

УДК 623.093

doi: 10.53816/20753608_2025_1_39

**ПОВЫШЕНИЕ ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ СТРУКТУР
С МЕХАНОАКТИВИРОВАННЫМИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ КОМПОЗИТАМИ
ОТ ПУЛЬ ЛЕГКОГО СТРЕЛКОВОГО ОРУЖИЯ**

**IMPROVING THE PROTECTIVE PROPERTIES
OF STRUCTURES WITH MECHANICALLY ACTIVATED ENERGY COMPOSITES
AGAINST SMALL ARMS BULLETS**

Академик РАРАН М.В. Сильников, чл.-корр. РАРАН А.И. Михайлин, И.В. Гук, В.Д. Насонов

НПО Спецматериалов

M.V. Silnikov, A.I. Mikhaylin, I.V. Guk, V.D. Nasonov

Рассмотрена возможность применения механоактивированных энергетических композитов (МАЭК) в составе разнесенных бронеструктур для защиты от пуль легкого стрелкового оружия. Полученные результаты позволяют сделать вывод о влиянии плотности и химического состава образцов МАЭК на характер реакции, протекающей при внедрении пули в образец, а также оценить влияние МАЭК на пулестойкость структур.

Ключевые слова: МАЭК, пулестойкость, испытания, детонация, броневая структура, защита.

The possibility of using mechano-activated energy composites (MAEC) as part of spaced armored structures to protect against small arms bullets is considered. The results obtained allow us to conclude about the influence of the density and chemical composition of the MAEC samples on the nature of the reaction occurring when a bullet is inserted into the sample, as well as to evaluate the effect of the MAEC on the bullet resistance of structures.

Keywords: MAEC, bullet resistance, testing, detonation, armor structure, protection.

Введение

Одним из направлений в разработке бронезащиты является создание динамической защиты (ДЗ), которая обладает меньшей массой по сравнению со стальными защитными элементами при воздействии кумулятивных боеприпасов [1, 2]. Основным принципом работы ДЗ является использование энергии взрывной реакции заряда взрывчатого вещества, входящего в состав ДЗ, для встречного метания защитных пластин, приводящего к изменению траектории и разрушению кумулятивной струи или ударного ядра.

При этом неизбежно возникают большие динамические нагрузки на защищаемый объект. Кроме того, для защиты некоторых объектов принципиально не могут быть использованы заряды взрывчатых веществ [3].

Дальнейшее развитие ДЗ привело к созданию невзрывной динамической защиты. В элементах такой ДЗ используются инертные наполнители из сжимаемого материала, например резины. При проникании в элемент невзрывной ДЗ кумулятивной струи в наполнителе формируется ударная волна, локализованная в области удара. Под действием высокого давления за фронтом

ударной волны происходит вспучивание защитных пластин и вынос непробитых участков этих пластин на траекторию движения кумулятивной струи, что снижает ее проникающую способность [4].

Многочисленные варианты ДЗ доказали свою эффективность против кумулятивных и кинетических боеприпасов. Однако они не применяются для защиты от легкого стрелкового оружия. Типичные для пуль параметры — скорости 300–1000 м/с и массы 5–50 граммов не дают преимуществ взрывной и невзрывной ДЗ против традиционной стальной или композитной брони. Создание противопульной ДЗ требует использования нового источника энергии, отличного от взрывчатых веществ, как в ДЗ, или энергии кумулятивной струи, как в невзрывной ДЗ.

В научных работах экспериментально подтверждена возможность создания невзрывной ДЗ от пуль легкого стрелкового оружия [5] и высокоскоростных осколков [6] на основе составов алюминий-окислитель, не являющихся взрывчатыми веществами. Наиболее перспективным для этих целей представляется использование механически активированных энергетических композитов (МАЭК). Достаточно высокая скорость и теплота экзотермической реакции этих композитов обеспечиваются за счет механической активации гетерогенных составов металл-окислитель [7]. Получаемая реакционная смесь способна реагировать в результате ударно-волнового воздействия с ударником, сопровождающимся высвобождением большого количества энергии [8–17]. Предполагается, что термобарическое действие экзотермической реакции может повлиять на целостность, траекторию и стабильность пули, в результате чего возможно снижение бронепробиваемости.

