

УДК 539.4
DOI: 10.15372/PMTF202115020

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БАЛЛИСТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ГИБРИДНЫЙ КОМПОЗИТ (ОКСИД АЛЮМИНИЯ — ТКАНЫЙ МАТЕРИАЛ — ЭПОКСИДНАЯ СМОЛА — АЛЮМИНИЙ), ИСПОЛЬЗУЕМЫЙ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ БРОНЕЖИЛЕТА

П. С. Ахмед, М. С. Абед*, И. А. Салим*

Университет г. Койи, Койя, Ирак

* Технологический университет, Багдад, Ирак

E-mails: payman.suhbat@koyauniversity.org, Mayyadah.S.Abed@uotechnology.edu.iq,
mae.19.34@grad.uotechnology.edu.iq

Приводятся результаты экспериментального исследования и численного моделирования поведения гибридных композитов при баллистическом воздействии. Разработана многослойная броня алюмооксидная керамика — тканый материал (кевлар или сверхвысокомолекулярный полиэтилен высокой плотности), армированная эпоксидной смолой и алюминиевым сплавом. Показано, что результаты численного моделирования хорошо согласуются с результатами баллистических испытаний.

Ключевые слова: баллистические эксперименты, алюмооксидная керамика, алюминиевый сплав 5074, вмятина

Введение. Бронежилеты, предназначенные для защиты от пуль, должны быть прочными и простыми в изготовлении, использовании и ремонте. Обычно бронежилеты изготавливаются из нескольких стальных слоев, в результате чего повышается их стойкость к пробиванию.

Керамический слой, имеющийся в многослойной броне, изменяет направление пули, слой волокон замедляет движение пули, а металлический слой ее останавливает. Данная броня легче брони из одного стального листа, однако обеспечивает такой же уровень защиты [1]. При изготовлении брони широко используются композитные материалы. В работе [2] исследовалась возможность использования слоистой брони для изготовления легких, прочных бронежилетов.

При изготовлении бронежилетов широко используется сталь кевлар [3, 4]. Проектирование бронежилетов, особенно многослойных, обычно включает два этапа: 1) проектирование и выбор подходящих материалов; 2) моделирование для определения баллистических свойств используемого материала и общей эффективности конструкции бронежилета [5].

Вследствие высокой прочности и возможности расслоения материал брони предохраняет от разрушения, вызванного большими деформациями, рассеивает энергию сдвига и изгиба [6]. Волокном, впервые использованным при изготовлении бронежилетов, был нейлон. При изготовлении бронежилетов широко применяется сталь кевлар фирмы DuPont's,

а также другие материалы, сопоставимые по свойствам с кевларом, например арамиды (синтетический материал Zylon, параарамидное волокно Twaron, нетканый материал Gold Flex), и сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) (синтетическое химическое волокно Dyneema, композитный материал Spectra) [6]. Тканые материалы, изготовленные из высокопрочных волокон, находят широкое применение в различных изделиях, предназначенных для военных и гражданских целей [7].

Таким образом, исследование свойств бронежилетов является актуальной задачей. В данной работе изучается прочность бронежилета из композитного материала при различных баллистических воздействиях. Проведены стандартные баллистические испытания бронежилета с расстояния 5 м с использованием пистолета Daewoo и пули с цельнометаллической оболочкой калибром 9 мм. Были изучены повреждения брони при баллистических воздействиях. Результаты этих экспериментов использованы при разработке брони из композитного материала.

В данной работе проводятся экспериментальное и численное исследования баллистических характеристик бронежилетов, изготовленных из гибридных композитов, с использованием пакета ANSYS R20. Бронежилет изготовлен из трех различных материалов: передний (внешний) слой состоит из шестиугольных керамических плиток из оксида алюминия Al_2O_3 толщиной 3 мм, промежуточный слой представляет собой препрег (кевлар или СВМПЭ, армированный эпоксидной смолой (ЭС)), задний (внутренний) слой толщиной 2 мм изготовлен из алюминиевого сплава 5074. Данная конструкция при минимальных массе и толщине обеспечивает необходимую защиту от высокоскоростного удара. Использовался метод конечных элементов в сочетании с пакетом Ansys 20R2 Autodyn. Для определения кинетической энергии пули и энергии, поглощаемой слоями брони, а также для сравнения величины деформации с экспериментальными данными применялась явная схема решения динамической задачи.

1. Материалы, используемые при изготовлении бронежилетов. В экспериментах использовались СВМПЭ (Yixing Huaheng High-Performance Fiber Textile Company, Китай) и кевлар Twaron (Teijin Ltd, Япония). Характеристики материалов представлены в табл. 1. При изготовлении бронежилетов использовались также керамические плитки из оксида алюминия (Al_2O_3), плиты из алюминиевого сплава 5074, жидкий упрочнитель Sikafloor-156 на основе двухкомпонентной ЭС с соотношением смолы и отвердителя 3 : 1.

