

Влияние степени проникания ударника на защитные свойства многослойной структуры при разных углах контакта

© В.Н. Зузов, Д.А. Яковлев

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

Современные расчетные исследования бронирования транспортных средств сфокусированы чаще всего на обеспечении соответствия защиты международным нормам EN 1063, где учитывается только лобовое взаимодействие ударника. Учет влияния угла контакта и минимизация угла проскальзывания (угол, при котором ударник продолжает относительное движение перед преградой) — это исследовательская задача, которую часто обходят стороной. Ее цель — минимизировать сопутствующие потери при эвакуации, т. е. обеспечить минимальную кинетическую энергию после контакта с защитной структурой. На базе рациональных расчетных моделей, разработанных с помощью устоявшихся подходов в пакете LS-DYNA, проведено расчетное исследование влияния степени проникания ударника в защитные многослойные структуры, изготовленные с применением сыпучего материала, при разных углах контакта. Показано влияние толщины внешних слоев оболочки на останавливающую способность пластин при лобовом столкновении под разными углами, с последующим определением угла проскальзывания. Рассмотрена краевая задача — попадание пули в стык пластин. В исследовании использованы пули АРМ2 калибра 7,62 мм, начальная скорость выстрела соответствовала выстрелу из снайперской винтовки Драгунова. Результаты работы позволяют полностью оценить возможность применения брони нового типа для транспортных средств в гражданской сфере.

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

Введение. Бронирование транспортных средств фокусируется не только на оптимизации массы при обеспечении надежной защиты от воздействия различных ударников, но и на уменьшении сопутствующих потерь при ударном и ударно-волновом воздействии.

Данная работа представляет собой углубленное продолжение исследования [1], целью которого было расчетное обоснование выбора состава многослойных пластин, обеспечивающих уровень защиты BR7 по нормам EN 1063, путем поиска оптимальных соотношений компонентов сэндвич-панели. Было определено, что при проектировании брони для транспортных средств следует использовать перспективные бронепанели, разработанные с применением сыпучих материалов, так как они обеспечивают остановку ударника при оптимальных массе и размерах. Уменьшение массы предлагаемой защитной панели достигает до 31 % относительно гомогенной структуры, прогнозируемое уменьшение массы итогового изделия — до 10 %.

Для решения задачи оптимизации массы транспортного средства необходимо подобрать рациональные углы бронирования. Так, авторы работы [2] изучали влияние угла между ударником и броней на защитные свойства самой брони. Данный класс исследований позволяет организовать бронирование кабин и корпусов транспортных средств путем изменения траектории полета ударника с сопутствующей потерей кинетической энергии самого ударника. Большой научный интерес представляет изучение влияния угла проскальзывания ударника по защитной структуре, описанное в работах [3–9].

В настоящей работе проведено расчетное исследование процесса взаимодействия пули при разных углах контакта с группой многослойных пластин, в основе которых — алюминиевый сплав 1950 и сталь 07X16H6. Кроме того, рассмотрена краевая задача взаимодействия со стыком пластин. Результаты расчетов включают в себя относительные значения убывания скорости и кинетической энергии пули и ее сердечника после взаимодействия с пластиной, а также демонстрацию механизма взаимодействия.

Цель работы — расчетное обоснование выбора наилучшего соотношения геометрических параметров защитной структуры, разработанной с применением сыпучих материалов, которое выполнено при учете разных углов воздействия ударника с помощью моделирования в расчетном пакете LS-DYNA.

Описание расчетных моделей. Принципиальная схема броне-плиты приведена на рис. 1, а перечень моделей, участвующих в исследова-

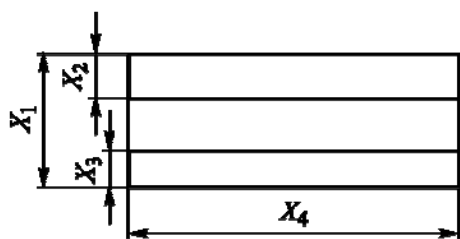


Рис. 1. Принципиальная схема броне-плиты

нии, дан в табл. 1, где значение параметра в миллиметрах обозначено как X с индексом. Согласно предварительному анализу, толщина среднего слоя 11,5 мм является оптимальной для поставленных целей и остается неизменной на протяжении всего исследования.

Рассматриваемые броне-плиты являются сложносоставным элементами. Для исследования возможности применения данных пластин необходимо изучить влияние толщины внешнего и замыкающего слоя на останавливающую способность и угол проскальзывания пули.

