

**Исследование эффективности защитных структур,
изготовленных с применением корундового песка,
при высокоскоростном баллистическом воздействии
с помощью модифицированного
расчетно-экспериментального метода**

© В.Н. Зузов, Д.А. Яковлев, М.М. Журкин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация

Проведено расчетно-экспериментальное исследование многослойной защитной структуры, проектируемой для бронирования транспортных средств, в составе которой присутствует керамический песок. Изложена методика определения параметров модели материала Джонсона — Кука, а также дана оценка эффективности подбора параметров путем валидации по открытым экспериментальным данным и проведенному эксперименту. В экспериментальной части исследования была использована пуля FMJ 18 «Парадокс», а выстрел был произведен из гладкоствольного ружья. С помощью численного моделирования в пакете LS-DYNA прогнозируется эксперимент и оценивается влияние песка на защитные свойства брони, но уточнения данных, полученных путем расчета, на основе результатов эксперимента не осуществлялось. Модифицированный метод описания частиц (песок смоделирован в FEM-постановке с применением однородных тетраэдральных TET-элементов первого порядка, которые моделировались с зазором), а также подобранные параметры модели материала Джонсона — Кука позволили достаточно точно спрогнозировать замедление ударника и его влияние на сэндвич-панель. Результаты испытаний демонстрируют как потенциал использования керамики в виде песка в защитных комплектах, применяемых в транспортных средствах, так и то, что введение песка как промежуточного слоя в защитной структуре способствует явному увеличению баллистической стойкости.

Ключевые слова: многослойная броня, песок, LS-DYNA, конечно-элементная модель, численное моделирование, натурные испытания

Введение. Проведенный на примере защиты транспортных средств анализ защитных структур всех видов показал, что при исследовании на баллистическую стойкость керамические материалы сохраняли свою эффективность. Как правило, для этого используются керамические бронеэлементы в виде трехслойных сэндвич-панелей, определение оптимальных параметров которых является актуальной задачей, она вызывает не только практический, но и научный интерес. Одним из возможных вариантов решения является введение мелкодисперсной керамики в состав сэндвич-панели в качестве альтернативы существующим способам для защиты от пуль. Это приводит к удешевлению производства инкассаторских фургонов при обеспечении заявленного класса защиты. Полученная экспериментально оценка воздействия высокоскоростных ударов на сэндвич-панель,

в состав которой входит керамический песок, а также результаты испытаний по спектру параметров [1], позволяют получить данные, подтверждающие эффективность предлагаемого решения.

Расчетно-экспериментальное исследование потенциала применения керамического песка в защитных комплектах при высокоскоростном баллистическом воздействии проведено на примере сэндвич-панели со слоем керамического песка. При разработке используемой методики расчета были приняты допущения [1], связанные с учетом пластических деформаций материала пули и емкости, а также применены недеформируемые тела. В процессе исследования проводились определение параметров уравнения Джонсона — Кука, валидация предложенных моделей материалов и изучение целесообразности введения керамического песка в защитные структуры.

Цель работы — расчетно-экспериментальное исследование влияния корундового песка на баллистическую стойкость многослойной пластины, имеющей сыпучий слой, на базе предложенной методики, для обеспечения защиты по ГОСТ Р 51136–2008.

Описание ударника. Пуля FMJ 18 «Парадокс» массой 18,5 г имеет мягкий свинцовый сердечник с латунной оболочкой. Ее начальная скорость не превышает 310 м/с, что соответствует выстрелу из самозарядного гладкоствольного охотничьего карабина «Сайга-410К». Общий вид (а) и сечение ударника (б) представлены на рис. 1.

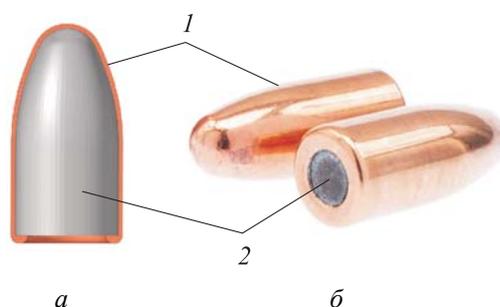


Рис. 1. Общий вид пули FMJ 18 «Парадокс» (а) и ее сечение (б):
1 — латунная оболочка; 2 — свинцовый сердечник

Описание эксперимента. После завершения численного моделирования, выступающего в роли цифрового двойника эксперимента и предназначенного для предсказания его результатов, был проведен эксперимент, который стал подтверждением расчетной модели. Поскольку структура и эксперимента, и численной модели имеют много общего, можно рассмотреть особенности каждой из них. Квадратные пластины со стороной 400 мм из исследуемого материала поочередно закрепляли в баллистическом тракте экспериментальной установки. Ось гладкоствольного канала полуавтоматического ружья «Сайга»

проходит перпендикулярно установленной пластине таким образом, что геометрический центр пластины и продолжение оси совпадают в одной точке. Предполагаемая скорость ударника на подлете к плите составляет 305...310 м/с (скорость указана на упаковке снарядов). Кроме того, вектор скорости ударника совпадает с осью канала. Применяемые образцы были жестко закреплены по периметру пластин. Оценить адекватность математической модели помогают такие геометрические характеристики, как деформация пластины и каждого ее слоя, взаимодействующего с ударником, а также диаметр отверстия в зоне максимального повреждения.

