

УДК 623.445+539.411.5
DOI: 10.15372/PMTF202315265

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ УДАРНИКОВ С МНОГОСЛОЙНОЙ ПРОЗРАЧНОЙ БРОНЕЙ

В. В. Федяй, В. В. Селиванов, А. В. Петюков

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана,
Москва, Россия
E-mails: shakirzyanova@bmstu.ru, selivanovvv@bmstu.ru, petyukov_a@bmstu.ru

Разработана экспериментальная методика, которая позволяет визуализировать возникновение и распространение повреждений в каждом слое прозрачной брони. Проанализирована динамика развития повреждений в многослойных пакетах, состоящих из четырех и восьми слоев площадью 480×480 мм и 300×300 мм соответственно. Эволюция повреждений получена при воздействии пули калибром 12,7 мм с двухкомпонентным сердечником общей массой 59,2 г и пули калибром 7,62 мм с двухкомпонентным сердечником общей массой 10,9 г как по нормали, так и под острым углом в диапазоне скоростей удара $777 \div 797$ м/с. Проведено сравнение экспериментальных данных с результатами численного моделирования взаимодействия ударника с многослойной прозрачной преградой.

Ключевые слова: пробитие, прозрачная броня, многослойный стеклопакет, изгиб, разрушение, воздействие под углом

Введение. В настоящее время главной угрозой для личного состава легкобронированной техники, ударных вертолетов и самолетов-штурмовиков, действующих в зонах досягаемости огня автоматического оружия, являются пули винтовок и пулеметов, а также осколочные боеприпасы. Во многих случаях именно бронезащита определяет эффективность вооружения и военной техники. Одним из типов бронезащиты является прозрачная броня, которая наиболее удобна для личного состава, выполняющего различные боевые задачи.

Как правило, прозрачная броня представляет собой многослойную конструкцию, в которой стеклянные и полимерные слои соединены прозрачным синтетическим клеем (рис. 1) [1].

Лицевой слой пулезащитной брони необходимо изготавливать из упрочненного стекла или прозрачной керамики. В работе [2] предлагается использовать в качестве лицевого слоя пластины монокристалла лейкосапфира толщиной $4 \div 8$ мм. Однако стоимость пластин монокристалла лейкосапфира значительно превышает стоимость других материалов, кроме того, из этого материала невозможно создать преграды больших размеров. В работе [3] в качестве высокотвердого лицевого слоя предложено использовать пластины сапфира толщиной 4 или 6 мм (однослойные) и $4 + 4$ мм (двухслойные). Пуля Б-32 калибром 7,62 мм при скорости 836 м/с не пробивает многослойную прозрачную преграду,

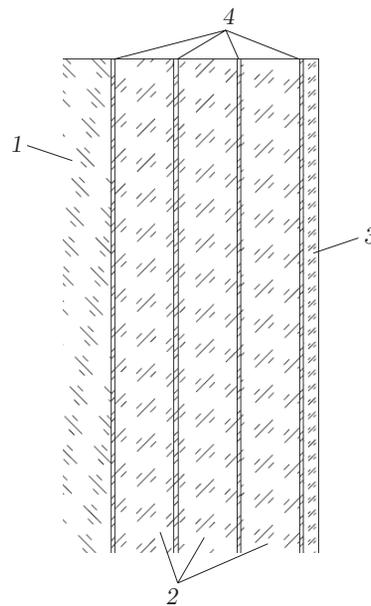


Рис. 1. Схема многослойной прозрачной брони:

1 — высокопрочный лицевой слой, 2 — слои стекла, 3 — слой поликарбоната, 4 — прозрачный клей

состоящую из пластины сапфира (обычного) толщиной 6 или 3 мм, упрочненного стекла толщиной 10 мм и слоя поликарбоната толщиной 4 мм. Использование в качестве лицевого слоя двух пластин сапфира толщиной 4 мм обеспечивает стойкость к воздействию пули Б-32, летящей со скоростью 855 м/с. Таким образом, применение лицевого слоя из сапфира и использование упрочненного стекла позволяют более чем в три раза уменьшить толщину и массу многослойной прозрачной брони, обеспечивающей защиту по шестому классу.

Роль лицевого слоя заключается, во-первых, в локализации наибольшего пика давления, формирующегося на начальной стадии ударно-волнового взаимодействия пули с преградой [4], во-вторых, в разрушении средства поражения, преобразовании его сосредоточенного воздействия в распределенное на большую площадь и поглощении части кинетической энергии этого средства поражения. Для предотвращения проникания вторичных (откольных) осколков в защищаемую зону тыльный слой многослойных стеклопакетов изготавливается из прозрачного пластичного полимера — поликарбоната или оргстекла [1, 5].

В качестве клея используются поливинилбутираль (PVB), этилен-винилацетат (EVA) или термопластичный полиуретан (TPU). Промежуточный слой удерживает слои стекла связанными даже в случае разрушения, а его высокая прочность предотвращает разрушение стекла на крупные заостренные фрагменты. Важными требованиями к адгезиву являются его оптическая прозрачность при контакте со стеклом и высокая устойчивость к УФ-излучению. Этим требованиям удовлетворяет полиуретан [6, 7]. Для соединения сапфировых стекол применяются высокотемпературные композиционные материалы, такие как полиэтиленвинилацетат (термопластик) и некоторые виды стеклокерамических материалов с низкой температурой плавления [8].