Таким образом, в расчетном исследовании участвует 6 моделей, каждая модель подвергается воздействию пули при углах контакта $\alpha = 20, 30, 45, 60, 75$ и 90° . Начальная скорость пули 830 м/с. На рис. 2 приведена визуализация конечно-элементных моделей исследуемых броне-плит на примере модели 2.

Перечень и размеры моделей пластин, участвующих в исследовании

Номер модели (вариант)	Размеры пластин, мм			
	X_1	X_2	X_3	X_4
<i>Стальная основа</i>				
1	17,5	2,0	4,0	200,0
2	17,5	3,0	3,0	200,0
3	17,5	4,0	2,0	200,0
<i>Алюминиевая основа</i>				
4	30,0	6,5	12,0	200,0
5	30,0	10,0	8,5	200,0
6	30,0	12,0	6,5	200,0

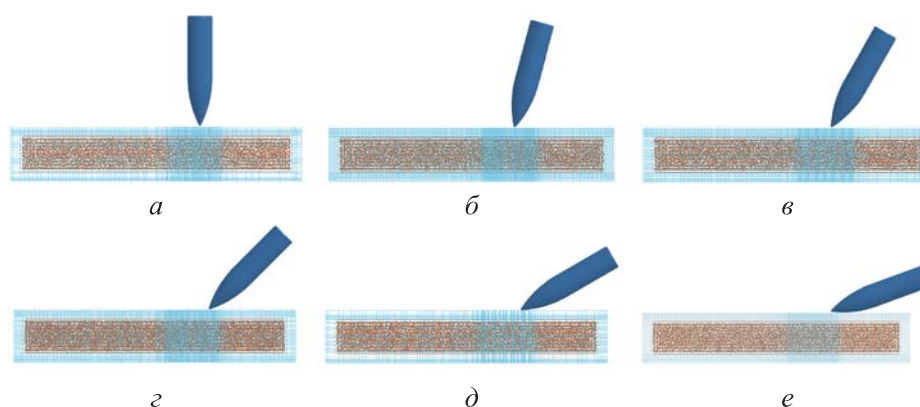


Рис. 2. Сечения расчетных моделей на примере модели 2 при разных углах контакта: 90° (а), 75° (б), 60° (в), 45° (г), 30° (д), 20° (е)

Пуля и область в металлической пластине, которая подвергается наибольшей деформациям, были смоделированы с учетом исследований [10]: размер конечного элемента задан равным 0,2 мм в области воздействия и 0,3 мм в пуле для получения результатов достаточной точности, коэффициентом тангенциального трения пренебрегли. Средний размер частиц не превышал 1 мм, зазоры между частицами составляли до 0,14 мм.

Результаты исследования. В рамках исследования было проведено 36 численных расчетов, связанных с углом взаимодействия пули и бронеплиты, определен угол проскальзывания, а также проанализирован стык пластин в момент попадания пули.

Рассмотрим влияние углов контакта пули и бронеплиты.

Угол контакта 90°. Базовыми являются варианты 2 и 5 при изготовлении стального и алюминиевого короба соответственно. Таким образом, варианты 2 и 5 обладают достаточной баллистической стойкостью.

Вариант 1, с увеличенной толщиной заднего слоя бронеплиты, не обеспечивает остановки ударника. Тонкий лицевой слой деформируется значительно быстрее базового и утолщенного, что влечет за собой сохранение кинетической энергии пули до взаимодействия с задним слоем. Вариант 3 имеет обратную зависимость, задняя стенка более тонкая, чем у вариантов 1 и 2, в этом случае требуется меньшая энергия при взаимодействии.

Анализируя группу моделей с алюминиевым каркасом, можно прийти к выводу, что базовая модель 5 удовлетворяет критерию баллистической стойкости, однако модель 4 показывает более эффективное поглощение кинетической энергии, а модель 6 уже не обеспечивает нулевой запреградной скорости пули.

Характер взаимодействия пули в случае угла полета 90° со всеми вариантами бронеплит приведен на рис. 3.

