

Влияние свойств материала защитных структур на проникающую способность ударника при высокоскоростном баллистическом воздействии

© В.Н. Зузов, Д.А. Яковлев

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

Анализ опубликованных современных расчетных исследований бронирования транспортных средств показал, что перспективной является разработка многослойных преград для защиты от баллистического воздействия. Причем чаще всего применяются подходы, основанные на формулировке Лагранжа. Проведено расчетное исследование влияния материала внешней оболочки многослойной защитной структуры, содержащей керамический песок, которая проектируется для бронирования транспортных средств, на проникающую способность ударника. Исследование выполнено на базе рациональных расчетных моделей, разработанных с помощью устоявшихся подходов в пакете LS-DYNA. В результатах отражено влияние структуры промежуточного слоя, количества слоев и свойств материалов в составе защитных структур транспортных средств на проникающую способность ударника при применении изложенного метода моделирования. В работе рассматривается бронебойная пуля 7,62 мм «APM2», используемая чаще остальных в исследованиях, начальная скорость выстрела соответствовала выстрелу из снайперской винтовки Драгунова. Проанализировано влияние граничных условий на останавливающую способность применяемых образцов. Результаты исследования подкрепляют заявленный в более ранних работах потенциал использования керамики в виде песка в защитных комплексах для применения в транспортных средствах.

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

Введение. Исследование существующего парка автомобилей МЧС и специализированного медицинского транспорта выявило, что они эксплуатируются главным образом в условиях наличия безопасного коридора. Для использования специализированного транспортного средства, удовлетворяющего новым требованиям безопасности в приграничных зонах или в зонах бедствия, необходимо разработать многоцелевую защитную сэндвич-панель, которую можно разместить внутри существующего серийного транспортного средства, чтобы она обеспечивала защиту по ГОСТ Р 51136–2008. В общем случае для решения этой проблемы применяют методы оптимизации.

Оптимизация бронеплит, выполняемая по разным целевым параметрам и направленная против воздействия поражающих элементов, давно и плотно интересует не только военных, но и гражданских исследователей по всему миру, причем особенно актуальным является решение этой проблемы в сфере транспорта. Основными требованиями к бронеплитам и к кузовам бронированных автомобилей неизменно считаются малая масса, минимальная стоимость и соответствие

целевому уровню защиты, а для их выполнения всегда приходится находить компромиссное решение.

Композитные и многослойные бронеплиты хотя и обладают рядом достоинств, все же не лишены недостатков, являющихся критичными при проектировании транспортных средств. Основное их преимущество — меньшая масса для обеспечения необходимой бронезащиты, однако изготовление и крепление таких плит отличается технологической сложностью, а также они имеют более высокую стоимость, чем гомогенные бронеплиты.

Для достижения эффективной защиты при минимальной массе конструкции необходимо обосновать толщины всех слоев пакета. В связи с этим проведено численное исследование пробития группы многослойных пластин с разным наполнением, обеспечивающих защиту от пули 7,62 мм «АРМ2» с жестким стальным сердечником (далее — пулей «АРМ2» [1]) при начальной скорости удара пули, равной 830 м/с. Приведенное исследование построено на основе анализа взаимодействия ударника с группой пластин, в которых применяются алюминиевый сплав 1950 и сталь 07Х16Н6, а в качестве базовых взяты значения для монолитных пластин соответствующего материала.

Цель работы — расчетное обоснование выбора состава и параметров многослойных пластин, обеспечивающих уровень защиты BR7 по норме EN 1063 и меньшую массу конструкции, путем поиска оптимальных соотношений компонентов сэндвич-панели.

Описание ударника. Пуля 7,62 мм «АРМ2» массой 10,5 г имеет стальной сердечник. Ударник состоит из латунной оболочки, латунной заглушки, свинцовой рубашки и стального сердечника. Общий вид, габаритные размеры и сечение ударника представлены на рис. 1. В работе [1] подробно описан эксперимент, в котором использованы два варианта пули. Пуля 7,62 мм «АРМ2» имеет начальную скорость 830 м/с,