Несмотря на многолетнюю историю применения прозрачной брони, ее создание до сих пор остается эмпирическим процессом. Для оптимизации структуры многослойной прозрачной брони необходимо понимание механики процессов разрушения и пробития при воз-

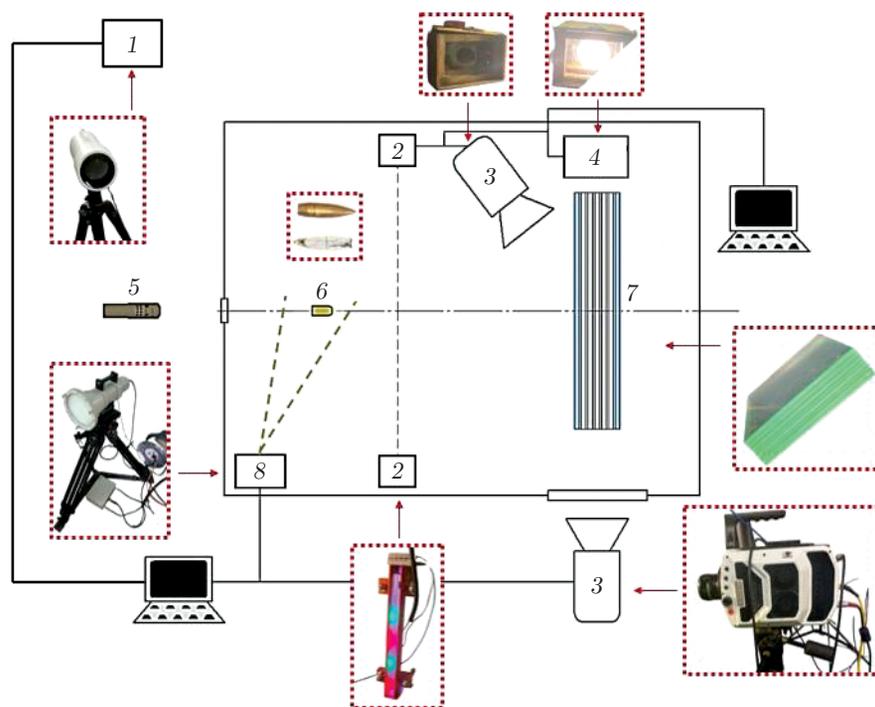


Рис. 2. Схема экспериментальной установки:

1 — датчик для измерения начальной скорости, 2 — рама-мишень, 3 — высокоскоростная камера Phantom v1610, 4 — вспышка, 5 — ствол, 6 — пуля, 7 — стеклопакет, 8 — радар

действии кинетических средств поражения. На баллистическую стойкость многослойных конструкций значительное влияние оказывают формирование и распространение в них повреждений, для оценки которых была разработана экспериментальная методика, позволяющая визуализировать возникновение и развитие повреждений в каждом слое стеклопакета, что представляет собой основу для совершенствования прозрачной брони, создания расчетной методики определения предельной скорости пробития и выявления основных факторов, влияющих на ее величину.

1. Модель эксперимента и методы измерения. Ударные испытания проводились на специально оборудованной баллистической трассе в Дмитровском филиале Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. На рис. 2 представлена схема экспериментальной установки. Развитие повреждений в слоях визуализировалось с помощью высокоскоростных камер Phantom[®] v1610. Одна из камер располагалась вблизи торцевой поверхности образца за ударной камерой для визуализации возникновения и развития повреждений в каждом слое стеклопакета. Для фиксации картины разрушения лицевого слоя преграды перед фронтальной поверхностью образца размещалась вторая высокоскоростная видеокамера. В процессе высокоскоростной съемки образцы стеклопакетов подсвечивались с противоположной стороны вспышкой. Для защиты от осколков и стеклянной пыли данная видеокамера и лампа импульсной подсветки были помещены в защитные корпуса. Включение лампы подсветки регулировалось следующим образом: вдоль траектории движения пули были установлены рамы-мишени, по мере пролета которых происходили запуск камер и активация подсветки. Измерение начальной скорости выстрела осуществлялось с помощью датчика, который запускался в момент выстрела и передавал информацию о запуске радару.

Таблица 1

Характеристики экспериментальных образцов

Характеристика образца	Образец 1	Образец 2
Размеры стеклопакета, мм	480 × 480	300 × 300
Количество слоев стекла	4	8
Количество клеевых слоев	3	7
Материал стекла	Силикатное стекло марки М1	
Материал клеевого соединения	Пленка EVA	
Формула образца	4 × 12	3 × 10 + 6 + 10 + 6 + 10 + 8

В табл. 1 представлены характеристики образцов, а именно количество и размеры слоев, материалы и характеристики основных и промежуточных слоев, размеры стеклопакета.

Проведены две серии испытаний на баллистическое воздействие. В первой серии использовались бронебойные пули калибром 12,7 мм (12,7 × 108/СН (снайперский патрон)), имеющие биметаллическую оболочку и двойной сердечник — стальной заостренный массой 13,3 г в головной части и свинцовый массой 34,5 г в основной части. Во второй серии использовались пули калибром 7,62 мм (7,62 × 51/FMJ (пуля с цельнометаллической оболочкой)), имеющие биметаллическую оболочку и двойной сердечник — стальной массой 3,3 г в головной части и свинцовый массой 4,5 г в основной части.