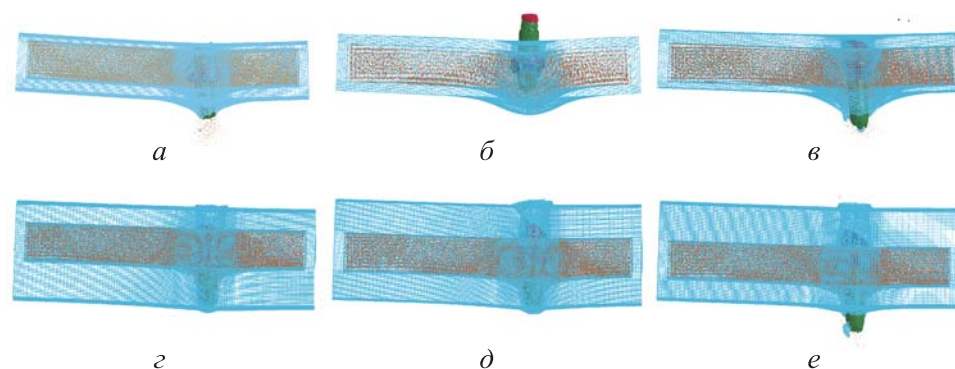


Рис. 3. Результаты моделирования взаимодействия пули с разными вариантами бронеплит при угле контакта 90° , варианты: 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г), 5 (д), 6 (е)

Для удобства сравнения результатов приведена диаграмма относительного поглощения кинетической энергии (рис. 4). Синим цветом отмечены варианты 1–3 (со стальной оболочкой), красным — 4–6 (с алюминиевой оболочкой).

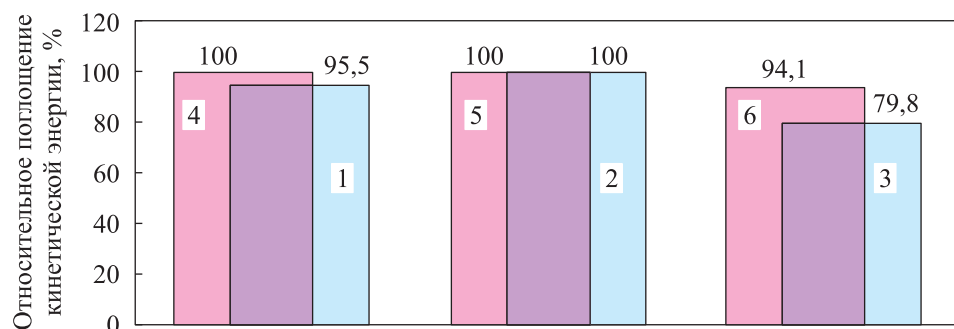


Рис. 4. Диаграмма относительного поглощения кинетической энергии пули разными вариантами бронеплиты

Из диаграммы видно, что варианты 2 и 5 (базовые) поглощают 100 %, кинетической энергии пули, т. е. обеспечивает полную остановку пули.

Угол контакта 75°. Взаимодействие без проскальзывания пули относительно бронеплиты сохраняется и идентично взаимодействию при угле контакта 90°, но абсолютные значения запреградных скоростей уменьшаются на 10 %. Следует обратить внимание, что самозапирающий механизм, который закрывает оболочку части отверстия и препятствует высыпанию песка, более ярко выражен у группы бронеплит с алюминиевым основанием.

Отметим, что варианты 2, 4 и 5 обеспечивают нулевую запреградную скорость пули, а варианты 1, 3 и 6 не обеспечивают ее остановку (рис. 5). При взаимодействии с вариантами 1–3 высок риск образования осколков оболочки пули, а также отбрасывания частиц песка.

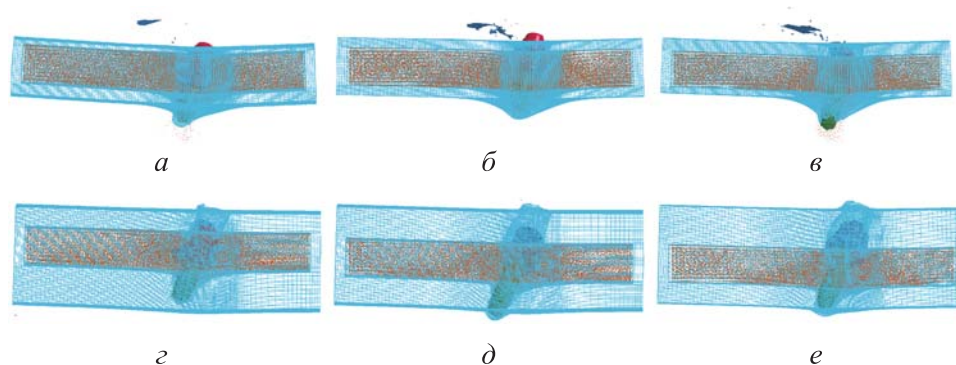


Рис. 5. Результаты моделирования взаимодействия пули с разными вариантами бронеплит при угле контакта 75°, варианты: 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г), 5 (д), 6 (е)