Таблица 1

Характеристики кевлара и СВМПЭ

Характеристика	Кевлар (Twaron)	СВМПЭ
Плотность, г/см ³	1,45	0,97 ÷ 0,98
Прочность на разрыв, сН/текс	200	285,6 ÷ 408,0
Модуль упругости при растяжении, сН/текс	8300	9282 ÷ 14 280
Удлинение при разрыве, %	2,5	3,5 ÷ 3,7
Предельная температура, °С	204	80
Температура деструкции, °С	400	145 ÷ 160
Прочность волокон после выдержки в течение 100 ч при температуре 300 °С, %	60 ÷ 65	68 ÷ 70
Влагопоглощение, %	4,5	0,6
Износостойкость	Стандартная	Высокая
Стойкость к растворителям	Высокая	Высокая
Устойчивость к кислоте	Низкая	Высокая
Щелочестойкость	Высокая	Высокая
Стойкость к ультрафиолетовому излучению	Низкая	Высокая

Таблица 2

Характеристики бронежилетов

Бронежилет	Материал	Количество слоев	h , мм	H , мм	m , кг
1	Al_2O_3 — СВМПЭ — алюминиевый сплав 5074	1 слой 10 слоев 1 слой	3 $0,8 \cdot 10$ 2	14	1,90
2	Al_2O_3 — (кевлар — ЭС) — алюминиевый сплав 5074	1 слой 10 слоев 1 слой	3 $0,45 \cdot 10$ 2	11	1,75

2. Конструкция бронежилетов. Были изготовлены два типа бронежилетов размером 30×30 см с передним (внешним) слоем из керамики, промежуточным слоем, состоящим из армированной полимером ткани, и задним (внутренним) слоем из алюминиевого сплава. Бронежилет первого типа (бронежилет 1) состоит из одной плитки Al_2O_3 толщиной 3 мм, 10 слоев препрега (СВМПЭ — ЭС) и одной пластины из алюминиевого сплава 5074 толщиной 2 мм. Бронежилет второго типа (бронежилет 2) состоит из одной плитки Al_2O_3 толщиной 3 мм, 10 слоев препрега (кевлар — ЭС) и одной пластины из алюминиевого сплава 5074 толщиной 2 мм. Для бронежилетов обоих типов использовалась ручная укладка. Весовое соотношение отвердителя и ЭС составляло 3 : 1. С помощью механического давления и зажимов образцы запрессовывались в стеклянную форму размером 34×34 см для удаления пузырьков и излишков ЭС. Образцы хранились в течение 24–48 ч при комнатной температуре. Для приклеивания керамического слоя к композиту и композита к алюминиевому листу использовался силиконовый каучук, для приклеивания слоев композита — эпоксидный клей. Характеристики бронежилетов приведены в табл. 2 (h — толщина одного слоя, H — общая толщина, m — масса бронежилета).

3. Моделирование снарядов и бронежилетов. С помощью пакета Ansys Workbench 20.R2 были созданы трехмерные модели снаряда и бронежилета. Для численного решения задачи использовались пакет Ansys Explicit и AUTODYN.

Снаряд (пуля) состоит из сердечника и оболочки. Сердечник изготовлен из стали, а цельнометаллическая оболочка — из латуни. 3D-сетка для пули создана с использованием пакета Ansys Explicit Dynamics.

Материал бронежилета состоит из керамики (Al_2O_3), полимера, армированного волокнами (СВМПЭ — ЭС или кевлар — ЭС), и алюминиевого сплава 5074. Характеристики керамики (Al_2O_3) и материала из алюминиевого сплава взяты из базы данных о материалах пакета Ansys (табл. 3).

Бронежилеты имели размеры 30×30 см и различную толщину (см. табл. 2). При построении макрооднородных моделей СВМПЭ — ЭС и кевлар — ЭС предполагалось, что все слои ортотропные и имеют одинаковую геометрию. С использованием пакета Ansys Explicit Dynamics создана высокоточная сетка с элементами стандартного размера.

4. Модели и критерии разрушения материалов. Для моделирования напряженно-деформированного состояния керамики используется модель Джонсона — Холмквиста, описывающая три стадии перехода оксида алюминия Al_2O_3 из неповрежденного состояния в поврежденное: стадию неповрежденного состояния, стадию накопления повреждения и стадию разрушения.

Эквивалентное напряжение в оксиде алюминия Al_2O_3 определяется по формуле

$$\sigma^* = \sigma_i^* - D(\sigma_i^* - \sigma_f^*), \quad (1)$$

где $0 \leq D \leq 1$ — параметр повреждения.

Таблица 3

Характеристики материалов кевлар — ЭС и СВМПЭ — ЭС

Характеристика	Материал	
	Кевлар — ЭС	СВМПЭ — ЭС
$E_1 \cdot 10^{-10}$, Па	3,0669	2,1588
$E_2 \cdot 10^{-10}$, Па	3,0670	2,1588
$E_3 \cdot 10^{-10}$, Па	1,2722	2,1040
$G_{12} \cdot 10^{-9}$, Па	12,8060	8,1669
$G_{23} \cdot 10^{-9}$, Па	3,3063	5,6312
$G_{31} \cdot 10^{-9}$, Па	3,3063	5,6312
σ_{12}	0,426 97	0,405 96
σ_{13}	0,328 22	0,407 37
σ_{23}	0,328 23	0,407 37

Примечание. E — модуль упругости, G — модуль сдвига, σ — пределы прочности на растяжение и сдвиг.