2. Анализ процесса распространения повреждений при воздействии пули по нормали. На рис. 3 показан процесс формирования и распространения зон повреждения в первом слое стеклопакета. Серия из шести высокоскоростных фотографий получена при пробитии образца 1 пулей 12,7 × 108/СН со скоростью 782 м/с. Слои стекла имеют вид четырех прямоугольных зон С1, С2, С3 и С4. Видимые части стеклянных слоев разделены темными вертикальными линиями, которые соответствуют связующим слоям

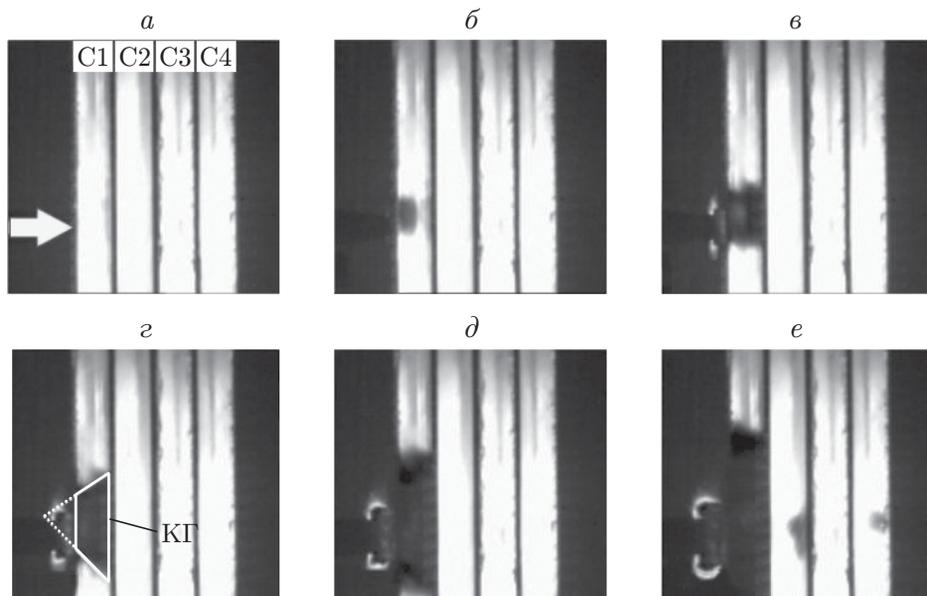


Рис. 3. Процесс формирования и распространения зон повреждения в первом слое стеклопакета образца 1:

a — $t = 0$, *б* — $t = 4$ мкс, *в* — $t = 8$ мкс, *г* — $t = 12$ мкс, *д* — $t = 16$ мкс, *е* — $t = 20$ мкс; С1, С2, С3, С4 — слои стекла, КГ — конус Герца, стрелка — направление выстрела

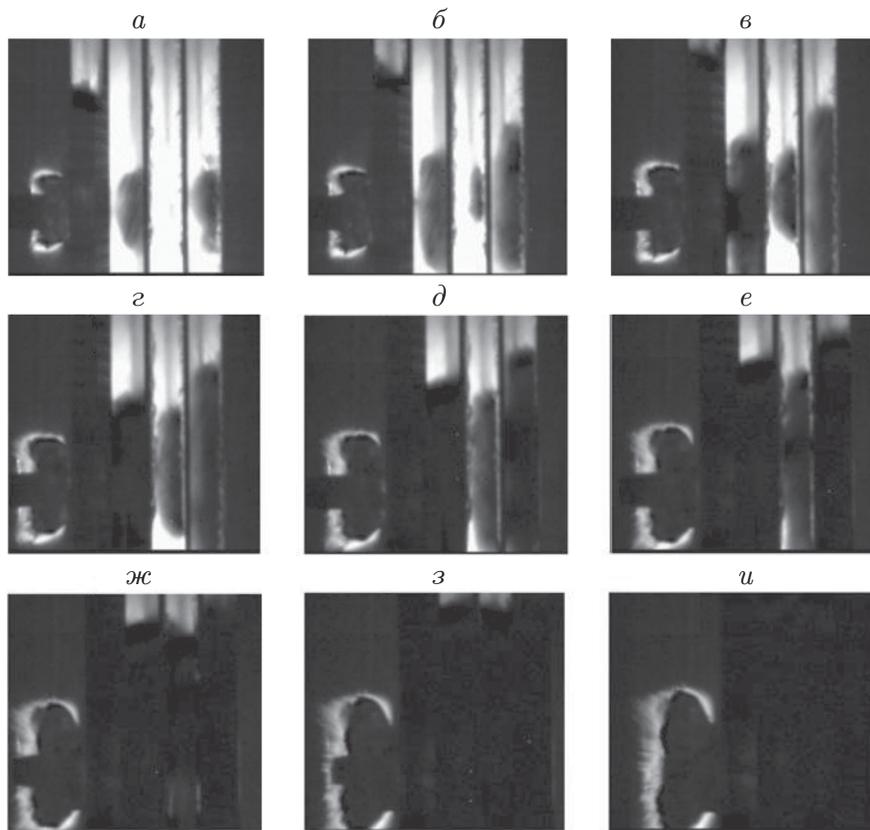


Рис. 4. Процесс распространения зон повреждения в образце 1:

a — $t = 24$ мкс, $б$ — $t = 28$ мкс, $в$ — $t = 32$ мкс, $г$ — $t = 36$ мкс, $д$ — $t = 40$ мкс, $е$ — $t = 44$ мкс, $ж$ — $t = 48$ мкс, $з$ — $t = 52$ мкс, u — $t = 56$ мкс

толщиной 0,8 мм. Сначала разрушение стекла происходит в зоне воздействия пули. В течение 6 мкс трещины достигают тыльной поверхности пластины, образуя зону разрушения конической формы, так называемый конус Герца, с углом раствора, равным 85° . На следующем этапе происходит распространение повреждений только в боковом направлении. Зона повреждения прямоугольной формы расширяется со средней скоростью 1350 м/с, причем скорость распространения получена на основе измеренных данных о координате и времени. Средняя скорость распространения трещины в направлении удара составила приблизительно 1500 м/с (по результатам двух позиционно-временных измерений).

