

УДК 539.3

DOI: 10.32326/1814-9146-2021-83-2-137-150

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПО ПРОБИВАНИЮ ХРУПКИХ СЛОИСТЫХ ПРЕГРАД*

© 2021 г. **Баничук Н.В., Иванова С.Ю., Осипенко К.Ю.**

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН,
Москва, Российская Федерация*

banichuk@ipmnet.ru

Поступила в редакцию 24.03.2021

Проведено экспериментальное исследование процесса пробивания пластин из хрупких материалов жесткими сферическими ударниками, которые разгонялись до требуемой скорости пневматической пушкой. В качестве мишеней рассматривались как однородные пластины, так и преграды из нескольких пластин, склеенных между собой, составленных вместе без склеивания или разнесенных друг относительно друга. Представлены результаты экспериментов по пробиванию пластин из оргстекла жесткими сферическими телами при скоростях соударения 100–200 м/с. Выявлены качественные особенности характера разрушения при различных скоростях соударения. Для рассмотренных образцов установлено, что разнесенные пластины более эффективно снижают скорость ударника при пробивании, чем те же пластины, составленные вместе. Проведен ряд экспериментов по пробиванию жестким сферическим ударником двух составленных вместе пластин из различных хрупких материалов: оргстекла, керамики, искусственного камня (полиакрил, кварц) – для диапазона скоростей 200–350 м/с. Для каждого рассмотренного сочетания пластин был экспериментально установлен баллистический предел (предельная баллистическая скорость, при которой ударник пробивает преграду с нулевой скоростью на выходе), характеризующий защитные свойства преграды. Изучалось влияние на баллистический предел порядка размещения слоев. В результате было установлено, что для всех выбранных пар материалов больший баллистический предел достигался, когда за более плотной пластиной (из керамики или из искусственного полиакрилового или кварцевого камня) располагался менее плотный и менее хрупкий слой оргстекла. Обратный порядок слоев во всех случаях приводил к снижению баллистического предела. Представлены фото, иллюстрирующие характер разрушения пластин.

Ключевые слова: пробивание, баллистический предел, хрупкие слоистые преграды.

Введение

Исследование процесса пробивания пластин и пластинчатых слоистых структур из хрупких (например, керамических) материалов жесткими ударниками пред-

* Выполнено по теме Госзадания (номер госрегистрации АААА-А20-120011690132-4).

ставляет теоретический и практический интерес. Это связано с высокой твердостью, прочностью на сжатие и большим модулем упругости керамики. Однако керамические материалы имеют низкую прочность на растяжение, поэтому они могут уступать стальным преградам. Подробный обзор результатов по пробиванию стальных преград имеется в книгах [1, 2]. Экспериментальные исследования по пробиванию металлических и керамических преград с различной толщиной мишени отражены в статьях [3–5]. При одинаковых скоростях удара измерялись остаточные скорости ударника в зависимости от толщины мишени. Аналитическое и численное моделирование процесса пробивания керамических и составных преград (первый слой – керамика, второй – композит или металл) представлено в [6–14]. Подробный обзор моделей пробивания имеется в [12, 15]. В [16] на основе измерения глубины проникания исследовалась эффективность защитной структуры, состоящей из толстого металлического слоя с наложенной на него керамической плиткой. К. Франком [17] были введены такие безразмерные баллистические характеристики защитных броневых систем, как пространственная и массовая эффективность, в [18] предложен коэффициент дифференциальной баллистической эффективности, учитывающий поверхностную плотность и глубину проникания. Значительное число публикаций посвящено экспериментальному и численному изучению процесса пробивания различных керамических и двуслойных керамо-алюминиевых преград. Отметим в этой связи исследования [19–28]. Достаточно интенсивно исследовались двухслойные защитные экраны, состоящие из фронтального керамического слоя и расположенного за ним пластичного или вязкого слоя. Обзор по исследованиям в этом направлении можно найти в [2, 6, 11, 15]. В статье Г. Бен-Дора, А. Дубинского и Т. Эльперина [13] рассматривается слоистая защитная структура из нескольких керамических пластин, изготовленных из различных материалов. В ней авторы на основе модели, предложенной А. Флоренсом [6], определяют оптимальный порядок укладки керамических слоев разной плотности с целью увеличения предельной баллистической скорости ударника. Аналитически показано, что плотность слоев для этого должна возрастать в направлении движения ударника. Исследования по отысканию оптимального порядка укладки металлических пластин слоистой структуры для повышения ее защитных свойств при пробивании жесткими ударниками проводились ранее в [29–31].