В уравнении (1) напряжения отнесены к динамическому пределу упругости Гюгонио σ_H :

$$\sigma^* = \sigma / \sigma_H,$$

σ_i^* , σ_f^* — безразмерные значения прочности на излом неповрежденного и поврежденного материала соответственно:

$$\sigma_i^* = A(P^* + P_{\max}^*)^n(1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*), \quad \sigma_f^* = B(P^*)^m(1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*).$$

Здесь $P_{\max}^* = P_{\max}/P_H$; $P_{\max}$ — максимальное значение гидростатического давления при растяжении; $P^* = P/P_H$; P — фактическое гидростатическое давление; P_H — динамический предел гидростатического давления; A, B, C, m, n — константы материала, определяемые по данным механических испытаний [8]. Эффективная безразмерная скорость деформации определяется выражением $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$, где $\dot{\varepsilon}$ — эффективная деформация; $\dot{\varepsilon}_0 = 1 \text{ с}^{-1}$ — отсчетная скорость деформации.

Таким образом, параметр поврежденности D определяется по формуле

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon^p}{\varepsilon_p^f}, \quad (2)$$

где $\Delta \varepsilon^p$ — приращение эффективной пластической деформации; $\varepsilon_p^f = D_1(P^* + P_{\max}^*)^{D_2}$; D_1, D_2 — константы материала. Уравнение состояния хрупкого разрушения материала при динамическом нагружении записывается в виде полиномиального соотношения

$$P = K_1\mu + K_2\mu^2 + K_3\mu^3 + \Delta P,$$

где $\mu = \rho/\rho_0 - 1$; ρ — текущая плотность; ρ_0 — начальная плотность; K_1, K_2, K_3 — константы; ΔP — приращение давления, отличное от нуля при $D > 0$. Значения параметров оксида алюминия Al_2O_3 приведены в работе [9].

Слои из композитов кевлар — ЭС и СВМПЭ — ЭС моделируются линейно-упругими ортотропными материалами, для которых пренебрегается пластическими деформациями и не используются уравнения состояния, что приводит к упрощению анализа и уменьшению времени решения [9]. Значения констант упругости для композитов кевлар — ЭС и СВМПЭ — ЭС приведены в табл. 3.

Таблица 4

Значения параметров алюминиевого сплава и материалов пули [8, 9, 12]

Параметр	Алюминиевый сплав	Сталь сердечника пули	Материал оболочки пули
Плотность ρ , г/см ³	2700	7860	5820
Предел текучести $A \cdot 10^{-8}$, Па	1,67	7,92	2,06
Константа упрочнения $B \cdot 10^{-8}$, кПа	5,96	5,10	5,05
Экспонента деформационного упрочнения n	0,551	0,260	0,420
Константа скорости деформации C	0,001	0,014	0,010
Константа теплового разупрочнения m	0,859	1,030	1,680
Температура T , К	300	300	300
Температура плавления t_m , К	893	1790	1790
Характерная скорость деформации $\dot{\varepsilon}_0$, 1/с	1	1	1
Константа поврежденности D_1	0,0261	0,0500	0,0500
Константа поврежденности D_2	0,263	3,440	—
Константа поврежденности D_3	−0,349	−2,120	—
Константа поврежденности D_4	0,247	0,002	—
Константа поврежденности D_5	16,80	0,61	—

В качестве критерия пластического разрушения алюминиевого сплава используется критерий разрушения Джонсона — Кука [10], учитывающий воздействие температуры, скорости деформации и напряжения, вызванного деформацией.

Определяющее уравнение данной модели имеет вид

$$\sigma = [A + B\varepsilon^n][1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*][1 - T^{*m}],$$

где ε — эквивалентная пластическая деформация; $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$; $T^* = (T - T_r)/(T_m - T_r)$; T — температура, °C; T_r — комнатная температура, °C; T_m — температура плавления материала, °C [11].

В табл. 4 приведены значения параметров алюминиевого сплава [12], свойства которого близки к свойствам алюминиевого сплава 5074.

Поскольку в пуле возникают большие скорости деформации, следует использовать расширенную модель, известную как модель динамического разрушения Джонсона — Кука. Согласно этой модели разрушение происходит при значении параметра повреждаемости $\omega > 1$. Параметр повреждаемости ω определяется следующим образом:

$$\omega = \sum \frac{\Delta\varepsilon^{pl}}{\varepsilon_{p,f}}.$$

Здесь $\Delta\varepsilon^{pl}$ — приращение эквивалентной пластической деформации; $\varepsilon_{p,f}$ — деформация, при которой в ячейке происходит разрушение; суммирование проводится по ячейкам, в которых происходит разрушение. Деформация, при которой происходит разрушение, вычисляется по формуле

$$\varepsilon_f = [D_1 + D_2 e^{D_3 \sigma^*}] \left[1 + D_4 \ln \frac{\dot{\varepsilon}^{pl}}{\dot{\varepsilon}_0} \right] [1 + D_5 T^*],$$

где $\sigma^* = \sigma_m/\sigma_{eq}$; σ_m — среднее напряжение. В табл. 4 приведены параметры материала, из которого изготовлена пуля [8, 9, 12].