Картина дальнейшего процесса распространения зон разрушений в стеклопакете в интервале времени 56 мкс представлена на рис. 4.

Повреждения во втором слое визуализируются через 18 мкс с момента удара. Трещина возникает в центре тыльной поверхности стекла и распространяется в направлении, противоположном направлению выстрела. В результате анализа данных получены средние значения скорости разрушения 1300 м/с в направлении, противоположном направлению выстрела, и 1600 м/с в боковом направлении. Аналогично разрушаются третий и четвертый слой стеклопакета. Следует отметить, что на всех стадиях, кроме начальной, пуля проникала в поврежденное стекло. В четвертом слое стекла трещина возникала через 20 мкс на тыльной поверхности пластины и распространялась в направлении, противоположном направлению выстрела. В третьем слое стекла трещины также возникали на тыльной поверхности пластины через 27 мкс с момента выстрела. Средние значения скорости разрушения в третьем слое стекла составили 1400 м/с в направлении выстрела

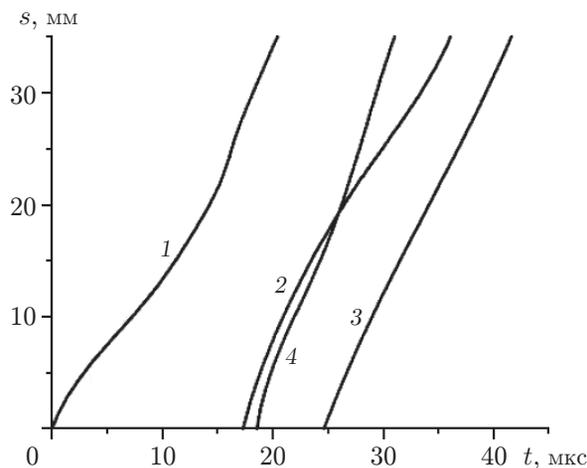


Рис. 5. Зависимость положения фронта трещины, распространяющейся по длине слоя, от времени в различных слоях стекла:

1 — первый слой, 2 — второй слой, 3 — третий слой, 4 — четвертый слой

и 2000 м/с в боковом направлении. Фронт разрушения в четвертом слое распространялся в направлении, противоположном направлению выстрела, со средней скоростью 1500 м/с, скорость распространения в боковом направлении составила 2000 м/с. Полученные значения скорости близки к значениям скорости распространения трещин V_{CR} , измеренным в ЕОИ-тестах с натриево-известковым стеклом [9].

Следует отметить, что направление движения пули практически не меняется (отклонения от первоначальной траектории не превышают 2°). Зависимость положения фронта трещины, распространяющейся по длине слоя, от времени для всех слоев стекла представлена на рис. 5 (s — расстояние от центра стеклопакета). Положение кривой зависимости $s(t)$ для четвертого слоя стекла (кривая 4) свидетельствует о таком явлении, как откол, при котором происходит отделение части материала стеклопакета от его тыльной поверхности в результате воздействия отрицательных давлений (растягивающих напряжений) в стекле. Для предотвращения проникания вторичных (откольных) осколков в защищаемую зону тыльный слой пулезащитной брони необходимо изготавливать из прозрачного пластичного полимера.

3. Анализ распространения повреждений при воздействии пули под острым углом. Результаты современных исследований в области динамики удара показывают, что при определенных условиях траектория движения ударника, пробивающего преграду под некоторым углом, может меняться, отклоняясь в направлении нормали к тыльной поверхности преграды [10]. Кроме того, наблюдается явление, которое получило название нормализации разрушения: разрушение и перемещение элементов преграды происходят так же, как при воздействии ударника по нормали к поверхности преграды [11].

Для оценки развития повреждений при стрельбе в направлении, отличном от нормали, проведены ударные испытания, при которых стрельба велась под углами 30° , 45° и 60° . Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о нормализации области разрушения в стеклянной преграде при соударении под углом: разрушение стекла происходит по нормали к поверхности. На рис. 6 показано распространение зон повреждения при ударном воздействии на образец 2 пули $7,62 \times 51$ /FMJ под углом 45° со скоростью 784 м/с. Следует отметить, что разрушение отдельных слоев происходит с образованием конуса Герца с углом раствора, равным 75° . Как и при стрельбе под углами 30° и 60° , наблюдается нормализация процесса пробития.