В настоящей статье представлены результаты экспериментального изучения процесса пробивания слоистых преград из хрупких материалов жесткими ударниками. Проведено экспериментальное исследование по пробиванию пластин из оргстекла жесткими сферическими телами при скоростях соударения в диапазоне 100–200 м/с. При этом рассматривались как однородные пластины, так и композитные пакеты из отдельных пластин, склеенных между собой, составленных вместе без склеивания или разнесенных друг относительно друга. Выявлены качественные особенности характера разрушения при различных скоростях соударения. Отмечено, что пакет из разнесенных пластин более эффективно снижает скорость ударника при пробивании, чем пакет из пластин, составленных вместе.

Другая часть статьи посвящена пробиванию стальным шаром двух совмещенных пластин из разных материалов (например, керамического слоя и слоя оргстекла). Изучалось влияние на баллистический предел порядка размещения слоев. При пробивании преград измерялась остаточная скорость. Из экспериментов следует, что для всех выбранных пар материалов больший баллистический предел дости-

гался, когда за более плотной керамической пластиной (или пластиной из искусственного полиакрилового или кварцевого камня) располагался менее плотный и менее хрупкий слой оргстекла. Обратный порядок слоев приводил к снижению баллистического предела.

1. Пробивание пластин из оргстекла

Экспериментально исследовано пробивание отдельных пластин и пакета из двух или трех пластин стальным шаром, имеющим диаметр $d = 0,01$ м и массу $m = 0,004$ кг. Пластины толщиной $h = 0,003$ м, изготовленные из оргстекла ТОСП, ГОСТ 17622-72 (плотность $\rho = 1190$ кг/м³, модуль упругости при растяжении $E = 3000$ МПа), имели форму квадрата со стороной $a = 0,1$ м и устанавливались и жестко фиксировались по трем сторонам перпендикулярно направлению движения ударника, который разгонялся пневматической пушкой. Четвертая (верхняя) сторона пластин оставалась свободной. Давление в камере пушки устанавливалось таким образом, чтобы скорость вылета ударника составляла приблизительно от 120 до 200 м/с в зависимости от совокупной толщины пробиваемой мишени. Скорость ударника на вылете из ствола пушки принималась за скорость входа в пластину v_1 , сопротивлением воздуха движению тела можно было пренебречь в силу небольших размеров экспериментальной установки. Скорости входа v_1 и выхода из пластины v_2 измерялись с помощью оптических рамочных хронографов ИБХ-АСС-0022 «Стрелец». Во всех экспериментах пластинам присваивались номера 1, 2 или 3, считая по направлению движения тела. Цель исследования – изучение особенностей пробивания пластин в зависимости от подлетной скорости ударника и изучение влияния свободных поверхностей на изменение скорости ударника при пробивании пакета из разнесенных пластин. Расстояние между разнесенными пластинами $H = 0,1$ м.

На рис. 1 и 2 представлены фотографии двух последовательно пробиваемых разнесенных пластин из оргстекла при скоростях входа ударника $v_1 = 143,2$ м/с и $v_1 = 173,6$ м/с соответственно. В обоих случаях наблюдался существенный рост радиальных трещин во второй пластине. Диаметр пробиваемого отверстия (каверны) у второй пластины в первом представленном случае (см. рис. 1) был меньше, чем у первой пластины. Во втором случае при большей скорости входа (см. рис. 2) диаметр отверстия у второй пластины был больше, чем у первой.

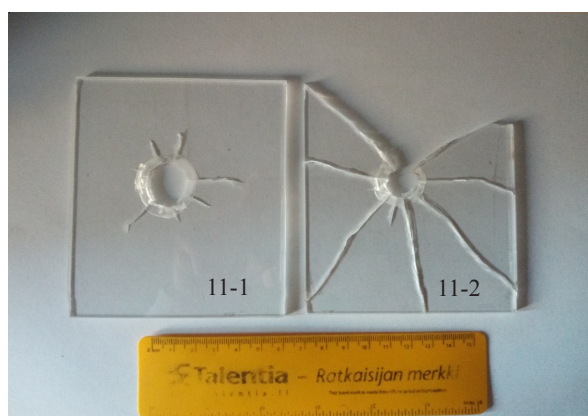
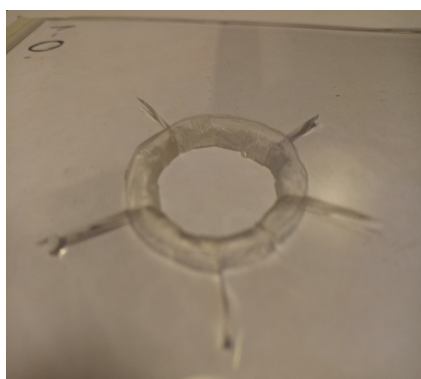