Предполагается, что при пластических деформациях в элементе происходит накопление повреждений, скорость накопления увеличивается при достижении параметром поврежденности критического значения [8].

Если параметр поврежденности D (см. уравнение (2)) равен единице, то полагается, что керамический наконечник разрушился. Предполагается, что в некоторой точке композитного слоя происходит разрушение, если выполняется условие

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_{11}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{13}}{S_{13}}\right)^2 \geq 1,$$

где X_{11} , S_{12} , S_{13} — пределы прочности на растяжение и сдвиг соответственно.

В случае если условие разрушения происходит в одном из главных направлений материала, свойства материала ухудшаются только в этом направлении [9].

Численное решение задачи получено с использованием пакетов Ansys Explicit Dynamics, AUTODYN 3D и Ansys Workbench V20.R2 [13]. В качестве начального условия задавалась начальная скорость снаряда, равная 307 м/с. Время решения задачи для бронежилетов 1 и 2 составило $1,1001 \cdot 10^{-4}$ и $1,2 \cdot 10^{-4}$ с соответственно, число шагов по времени — 5543 и 38 227 соответственно. Предполагалось, что между всеми слоями имеется жесткий контакт.

Для предотвращения движения брони при баллистическом ударе верхние и нижние кромки всех слоев полагались неподвижными. После введения в программу механических характеристик материалов и критериев разрушения вычислялись напряжения и внутренняя энергия [14].

5. Экспериментальное исследование баллистических свойств бронежилета. Бронежилеты 1, 2 были испытаны в соответствии со стандартом NIJ 0101.06. Измерения скорости пули проводились в соответствии со стандартом NIJ 0101.06 Level II (Type A). При использовании пули с цельнометаллической оболочкой диаметром 9 мм и пистолета Daewoo скорость пули при выстрелах с расстояния 5 м составила 307 м/с. Скорость пули измерялась хронографом, расположенным между пистолетом и броней. Образец (бронежилет) помещался в окне со стальной рамой размером 30 × 30 см без задней опоры. Использовалась пуля с цельнометаллической оболочкой массой 8 г и диаметром 9 мм. Глубина проникания измерялась штангенциркулем. После завершения баллистического эксперимента броня разрезалась и исследовались типы и механизмы повреждения в ее поперечном сечении.

6. Результаты исследования и их обсуждение. До начала баллистических экспериментов проводилось их моделирование.

На рис. 1, 2 представлены фрагменты деформированных бронежилетов 1 и 2 соответственно при баллистических испытаниях и моделировании. Из приведенных результатов следует, что пуля останавливается, не пробивая бронежилет. В поперечных сечениях бронежилетов возникает повреждение керамического слоя в виде радиальных и кольцевых трещин. В слоях кевлар — ЭС образуются хрупкие трещины, в слоях СВМПЭ — ЭС и кевлар — ЭС наряду с пластической деформацией происходит расслоение. На внутренней поверхности слоя алюминиевого сплава появляются конусообразные вмятины, глубина которых в бронежилетах 1 и 2 составила $13 \div 23$ и $16 \div 18$ мм соответственно, что находится в допустимом диапазоне. В бронежилете 1 первая и вторая пули пробили слой керамики, что привело к пробиванию небольшого количества слоев СВМПЭ — ЭС, а также к появлению пластической деформации и незначительному расслоению слоев СВМПЭ — ЭС и алюминиевого сплава. Третья пуля пробила несколько слоев СВМПЭ — ЭС, что привело к разрывам волоконной матрицы, расслоению и появлению пластической деформации. Четвертая пуля пробила все слои СВМПЭ — ЭС и частично слои алюминиевого сплава 5074, в результате чего произошло расслоение и появились пластические деформации. Пятая пуля пробила большое количество слоев СВМПЭ — ЭС, но не пробила слой алюминиевого сплава 5074.

