М.В., Лазоркин В.И. Активная защита мобильных объектов. СПб., 2020. 488 с.
5. Разнесенная бронеструктура: пат. RU147175 U1; опубл. 27.10.2014; бюл. № 30.
6. Композитная броня: пат. RU2329455 C1; опубл. 20.07.2008; бюл. № 20
7. Яшин В.Б., Имховик Н.А., Малкин А.И. Исследование возможности применения механоактивированных металл-фторопластовых композитов в конструкциях средств защиты // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2014. № 1–2. С. 49–53.
8. Ren S., Zhang Q., Wu Q., Long R., Gong L., Lu Y. A reactive material double-bumper shield for centimeter sized projectile // Int. J. Impact Engineering, 2021. 158, P. 104028 (1–10).
9. Долгобородов А.Ю. Механоактивированные энергетические композиты окислитель-горючее // Физика горения и взрыва. 2015. Т. 51. № 1. С. 102–116.
10. Huston M.R., Sippel T.R. Confined flame propagation of Al/PTFE mechanically activated composites // Combustion and Flame. 2019. Pp. 83–91.
11. Tao J., Wang X. Experimental study and simulation of the reaction mechanism of Al–PTFE mechanically activated energetic composites // RSC Advances. 2023. № 13. Pp. 20457–20466.