Квадратная пластина из стали 09Г2С со стороной 400 мм конструктивно состоит:

- из пластины толщиной 2 мм (рис. 2, а);
- сдвоенной пластины толщиной 4 мм (рис. 2, б);
- пакета из трех пластин толщиной по 2 мм с зазором 16 мм (рис. 2, в);
- сэндвич-панели из двух внешних стальных слоев толщиной 2 мм и внутреннего сыпучего наполнения из корунда толщиной 9 мм (рис. 2, г).

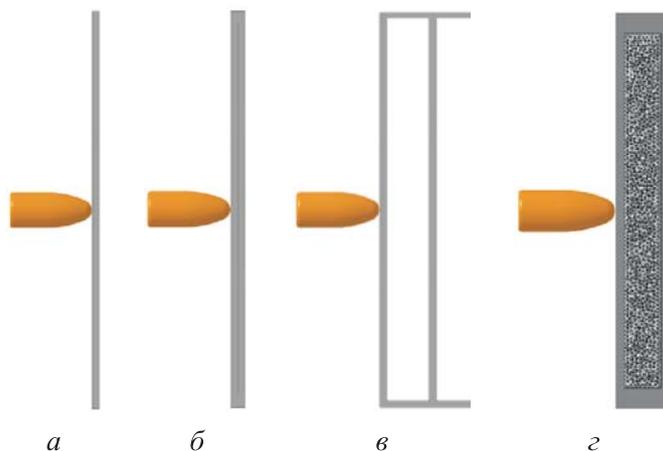


Рис. 2. Принципиальный вид сечения пластины: тестовой (а), сдвоенной (б), тройной (в), сэндвич-пластины (г)

Количество пластин зависело от необходимости верификации модели материала модифицированной модели Джонсона — Кука и экспериментального подтверждения предложенной расчетной модели песка в составе сэндвич-панели при баллистическом воздействии.

Модель материала Джонсона — Кука. При моделировании взаимодействия объектов важную роль играет описание пластических эффектов в материале, а также механизма его разрушения. Универсальная модель материала Джонсона — Кука позволяет описывать

пластичные материалы в широком диапазоне скоростей деформации — от статических режимов до быстротекущих процессов. Модифицированная версия этой модели материала учитывает адиабатическое нагревание, высокую скорость деформации и ее большие эффекты, поэтому она и была выбрана при исследовании.

Модифицированную модель пластической деформации материала Джонсона — Кука описывает уравнение

$$\sigma_y = (A + Br^n)(1 + \dot{r}^*)^c (1 - T^m), \quad (1)$$

где σ_y — предел текучести по модели материала; A — предел текучести; B — деформационное упрочнение; r — эквивалентная пластическая деформация; n — показатель твердения; \dot{r}^* — нормированная скорость эквивалентных пластических деформаций при повреждении; c — коэффициент скорости деформации; T — температура материала; m — показатель термического размягчения.

Развитие повреждения происходит по расширенной модели разрушения материала Джонсона — Кука

$$\dot{D} = \begin{cases} 0 & \text{при } \varepsilon \leq \varepsilon_d; \\ \frac{D_c}{\varepsilon_f - \varepsilon_d} \cdot \dot{\varepsilon} & \text{при } \varepsilon \geq \varepsilon_d. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь \dot{D} — параметр разрушения; D_c — критический параметр; ε_f — текущая эквивалентная деформация разрушения, вычисляемая по формуле

$$\varepsilon_f = [D_1 + D_2 \exp D_3 \sigma^*][1 + \dot{\varepsilon}^*]^{D_4} [1 + D_5 T^*], \quad (3)$$

где D_1, D_2, D_3, D_4, D_5 — параметры материала, $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_0$ — нормированная скорость эквивалентной пластической деформации; ε_d — порог повреждения.

Методика определения постоянных уравнения пластической деформации материала Джонсона — Кука сводится к аппроксимации диаграммы растяжения по зависимости (1). На примере стали 09Г2С представлена методика подбора параметров материала для модели разрушения материала Джонсона — Кука. Следует отметить, что аппроксимация любого вида вносит погрешность, оптимальным вариантом будет применение опубликованных диаграмм растяжения [2] или проведение соответствующих испытаний.

Определение постоянных сводится к трем этапам — решению уравнений [3]:

$$D_1 + D_2 \exp D_3 \sigma^* = \varepsilon^f; \quad (4)$$

$$\frac{\varepsilon_f}{[D_1 + D_2 \exp D_3 \sigma^*]} = [1 + \dot{\varepsilon}^*]^{D_4}; \quad (5)$$

$$\frac{\varepsilon_f}{[D_1 + D_2 \exp D_3 \sigma^*]} = [1 + D_5 T^*]. \quad (6)$$

Очевидно, что в них определяющими параметрами являются D_1 , D_2 , D_3 . Форма записи уравнения (4) такова, что образуется экспоненциальная зависимость, а коэффициенты в (4) являются параметрами D_1, D_2, D_3 . Их определение сводится к описанию кривой $\varepsilon_f(\sigma^*)$, образующейся в ходе серии экспериментов. На этом шаге необходимо найти значение пластической деформации с учетом концентраторов. Зависимость деформаций от коэффициента трехосности напряжений, полученная в результате эксперимента, представлена на рис. 3.