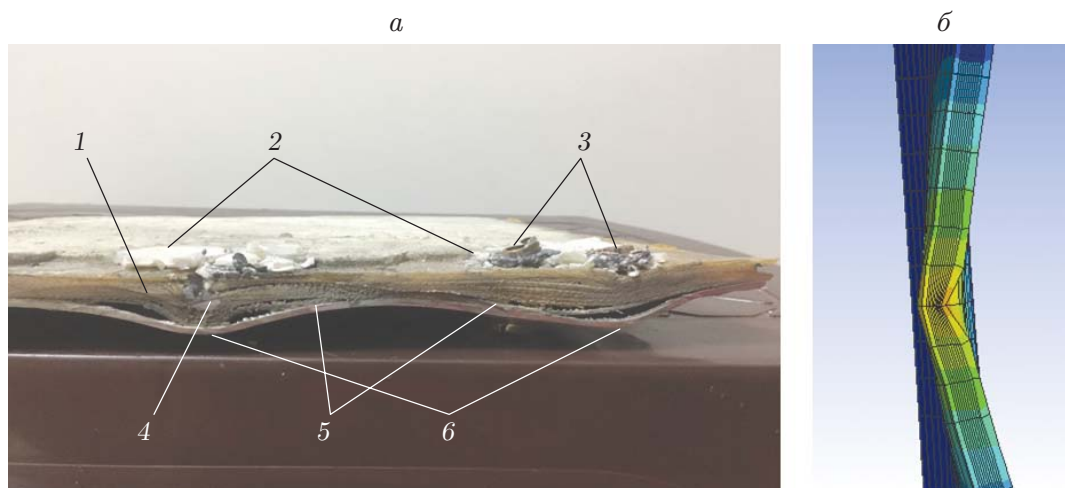


Рис. 1. Деформирование материалов бронежилета 1 в поперечных сечениях: *а* — эксперимент, *б* — моделирование; 1 — средний слой, 2 — разрушенный слой керамики, 3 — пули, 4 — разрушенные волокна, 5 — расслоение, 6 — вмятины

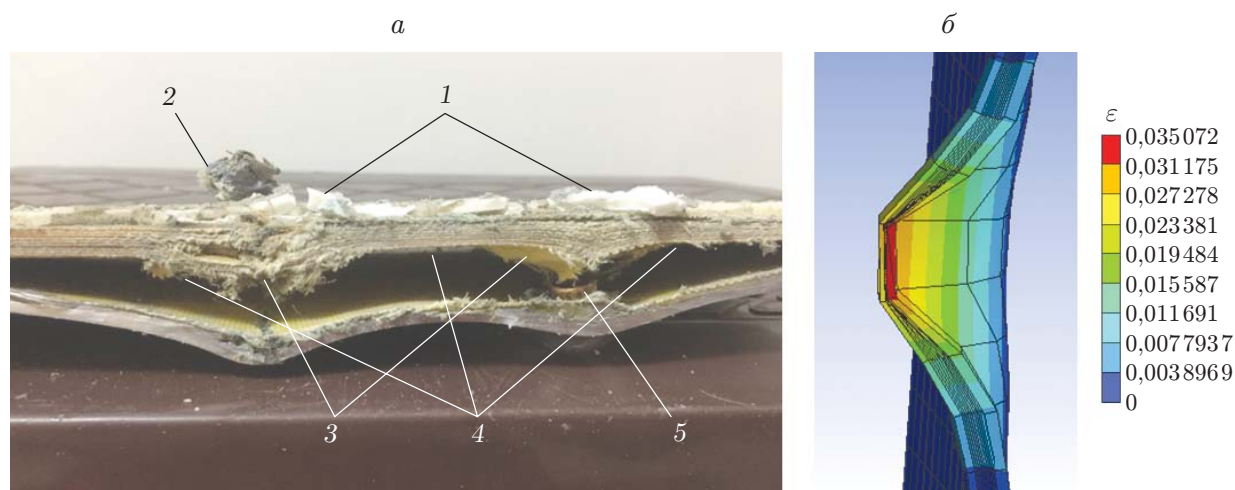


Рис. 2. Деформирование материалов бронежилета 2 в поперечных сечениях: *а* — эксперимент, *б* — моделирование; 1 — разрушенный слой керамики, 2 — пуля, 3 — деформированные волокна, 4 — расслоение, 5 — оболочка пули

В бронежилете 2 первая и вторая пули пробili керамический слой и вызвали хрупкое разрушение слоев кевлар — ЭС, а также значительные деформации в слое алюминиевого сплава 5074. Вторая пуля не пробila слой из алюминиевого сплава 5074. Как в бронежилете 1, так и в бронежилете 2 не произошло отслоения слоя кевлар — ЭС от слоя алюминиевого сплава.

В том случае, если не происходит повреждения внутреннего слоя из армированного тканью эпоксидного композита, этот слой воспринимает нагрузку даже после разрушения алюмооксидной керамики. Керамический слой и композитные слои, армированные тканью, были соединены клеем из силиконового каучука, который не допускает пробивание, предотвращая слияние повреждений [15].

В бронежилете 1 наконечник пули разрушается. Первая и вторая пули разрушились и приняли грибовидную форму. Следующие пули деформировались и остались внутри слоев

СВМПЭ — ЭС. В бронежилете 2 первая пуля разрушилась, а вторая остановилась в слоях кевлар — ЭС — алюминиевый слой. При уменьшении скорости пуля только деформируется.

При деформировании и разрушении пули уменьшаются ее кинетическая энергия и скорость [15]. Вследствие ограничения на толщину бронежилета внутренний защитный слой состоит из одной керамической плитки, однако даже один слой обеспечивает эффективную защиту. Поскольку пуля может повредить большую керамическую плитку [16], использовалось несколько керамических плиток небольшого размера.