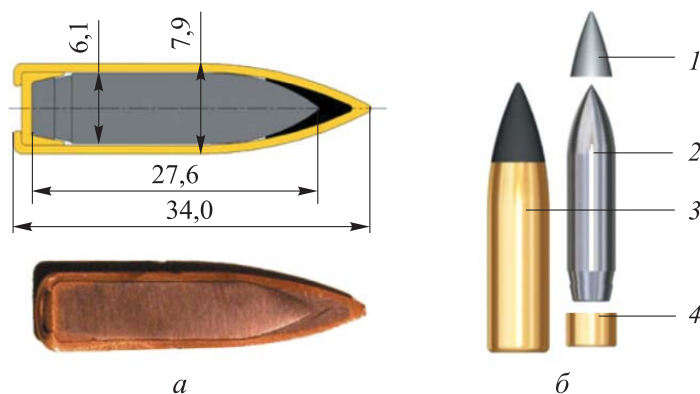


Рис. 1. Общий вид пули 7,62 мм «АРМ2» (а) и сечение ударника (б):
1 — наполнитель; 2 — стальной сердечник; 3 — латунная оболочка; 4 — заглушка

что соответствует выстрелу пуль из снайперской винтовки Драгунова, винтовки М2010 или винтовки М24. Согласно принятому в работе консервативному допущению, скорость удара пули соответствует начальной скорости пули при выстреле.

Описание исследуемых рациональных конечно-элементных моделей (КЭ-моделей). Рассмотрен процесс взаимодействия пули 7,62 мм «АРМ2» с группой пластин пяти видов.

1. Базовая — толщина гомогенной сплошной пластины, равная толщине многослойного пакета, составляет 17,6 мм для стали 07Х16Н6 и 30,0 мм для алюминиевого сплава 1950.

2. Сэндвич-панель, где 2-й слой состоит из керамических гранул. Размеры гранул среднего слоя, которые предварительно подбирались исходя из стандартных толщин приведенных в [2] керамических гранул, составляют 11,5 мм. Анализ влияния толщин внешних слоев сэндвич-панели проведен ниже.

3. Сэндвич-панель, где 2-й слой состоит из керамических гранул и керамического песка. Размеры слоев панели приняты равными размерам пластин группы 2 для проведения качественного сравнения.

4. Сэндвич-панель, где 2-й слой состоит только из керамического песка. Для обеспечения презентативности размеры слоев панели приняты равными размерам слоев пластин группы 2 и 3. Это позволит качественно и изолированно сравнить влияние слоя песка на предлагаемую броню.

5. Многослойная сэндвич-панель, где 2-й и 4-й слои состоят из керамического песка, а слои 1-й, 3-й и 5-й — равнотолщинные металлические пластины. Для учета влияния эффекта многослойности разработана модель, имеющая суммарную толщину, равную габаритной толщине пластин групп 2–4.

Визуализация КЭ-моделей исследуемых бронеплит приведена на рис. 2.

Рассматриваемые бронеплиты являются сложносоставными элементами, поэтому для исследования возможности применения данных пластин необходимо определить потенциально слабые места этих бронеплит. Так, при оценке групп бронеплит, обозначенных 2 и 3, следует рассмотреть выстрел в центр гранулы и в стык гранул.

Пуля и область в металлической пластине, которая подвергается наибольшим деформациям, были смоделированы с учетом результатов исследований из работы [1], а именно, размер КЭ был задан равным 0,2 мм в области воздействия и 0,3 мм в пуле для получения результатов достаточной точности, адекватных полученным при выполнении экспериментов. При использовании среднего размера КЭ, превышающего 0,2 мм, накапливается большая погрешность по прогибам и остаточной скорости.