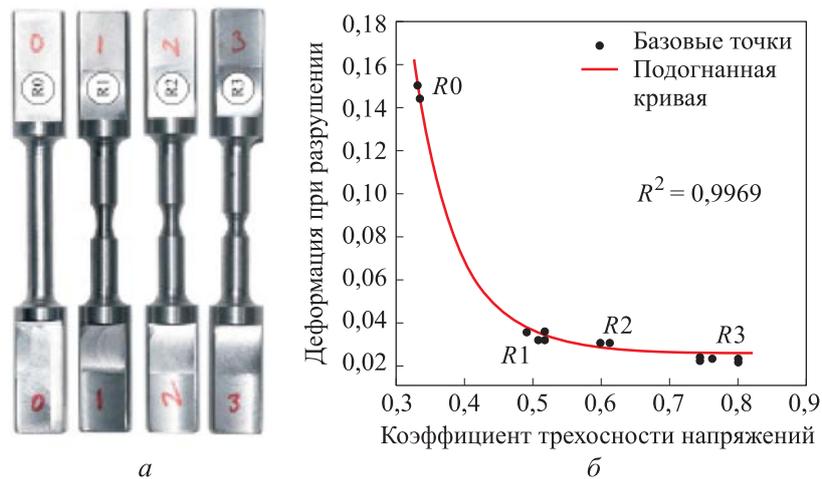


Рис. 3. Общий вид образцов 0, 1, 2, 3, подвергнутых испытаниям (а) и зависимость деформаций ε от коэффициента трехосности напряжений, полученная в результате эксперимента (б):

$R0$ — цилиндрический образец без надреза; $R1, R2, R3$ — образец с надрезом указанным радиусом

Основываясь на данных из работы [4], испытания допустимо заменить численным экспериментом с учетом физической нелинейности. Относительное удлинение образцов ε_f зависит от коэффициента трехосного напряжения σ^* , причем каждому из образцов соответствует однозначный σ^* , который является вычисляемой величиной логарифмической зависимости:

$$\sigma^* = \frac{1}{3} + \ln\left(1 + \frac{a}{r}\right), \quad (7)$$

где a — площадь поперечного сечения концентратора; r — радиус его галтели.

По результатам численного эксперимента строится зависимость $\varepsilon^f(\sigma^*)$ по токам. Коэффициенты D_1, D_2, D_3 для конкретного материала являются коэффициентами уравнения экспоненты, которая проходит через эти точки, а при решении уравнений (5) и (6) получаются коэффициенты D_4 и D_5 .

Неизвестные постоянные D_c и ε_d можно рассчитать по уравнению

$$\frac{D_c}{\varepsilon_f - \varepsilon_d} \dot{\varepsilon} = 1, \quad (8)$$

приравняв расширенное правило Джонсона — Кука (2), по аналогии с классической моделью разрушения материала Джонсона — Кука.

Таким образом, для работы требуется билинейная аппроксимация диаграммы растяжения. В первом приближении это позволит получить все необходимые параметры модели материала Джонсона — Кука. Общие параметры модифицированной модели пластической деформации материала Джонсона — Кука в пуле из сталей, используемых в исследовании, приведены в табл. 1 и 2, а параметры уравнения разрушения модифицированной модели Джонсона — Кука для рассматриваемых материалов — в табл. 3.

Таблица 1

Параметры материалов

Материал (детали)	Модуль упругости 1-го рода E , МПа	Коэффициент Пуассона ν	Массовая плотность ρ , кг/м ³	Теплопроводность C_p , Дж/кг·К	Коэффициент Тейлора χ	Коэффициент линейного температурного расширения α , К ⁻¹
Сталь 09Г2С	210 000	0,33	7850	494	0,9	$1,22 \cdot 10^{-5}$
<i>Материалы ударника</i>						
Свинец (сердечник и рубашка)	1000	0,42	10660	124	0,9	$2,9 \cdot 10^{-5}$
Латунь (оболочка)	115 000	0,31	8520	385	0,9	$1,9 \cdot 10^{-5}$
Сталь (сердечник)	210 000	0,33	7850	452	0,9	$1,2 \cdot 10^{-5}$

Материал (детали)	Модуль упругости 1-го рода E , МПа	Коэффициент Пуассона ν	Массовая плотность ρ , кг/м ³	Теплопроводность C_p , Дж/кг·К	Коэффициент Тейлора χ	Коэффициент линейного температурного расширения α , К ⁻¹
<i>Зарубежные бронематериалы [5]</i>						
Domex Protect 500, Hardox 400, Weldox 700E, Weldox 500E, Armoх 560T	210 000	0,33	7850	452	0,9	$1,2 \cdot 10^{-5}$

Таблица 2

Параметры уравнения пластической деформации модифицированной модели Джонсона — Кука

Материал (детали)	Нормированный температурный коэффициент T_c^*	Предел текучести A , МПа	Деформационное уплотнение B , МПа	Показатель твердения n	ϵ_0^* , с ⁻¹	Коэффициент скорости деформации c	Температура пластической деформации T_r , К	Температура плавления T_m , К	Показатель термического размягчения m
Сталь 09Г2С	0,9	330,0	76,7	0,78	$1 \cdot 10^{-3}$	0,0010	293	1250	1,00
<i>Материалы ударника</i>									
Свинец (сердечник и рубашка)	0,9	24	300	1,0	0,0005	0,1	293	760	1,0
Латунь (оболочка)	0,9	206	505	0,42	0,0005	0,01	293	1189	1,68
Сталь (сердечник)	0,9	1200	50000	1,0	0,0005	0	293	1800	1,0
<i>Зарубежные бронематериалы [5]</i>									
Domex Protect 500	0,9	1590	500	0,1	0,0005	0,001	293	1800	1
Hardox 400	0,9	1350	360	0,2	0,0005	0,0108	293	1800	1
Weldox 700E	0,9	820	300	0,1	0,0005	0,0098	293	1800	1
Weldox 500E	0,9	600	400	0,6	0,0005	0,0166	293	1800	1
Armoх 560T	0,9	2030	570	0,5	0,01	0,001	293	1800	1