В работе [18, 21–23] рассмотрена возможность применения МАЭК в качестве составной

части броневых структур для защиты от легкого стрелкового оружия. Было показано, что МАЭК дает существенный вклад в бронестойкость броневых листов, связанный с изменением траектории сердечника пули и его дроблением.

В настоящей работе представлены результаты исследований различных МАЭК в составе структур разнесенного бронирования применительно к защите от пуль с термоупрочненным сердечником со скоростями, характерными для класса защиты Бр 5. Образцы МАЭК были предоставлены А.Ю. Долгобородовым и изготовлены по технологии, описанной в [7], той же что и образцы, использованные в работе [18].

Методика испытания разнесенных броневых структур

Для определения вклада МАЭК в пулестойкость были выполнены следующие работы:

- проведение баллистических испытаний разнесенной броневой структуры без МАЭК со стальными экранами-свидетелями (первая серия испытаний);
- проведение баллистических испытаний разнесенной броневой структуры с МАЭК со схожей конструкцией (вторая серия испытаний);
- сравнение результатов испытаний с целью определения характеристик вклада МАЭК в пулестойкость образцов, качественной оценки реакции различных образцов МАЭК на внедрение ударника в разнесенную броневую структуру.

Первая серия испытаний проводилась по схеме, приведенной на рис. 1. Обстрел производился из винтовки СВД с углом 0° от нормали патроном 7Н13 с пулей ПП. В процессе испытаний фиксировались начальная скорость пули, при помощи баллистического регистратора скорости РБ-1000, а также количество пробитых стальных листов.

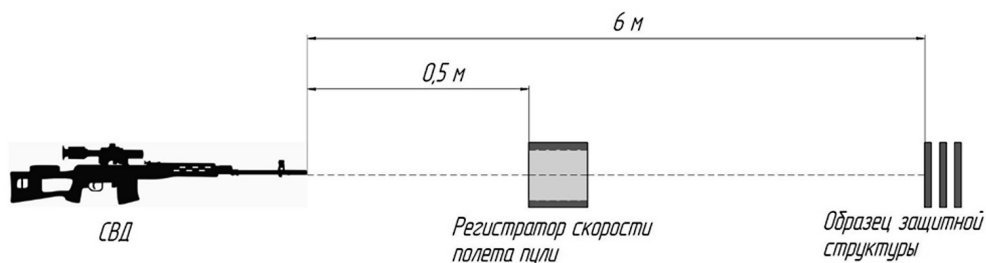


Рис. 1. Схема проведения баллистических испытаний

Образец защитной структуры представлен на рис. 2, а. Каждый лист представлял собой квадрат со сторонами 300 мм. Зазоры между листами указаны на рис. 2, б.

Многослойная структура выбрана с целью фиксации количества пробитых контрольных листов из стали Ст3. Основной защитный элемент структуры — это конструкция из броневого листа СПС-43 и листа алюминиевого сплава АМГ6м толщиной 0,5 мм и картона — имитатора МАЭК, в то время как стальные листы служили средством индикации эффективности защитной конструкции.

Всего было изготовлено 2 образца и выполнено по 5 выстрелов в каждый образец. Во всех 10 выстрелах была пробита защитная структура

из двух листов стали СПС-43. В следующем за защитной структурой контрольном наборе листов стали Ст3 первые два листа были пробиты в 100 % случаев. Третий лист не был пробит один раз в первом образце (рис. 3, а) и два раза во втором образце (рис. 3, б), то есть вероятность пробития третьего контрольного листа составляла 70 %. В местах непробития контрольного стального листа можно было заметить фрагменты разрушенного сердечника, рис. 3.

Для второй серии испытаний использовали защитную структуру из двух листов стали СПС-43 со вставкой из МАЭК и контрольную структуру из двух листов из стали Ст3. За вторым листом Ст3 вплотную к нему были допол-