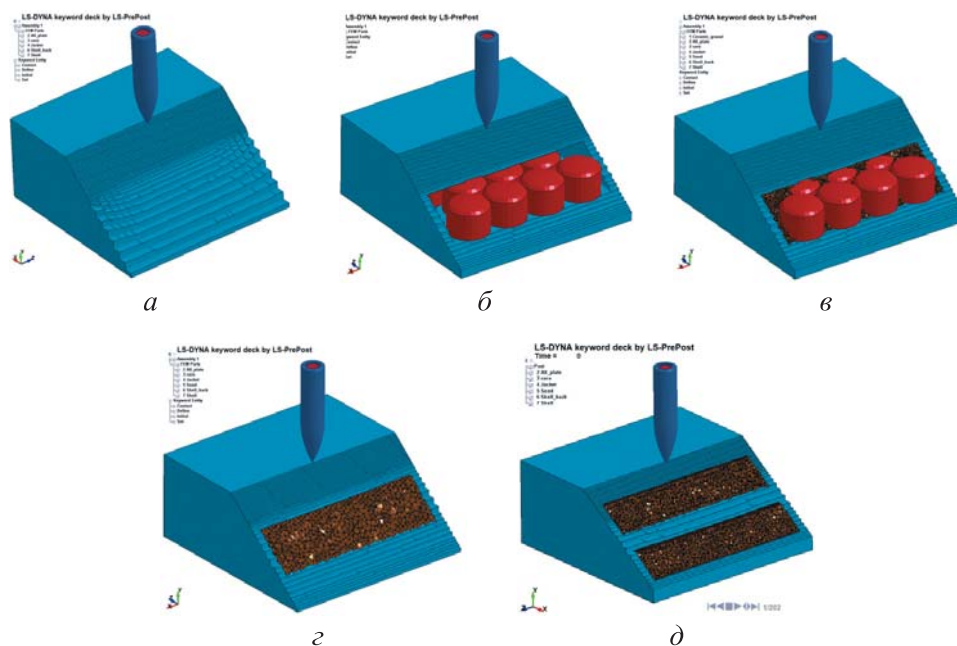


Рис. 2. Визуализация расчетных моделей на примере пластин групп 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г) и 5 (д)

Моделирование песка основано на предварительном исследовании, где рекомендуемый средний размер частиц не превышает 1 мм, а зазоры между частицами — 0,14 мм. Лучшее схождение результатов с представленными экспериментом из [3] показала расчетная модель с моделью песка из раззороженных ТЕТ-элементов первого порядка, модель материала была принята абсолютно жесткой.

Обоснование выбора параметров многослойных пластин. Методом автоматизированного перебора проведено параметрическое исследование процесса пробития пульей сэндвич-панели. На предварительном этапе проводился подбор таких базовых толщин слоев многоцелевой сэндвич-панели, которые обеспечат нулевую запреградную скорость ударника, а целевой функцией была минимизация массы многослойного пакета. В исследовании независимо варьировались толщины всех слоев выбранной пластины. Показатель работоспособности рассматриваемой сэндвич-панели определялся исходя из условия отсутствия кинетической энергии ударника и эффекта «выбивание пробки» при взаимодействии ударника с центром гранулы. Пример такого эффекта приведен на рис. 3.

Результаты решения оптимизационной задачи, где семейство зависимостей остаточной энергии ударника при заглублении в пластины группы 2 с разными толщинами внешней оболочки, а ненулевая кинетическая энергия ударника сопровождается эффектом «выбивание пробки», проиллюстрированы на рис. 4.

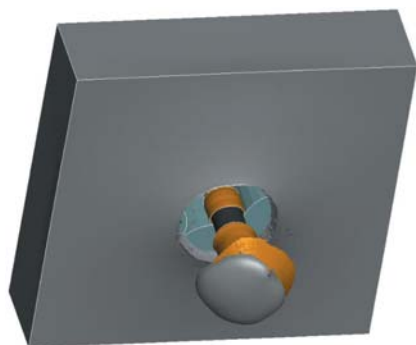


Рис. 3. Пример эффекта «выбивание пробки»

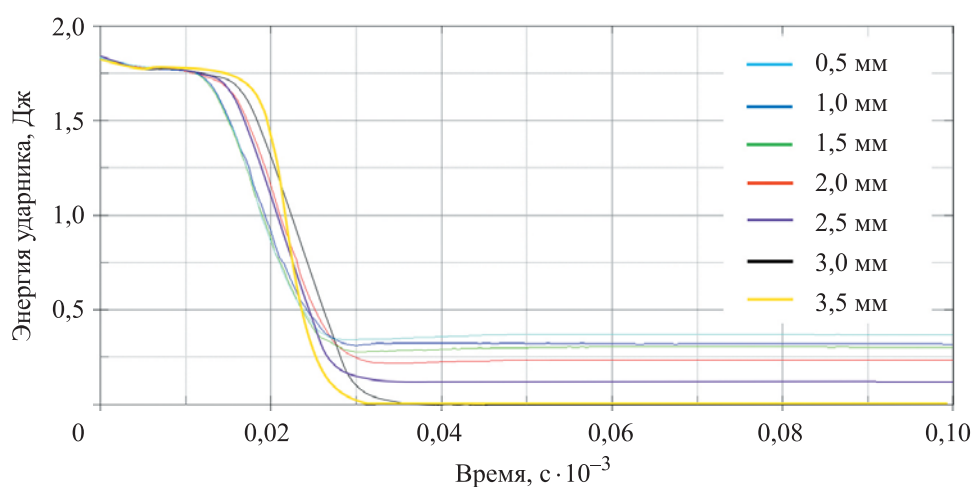


Рис. 4. Зависимость остаточной энергии от времени при заглоблении ударника в преграде пластин группы 2 со стальной оболочкой

По результатам поиска оптимальной структуры конструкции внешние слои пластин групп 2, 3, 4 имеют толщины 3,00 мм для стали 07X16H6 и 9,3 мм для алюминиевого сплава 1950.