**Параметры уравнения разрушения
модифицированной модели Джонсона — Кука**

Материал (детали)	Параметры материала						Порог повреждения ε_d
	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_c	
Сталь 09Г2С	0,0064	41,0003	15,6419	0,0123	0,0198	0,90	1,4540
<i>Материалы ударника</i>							
Свинец (сердечник и рубашка)	0,0096	20,5889	13,7702	0	0	1,00	0,3300
Латунь (оболочка)	0,0054	0,1489	2,3922	0	0	0,99	1,9720
Сталь (сердечник)	5,625	0,3	-7,1999	-123,00	-	0,99	0,9110
<i>Зарубежные бронематериалы [5]</i>							
Domex Protect 500	0,0033	1,2787	13,0456	-0,2170	0,0028	0,99	1,1101
Hardox 400	0,0029	1,6365	13,2821	-0,3090	0,0016	0,99	1,1408
Weldox 700E	0,0022	1,6294	13,4535	-0,0790	0,0011	0,99	1,1667
Weldox 500E	0,0024	1,6153	13,1206	-0,0430	0,001	0,99	1,1384
Armox 560T	0,0038	1,6076	13,0850	-0,0270	-2,3552	0,99	1,1275

Оценка эффективности подбора параметров модели материала Джонсона — Кука. В исследованиях [3–4] приведена методика подбора параметров модели разрушения материала Джонсона — Кука, но расчетно-экспериментального подтверждения не наблюдается. В статьях [5–9], наоборот, данные модели материала являются входными параметрами, использующимися в работе. Для подтверждения работоспособности приведенной методики подбора постоянных материала можно сравнить полученные данные с результатами опубликованного эксперимента.

Возьмем за основу данные опубликованного эксперимента [4] с приведенными параметрами уравнения пластической деформации материала Джонсона — Кука. В основу этого расчетно-экспериментального исследования [4] положены пять материалов и два варианта пуля, и этого достаточно для валидации методики. В работе [4] подробно описан эксперимент, что позволяет верифицировать полученные данные по заградным скоростям. Нужно определить параметры уравнения пластической деформации путем наложения билинейной диаграммы растяжения каждого из материалов на уравнение (1), а параметры уравнения разрушения — по изложенной методике.

Результаты расчетов для сравнения с данными экспериментов приведены в табл. 4. Поскольку само экспериментальное исследование неполно представляет значения для сверки, в дополнение к этим данным приняты материалы статьи [9], в которой развиваются расчетные данные, опубликованные в [6]. В целях удобного сравнения результатов приведены данные для бронеплит толщиной 6 мм. Максимальное расхождение сопоставляемых данных достигает 5 %, минимальное — 1,5 %.

Таблица 4

**Результаты предварительного расчета
и данные опубликованного эксперимента [4]**

Материал	Начальная скорость пули, м/с	Запреградная скорость пули, м/с			
		7,62 мм «АРМ2»		7,62 мм «Шар НАТО»	
		Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет
Domex Protect 500	830	596,9	579,1	0	0
	1000	—	—	730,0*	755,0*
Hardox 400	830	612,7	599,9	565,7	594,7
Weldox 700E	830	699,8	681,9	617,4	640,0
Weldox 500E	830	734,1	723,0	647,2	673,2
Armoх 560Т	830	591,0	574,9	0	0
	1000	—	—	690*	720,0*

* Есть пробитие, наблюдается полное разрушение сердечника.

Материалы, применяемые в исследовании. В проводимом расчетно-экспериментальном исследовании приняты сталь марки 09Г2С и керамический песок на основе оксида алюминия.

Механические свойства стали марки 09Г2С даны ниже:

Температура испытания T , °С	20
Предел прочности σ_b , МПа	470,0
Условный предел текучести, остаточная деформация 0,2 % $\sigma_{0,2}$, МПа	295,0
Относительное растяжение δ , %	21
Относительное сужение ψ , %	—
Ударная вязкость KCU , Дж/см ²	61,7
Поверхностная твердость по Бринеллю НВ, МПа	—

Механические свойства оксида алюминия, которые взяты из сертификата, выданного производителем, приведены ниже:

Температура испытания T , °С	20
Поверхностная твердость НV, ГПа	20
Предел прочности при изгибе $\sigma_b^{изг}$, ГПа	200–300

Относительное растяжение δ , %	0,4–0,8
Вязкость разрушения K_{IC} , МПа · м ^{1/2}	3–5
Плотность ρ , кг/м ³	3700

Параметры, необходимые для описания стали марки 09Г2, даны в табл. 1–3. Значения параметров, требуемые для описания корунда в виде песка согласно результатам предварительного исследования, представлены в табл. 5.