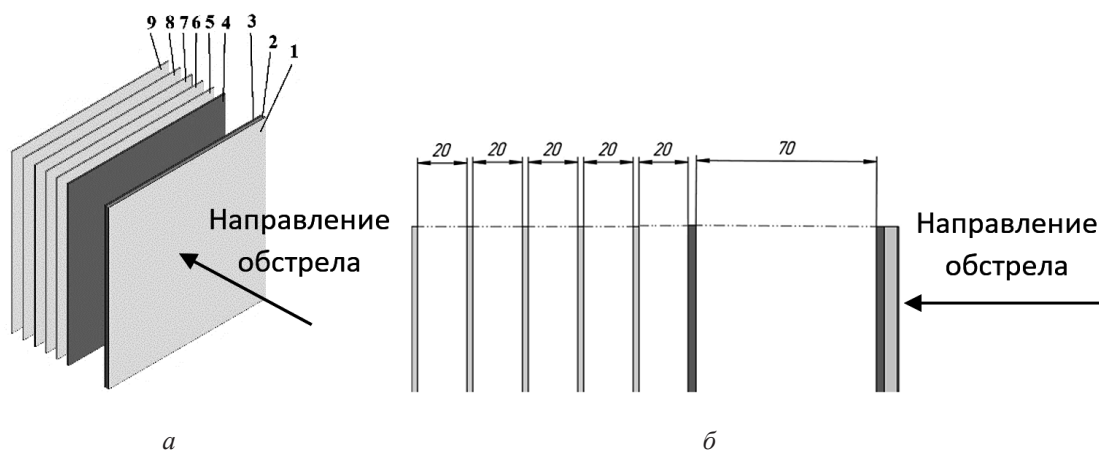


Рис. 2. а — модель разнесенной броневого структуры: 1 — алюминиевый лист 0,5 мм; 2 — картон, для имитации образца МАЭК; 3,4 — листы стали СПС-43 3,0 мм; 5-9 — листы Ст3 2,2 мм;
б — расстояния между листами броневого структуры

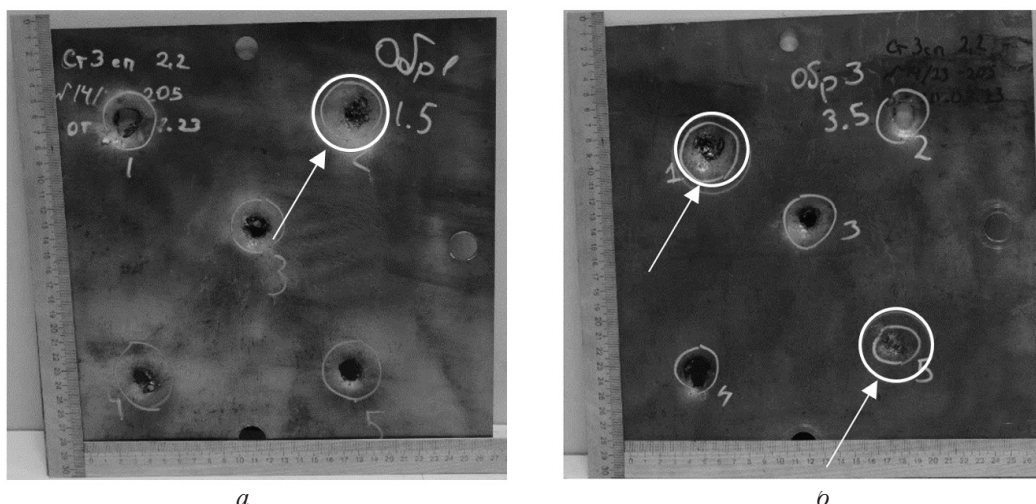


Рис. 3. Вид третьего стального листа: а — в первом образце; б — во втором образце.
Стрелками показаны следы от пуль при непробитии стального листа

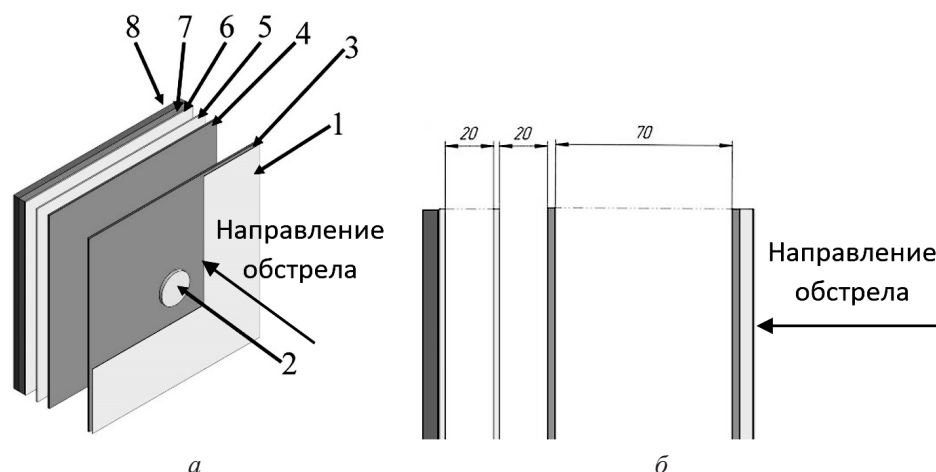


Рис. 4. а — модель с разрезом разнесенной броневой структуры для испытаний с МАЭК:
1 — алюминиевый лист; 2 — образец МАЭК; 3,4 — СПС-43 3,0 мм; 5,6 — Ст3 2,2 мм; 7,8 — фанера, 10 мм;
б — расстояния между листами