Проведенный анализ зависимости характеристик от параметров керамических гранул [2] показал следующее: возрастание размера отдельных элементов (сегментов) сопровождается заметным увеличением общей массы изделия и существенным повышением уровня устойчивости к воздействию поражающих факторов (баллистической стойкости). А уменьшение толщины гранул, напротив, вызывает значительные изменения в массе конструкции, сопровождаемые ощутимым снижением способности противостоять ударным нагрузкам.

Модели материала. Значения параметров металлических материалов бронеплит и пули, относящиеся к модели модифицированной версии Джонсона — Кука, приведены в табл. 1–3. Данные параметры определены по методике, изложенной в [4].

Таблица 1

Общие параметры материала модифицированной модели Джонсона — Кука для группы материалов

Материал	E , МПа	ν	ρ , кг/м ³	C_p , Дж/(кг·К)	χ	α , К ⁻¹	T_c^*
Сплав 1950	71700	0,33	2810	910	0,9	$2,24 \cdot 10^{-5}$	0,9
Сталь 07X16H6	210000	0,33	7750	435	0,9	$1,12 \cdot 10^{-5}$	0,9
Стальной сердечник	210000	0,33	7850	452	0,9	$1,2 \cdot 10^{-5}$	0,9
Свинцовый сердечник	1000	0,42	10660	124	0,9	$2,9 \cdot 10^{-5}$	0,9
Латунная оболочка	115000	0,31	8520	385	0,9	$1,9 \cdot 10^{-5}$	0,9
Обозначения: E — модуль упругости первого рода; ν — коэффициент Пуассона; ρ — плотность материала; C_p — удельная теплоемкость; χ — коэффициент Тейлора — Куинси; α — коэффициент теплового расширения; T_c^* — критический температурный коэффициент.							

Таблица 2

Параметры уравнения пластической деформации модифицированной модели Джонсона — Кука для группы материалов

Материал	A , МПа	B , МПа	n	ϵ_0^* [C ⁻¹]	C	T_r , К	T_m , К	m
Сплав 1950	550	60	1,51	0.01	0,0025	293	893	1,61
Сталь 07X16H6	1130	96.3	1,45	0,0005	0,014	293	1723	1,03
Стальной сердечник	1200	50000	1	0,0005	0	293	1800	1
Свинцовый сердечник	24	300	1	0,0005	0,1	293	760	1
Латунная оболочка	206	505	0,42	0,0005	0,01	293	1189	1,68
Обозначения: A — предел текучести; B — деформационное упрочнение; n — показатель твердения; ϵ_0^* — нормированная скорость эквивалентных пластических деформаций при повреждении; C — коэффициент скорости деформации; T_r — температура окружающей среды; T_m — температура плавления материала; m — показатель термического размягчения.								

Параметры уравнения разрушения модифицированной модели Джонсона — Кука для группы материалов

Материал	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_c	ε_d
Сплав 1950	0,00193	39,811	18,351	0,07480	0,00008	0,00193	1,204
Сталь 07X16H6	0,00133	533,596	23,869	-0,08400	0,00060	0,00133	1,418
Стальной сердечник	5,625	0,3	-7,1999	-123,00	—	0,99	0,9110
Свинцовый сердечник	0,1747	1,1870	6,0201	—	—	0,99	1
Латунная оболочка	0,5399	4,8899	-3,0300	0,0140	1,1200	0,99	3,72
Обозначения: $D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, \varepsilon_d$ — параметры материала.							

Согласно результатам предварительного исследования [5], при описании оксида алюминия в форме песка целесообразнее применять модель абсолютно жесткого материала, где модуль Юнга E и коэффициент Пуассона ν используются для задания параметров контактного взаимодействия, если жесткое тело участвует в контактном взаимодействии.

Для описания керамических гранул целесообразно применять модель материала Джонсона — Холмквиста, которая часто используется для моделирования механического поведения хрупких материалов с механизмом разрушения. Значения параметров материала взяты из [5–7].

Результаты исследования. Результаты численного моделирования взаимодействия пули с группами пластин сгруппированы на основе приведенного перечня при описании исследуемых рациональных КЭ-моделей.

Графическое отображение расчетного взаимодействия пули 7,62 мм «АРМ2» с пластинами базовой группы 1 приведено на рис. 5.