Таблица 5

Данные для описания корунда в виде песка

Материал	ρ , кг/м ³	E , МПа	ν
Песок оксида алюминия (Al_2O_3)	3700	3 150 000	0,24

Конечно-элементная модель. Пуля и область в металлической пластине, которая подвергается наибольшим деформациям, были смоделированы с учетом исследований [9], а именно, размер конечного элемента (КЭ) был принят равным 0,2 мм в области воздействия и 0,3 мм в пуле для получения результатов достаточной точности, адекватных результатам экспериментов. При среднем размере КЭ больше 0,2 мм накапливается значительная погрешность по прогибам и остаточной скорости. Лучшее сходжение с экспериментом [1] показала расчетная модель с моделью песка из раззороженных тетраэдральных (TET) элементов первого порядка, модель материала *MAT_RIGID_020, средний размер частиц не превышал 1 мм, а расстояние между частицами достигает 0,18 мм.

Начальная скорость пули, равная 310 м/с, моделируется с помощью *INITIAL_VELOCITY_GENERATION, а взаимодействие между пулей и мишенью моделируется без трения с применением *CONTACT_ERRODING_SURFACE_TO_SURFACE. Предварительный анализ результатов взаимодействия ударников с пластиной без учета и с учетом трения показывает, что разница остаточной энергии ударника и осколков составляет 3 %.

Ударник и оболочка моделируются с учетом пластической деформации и разрушения, что реализовано в LS-DYNA с помощью модифицированного метода Джонсона — Кука (уравнения (1) и (2)) *MAT_MODIFIED_JOHNSON_COOK. Для определения временных границ расчетов в LS-DYNA предварительно было определено общее время пробития пластин пулей, составившее 120 мкс для сэндвич-панели толщиной 10 мм. Эти условия справедливы для всех вариантов проведенных исследований.

Численное моделирование повторяет эксперимент, в котором участвует набор пластин со стороны 400 мм (см. рис. 2).

Результаты исследования. Для того чтобы нагляднее изложить полученные результаты, испытания и численное моделирование были сгруппированы и проанализированы одновременно. Величина прогиба пластины в наиболее деформированном месте каждого из слоев преграды и диаметр отверстия в зоне максимального повреждения приведены далее в табл. 6. Следует отметить, что экспериментальные данные усреднены по трем выстрелам, которые выполнялись по разным пластинам, за исключением однослойной пластины, представленной на рис. 4, *а*.

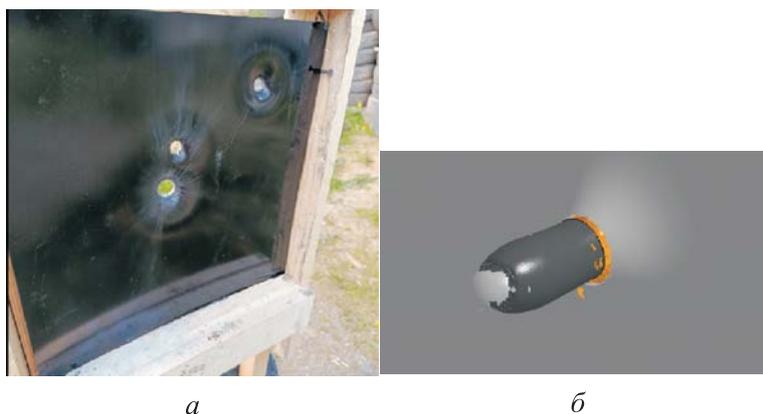


Рис. 4. Общий вид результатов испытаний (*а*) и численного моделирования (*б*) взаимодействия ударника и тестовой пластины

Результаты испытания тестовой пластины и численного моделирования (см. рис. 2, *а*) приведены на рис. 4. Пробитие в эксперименте, очевидно, сопровождалось выбиванием «пробки» из листа материала. Характер найденной рядом оболочки свидетельствует о том, что произошло разделение оболочки и сердечника. По результатам численного моделирования зафиксировано выбивание пробки и разделение сердечника с оболочкой.

Результаты испытания двоянной пластины и численного моделирования (см. рис. 2, *б*) продемонстрированы на рис. 5. Пробития в эксперименте и численном моделировании не наблюдается. Вид найденной рядом оболочки свидетельствует о разделении оболочки и сердечника. Совместная работа переднего и заднего слоев привела к тому, что ни один из них не имеет видимых разрушений.

Результаты испытания тройной пластины и численного моделирования (см. рис. 2, *в*) представлены на рис. 6 и 7. После испытаний наблюдается пробитие только переднего листа, средний лист деформирован в зоне воздействия, контакта с задним листом не наблюдается, что полностью повторяется в численном эксперименте. Вид найденной рядом оболочки совпадает с видом оболочек после других испытаний, а в численном моделировании у оболочки наблюдается

отрицательная скорость, и она отскакивает. Средней пластиной была остановлена пробка, выбитая из переднего листа, аналогично представленному на рис. 4, б.