Угол контакта 60°. Как и при рассмотренных выше углах контакта 90 и 75°, пуля имеет ненулевую остаточную скорость в варианте 3, а варианты 1 и 6 уже способны поглощать кинетическую энергию пули в полном объеме. Таким образом, в вариантах 1, 2, 4–6 отмечается нулевая запреградная скорость пули, а вариант 3 не обеспечивает остановку пули (рис. 6).

Следует отметить, что входное отверстие в лицевой части всех бронеплит ощутимо больше диаметра пули, наблюдаются значительная эрозия и склонность к высыпанию песка. При взаимодействии пули со стальной панелью бронеплиты оболочка имеет тенденцию к разрушению и образованию осколков.

Угол контакта 45°. Явно прослеживается изменение траектории при утоньшении лицевого слоя, что увеличивает поглощающую способность при меньших углах контакта пули с бронепанелью, однако более тонкий лицевой слой оголяет слой сыпучего материала при воздействии пули под углом контакта 45°. Начиная с угла контакта 45°, все

варианты способны обеспечить нулевую запреградную скорость ударника и осколков.

Характер взаимодействия пули в случае угла подлета 45° со всеми вариантами бронеплит приведен на рис. 7.

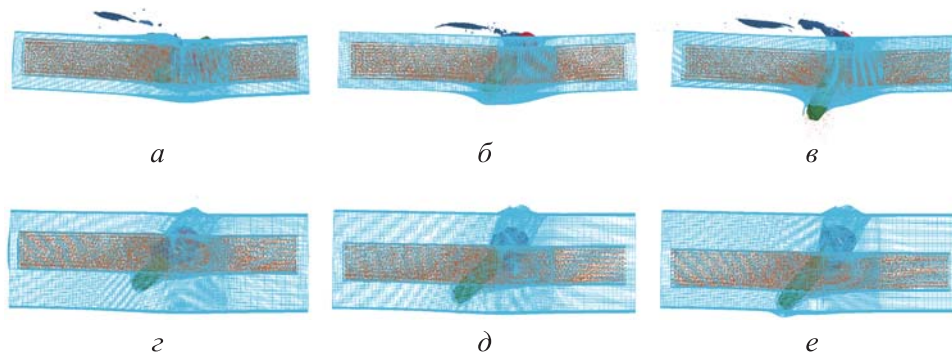


Рис. 6. Результаты моделирования взаимодействия пули с разными вариантами бронеплит при угле контакта 60° , варианты: 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г), 5 (д), 6 (е)

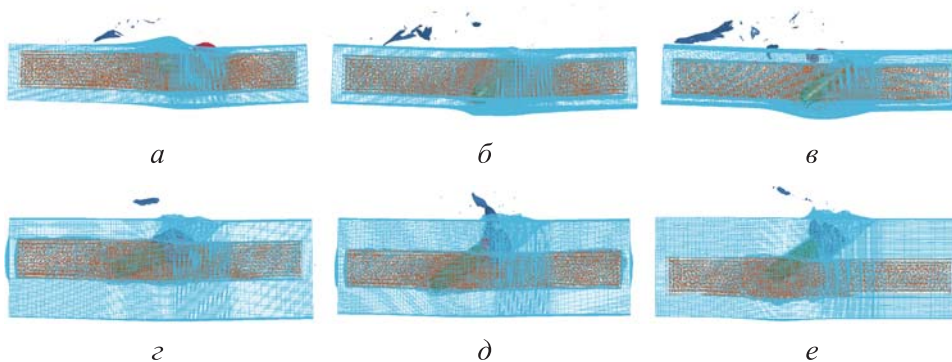


Рис. 7. Результаты моделирования взаимодействия пули с разными вариантами бронеплит при угле контакта 45° , варианты: 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г), 5 (д), 6 (е)

Угол контакта 30° . В ходе анализа взаимодействия вариантов 3, 5 и 6 с пулей под углом контакта 30° зафиксировано проскальзывание пули вдоль лицевой стенки с поверхностной эрозией материала бронеплиты. Проскальзывание пули сопровождается потерей кинетической энергии: 69, 77 и 76 % для вариантов 3, 5 и 6 соответственно. Толщины материала лицевого слоя достаточно для эрозии материала без оголения слоя с сыпучим материалом.