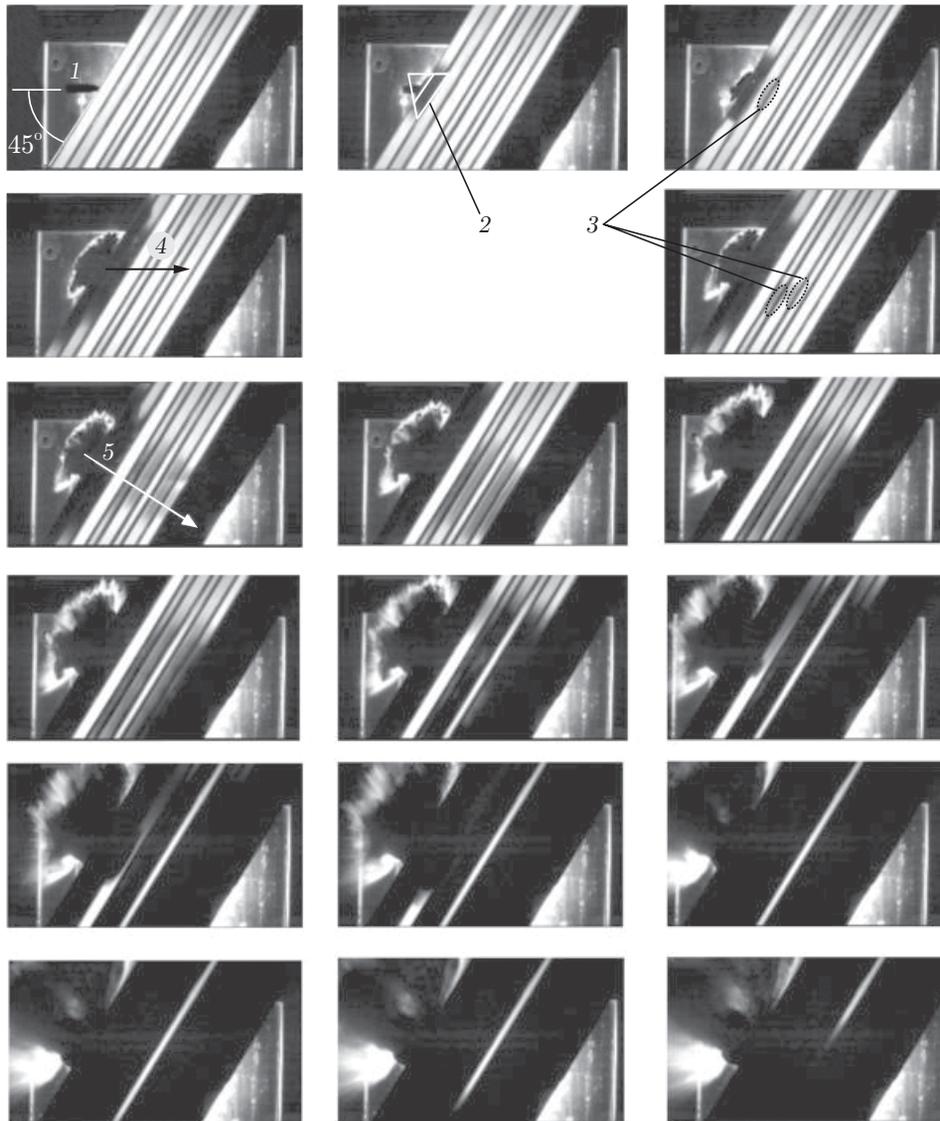


Рис. 6. Процесс формирования и распространения зон повреждения в образце 2 при воздействии пули под углом 45° (шаг по времени между кадрами — 5 мкс): 1 — пуля, 2 — конус Герца, 3 — зона действия растягивающих напряжений, 4 — начальная траектория пули, 5 — нормаль к поверхности

Нормализация области разрушения в преграде при воздействии пули под некоторым углом происходит в результате разделения осколков преграды, образующихся при ее высокоскоростном пробитии, на два потока: поток осколков, направленных преимущественно по нормали к поверхности преграды, и поток фрагментов, движущихся в направлении начальной траектории ударника (рис. 7).

4. Численное моделирование. Для дальнейшего анализа экспериментальных данных с целью установления взаимосвязи между проникающей способностью пули и развитием повреждений в прозрачной броне при воздействии пули под углом проведено трехмерное численное моделирование. Механика пробития и развития повреждений при воздействии ударников по нормали более подробно рассмотрена в работах [9, 12].

Задачи решались в трехмерной постановке с использованием метода гидродинамики сглаженных частиц (smoothed particle hydrodynamics (SPH)), реализованного в програм-

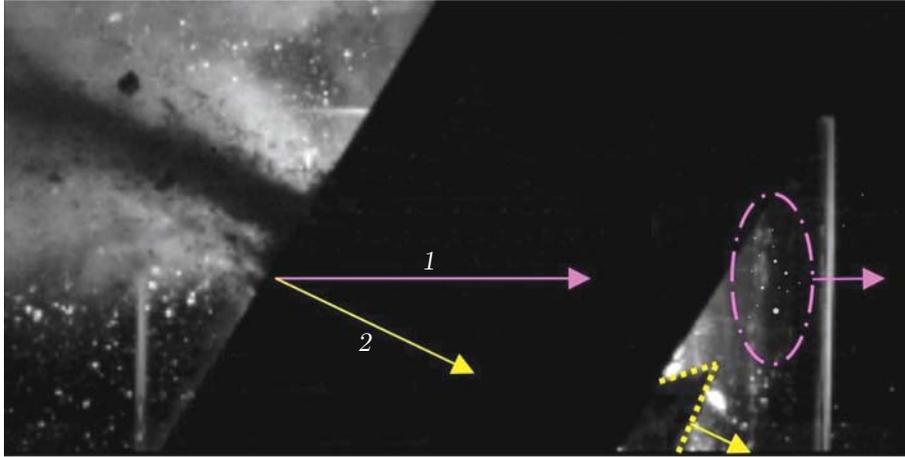


Рис. 7. Разделение потока осколков, образующихся при разрушении преграды: 1 — начальная траектория пули, 2 — нормаль к поверхности

мною комплексе LS-DYNA [13]. В основу этого метода положена система уравнений законов сохранения массы, импульса и энергии в дифференциальной форме [14]