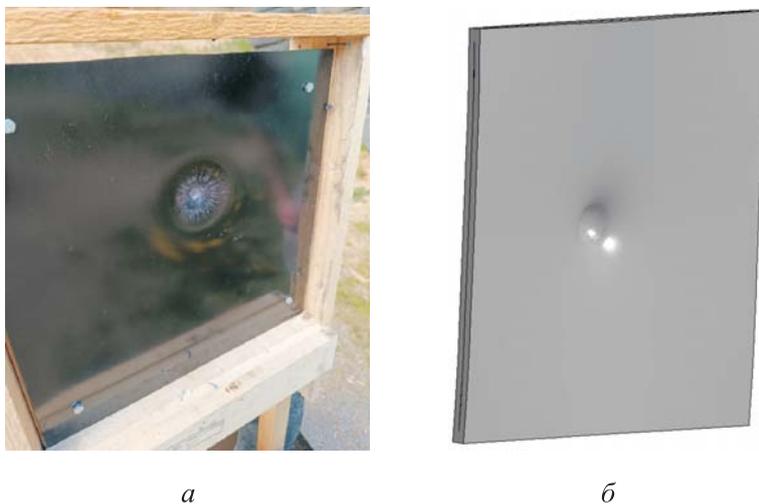


Рис. 5. Общий вид результатов испытаний (*a*) и численного моделирования (*б*) взаимодействия ударника и двойной пластины

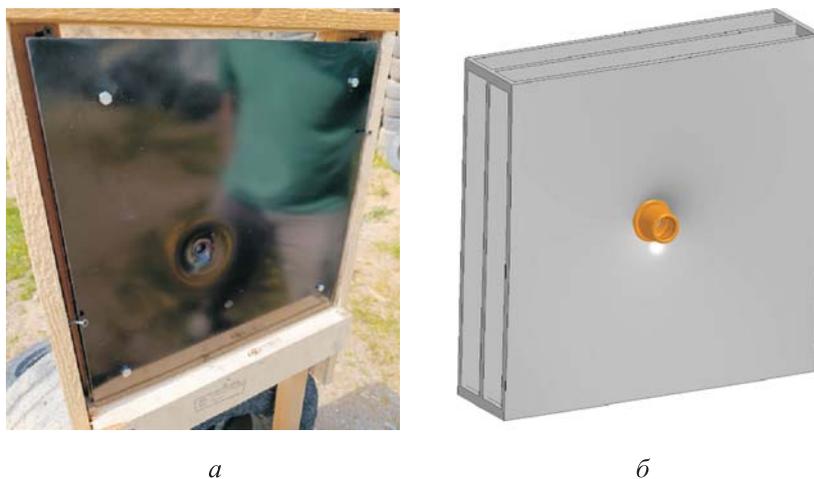


Рис. 6. Общий вид результатов испытаний (*a*) и численного моделирования (*б*) взаимодействия ударника и тройной пластины

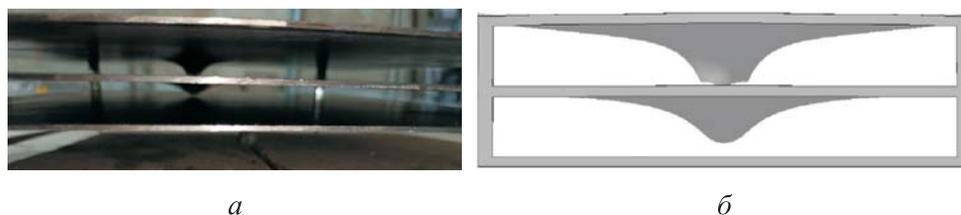


Рис. 7. Вид сбоку результатов испытаний (*a*) и численного моделирования (*б*) взаимодействия ударника и тройной пластины

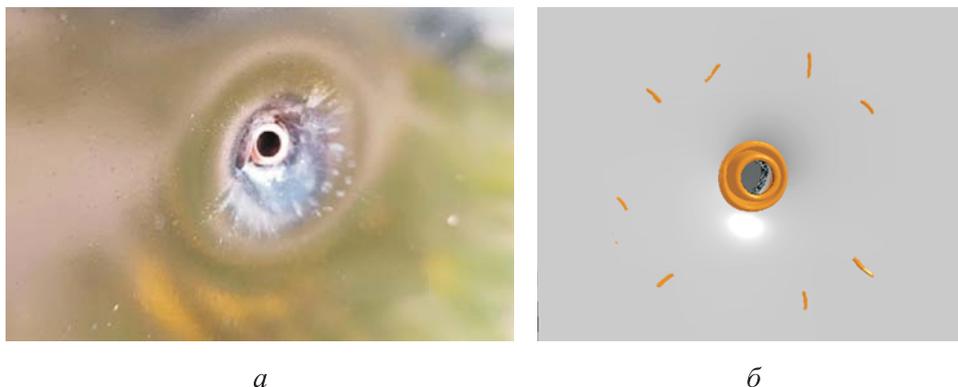


Рис. 8. Общий вид результатов испытаний (а) и численного моделирования (б) взаимодействия ударника и сэндвич-панели



Рис. 9. Визуализация деформации пули после взаимодействия с пластиной в результате испытаний (а) и численного моделирования (б)

Результаты испытания сэндвич-панели и численного моделирования (см. рис. 2, з) показаны на рис. 8. Наблюдается пробитие только переднего листа, сердечник вошел внутрь целиком и деформировал задний лист. Оболочка заперла собой отверстие и приобрела характерный вид. Разрушение ударника сопровождалось образованием лепестковых осколков из оболочки. Лепестки попали в деревянную рамку. Эксперимент полностью повторяется в численном моделировании. У оболочки зафиксирована нулевая скорость, оболочка запирает отверстие. Выбита «пробка» из передней стенки. Песок раздвигается и уплотняется от места воздействия ударником. Характерный вид пули после такого воздействия приведен на рис. 9.

Сэндвич-панель получается технологически сложной в изготовлении и требовательной к размеру частиц песка. В перспективе стоит проверить влияние технологических операций на баллистическую стойкость.