Материал, используемый в бронежилетах, исследуемых в данной работе, являлся тканым. Такие материалы, образуя сеть, задерживают пулю. Кинетическая энергия пули передается по этой сети [17].

Для придания защитной системе пластичности и прочности на растяжение наряду с керамикой используются слои из армированного волокном материала или металлические пластины. Материалы, армированные волокном, или металлы используются в качестве материала для внутреннего слоя, керамика — в качестве внешнего слоя. По сравнению с монолитной броней двухслойная броня защищает более эффективно и имеет небольшую массу. В случае если керамика используется без опорной пластины или крышки, она быстро разрушается под действием удара вследствие ее чрезвычайно малой ударной вязкости. Керамический слой предназначен для того, чтобы разрушить и деформировать пулю. При этом керамика также разрушается, но другие слои задерживают пулю и, деформируясь, поглощают оставшуюся энергию пули. Двухслойная броня, состоящая из прочного керамического слоя с энергопоглощающим металлическим защитным слоем, имеет меньшую массу по сравнению с монолитной металлической броней и обеспечивает такой же уровень защиты [18].

Из результатов, представленных на рис. 3, 4, следует, что кинетическая энергия пули, изготовленной из латуни и стали, составляет 83,4 Дж. Результаты численного моделирования показывают, что керамика и композит, армированный тканью, поглотили внутреннюю энергию, равную 46,61 и 67,01 Дж соответственно. Оставшаяся кинетическая энергия пули расходуется на расслоение композитного слоя, деформирование пули и растрескивание глиноземной керамики. В табл. 5 приведены результаты численного моделирования и баллистических испытаний.

Керамический материал поглощает большее количество энергии, чем армированный волокном полимер и алюминиевый сплав, на долю которых приходится соответственно 99,98 и 72,68 % общей поглощаемой броней энергии (см. рис. 3, 4 и табл. 5).

Из приведенных выше результатов следует, что броня, содержащая слой кевлар — ЭС, поглощает большее количество энергии, чем броня, содержащая слой СВМПЭ — ЭС. Однако броня, содержащая слой СВМПЭ — ЭС, более эффективна, поскольку при попадании пули в такую броню ее скорость падает до нуля. Пуля сначала соприкасается со слоем керамики, которая вследствие большой твердости, прочности на сжатие и малой плотности рассеивает значительное количество кинетической энергии пули, но при этом в отличие от металлов разрушается. Затем пуля достигает композитных слоев, в которых ее скорость уменьшается. При этом увеличивается сила сопротивления прониканию пули, что может быть обусловлено наличием тканого материала и высокой прочностью используемого волокна. Эти результаты согласуются с результатами экспериментов (см. рис. 1). На рис. 1 видно, что бронежилет 1 останавливает первую и вторую пули, не допуская пробивания композиционных слоев.

Удельный модуль, удельная прочность СВМПЭ почти на 50 % больше, чем у кевлара. Следовательно, СВМПЭ обладает наилучшими баллистическими свойствами [19]. Однако в случае сильной ударной волны композит деформируется и смещается в направлении слоя

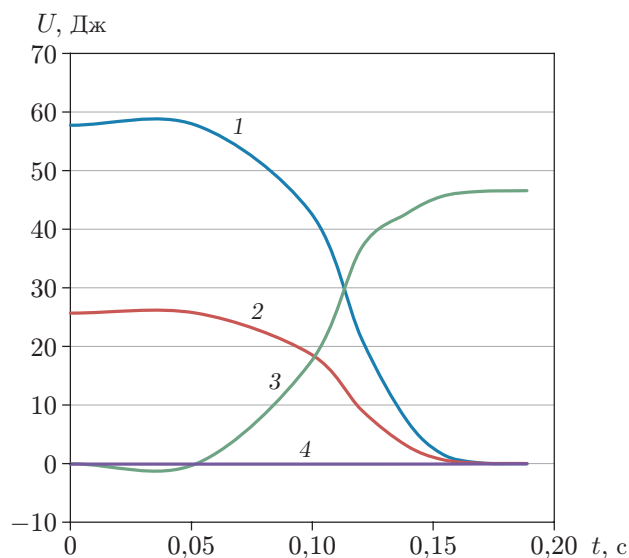


Рис. 3

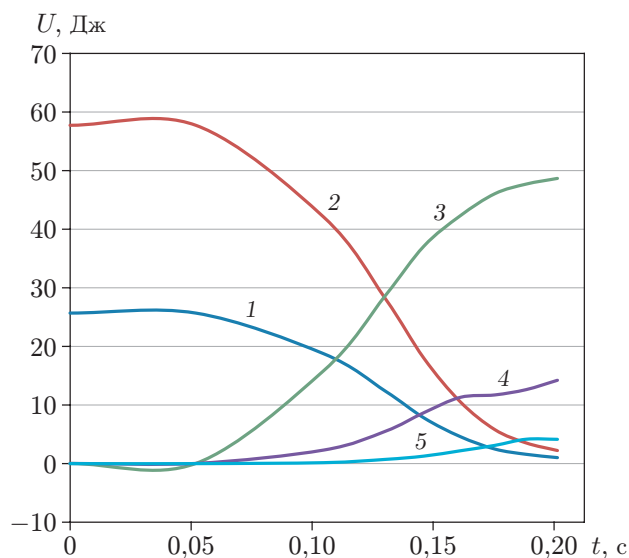


Рис. 4

Рис. 3. Зависимости от времени кинетической энергии пули и внутренней энергии в слоях материалов, используемых в бронежилете 1:

1, 2 — кинетическая энергия (1 — стального сердечника пули, 2 — латунной оболочки пули), 3, 4 — внутренняя энергия (3 — в слое Al_2O_3 , 4 — в слое алюминиевого сплава)

Рис. 4. Зависимости от времени кинетической энергии пули и внутренней энергии в слоях материалов, используемых в бронежилете 2:

1, 2 — кинетическая энергия (1 — стального сердечника пули, 2 — латунной оболочки пули), 3–5 — внутренняя энергия (3 — в слое Al_2O_3 , 4 — в слое кевлар — ЭС, 5 — в слое алюминиевого сплава)

Таблица 5

Результаты баллистических испытаний и численного моделирования

Бронежилет	Эксперимент				Численное моделирование	
	Характер повреждения	Глубина вмятины, мм	Диаметр вмятины, мм	Глубина проникания пули в композит, мм	Кинетическая энергия пули, Дж	Поглощенная энергия, Дж
1	Частичное проникание без пробития	23 (пули 1–4), 13 (пуля 5)	100 (пули 1–4), 68 (пуля 5)	6,2 (пули 1, 2), 11 (пуля 3), 14 (пуля 4), 7,8 (пуля 5)	57,7 (СС), 25,7 (ЛО)	46,6 (Al_2O_3), $7,25 \cdot 10^{-3}$ (СВМПЭ — ЭС), 0 (сплав 5074)
2	Частичное проникание без пробития	16 (пуля 1), 18 (пуля 2)	73 (пуля 1), 80 (пуля 2)	8,5 (пуля 1), 11,0 (пуля 2)	57,7 (СС), 25,7 (ЛО)	48,7 (Al_2O_3), 14,2 (кевлар — ЭС), 4,11 (сплав 5074)

Примечание. СС — стальной сердечник, ЛО — латунная оболочка.

из алюминия. Как следует из рис. 1, 2, алюминиевые слои отражают ударную волну, в результате чего происходит изгиб брони. В этот момент кинетическая энергия пули незначительна вследствие ее потери на предыдущих этапах проникания. Слой алюминия имеет наименьшую внутреннюю энергию [20] (см. рис. 3, 4). При ударных воздействиях броня, содержащая слой СВМПЭ — ЭС, превосходит броню, изготовленную на основе кевлара. Этим обусловлено значительное влияние толщины брони на сопротивление баллистическому удару. Общая толщина промежуточного слоя композита кевлар — ЭС приблизительно равна 0,45 см, в то время как толщина композита СВМПЭ — ЭС — 0,8 см. Эти выводы согласуются с выводами работы [21], в которой установлено, что волокна СВМПЭ поглощают большее количество энергии, чем арамид, и скорость звука в волокнах СВМПЭ больше скорости звука в арамиде [22–24].

Заключение. В работе исследованы свойства многослойной композитной брони размером 30×30 см, изготовленной из трех различных материалов. Выполнено численное моделирование и экспериментальное исследование поведения керамического полимерного композита, армированного тканым материалом и состоящего из слоя алюминиевого сплава и слоя СВМПЭ — ЭС или слоя кевлар — ЭС. Установлено, что броня из композита сплав Al_2O_3 — (СВМПЭ — ЭС) — алюминиевый сплав и броня из композита сплав Al_2O_3 — (кевлар — ЭС) — алюминиевый сплав могут остановить пулю калибром 9 мм с цельнометаллической оболочкой. При этом деформация пули незначительна.

Авторы выражают благодарность руководству факультета материаловедения технологического университета (Багдад) и факультета производства и промышленного машиностроения Университета г. Койи.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Pat. 6497966 US, IC⁷ В 32 В 15/08.** Laminated armor / М. Cohen. Оpubл. 24.12.2002. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <https://patents.google.com/patent/US6497966%0Ahttps://www.google.com/patents/US4309487>.
2. **Silva M. A. G., Cismasiu C., Chiorean C. G.** Numerical simulation of ballistic impact on composite laminates // Intern. J. Impact Engng. 2005. V. 31, N 3. P. 289–306. DOI: 10.1016/J.IJIMPENG.2004.01.011.
3. **Banerjee A., Dhar S., Acharyya S., et al.** Numerical simulation of ballistic impact of armour steel plate by typical armour piercing projectile // Procedia Engng. 2017. V. 173. P. 347–354. DOI: 10.1016/J.PROENG.2016.12.028.
4. **Cunniff P. M.** An analysis of the system effects in woven fabrics under ballistic impact // Textile Res. J. 1992. V. 62, N 9. P. 495–509. DOI: 10.1177/004051759206200902.
5. **Kant S. L., Shashi V. A.** A review on analysis and design of bullet resistant jacket-ballistic analysis // Intern. Adv. Res. J. Sci., Engng Technol. 2017. V. 4. P. 1–10.
6. **Bhat A. R.** Finite element modeling and dynamic impact resonance evaluation for ballistic applications. Stillwater: Oklahoma State Univ., 2009.
7. **Mamivand M., Liaghat G. H.** A model for ballistic impact on multi-layer fabric targets // Intern. J. Impact Engng. 2010. V. 37, N 7. P. 806–812. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2010.01.003.
8. **Moreno A. D.** Numerical study of the behavior against impact of personal protections: Bachelor thesis. Madrid: Univ. Carlos III De Madrid, 2017.
9. **Wen Y., Xu Ch., Wang Sh., Batra R. C.** Analysis of behind the armor ballistic trauma // J. Mech. Behav. Biomed. Materials. 2015. V. 45. P. 11–21. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2015.01.010.
10. **William H., Gordon R., Johnson A.** Constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures // Engng Fracture Mech. 1985. V. 21, iss. 1. P. 31–48.