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} = \sum_{j=1}^N m_j (v_i^\beta - v_j^\beta) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta}, \quad \frac{\partial v_i^\alpha}{\partial t} = - \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{\sigma_i^{\alpha\beta}}{\rho_i^2} + \frac{\sigma_j^{\alpha\beta}}{\rho_j^2} + \Pi_{ij} \right) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta},$$

$$\frac{\partial e_i}{\partial t} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{p_i}{\rho_i^2} + \frac{p_j}{\rho_j^2} + \Pi_{ij} \right) (v_i^\beta - v_j^\beta) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} + \frac{1}{\rho_i} \tau_i^{\alpha\beta} \varepsilon_i^{\alpha\beta}, \quad \frac{\partial x_i^\alpha}{\partial t} = v_i^\alpha,$$

где ρ — плотность SPH-частицы; m — масса SPH-частицы; v^α , v^β — компоненты вектора скорости; W_{ij} — ядро сглаживания; $\sigma^{\alpha\beta}$ — компоненты тензора напряжений; Π — псевдовязкость; e — внутренняя энергия; p — давление; $\tau^{\alpha\beta}$ — компоненты тензора девиатора напряжений; $\varepsilon^{\alpha\beta}$ — компоненты тензора скоростей деформаций; индекс i соответствует текущей SPH-частице, индекс j — частицам окружения. Данная система уравнений дополнялась соотношениями для девиатора напряжений, замыкающими соотношениями (уравнениями состояния и моделями прочности), а также начальными и граничными условиями. Выбор метода SPH обусловлен тем, что он позволяет рассчитать большие деформации материалов, при этом отсутствует искажение расчетной сетки, и как следствие не требуется удалять ячейки из расчетной области. Более подробно расчетный метод моделирования хрупких материалов описан в работе [15].

На рис. 8 показана схема нагружения образца 2: пакет, состоящий из восьми стеклянных слоев, склеенных между собой, подвергался высокоскоростному воздействию ударника под углами 30, 45 и 60°. Скорость ударника составляла приблизительно 800 м/с. В силу симметрии рассматривалась половина расчетной области.

При моделировании сжимаемости, механического поведения и разрушения стекла использовалась модель Джонсона — Холмквиста с полиномиальным уравнением состояния [16], в котором A , B , C , M , N , SF_{\max} , P_{Hel} , $EPSI$ — константы модели прочности; K_1 , K_2 , K_3 , β — константы уравнения состояния; D_1 , D_2 — константы модели разрушения. В расчетах использовались следующие значения коэффициентов: модуль сдвига 30,4 ГПа, предел упругости Гюгонио 5,95 ГПа, плотность 2530 кг/м³, $A = 0,93$, $B = 0,2$, $C = 0,003$, $M = 1,0$, $N = 0,77$, $SF_{\max} = 0,5$, $P_{Hel} = 2,92$ ГПа, $EPSI = 1,0$, $K_1 = 45,4$ ГПа, $K_2 = -138$ ГПа, $K_3 = 290$ ГПа, $\beta = 1$, $D_1 = 0,043$, $D_2 = 0,85$, предел прочности на растяжение 150 МПа.

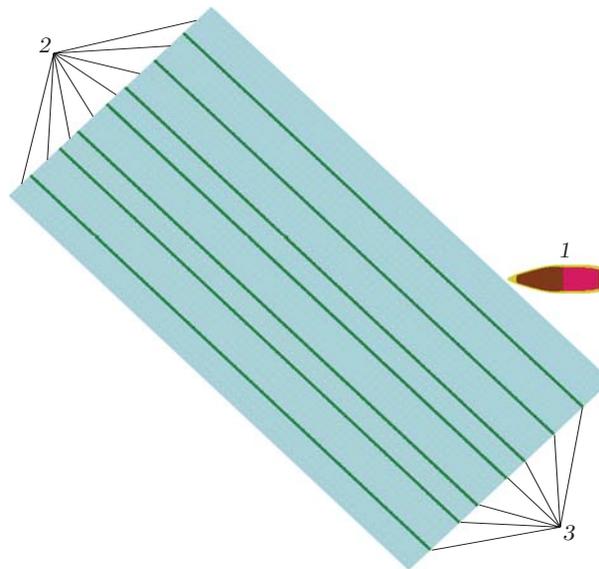


Рис. 8. Схема нагружения образца 2:
1 — ударник, 2 — слой стекла, 3 — клеевые слои

Таблица 2

Константы модели идеального упругопластического материала

Материал	ρ_0 , кг/м ³	E , ГПа	ν	σ_T , МПа
Рубашка ударника (томпак)	8850	114,0	0,350	250,0
Свинцовая часть сердечника	11 340	15,7	0,440	15,0
Клеевые слои	1320	0,0013	0,017	3,3

Уравнение состояния для материала сердечника (сталь) было выбрано в форме уравнения Ми — Грюнайзена [13]

$$p = \frac{\rho_0 C^2 \mu [1 + (1 - \gamma_0/2)\mu]}{[1 - (S_1 - 1)\mu]^2} + \gamma_0 E, \quad \mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1,$$

где ρ_0 — начальная плотность материала; ρ — текущая плотность материала; E — удельная внутренняя энергия, Дж/м³; γ_0 — коэффициент Грюнайзена; S_1 — коэффициент наклона ударной адиабаты. В расчетах использовались следующие значения констант: $C = 4369$ м/с, $S_1 = 1,49$, $\gamma = 2,17$.