Для сравнения результаты значений, полученных при эксперименте, и данные численного моделирования приведены в табл. 6.

Результаты эксперимента и численного моделирования

Преграда	Параметр	Эксперимент, мм	Численное моделирование, мм	Погрешность, %
Тестовая	Прогиб	10,8	11,4	+5
	Диаметр	11,8	11,2	-5
Сдвоенная	Прогиб первого листа	11,2	10,6	+5
	Прогиб второго листа	11,9	11,3	-5
Тройная	Прогиб первого листа	11,2	11,1	-6
	Диаметр отверстия в первом листе	12,9	12,1	-6
	Прогиб второго листа	13,4	12,6	-6
Сэндвич	Прогиб первого листа	8,8	10,3	+15
	Диаметр отверстия в лицевом листе	13,4	11,4	-15
	Прогиб второго листа	10,9	9,3	-15

Наблюдается значительная погрешность при сравнении результатов расчета и эксперимента, и тому есть несколько объяснений:

- погрешность при измерении;
- масса ударника и масса порохового заряда могут давать суммарную погрешность до 2 г в пределах первой серии выпуска. Таким образом, кинетическая энергия ударника на подлете к преграде может составлять 650...890 Дж, что соответствует 75...100 % от заявленной энергии удара;
- отклонения в зернистости выбранного песка; выборочный размер частиц показал отклонения от среднего размера частиц в 1,5 раза.

Анализируя результаты эксперимента и численного моделирования, можно сделать вывод, что чем сложнее структура бронеплиты, тем больше погрешность. Например, в статье [5] приведена погрешность в прогибах, достигающая 52 %, а в статье [7] она составляет 20 %. Погрешность до 11 % является стандартной для однородной брони практически любой конструкции [8].

Зафиксирована расчетная погрешность в описании деформации ударника. Однако поскольку сердечник не является предметом исследования, допускается остановиться на достигнутой точности при моделировании описания поведения ударника. В то же время поведение пули в момент удара согласуется с ожиданиями расчетной модели.

Заключение. Введение песка в качестве промежуточного слоя в защитной структуре демонстрирует явное увеличение баллистической стойкости по критерию прогиба второй пластины до 18 % по экспериментальным и расчетным данным, а при увеличении массы защитного элемента в 1,9 раз относительно сдвоенной преграды. Полученные результаты обосновывают потенциал применения предлагаемой защиты при проектировании кузовов специальных транспортных средств, и их следует учитывать при оценке поведения бронезлемента для других классов защиты и более наглядного сравнения. Анализ результатов численного моделирования и натурального эксперимента показывает, что разработанная комплексная конечно-элементная модель, которая включает предварительный подбор параметров модели материала Джонсона — Кука, основанный на приведенной методике, полно описывает процесс взаимодействия ударника и исследуемой области защитной структуры. Модель позволяет прогнозировать результаты моделирования гомогенной структуры с погрешностью до 5 %. Для многослойной пластины, разработанной с применением сыпучего слоя, погрешность увеличивается до 15 % из-за ошибок измерения и производственных дефектов пули и песка.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Kopinski P. Ceramic Particle Armor. In: *Proceedings of the Ground Vehicle Systems Engineering and Technology Symposium (GVSETS)*, NDIA, Novi, MI, Aug. 13–15, 2019.
- [2] Баженов В.Г., Нагорных Е.В., Осетров Д.Л., Рябов А.А. Численно-экспериментальный анализ процессов растяжения-кручения цилиндрических образцов из стали 09Г2С при больших деформациях до разрушения. *Учен. зап. Казан. ун-та. Сер.: Физ.-матем. науки*, 2018, т. 160, кн. 3, с. 495–507.
- [3] Wang Jianjun, Guo W.G., Guo Jin, Wang Ziang, Lu Shengli. (). The Effects of Stress Triaxiality. Temperature and Strain Rate on the Fracture Characteristics of a Nickel-Base Superalloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2016, no. 25. DOI: 10.1007/s11665-016-2049-9
- [4] Dhanraj Rajaraman. A novel calibration procedure of Johnson–Cook damage model parameters for simulation of scratch abrasion. *Wear*, 2023, vol. 528–529, pp. 204977–204977. DOI: 10.1016/j.wear.2023.204977
- [5] Shuaib Mujtaba, Chung Kim Yuen S., Nurick Gerald. Numerical Simulation of Blast Loaded CFRP Retrofitted Steel Plates. *MATEC Web of Conferences*, 2021, vol. 347. Paper 00038. DOI: 10.1051/mateconf/202134700038
- [6] Borvik T., Dey S., Clausen A.H. Perforation resistance of five different high-strength steel plates subjected to small-arms projectiles. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, vol. 36 (7), pp. 948–964. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2008.12.003
- [7] Cu Jie, Chen Xin, Tian Ali, Ye Renchuan, Qiao Y.X, Miu Dongqin. Investigation of the penetration resistance of monolithic and double-layered steel plates. *International Journal of Modern Physics B*, 2019, vol. 33, pp. 1940005. DOI: 10.1142/S0217979219400058

- [8] Børvik T., Dey S., Clausen A.H. Perforation resistance of five different high-strength steel plates subjected to small-arms projectiles. *Intern. J. of Impact Engineering*, 2009, vol. 36, no. 7, pp. 948–964.
DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2008.12.003
- [9] Zuzov V.N., Shash N. Analiz protivopul'noi stoikosti bronevykh staley inostrannogo proizvodstva [Analysis of Anti-Bullet Resistance of Armored Steels of Foreign Manufacture]. *Nauka i Obrazovanie: nauchnoe izdanie* [Science and Education: Scientific Publication], 2017, no. 5, pp. 21–41. Available at: <http://technomag.edu.ru/jour/article/view/1156/1084>