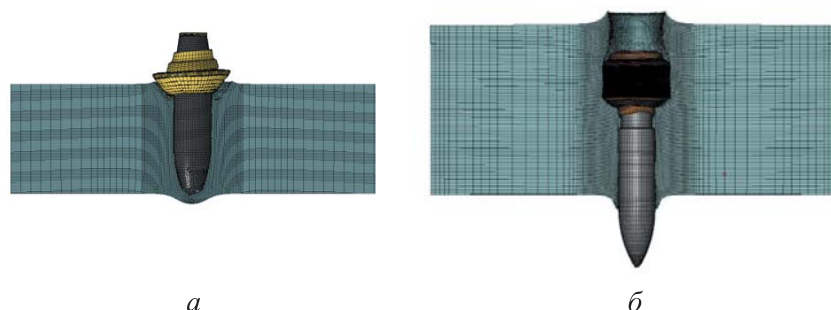


Рис. 5. Расчетное взаимодействие пули 7,62 мм «АРМ2» с базовыми пластинами на основе стали 07X16H6 (а) и сплава 1950 (б)

В базовом варианте приняты толщины материала, соответствующие габаритным толщинам остальных групп пластин. По результатам расчета запреградная скорость ударника при взаимодействии со стальной пластиной равна нулю, а при взаимодействии с алюминиевой пластиной остаточная скорость достигает 215 м/с. Потребная толщина пластины из алюминиевого сплава 1950 достигает 63 мм.

Отображение расчетного взаимодействия пули с пластинами группы 2 на основе стали 07X16H6 и алюминиевого сплава 1950 продемонстрировано на рис. 6. Потенциально наиболее слабое место этих пластин — стык гранул. В таком случае гранулы при взаимодействии с ударником разъезжаются, что открывает пространство для беспрепятственной пенетрации. Согласно результатам расчета, пластины группы 2 с алюминиевым основанием останавливают ударник в любом случае, а пластины, изготовленные с применением стали 07X16H6, обеспечивают защиту только при попадании в центр гранулы. В случае попадания в стык гранул пластины на основе стали 07X16H6, ударник имеет запреградную скорость, равную 218 м/с.

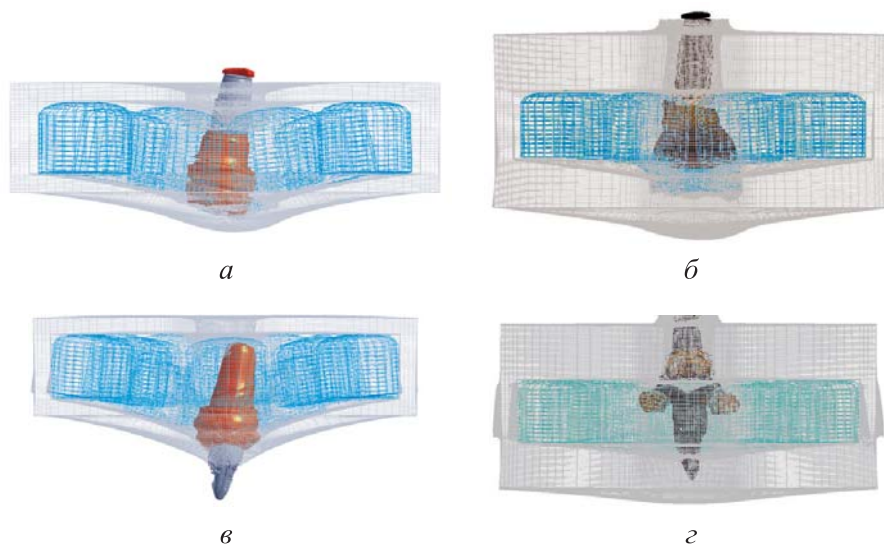


Рис. 6. Расчетное взаимодействие пули 7,62 мм «АРМ2» с пластинами группы 2 на основе стали 07X16H6, центр гранулы (а); сплава 1950, центр гранулы (б); стали 07X16H6, стык гранул (в); сплава 1950, стык гранул (г)

Расчетное взаимодействие ударника с пластинами группы 3 приведено на рис. 7. Механика взаимодействия пули с пластинами в данном случае схожа с механикой пластин группы 2. Результаты численного моделирования показывают качественное сходство и незначительные количественные различия. При попадании в стык гранул пластины на основе стали 07X16H6 ударник имеет запреградную скорость, равную 278 м/с.