нительно установлены два листа фанеры толщиной по 10 мм.

Защитная структура образцов для второй серии испытаний представлена на рис. 4, а. Каждый лист представлял собой квадрат со сторонами 300 мм. Образец МАЭК закреплялся на первом листе броневой стали СПС-43 с помощью клея. Диаметр образца составлял 50 мм. Толщина образца H указана в табл. 1. Зазоры между слоями указаны на рис. 4, б. Со стороны выстрела образец с МАЭК покрывался листом алюминиевого сплава АМГ6м толщиной 0,5 мм для предотвращения разлета продуктов реакции.

Результаты испытаний защитных структур с МАЭК

Параметры образцов, скорость пули и характер реакции образца на обстрел представлены в табл. 1. Характер реакции образца оценивался визуально. В результате проведения 20 испытаний было получено 3 непробития второго стального листа из стали Ст3 контрольной структуры и 17 пробитий. Непробития были получены при испытании образцов 1, 2 и 11. Непробития структуры были получены в результате использования двух разных составов — для обоих образцов

Таблица 1

Характеристики образцов и результаты испытаний

№	Параметры образца				Скорость пули, м/с	Реакция образца
	состав	H , мм	M , г	ρ_0 , г/см ³		
1	Al/CuO/Hf/Tf/F42	3,60	25,22	3,57	844	высокоскор. горение
2		3,48	24,03	3,52	845	высокоскор. горение
3		4,8	30,11	3,20	840	высокоскор. горение
4	Al/CuO/Hf/Tf/F42	4,13	25,10	3,10	844	высокоскор. горение
5	Al/Tf/S/F42	5,68	24,93	2,24	816	низкоскор. горение
6	Al/Tf/S/F42	6,40	24,89	1,98	844	низкоскор. горение
7		6,32	24,90	2,01	845	низкоскор. горение
8	Al/Tf/Hf/F42/nNi	5,20	22,69	2,22	862	низкоскор. горение
9	Al/Tf (флуралит)/W/Tf/F42/nNi	4,75	21,76	2,33	869	низкоскор. горение
10	Al/Tf(флуралит)/W/Tf/F42/nNi	4,37	19,46	2,27	833	нет реакции
11		4,29	18,23	2,16	840	нет реакции

№	Параметры образца				Скорость пули, м/с	Реакция образца
	состав	H , мм	M , г	ρ_0 , г/см ³		
12	Al/S/Tf/F42	6,34	25,80	2,07	823	нет реакции
13		6,18	25,19	2,08	826	нет реакции
14	Al/Tf/S/F42	5,75	24,86	2,20	826	нет реакции
15	Al/W/Ф4/Ф42	4,13	25,10	2,16	830	нет реакции
16	Al/Tf/Hf/F42/nNi	5,52	24,88	2,30	837	нет реакции
17	Al/Hf/Ф4/Ф42	5,33	22,04	2,13	837	нет реакции
18	Al/Hf/Ф4/Ф42	4,50	22,63	2,59	840	нет реакции
19	Al/Tf/Hf/F42/nNi	5,55	25,00	2,29	845	нет реакции
20	Al/W/Ф4/Ф42	5,52	24,25	2,26	850	нет реакции

Al/CuO/Hf/Tf/F42, № 1 и № 2, и одного образца состава Al/Tf(флуралит)/W/Tf/F42/nNi, образец № 11, не вступившего в реакцию.

При испытании образцов 1–4 наблюдалась реакция высокоскоростного горения, энергии которой оказалось достаточно, чтобы сорвать поверхностный алюминиевый лист с мест креплений (рис. 5–7). В случае испытаний образцов 5–9 наблюдалось низкоскоростное горение. При этом температуры реакции было достаточно, чтобы оставить на алюминиевом листе следы оплавления и подтеков металла (рис. 8, 9). Для образцов № 11–20 реакции не было зафиксировано.