Рис. 1. Пробивание двух разнесенных пластин при $v_1 = 143,2$ м/с

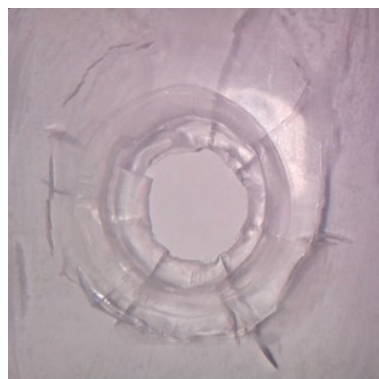


Рис. 2. Пробивание двух разнесенных пластин при $v_1 = 173,6$ м/с

Боковая поверхность каверн имела коническую форму, расширяющуюся по ходу движения шарика (рис. 3а).



а)



б)

Рис. 3. Боковая поверхность каверн

Проведена серия опытов по пробиванию одиночных пластин при различных скоростях ударника и установлено, что при более высоких скоростях (~ 170 – 200 м/с) диаметр каверны мал и радиальные трещины только зарождаются. При снижении скорости ударника до величины ~ 140 м/с диаметр отверстия возрастает и существенно увеличивается длина радиальных трещин. При дальнейшем снижении скорости входа (меньше 120 м/с) диаметр отверстия снова становится малым, а трещины достигают критических размеров и пластина рассыпается. Количество радиальных трещин во всех экспериментах оставалось примерно одинаковым (8–10) и не зависело от скорости ударника.

Были проведены эксперименты по пробиванию двух совмещенных и двух разнесенных пластин. Фиксировалось относительное изменение скорости (энергии) ударника при пробивании двух пластин при разных значениях скорости входа. Результаты опытов приведены в виде диаграмм на рис. 4 и 5 для совмещенных и разнесенных пластин соответственно. Эксперименты показали, что потеря энергии ударника больше при пробивании разнесенных пластин. Также видно, что потери в скорости и в энергии уменьшаются при возрастании скорости входа ударника.

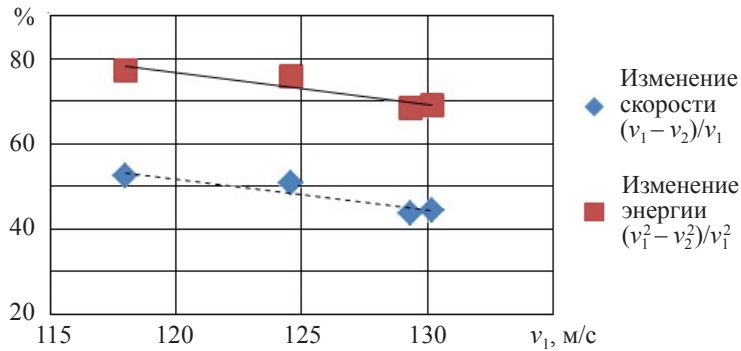


Рис. 4. Зависимости относительного изменения скорости и энергии ударника от скорости входа при пробивании двух совмещенных пластин

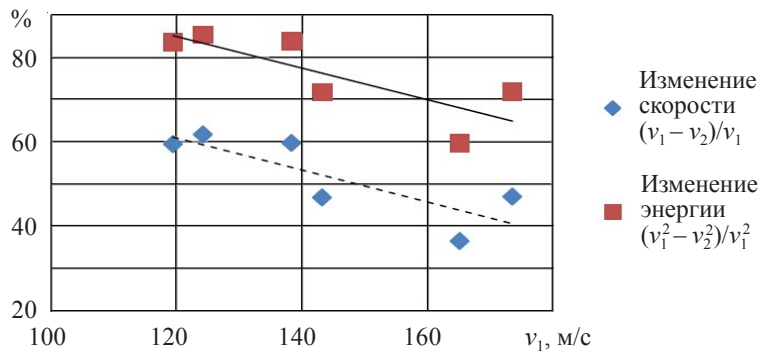


Рис. 5. Зависимости относительного изменения скорости и энергии ударника от скорости входа при пробивании двух разнесенных пластин

Результаты экспериментов по пробиванию пакета из двух склеенных пластин представлены на рис. 6.