Деформация материала сердечника описывалась моделью Джонсона — Кука

$$\sigma_T = [A + B\varepsilon_p^n] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^M \right],$$

где σ_T — предел текучести материала; A — предел текучести материала в исходном состоянии; B — коэффициент (модуль) деформационного упрочнения; ε_p — интенсивность пластических деформаций; n — показатель деформационного упрочнения; $\dot{\varepsilon}$ — интенсивность скорости деформаций; T — температура окружающей среды; T_r — комнатная температура; T_m — температура плавления; A , B , n , C , M — постоянные, зависящие от свойств материала. В расчетах использовались следующие значения констант: $\rho_0 = 7800$ кг/м³, $G = 80$ ГПа, $A = 892$ МПа, $B = 510$ МПа, $n = 0,26$, $C = 0,014$, $M = 1,03$, $\dot{\varepsilon}_0 = 1$.

Прочность рубашки ударника (томпак), свинцовой части сердечника и клеевых слоев преграды моделировалась с помощью модели идеального упругопластического материала (табл. 2).

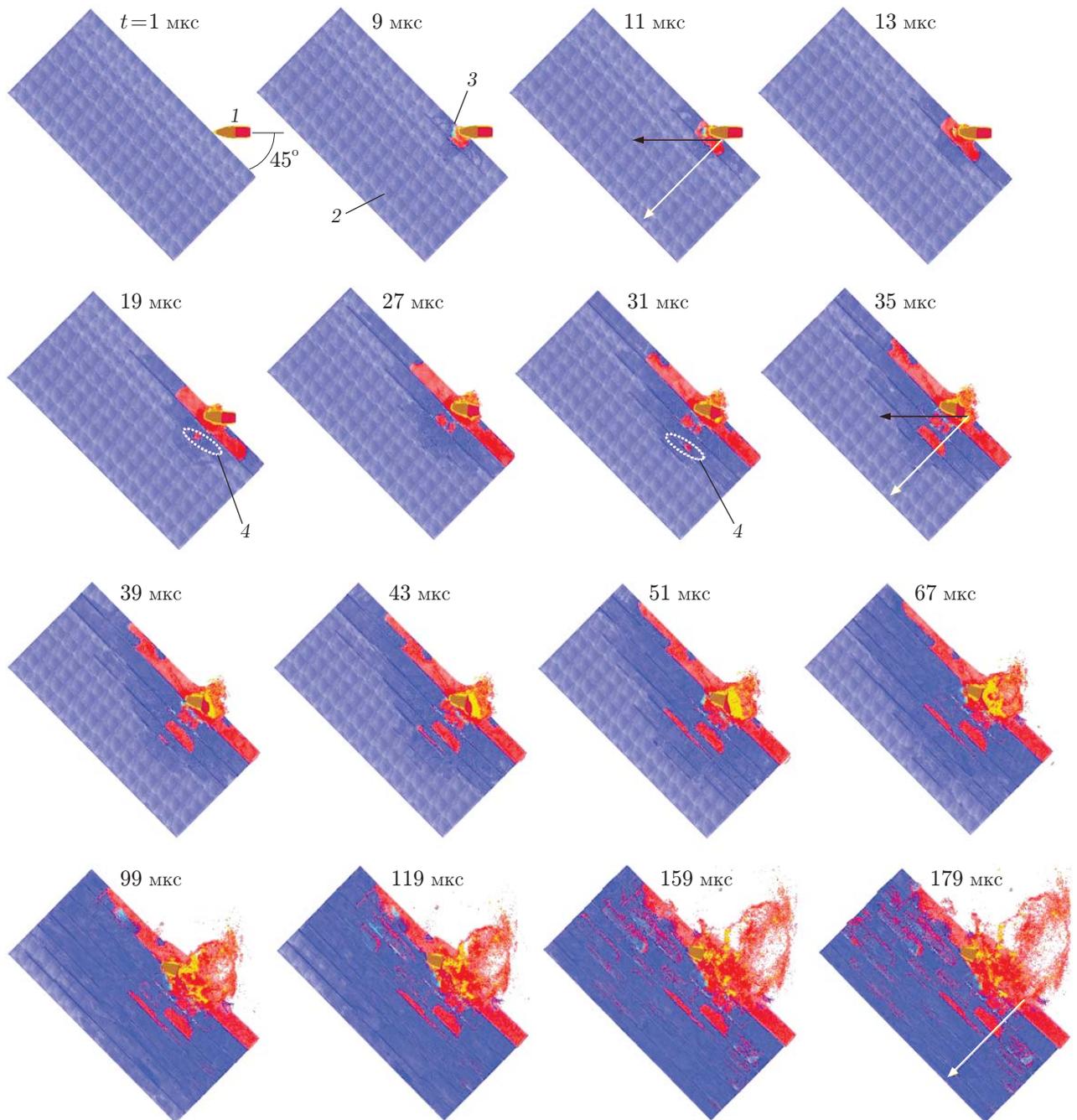


Рис. 9. Распределение повреждений в преграде при воздействии пули под углом 45° : 1 — пуля, 2 — неповрежденное стекло (параметр поврежденности $D = 0$), 3 — разрушенное стекло ($D = 1$), 4 — зона действия растягивающих напряжений

Результаты численного моделирования при воздействии пули под углом 45° приведены на рис. 9. Видно, что картина разрушения качественно совпадает с рентгенограммой процесса формирования и распространения зон повреждения, представленной на рис. 6: сначала происходит разрушение лицевого слоя стеклянной преграды вследствие ударного воздействия пули, а также волн разгрузки, распространяющихся от лицевой и тыльной поверхностей слоя. Разрушение второго и последующих слоев преграды происходит в соответствии с откольным механизмом, при этом разрушенные области располагаются по нормали к лицевой поверхности, т. е. происходит нормализация разрушения.