Эксперименты показали, что реакция высокоскоростного горения образца повлияла на повышение пулестойкости структуры, так как в 50 % случаев при такой реакции образца было получено непробитие второго контрольного стального листа. При детальном рассмотрении мест непробития второго стального листа было установлено, что сердечник пули был раздроблен, о чем свидетельствуют множественные углубления и фрагменты на поверхности стального листа (рис. 10 и 11). Непробитие структуры, полученное при испытании образца 11, скорее можно считать «выбросом» в общей статистике, т.к. сам образец не прореагировал.

При испытании защитных структур за последним стальным листом вплотную к нему были установлены два листа фанеры толщиной 10 мм. По количеству пробитых листов можно сделать грубую оценку скорости раздробленного сердечника. Так, при пробитии одного листа

фанеры баллистический предел группы осколков составляет приблизительно 300 м/с, а при пробитии двух листов — 390 м/с [19]. При пробитии одного стального листа баллистический предел составляет около 475 м/с.

Данные о количестве пробитых в экспериментах листов, а также их состоянии для испытанных образцов № 1–20 приведены в табл. 2. В таблице использованы следующие обозначения: N_1 — кол-во пробитых листов стали Ст3; N_2 — количество пробитых листов фанеры.



Рис. 5. Вид алюминиевого листа после испытаний образца № 2

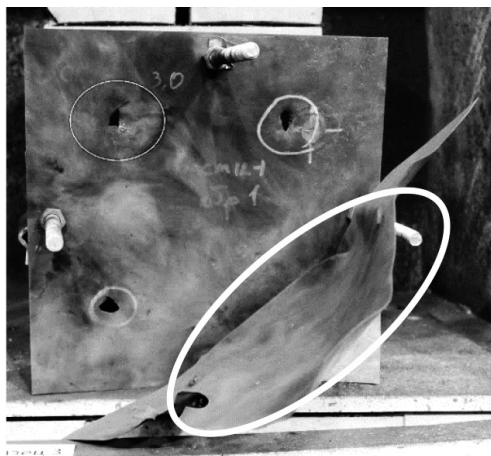


Рис. 6. Вид алюминиевого листа после испытаний образца № 1

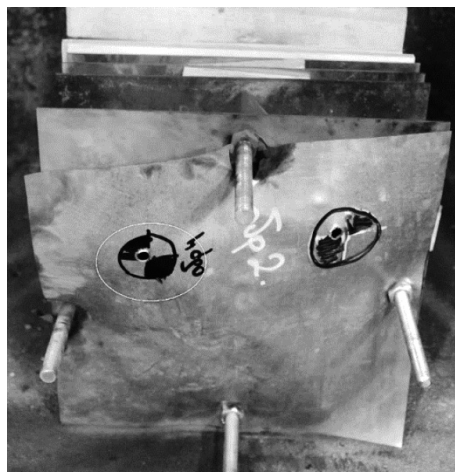


Рис. 7. Вид алюминиевого листа после испытаний образца № 4



Рис. 8. Оплавления алюминиевого листа при испытании образца № 9



Рис. 9. Оплавление алюминиевого листа при испытании образца № 8

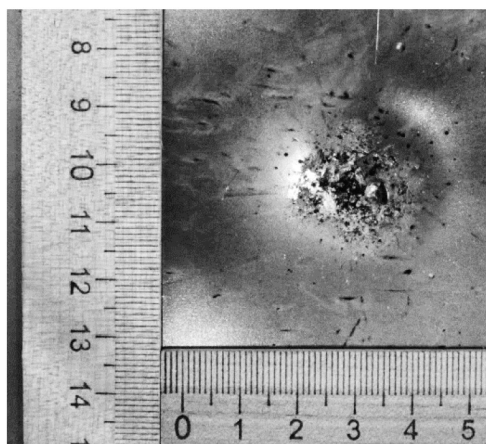


Рис. 10. Место не пробития при испытании образца № 1

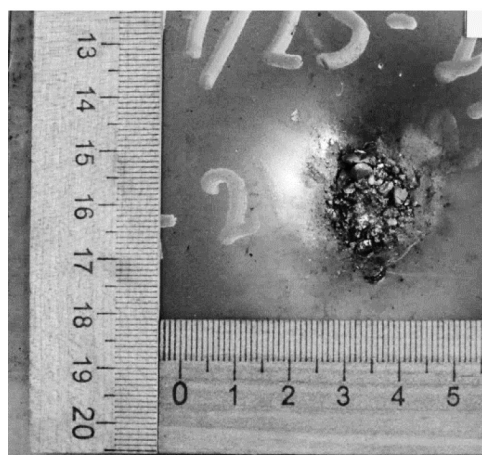


Рис. 11. Место не пробития при испытании образца № 2

Таблица 2

Количество и состояние пробитых листов испытанных структур

№	N_1	N_2	Характер пробития фанерных листов
1	1	0	Пуля остановлена вторым стальным листом, на фанере нет отметин
2	1	0	Пуля остановлена вторым стальным листом, на фанере нет отметин
3	2	0	Пуля остановлена первым листом фанеры. На лицевой стороне видны следы от раздробленного сердечника