Варианты 1, 2 и 4 обеспечивают нулевую запреградную скорость пули, т. е. ее полную остановку, но при этом варианты 1 и 2 склонны к потере песка после воздействия ударника. При взаимодействии пули с бронеплитой 1 пуля изменяет свою траекторию и останавливается между прослойкой из сыпучего материала и лицевым слоем.

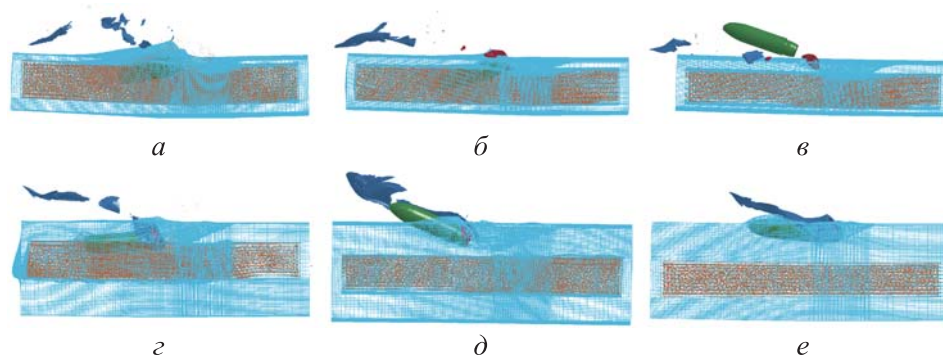


Рис. 8. Результаты моделирования взаимодействия пули с разными вариантами бронеплит при угле контакта 30° , варианты: 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г), 5 (д), 6 (е)

Характер взаимодействия пули в случае угла подлета 30° со всеми вариантами бронеплит показан на рис. 8.

Угол контакта 20° . Во всех приведенных вариантах наблюдается проскальзывание пули вдоль лицевой части многослойной бронеплиты. Взаимодействие пули с бронеплитой в модели 1 сопровождается эрозией лицевого слоя с последующим высыпанием песка, что негативно отражается на дальнейшей эксплуатации. Взаимодействие пули с вариантами 2–6 также сопровождается эрозией материала, которая, однако, не настолько велика, чтобы оголился промежуточный слой с сыпучим материалом.

Характер взаимодействия пули в случае угла подлета 20° со всеми вариантами бронеплит приведен на рис. 9.

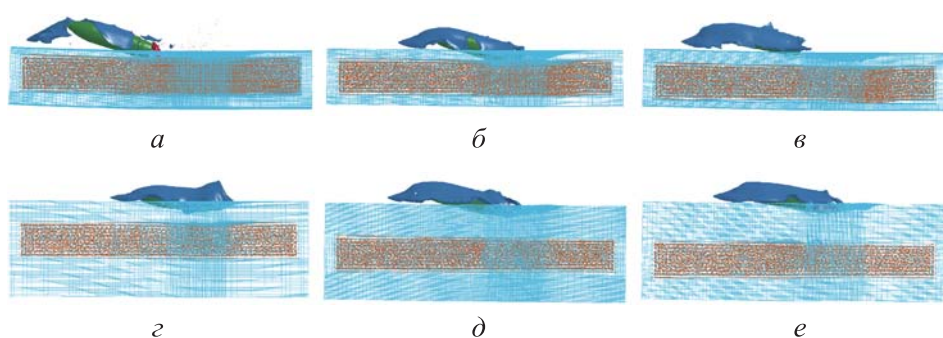


Рис. 9. Результаты моделирования взаимодействия пули с разными вариантами бронеплит при угле контакта 20° , варианты: 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г), 5 (д), 6 (е)

Качественно сравним определенные углы проскальзывания. На рис. 10 синим цветом показаны варианты 1–3 (со стальной оболочкой), а красным — варианты 4–6 (с алюминиевой оболочкой). Вариант 5 получается наилучшим с точки зрения весовой эффективности: его не нужно дорабатывать, а угол проскальзывания близок к минимальному.