При проникании ударника в поврежденную стеклянную область наблюдается его интенсивный разворот: в момент времени с начала взаимодействия $t = 51$ мкс угол поворота составил 12° . В работе [11] описан подобный механизм, наблюдавшийся при взаимодействии ударников с комбинированными преградами с внешним керамическим слоем. Разрушенное стекло, так же как керамика, обладает небольшим сопротивлением вращательному движению фрагментов ударника.

Заключение. Предложен метод визуализации процессов взаимодействия высокоскоростных ударников с прозрачными защитными структурами, необходимый для понимания механизмов их взаимодействия.

Разрушение отдельных слоев стекла сопровождается образованием конуса Герца с углом раствора $75 \div 85^\circ$. Основной причиной разрушения многослойного стеклопакета на границах раздела в процессе проникания в него высокоскоростного ударника является наличие растягивающих напряжений, возникающих при изгибе слоев стекла.

В отсутствие тыльного слоя пулезащитной брони наблюдается откол в последнем слое с образованием заостренных осколков, что подтверждает необходимость использования прозрачного пластичного полимера, предотвращающего проникание откольных осколков в защищаемую зону.

При пробитии стеклянной преграды под некоторым углом обнаружено явление нормализации разрушения преграды. Угол соударения пули с поверхностью преграды оказывает существенное влияние на ее траекторию. Так, при углах соударения, равных или близких к 90° , траектория пули практически не меняется (отклонение от начальной траектории не превышает 2°).

Трехмерное численное исследование взаимодействия высокоскоростных ударников с многослойными прозрачными преградами под некоторым углом подтвердило факт, обнаруженный при анализе высокоскоростных фотографий: стеклянные преграды нормализуют процесс пробития, разрушенные области располагаются по нормали к лицевой поверхности. Сопоставление полученных результатов расчета с данными экспериментов показало, что они удовлетворительно согласуются.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кобылкин И. Ф.** Материалы и структуры легкой бронезащиты / И. Ф. Кобылкин, В. В. Селиванов. М.: Изд-во Моск. гос. техн. ун-та им. Н. Э. Баумана, 2014.
2. **Белов Н. Н., Югов Н. Т., Саммель А. Ю., Степанов Е. Ю.** Исследование прочности прозрачной брони на высокоскоростной удар цилиндрическим ударником методом компьютерного моделирования // Вестн. Том. гос. ун-та. Математика и механика. 2020. № 67. С. 69–77. DOI: 10.17223/19988621/67/7.
3. **Li X., Luo J., Zhou Y.** Spark plasma sintering behavior of AlON ceramics doped with different concentrations of Y_2O_3 // J. Europ. Ceramic Soc. 2015. V. 35, N 7. P. 2027–2032.

4. **Власов А. С., Зильбербранд Е. Л., Кожушко А. А.** Принципы прозрачной защиты от высокоскоростного удара // Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны: Тр. Междунар. конф. “7-е Харитоновские тематические научные чтения”, г. Саров (Россия), 14–18 марта 2005 г. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 2005.
5. **The science of armour materials** / Ed. by I. G. Crouch. S. l.: Woodhead Publ., 2017.
6. **Freeguard G. F., Marshall D.** Bullet-resistant glass: A review of product and process technology // Composites. 1980. V. 11, N 1. P. 25–32.
7. **Machalická K., Eliášová M.** Adhesive joints in glass structures: effects of various materials in the connection, thickness of the adhesive layer, and ageing // Intern. J. Adhesion Adhesives. 2017. V. 72. P. 10–22. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2016.09.007.
8. **Patel P. J., Gilde G. A., Dehmer P. G., McCauley J. W.** Transparent armor // AMPTIAC Newslett. 2000. V. 4, N 3. P. 1–2.
9. **Strassburger E., Bauer S., Popko G.** Damage visualization and deformation measurement in glass laminates during projectile penetration // Defence Technol. 2014. V. 10, iss. 2. P. 226–238.
10. **Федоренко В. А.** Актуальные проблемы судебной баллистики. М.: Изд-во “Юрлитинформ”, 2011.
11. **Кобылкин И. Ф., Горбатенко А. А.** Пробивание двухслойных преград с внешним керамическим слоем при воздействии ударников под углом // Физика горения и взрыва. 2018. Т. 54, № 6. С. 112–120. DOI: 10.15372/FGV20180613.
12. **Кобылкин И. Ф., Шакирзянова В. В.** Численное моделирование пробивания многослойной прозрачной брони // Вестн. Моск. гос. техн. ун-та им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2020. № 1. С. 16–28. DOI: 10.18698/0236-3941-2020-1-16-28.
13. **LS-DYNA theory manual.** Livermore: Livermore Software Technol. Corp., 2019. Режим доступа: https://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/jday/manuals/DRAFT_Theory.pdf.
14. **Liu G. R.** Smoothed particle hydrodynamics: A meshfree particle method / G. R. Liu, M. B. Liu. New Jersey etc.: World Scientif., 2003.
15. **Петюков А. В., Грин К. А.** Особенности математического моделирования разрушения керамических пластин под воздействием высокоскоростных ударников // Инж. журн.: наука и инновации. 2021. Вып. 12. С. 1–12. DOI: 10.18698/2308-6033-2021-12-2133.
16. **Holmquist T. J., Johnson G. R., Grady D. E., et al.** High strain rate properties and constitutive modeling of glass // Proc. of the 15th Intern. symp. on ballistics, Jerusalem (Israel), 21–24 May 1995. S. l., 1995. P. 1–15.

*Поступила в редакцию 15/II 2023 г.,
после доработки — 22/V 2023 г.
Принята к публикации 26/VI 2023 г.*