4	2	2	Пробиты оба листа фанеры. На первом листе видно пробитие, на втором листе видно две отметины, одна из которых сквозная
5	2	0	Пуля остановлена первым листом фанеры. На листе видны следы от сажи и осколков раздробленного сердечника
6	2	0	Пуля остановлена первым листом фанеры. На листе не видно следов осколков, однако заметна сажа
7	2	0	Пуля остановлена первым листом фанеры. На листе видна отметина от раздробленного сердечника
8	2	1	Первый лист пробит, пуля остановлена вторым листом фанеры. На втором листе видно углубление от раздробленного сердечника
9	2	1	Первый лист пробит, пуля остановлена вторым листом фанеры. На втором листе видно углубление от раздробленного сердечника
10	2	0	Пуля остановлена первым листом фанеры, на лицевой стороне видны следы раздробленного сердечника, на тыльной стороне следов не обнаружено
11	1	0	На фанере нет следов, пуля остановлена вторым стальным листом
12	2	1	Пуля остановлена вторым листом фанеры. На первом листе видно сквозное пробитие, на втором листе видна отметина от удара сердечника
13	2	1	Пуля остановлена вторым листом фанеры. На первом листе видно сквозное пробитие, на втором листе видна отметина от удара сердечника
14	2	1	Пуля остановлена вторым листом фанеры. На первом листе видно сквозное пробитие, на втором листе видна отметина от удара сердечника
15	2	1	Пуля остановлена вторым листом фанеры. На первом листе видно сквозное пробитие, на втором листе видна отметина от удара раздробленного сердечника
16	2	0	Пуля остановлена первым листом фанеры. На лицевой стороне видна отметина от раздробленного сердечника, с обратной стороны первого листа видны следы расслоения фанеры
17	2	2	Оба листа фанеры пробиты, следов раздробления сердечника не обнаружено
18	2	1	Пуля остановлена вторым листом фанеры. На первом листе видны сквозное пробитие и отметины от осколков сердечника, во втором листе застрял сердечник пули, рис. 12
19	2	0	Пуля остановлена первым листом фанеры. На лицевой стороне видна отметина от раздробленного сердечника, с обратной стороны первого листа видны следы расслоения фанеры, рис. 13
20	2	1	Первый лист пробит, пуля остановлена вторым листом фанеры. На втором листе видно углубление от раздробленного сердечника