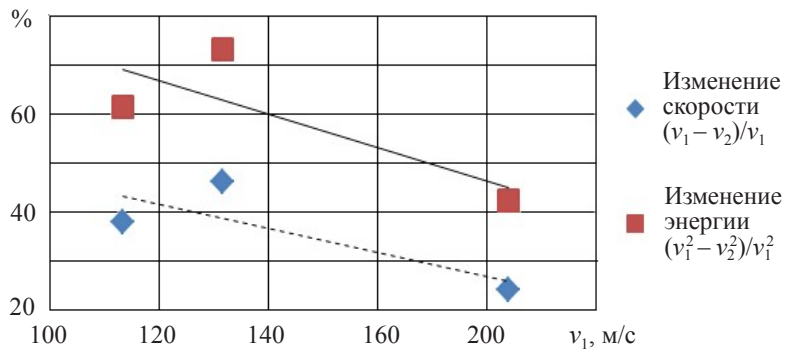


Рис. 6. Зависимости относительного изменения скорости и энергии ударника от скорости входа при пробивании пакета из двух склеенных пластин

В случае пробивания двух или трех склеенных между собой пластин наблюдалось ступенчатое расширение каверны в направлении движения ударника. Вид такой каверны представлен на рис. 3б. Пластины склеивались клеем на основе цианакрилата.

2. Пробивание двух составленных вместе пластин из различных хрупких материалов

Была проведена серия экспериментов по изучению процесса пробивания двух совмещенных пластин из различных хрупких материалов стальным шаром, имеющим диаметр $d = 0,01$ м и массу $m = 0,004$ кг. Для опытов использовались квадратные пластины со стороной 0,1 м. Пластины из оргстекла имели толщину $h_{pl} = 0,01$ м и плотность $\rho_{pl} = 1190$ кг/м³, керамические пластины – толщину $h_c = 0,006$ м и плотность $\rho_c = 1950$ кг/м³. Также в экспериментах использовались пластины из искусственного полиакрилового камня ($h_a = 0,012$ м, $\rho_a = 1740$ кг/м³) и кварцевого камня ($h_q = 0,01$ м, $\rho_q = 2300$ кг/м³). Две совмещенные пластины жестко зажимались в специальном штативе (рис. 7) и фиксировались на экспериментальном стенде.

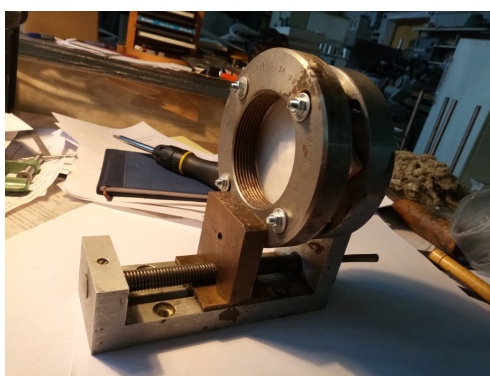


Рис. 7. Закрепление пластин в штативе

Скорости входа v_1 и выхода v_2 тела из двухслойной преграды измерялись двумя оптическими рамочными хронографами. Чтобы предотвратить попадание во второй хронограф разлетающихся при ударе осколков и исключить возможное измерение им скорости движения осколка вместо скорости выхода ударника, сразу за пакетом пластин был размещен блок из мягкого пенопласта толщиной 0,1 м, а второй хронограф помещен за этим блоком. При этом измеренная скорость ударника могла быть меньше реальной скорости примерно на 10 м/с. В результате проведенных экспериментов были установлены баллистические пределы (определены предельные баллистические скорости (BLV) ударника, реализующие пробивание ударником обеих пластин с нулевой скоростью выхода). Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1

Номер эксперимента (i)	Кол-во слоев в пакете	1-й слой; ρ , кг/м ³	2-й слой; ρ , кг/м ³	BLV, м/с
1	2	Керамика; 1950	Оргстекло; 1190	270,2
6	2	Оргстекло; 1190	Керамика; 1950	237,9
12	2	Оргстекло; 1190	Полиакриловый камень; 1740	309,1
13	2	Полиакриловый камень; 1740	Оргстекло; 1190	316,3; отскок
14	2	Оргстекло; 1190	Кварцевый камень; 2300	308
16	2	Кварцевый камень; 2300	Оргстекло; 1190	320,6

Во всех опытах, когда был зафиксирован баллистический предел, ударник не пробивал пенопластовый блок, а застревал в нем или падал рядом, отскочив с малой скоростью. На рис. 8–14 представлены фотографии результатов пробивания пластин в экспериментах, когда были достигнуты баллистические пределы.