11. **Zhang Y., Outeiro J. C., Mabrouki T.** On the selection of Johnson — Cook constitutive model parameters for Ti-6Al-4V using three types of numerical models of orthogonal cutting // *Procedia CIRP*. 2015. V. 31. P. 112–117.
12. **Flores-Johnson E. A., Saleh M., Edwards L.** Ballistic performance of multi-layered metallic plates impacted by a 7.62-mm APM2 projectile // *Intern. J. Impact Engng.* 2011. V. 38, iss. 12. P. 1022–1032. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2011.08.005.
13. **Tham C. Y., Tan V. B. C., Lee H. P.** Ballistic impact of a KEVLAR® helmet: Experiment and simulations // *Intern. J. Impact Engng.* 2008. V. 35, N 5. P. 304–318. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2007.03.008.
14. **Ramadhan A. A., Abu Talib A. R., Mohd Raffie A. S., Zahari R.** High velocity impact response of Kevlar-29/epoxy and 6061-T6 aluminum laminated panels // *Materials Design*. 2013. V. 43. P. 307–321. DOI: 10.1016/j.matdes.2012.06.034.
15. **Naik N. K., Kumar S., Ratnaveer D., et al.** An energy-based model for ballistic impact analysis of ceramic-composite armours // *Intern. J. Damage Mech.* 2013. V. 22, N 2. P. 145–187. DOI: 10.1177/1056789511435346.
16. **Florence A. L.** Interaction of projectiles and composite armor. Pt 2. Menlo Park: Stanford Res. Inst., 1969.
17. **Song J. W., Les Lee B. L.** Fabrics and composites for ballistic protection of personnel // *Lightweight ballistic composites: Military and law-enforcement applications*. S. l.: Elsevier Inc., 2006. P. 210–239.
18. **Khan M. K., Iqbal M. A., Bratov V. A., Gupta N. K.** Numerical study of fracture mechanism in ceramic armor under impact load // *Proc. of the 46th Intern. summer school-conf. “Advanced problems in mechanics — 2018”*, St. Petersburg (Russia), June 25–30, 2018. St. Petersburg: St. Petersburg Polytech. Univ., 2018. P. 134–144.
19. **Ruys A. J.** Alumina ceramics: Biomedical and clinical applications. Woodhead: Woodhead Publ., 2018.
20. **Payman S. A., Fadhil B. M., Mshir S., Salar M.** Experimental and numerical investigation of hybrid armor against a ballistic impact // *Multidiscipline Model. Materials Structures*. 2021. V. 17, N 4. P. 701–715. DOI: 10.1108/MMMS-09-2020-0242.
21. **Krishnan K., Sockalingam S., Bansal S., Rajan S. D.** Numerical simulation of ceramic composite armor subjected to ballistic impact // *Composites. Pt B. Engng.* 2010. V. 41, N 8. P. 583–593. DOI: 10.1016/j.compositesb.2010.10.001.
22. **Hassoon O. H., Abed M. S., Oleiwi J. K., Tarfaoui M.** Experimental and numerical investigation of drop weight impact of aramid and UHMWPE reinforced epoxy // *J. Mech. Behavior Materials*. 2022. V. 31, N 1. P. 71–82. DOI: 10.1515/jmbm-2022-0008.
23. **Abed M. S., Ahmed P. S., Oleiwi J. K., Fadhil B. M.** Low velocity impact of Kevlar and ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE) reinforced epoxy composites // *Multidiscipline Model. Materials Structures*. 2020. V. 16, N 6. P. 1617–1630. DOI: 10.1108/mmms-09-2019-0164.
24. **Saleem I. A., Ahmed P. S., Abed M. S.** Experimental and numerical investigation of Kevlar and UHMWPE multi-layered armors against ballistic impact // *Materials Today: Proc.* 2022. V. 56. P. 2516–2524. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.08.345.

*Поступила в редакцию 6/X 2021 г.,
после доработки — 20/I 2023 г.
Принята к публикации 27/II 2023 г.*