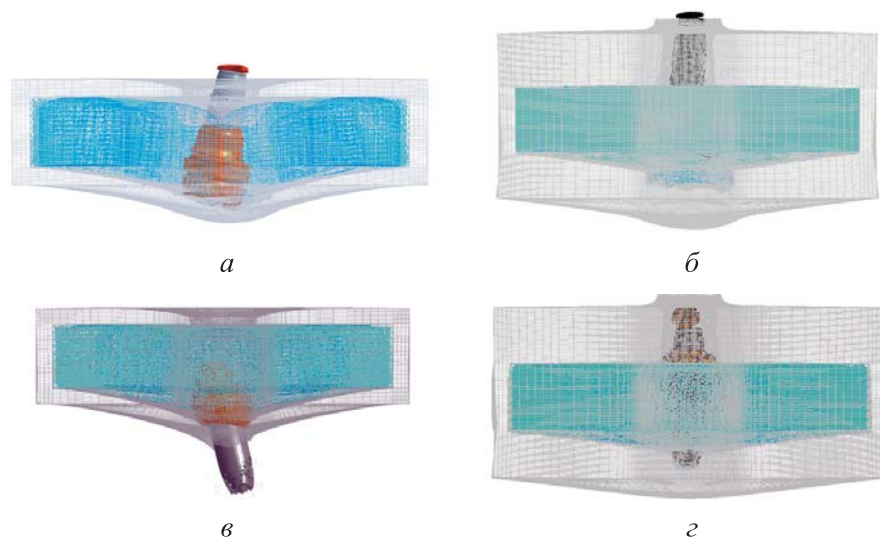


Рис. 7. Расчетное взаимодействие пули 7,62 мм «АРМ2» с пластинами группы 3 на основе стали 07X16H6, центр гранулы (а); сплава 1950, центр гранулы (б); стали 07X16H6, стык гранул (в); сплава 1950, стык гранул (г)

Полную остановку ударника обеспечивают пластины группы 4, результаты расчетного взаимодействия приведены на рис. 8. Применение трехслойных пластин с использованием керамического песка в кузовах бронев автомобилей создают требуемую защиту при меньшей массе конструкции, чем масса гомогенной металлической брони того же уровня защиты.

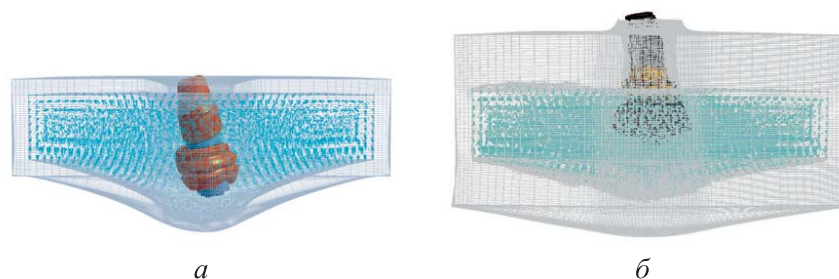


Рис. 8. Расчетное взаимодействие пули 7,62 мм «АРМ2» с пластинами группы 4 на основе стали 07X16H6 (а) и сплава 1950 (б)

При исследовании пластин группы 5 установлено, что ударник имеет ненулевую запреградную скорость, что продемонстрировано на рис. 9. Полученные результаты хорошо согласуются с независимым исследованием [8], где сделан вывод о том, что увеличение количества слоев понижает баллистическую стойкость пакета. Иными словами, увеличение слоев пакета при сохранении базовой толщины нецелесообразно с точки зрения защиты и технологичности.

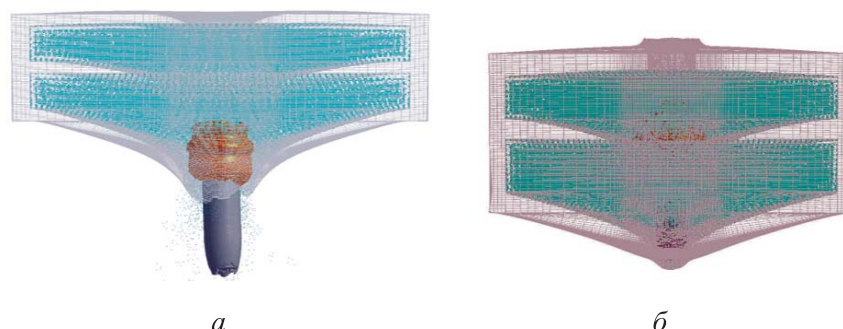


Рис. 9. Расчетное взаимодействие пули 7,62 мм «APM2» с пластинами группы 5 на основе стали 07X16H6 (а) и сплава 1950 (б)

Значения запреградных скоростей ударника после взаимодействия с пластинами для всех исследуемых моделей приведены в табл. 4. Видно, что пластинам группы 5 требуется значительно большая толщина пакета для полной остановки ударника. Положительно выделяются пластины группы 4 всех исполнений с точки зрения останавливающей способности и массы изделия. Суммарное изменение итоговой массы стальной брони достигает 40 % по сравнению с массой однородной металлической пластины группы 1, обеспечивающей тот же уровень защиты. При этом алюминиевый пакет незначительно тяжелее, чем базовая пластина со значительно более высокими баллистическими свойствами.