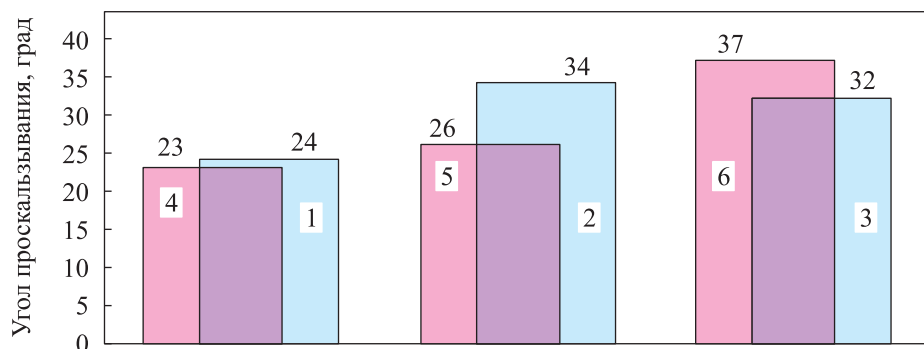


Рис. 10. Диаграмма остатка кинетической энергии после проскальзывания пули вдоль внешнего слоя

Исследование краевой задачи — попадание пули в стык пластин — показало, что при разработке брони требуется дополнительно укреплять стык пластин. Для сравнения в табл. 2 приведены данные о баллистической стойкости расчетных моделей при разных углах контакта ударника (плюс означает, что запреградная скорость ударника есть, минус — что ее нет).

Таблица 2

Баллистическая стойкость расчетных моделей

Угол контакта, град	Номер модели					
	1	2	3	4	5	6
90	+	–	+	–	–	+
75	+	–	+	–	–	+
60	–	–	+	–	–	–
45	–	–	–	–	–	–
30	–	–	–	–	–	–
20	–	–	–	–	–	–

Закключение. В результате проведенного анализа выявлено, что уменьшение толщины лицевого слоя защитной структуры приводит к уменьшению угла проскальзывания. Алюминиевые плиты с минимальной и средней толщиной внешнего слоя (варианты 4 и 5) имеют минимальные углы проскальзывания, 23 и 26° соответственно. Такие плиты рекомендованы для установки в эвакуационные капсулы для минимизации сопутствующих потерь. Увеличение толщины лицевого слоя приводит к увеличению угла проскальзывания. Стальные пластины, варианты 2, 3 и алюминиевая пластина, вариант 6 имеют наибольшие углы проскальзывания и не могут быть рекомендованы для установки в эвакуационные капсулы, так как будут способствовать сопутствующим потерям.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] 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
- [2] Шаш Н., Зузов В.Н. Численное исследование влияния угла контакта пули 7,62 мм «АРМ2» и бронелистов кабин бронеавтомобилей из стальных сплавов на степень проникновения пули. *Известия вузов. Машиностроение*, 2018, № 3 (696), с. 41–54. DOI: 10.18698/0536-1044-2018-3-41-54
- [3] Børvik T., Olovsson L., Dey S., Langseth M. Normal and oblique impact of small arms bullets on AA6082-T4 aluminium protective plates. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, vol. 38, iss. 7, pp. 577–589. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2011.02.001
- [4] Fawaz Z., Zheng W., Behdinan K. Numerical simulation of normal and oblique ballistic impact on ceramic composite armours. *Composite Structures*, 2004, vol. 63, pp. 387–395.
- [5] Bhuarya M., Rajput M., Gupta A. Finite element simulation of impact on metal plate. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 173, pp. 259–263. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.12.009
- [6] Rajagopal A., Naik N. Oblique ballistic impact behavior of composites. *International Journal of Damage Mechanics*, 2013, vol. 23, pp. 453–482. DOI: 10.1177/1056789513499268
- [7] Iqbal M.A., Senthil K., Madhu V., Gupta N.K. Oblique impact on single, layered and spaced mild steel targets by 7.62 AP projectiles. *International Journal of Impact Engineering*, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2017.04.011>
- [8] Moslemi Petrudi A., Vahedi Kh., Rahmani M., Petrudi M.A. Numerical and analytical simulation of ballistic projectile penetration due to high velocity impact on ceramic target. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 2020, vol. 14, pp. 226–248. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.54.17
- [9] Luo D., Wang Y., Wang F., Cheng H., Zhu Y. Ballistic behavior of oblique ceramic composite structure against long-rod tungsten projectiles. *Materials*, 2019, vol. 12 (18), article 2946. <https://doi.org/10.3390/ma12182946>
- [10] 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