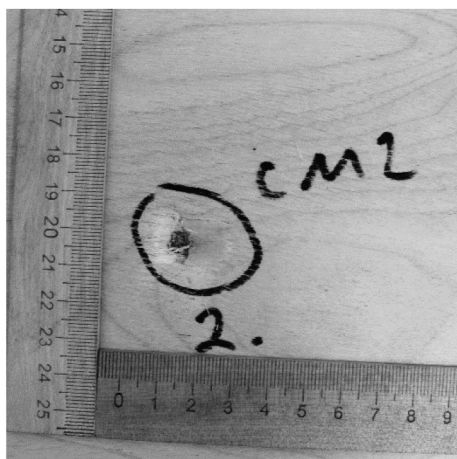
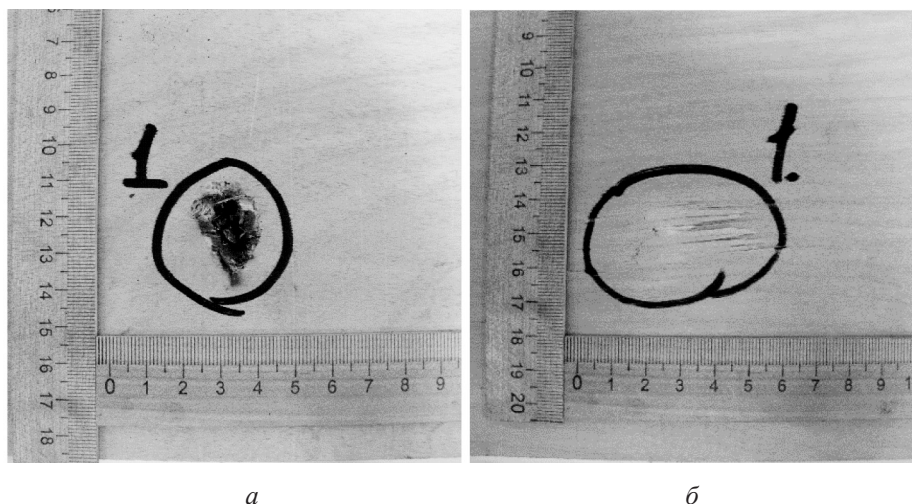


Рис. 12. Застывший во втором листе фанеры сердечник пули при испытании образца №18



а

б

Рис. 13. Вид второго листа фанеры при испытании образца № 19:
а — фронтальная сторона; б — тыльная сторона

Анализ результатов

Анализ характеристик образцов, приведенных в табл. 1, показывает, что существует зависимость между плотностью, составом и характером реакции для образцов МАЭК. При значениях плотности образца МАЭК $\geq 3 \text{ г/см}^3$ наблюдалась реакция высокоскоростного горения, в остальных случаях образец МАЭК горел с низкой скоростью или не инициировался. Практически на всех листах фанеры были видны следы черного налета. Однако по ходу испытаний не удалось установить, были ли это следы от сгоревшего образца МАЭК, так как такого рода налет имел место быть даже в испытаниях, где образец не реагировал.

Исходя из данных табл. 2 можно сделать вывод о заметном снижении скорости сердечника пули в случае высокоскоростного горения МАЭК. Для состава Al/CuO/Hf/Tf/F42 вероятность пробития двух контрольных листов Ст3 составила 33 %, по сравнению со стопроцентной вероятностью пробития для контрольных образцов без МАЭК.

Для низкоскоростного горения влияние МАЭК на пулестойкость можно оценить по вероятности пробития фанерных листов — свидетелей. Для образцов 5–9, показавших низкоскоростное горение МАЭК, вероятность остановки пули первым листом фанеры составила 60 %. Для образцов 10–20, для которых не наблюдалась реакция, вероятность остановки пули

первым листом фанеры снизилась до 30 %. Образец 11, как и ранее, был исключен из анализа из-за нетипичного поведения, которое могло быть вызвано, например, большим отклонением начального угла подхода пули к образцу защитной структуры от нормали.

При испытаниях образцов 1 и 2 на втором листе стали Ст3 видны следы попадания, аналогичные следам на третьем контрольном листе при пулевых испытаниях, что свидетельствует о более раннем разрушении сердечника в структуре с МАЭК.

В результате анализа результатов испытаний можно сделать следующие выводы:

- характер реакции образцов не зависит от скорости пули в пределах значений 810–870 м/с;
- наиболее активно реагировали образцы, имеющие в своем составе оксид меди;
- при непробитии на втором листе стали Ст3 видны следы попадания, аналогичные следам на третьем листе при пулевых испытаниях, что свидетельствует о более раннем разрушении сердечника.

Заключение

В ходе выполнения работы создана разнесенная бронева структура, при помощи которой была проведена оценка вклада МАЭК в пулестойкость.

В результате проведенных испытаний получены следующие результаты:

1. При достаточном ударно-волновом воздействии пули на мишень реакция образца протекает в режимах высокоскоростного или низкоскоростного горения;
2. Режим высокоскоростного горения образцов достигается в смесях, содержащих оксид меди и имеющих значения плотности более 3 г/см^3 , что говорит о влиянии состава и плотности образца на характер химической реакции образца МАЭК при ударно-волновом взаимодействии;
3. Использование МАЭК в разнесенных защитных структурах повышает характеристики пулестойкости образцов;
4. Использование МАЭК влияет на разрушение ударника, повышая степень его раздробленности, что провоцирует снижение бронепробиваемости.