Таблица 4

Значения остаточных скоростей пули 7,62 «APM2» для расчетных моделей

Номер группы пластин	Базовый материал	Масса пластины, кг	Запреградная скорость, м/с
1	Сталь 07X16H6	138,2	0
	Сплав 1950	82,5	215
2 (в центр гранулы)	Сталь 07X16H6	84,8	0
	Сплав 1950	88,9	0
2 (в стык гранул)	Сталь 07X16H6	84,8	218
	Сплав 1950	88,9	0
3 (в центр гранулы)	Сталь 07X16H6	91,9	0
	Сплав 1950	95,9	0
3 (в стык гранул)	Сталь 07X16H6	91,9	278
	Сплав 1950	95,9	0
4	Сталь 07X16H6	93,3	0
	Сплав 1950	97,4	0
5	Сталь 07X16H6	93,3	415
	Сплав 1950	97,4	244

К недостаткам этих моделей относятся сложность изготовления и возможность высыпания сыпучего материала. Однако использование оснастки в случае массового производства позволит улучшить технологичность, а с применением сотовой структуры перегородок можно сдерживать высыпание песка при пробитии. Кроме того, данная броня отличается высокой ремонтопригодностью.

Заключение. В результате обоснованного выбора состава и параметров многослойных пластин достигнуто снижение массы защитной панели до 31 % относительно панели гомогенной структуры. Применение предлагаемой многоцелевой сэндвич-панели позволит в итоге уменьшить и массу транспортного средства. При разработке брони для транспортных средств рекомендуется применять перспективные бронепанели, соответствующие группе 4, так как они обеспечивают остановку ударника при оптимальной массе. Пакет с применением алюминиевого сплава 1950 (AA-7075) показывает лучшую баллистическую стойкость во всех проведенных расчетах, за исключением базового пакета, чем пакеты с применением стали 07X16H6.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Зузов В.Н., Шаш Н. Анализ противопульной стойкости броневых сталей иностранного производства. *Наука и образование. Научное издание*, 2017, № 5, с. 21–41. URL: <http://technomag.edu.ru/jour/article/view/1156> (дата обращения: 15 ноября 2017).
- [2] Кулаков Н.А., Любин А.Н., Скакбаева А.С. Расчетно-экспериментальное исследование стойкости композитной керамической брони при воздействии пуль и высокоскоростных осколков. *Известия МГТУ «МАМИ»*, 2012, № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/raschetno-eksperimentalnoe-issledovanie-stoykosti-kompozitnoy-keramicheskoy-broni-pri-vozdeystvii-pul-i-vysokoskorostnyh-oskolkov> (дата обращения: 19.08.2025).
- [3] Kopinski P. Ceramic Particle Armor. In: *Proceedings of the Ground Vehicle Systems Engineering and Technology Symposium (GVSETS)*. NDIA, Novi, MI, Aug. 13–15, 2019.
- [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] Зузов В.Н., Яковлев Д.А. Исследование влияния основных параметров моделей сыпучих преград (корундового песка) на сопротивление прониканию твердого тела при высокоскоростном баллистическом воздействии. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2025, вып. 8. EDN ZITHOZ
- [6] Бузюркин А.Е., Гладкий И.Л., Краус Е.И. Определение параметров модели Джонсона—Кука для описания процессов деформирования и разрушения титановых сплавов. *Прикл. мех. техн. физ.*, 2015, 56:2, с. 188–195 [*J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 56:2 (2015), 330–336].
- [7] 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, vol. 25. DOI: 10.1007/s11665-016-2049-9

- [8] Shash Nebras, Zuzov V.N. Protection performance of the monolayer and multi-layered steel plates against 7.62-MM APM2 projectile in armored vehicles. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2018, vol. 13, pp. 2051–2057.
- [9] Børvik T., Hopperstad O.S., Berstad T., Langseth M. Perforation of 12 mm thick steel plates by 20 mm diameter projectiles with flat, hemispherical and conical noses: Pt. II: Numerical simulations. *Intern. J. of Impact Engineering*, 2002, vol. 27, no. 1, pp. 37–64. DOI: 10.1016/S0734-743X(01)00035-5
- [10] Bhuarya Manish, Rajput Mayank, Gupta Arpan. Finite Element Simulation of Impact on Metal Plate. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 173, pp. 259–263. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.12.009