Статья поступила в редакцию 30.06.2025

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Зузов В.Н., Яковлев Д.А., Журкин М.М. Исследование эффективности защитных структур, изготовленных с применением корундового песка, при высокоскоростном баллистическом воздействии с помощью модифицированного расчетно-экспериментального метода. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2025, вып. 9. EDN PRXYUU

Зузов Валерий Николаевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Колесные машины», МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: zuzov@bmstu.ru

Яковлев Денис Александрович — аспирант кафедры «Колесные машины», МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: iakovlev.denis.a@gmail.com

Журкин Михаил Михайлович — аспирант кафедры «Колесные машины», МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: mimizhur@gmail.com

Studying efficiency of the protective structures made with the corundum sand under a high-velocity ballistic impact using the modified computational and experimental method

© V.N. Zuzov, D.A. Yakovlev, M.M. Zhurkin

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

The paper presents results of a computational and experimental study of the multilayer protective structure designed for armoring the transport vehicles, which contains the ceramic sand. It provides a methodology for determining parameters of the Johnson–Cook material model, and assesses efficiency of selecting the parameters by validating the open experimental data and the experiment conducted. Experimental part of the study used the FMJ 18 Paradox projectile; the shot was fired from a smoothbore gun. Numerical simulation in the LS-DYNA package made it possible to forecast the experiment and assess the effect of sand on the armor protective properties. Computation results were not refined based on the experimental results. Sand was simulated in the FEM setting using the homogeneous first-order TET elements simulated with a gap. The modified method of particle description, as well as the selected parameters of the Johnson–Cook material model made it possible to predict the striker deceleration and its effect on the sandwich panel quite accurately. Test results demonstrate the potential in using ceramics in the form of sand in the protective kits of the transport vehicles. Introduction of sand as the intermediate layer in a protective structure indicates significant increase in the ballistic resistance.

Keywords: multilayer armor, sand, LS-DYNA, finite element model, numerical simulation, full-scale testing

REFERENCES

- [1] Kopinski P. Ceramic particle armor. In: *Proceedings of the Ground Vehicle Systems Engineering and Technology Symposium (GVSETS)*, NDIA, Novi, MI, Aug. 13–15, 2019.
- [2] Bazhenov V.G., Nagornykh E.V., Osetrov D.L., Ryabov A.A. Chislenno-eksperimentalnyi analiz protsessov rastyazheniya-krucheniya tsilindricheskikh obrabzov iz stali 09G2S pri bolshikh deformatsiyakh do razrusheniya [Numerical and experimental analysis of tension-torsion processes in cylindrical samples made of 09G2S steel under large deformations before destruction]. *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Seriya fiziko-matematicheskie nauki — Proceedings of Kazan University. Physics and Mathematics Series*, 2018, vol. 160, book 3, pp. 495–507.
- [3] Wang Jianjun, Guo W.G., Guo Jin, Wang Ziang, Lu Shengli. The effects of stress triaxiality, temperature and strain rate on the fracture characteristics of a nickel-base superalloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2016, no. 25. <https://doi.org/10.1007/s11665-016-2049-9>
- [4] Dhanraj Rajaraman. A novel calibration procedure of Johnson–Cook damage model parameters for simulation of scratch abrasion. *Wear*, 2023, vol. 528–529, pp. 204977–204977. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204977>
- [5] Shuaib Mujtaba Chung Kim Yuen S., Nurick Gerald. Numerical simulation of blast loaded CFRP retrofitted steel plates. *MATEC Web of Conferences*, 2021, vol. 347, paper 00038. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202134700038>

- [6] Børvik T., Dey S., Clausen A.H. Perforation resistance of five different high-strength steel plates subject to small-arms projectiles. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, vol. 36 (7), pp. 948–964.
<https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2008.12.003>
- [7] Cu Jie, Chen Xin, Tian Ali, Ye Renchuan, Qiao Y.X, Miu Dongqin. Investigation of the penetration resistance of monolithic and double-layered steel plates. *International Journal of Modern Physics B*, 2019, vol. 33, paper 1940005.
<https://doi.org/10.1142/S0217979219400058>
- [8] Børvik T., Dey S., Clausen A.H. Perforation resistance of five different high-strength steel plates subject to small-arms projectiles. *Int. J. of Impact Engineering*, 2009, vol. 36, no. 7, pp. 948–964.
<https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2008.12.003>
- [9] Zuzov V.N., Shash N. Analiz protivopul'noi stoikosti broneykh stali inostranogo proizvodstva [Analysis of Anti-Bullet Resistance of Armored Steels of Foreign Manufacture]. *Nauka i Obrazovanie: nauchnoe izdanie — Science and Education: Scientific Publication*, 2017, no. 5, pp. 21–41. Available at: <http://technomag.edu.ru/jour/article/view/1156/1084>

Zuzov V.N., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Wheeled Machines, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: zuzov@bmstu.ru

Yakovlev D.A., Postgraduate, Department of Wheeled Machines, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: iakovlev.denis.a@gmail.com

Zhurkin M.M., Postgraduate, Department of Wheeled Machines, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: mimizhur@gmail.com