Статья поступила в редакцию 24.03.2026

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Зузов В.Н., Яковлев Д.А. Влияние степени проникания ударника на защитные свойства многослойной структуры при разных углах контакта. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2026, вып. 8. EDN GQTFMT

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

Influence of Projectile Penetration Depth on the Protective Performance of a Multilayer Structure under Different Impact Angles

© V.N. Zuzov, D.A. Yakovlev

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

Modern computational studies of vehicle armor are most often focused on ensuring that protection meets international standard EN 1063, which takes into account only frontal impact of the projectile. Accounting for the effect of the contact angle and minimizing the glancing angle (the angle at which the projectile continues its relative motion along the barrier surface) is a research problem that is often overlooked. Its goal is to minimize associated losses during evacuation, i.e., to ensure minimal kinetic energy after contact with the protective structure. Based on developed rational computational models using established approaches within the LS-DYNA software package, a computational study has been conducted on the effect of the projectile penetration depth into protective multilayer structures made with loose granular material at different contact angles. The influence of the thickness of the outer shell layers on the plates stopping capability under frontal impact at various angles is demonstrated, followed by determination of the glancing angle. A boundary-value problem — bullet impact at the joint between plates — is also considered. The study used Dragunov sniper rifle 7.62 mm caliber APM2 bullets considering an initial muzzle velocity. The results of this work allow employing new-type armor for civilian vehicles comprehensive assessment.

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

REFERENCES

- [1] Zuzov V.N., Yakovlev D.A. Vliyanie svoystv materiala zaschitnykh struktur na pronikayushuyu sposobnost udarnika pri vysokoskorostnom ballisticheskom vozdeystviy [Computational study of the effect of material properties of protective structures made using corundum sand under high-speed ballistic impact]. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2026, iss. 4. EDN RQHXLW
- [2] Shash N., Zuzov V.N. Chislennoe issledovanie vliyaniya ugla kontakta puli 7.62 mm “APM2” i broneolistov kabin broneavtomobiley iz stalnykh splavov na stepen proniknoveniya puli [Numerical simulation of the impact of the contact angle between a 7.62 mm APM2 bullet and steel alloy armored plates of armored vehicle cabins on the degree of bullet penetration]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroyeniye — BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2018, no. 3 (696), pp. 41–54. DOI: 10.18698/0536-1044-2018-3-41-54
- [3] Børvik T., Olovsson L., Dey S., Langseth M. Normal and oblique impact of small arms bullets on AA6082-T4 aluminium protective plates. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, vol. 38, no. 7, pp. 577–589. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2011.02.001
- [4] Fawaz Z., Zheng W., Behdinan K. Numerical simulation of normal and oblique ballistic impact on ceramic composite armours. *Composite Structures*, 2004, vol. 63, no. 3–4, pp. 387–395.

- [5] Bhuarya M., Rajput M., Gupta A. Finite element simulation of impact on metal plate. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 173, pp. 259–263.
DOI: 10.1016/j.proeng.2016.12.009
- [6] Rajagopal A., Naik N.K. Oblique ballistic impact behavior of composites. *International Journal of Damage Mechanics*, 2014, vol. 23, no. 4, pp. 453–482.
DOI: 10.1177/1056789513499268
- [7] Iqbal M.A., Senthil K., Bhargava P., Gupta N.K. Oblique impact on single, layered and spaced mild steel targets by 7.62 AP projectiles. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, vol. 110, pp. 26–37.
DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2017.04.011
- [8] Moslemi Petrudi A., Vahedi K., Rahmani M., Petrudi M.A. Numerical and analytical simulation of ballistic projectile penetration due to high velocity impact on ceramic target. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 2020, vol. 14, no. 54, pp. 226–248. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.54.17
- [9] Luo D., Wang Y., Wang F., Cheng H., Zhu Y. Ballistic behavior of oblique ceramic composite structure against long-rod tungsten projectiles. *Materials*, 2019, vol. 12, no. 18, art. 2946. DOI: 10.3390/ma12182946
- [10] Zuzov V.N., Yakovlev D.A. Issledovanie vliyaniya osnovnykh parametrov modelei sypuchikh pregrad (korundovogo peska) na soprotivlenie pronikaniyu tverdogo tela pri vysokoskorostnom ballisticheskoy vozddeystvii [Investigation of the influence of the main parameters of granular barrier models (corundum sand) on the penetration resistance of a rigid body under high-velocity ballistic impact]. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2025, iss. 8. EDN ZITHOZ

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