Статья поступила в редакцию 23.01.2026

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Зузов В.Н., Яковлев Д.А. Влияние свойств материала защитных структур на проникающую способность ударника при высокоскоростном баллистическом воздействии. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2026, вып. 4. EDN RQHXLW

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

Computational Study of the Effect of Material Properties of Protective Structures Made Using Corundum Sand under High-Speed Ballistic Impact

© V.N. Zuzov, D.A. Yakovlev

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

An analysis of the published modern computational studies of vehicle reservations has shown that modeling multilayer barriers under ballistic impact is of scientific interest and is the most promising. Moreover, approaches based on the Lagrangian formulation are most often used. A computational study has been carried out on the effect of the material of the outer shell of a multilayer protective structure designed for booking vehicles, which contains ceramic sand. The study was conducted on the basis of rational computational models developed using well-established approaches in the LS-DYNA package. The results reflect the influence of the structure of the intermediate layer, the number of layers and the properties of the materials in the protective structures on the penetrating ability of the impactor when using the described modeling method. The study uses a 7.62 mm "APM2" bullet as the most popular armor-piercing bullet, and the muzzle velocity corresponds to a shot from a Dragunov sniper rifle. In the course of the study, the influence of boundary conditions on the stopping power of the studied samples was analyzed. The results of the study reinforce the potential of using ceramics in the form of sand in protective kits, stated in earlier studies, for use in vehicles.

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

REFERENCES

- [1] Zuzov V.N., Shash N. Analiz protivopulnoy stoykosti bronevykh staley inostrannogo proizvodstva [Analysis of bullet resistance of foreign-made armor steels]. *Nauka i obrazovanie. Nauchnoe izdanie*, 2017, no. 5, pp. 21–41. Available at: <http://technomag.edu.ru/jour/article/view/1156> (accessed: 15 November 2017).
- [2] Kulakov N.A., Lyubin A.N., Skakbaeva A.S. Raschetno-eksperimentalnoe issledovanie stoykosti kompozitnoy keramicheskoy broni pri vozdeystvii pul i vysokoskorostnykh oskolkov [Computational and experimental study of the resistance of composite ceramic armor under bullets and high-velocity fragments]. *Izvestia MGTU MAMI*, 2012, no. 2. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/raschetno-eksperimentalnoe-issledovanie-stoykosti-kompozitnoy-keramicheskoy-broni-pri-vozdeystvii-pul-i-vysokoskorostnyh-oskolkov> (accessed: 19 August 2025).
- [3] Kopinski P. Ceramic Particle Armor. In: *Proceedings of the Ground Vehicle Systems Engineering and Technology Symposium (GVSETS)*. NDIA, Novi, MI, Aug. 13–15, 2019.
- [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] Zuzov V.N., Yakovlev D.A. Issledovanie vliyaniya osnovnykh parametrov modelei sypuchikh pregrad (korundovogo peska) na soprotivlenie pronikaniyu tverdogo tela pri vysokoskorostnom ballisticheskoy vozdeystvii [Studying the influence of the bulk barrier model parameters (corundum sand) on resistance to penetration of a solid body under the high-speed ballistic impact]. *Inzhenerny*

- zhurnal: nauka i innovatsii* — *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2025, iss. 8. EDN ZITHOZ.
- [6] Buzyurkin A.E., Gladkiy Igor L., Kraus E.I. Opredelenie parametrov modeli Dzhonsona–Kuka dlya opisaniya protsessov deformirovaniya i razrusheniya titanovykh splavov [Determination of Johnson–Cook model parameters for describing deformation and fracture processes in titanium alloys]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika* — *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2015, vol. 56, no. 2, pp. 188–195 (Russian version); pp. 330–336 (English version).
 - [7] 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, vol. 25. <https://doi.org/10.1007/s11665-016-2049-9>
 - [8] Shash Nebras, Zuzov V.N. Protection performance of the monolayer and multi-layered steel plates against 7.62-MM APM2 projectile in armored vehicles. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2018, vol. 13, pp. 2051–2057.
 - [9] Børvik T., Hopperstad O.S., Berstad T., Langseth M. Perforation of 12 mm thick steel plates by 20 mm diameter projectiles with flat, hemispherical and conical noses: Pt. II: Numerical simulations. *Int. J. of Impact Engineering*, 2002, vol. 27, no. 1, pp. 37–64. [https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(01\)00035-5](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(01)00035-5)
 - [10] Bhuarya Manish, Rajput Mayank, Gupta Arpan. Finite Element simulation of impact on metal plate. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 173, pp. 259–263. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.12.009>

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

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