Список источников

1. Сильников М.В., Анастасиади Г.П. Работоспособность бронева материалов. НПФ Астерион, 2004. 622 с.
2. Held M. Brassey's Essential Guide to Explosive Reactive Armour and Shaped Charges, Brassey, 1999. 350 p.
3. Григорян В.А., Дорохов Н.С., Кобылкин И.Ф. и др. Невзрывная противоккумулятивная динамическая защита контейнеров для хранения и транспортировки устройств, содержащих делящиеся и взрывчатые вещества: тр. V Всерос. конф. «Актуальные проблемы защиты и безопасности». СПб. 2002.
4. Лазоркин В.И., Сильников М.В. Динамическая защита мобильных небронированных объектов от переносных средств поражения кольцевыми зарядами // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2017. № 3–4 (105–106). С. 91–97.
5. Wu Q. et al. Potential space debris shield structure using impact-initiated energetic materials composed of polytetrafluoroethylene and aluminum // Applied Physics Letters. 2016. V. 108. No 10. P. 101903.
6. Долгобородов А.Ю. Механоактивированные энергетические композиты окислитель-горючее // Физика горения и взрыва. 2015. Т. 51. № 1. С. 102–116.
7. Долгобородов А.Ю., Бородин Т.И., Кириленко В.Г. и др. Развитие метода механоактивации термитных смесей // Горение и взрыв. 2024. Т. 17. № 1. С. 105–117.
8. Ананьев С.Ю., Гришин Л.И., Долгобородов А.Ю., Янковский Б.Д. Ударно-волновое инициирование термитной смеси $\text{Al}+\text{CuO}$ // Физика горения и взрыва. 2020. Т. 56. № 2. С. 107–117.
9. Ren S. et al. Influence of impact-induced reaction characteristics of reactive composites on hypervelocity impact resistance // Materials & Design. 2020. V. 192. P. 108722.
10. Стрелецкий А.Н. и др. Дефектная структура и реакционная способность механоактивированных энергетических композитов магний/фторопласт // Коллоидный журнал. 2015. Т. 77. № 2. С. 225–237.
11. Xu X. et al. Mechanical properties, impact initiation characteristics and energy release effect

of Al/PTFE reactive materials enhanced by Fe particles // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2023. V. 33, No 3. Pp. 683–700.

12. Ge C. et al. Experimental Study on Impact-induced Initiation Thresholds of Polytetrafluoroethylene/Aluminum Composite // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 2017. V. 42, No 5. Pp. 514–522.

13. Ge C. et al. A study on the mechanical properties and impact-induced initiation characteristics of brittle PTFE/Al/W reactive materials // Materials. 2017. V. 10, No 5. P. 452.

14. Бажанов С.П., Амосов А.П., Мишина В.А. Деформация и воспламенение смесей металл-окислитель при нагружении в замкнутом объеме // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия Физико-математические науки. 1996. № 4. С. 235–239.

15. Tao J. et al. Reactivity and reaction mechanism of Al-PTFE mechanically activated energetic composites // FirePhysChem. 2021. V. 1, No 2. Pp. 123–128.

16. White B. W. et al. Impact initiation of reactive aluminized fluorinated acrylic nanocomposites // Journal of Dynamic Behavior of Materials. 2016. Vol. 2. Pp. 259–271.

17. Долгобородов А.Ю. и др. О возможности детонации в механоактивированном композите алюминий-фторопласт // Химическая физика. 2004. Т. 23. № 9. С. 85–88.

18. Сильников М.В., Гук И.В., Михайлин А.И., Сильников Н.М. и др. Защитные структуры на основе механоактивированных энергетических композитов // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2024. № 1 (131). С. 126–130.

19. Васильев Н.Н., Дмитриев В.Я., Пугачев А.Н. и др. Экспериментальная оценка баллистических параметров высокоскоростных поражающих элементов в осколочном потоке большой плотности // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2016. № 7–8 (97–98). С. 76–81.

20. Кобылкин И.Ф., Селиванов В.В. Материалы и структуры легкой бронезащиты: учебник. М.: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 191 с.

21. Современные материалы для средств индивидуальной бронезащиты: научно-популярный журнал «Композитный мир». URL: <https://compositeworld.ru/articles/materials/id636a0b3dfb445b0019831bd8> (дата обращения: 20.11.2024).

22. 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.