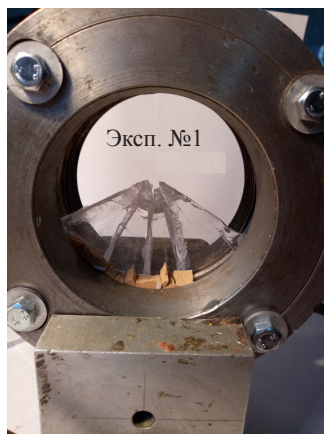


Рис. 8. Эксперимент №1: первый слой – керамика, второй – оргстекло

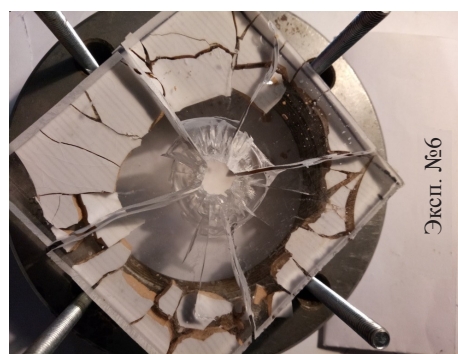


Рис. 9. Эксперимент №6: первый слой – оргстекло, второй – керамика

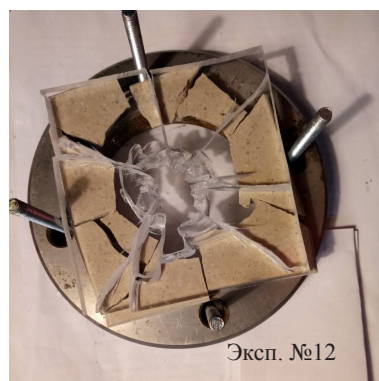


Рис. 10. Эксперимент №12: первый слой – оргстекло, второй – искусственный полиакриловый камень

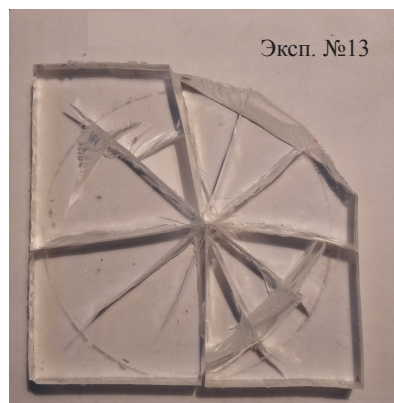


Рис. 11. Эксперимент №13: первый слой – искусственный полиакриловый камень, второй – оргстекло (наблюдался отскок)

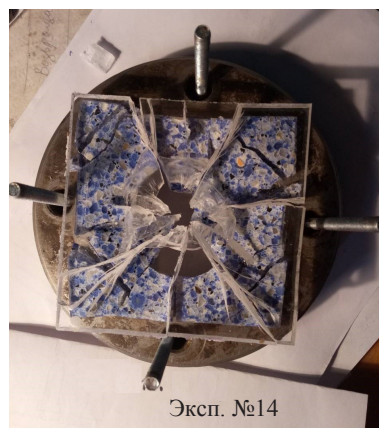
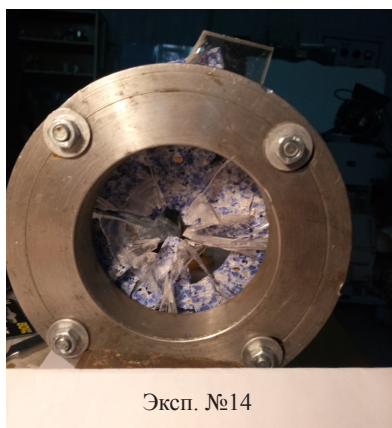


Рис. 12. Эксперимент №14: первый слой – оргстекло, второй – искусственный кварцевый камень

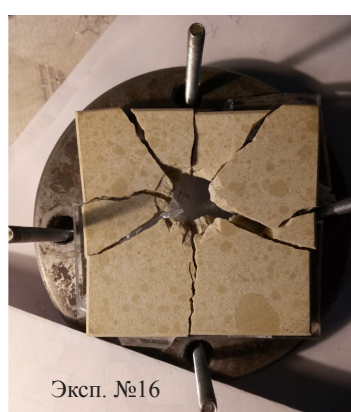


Рис. 13. Эксперимент №16: первый слой – искусственный кварцевый камень, второй – оргстекло

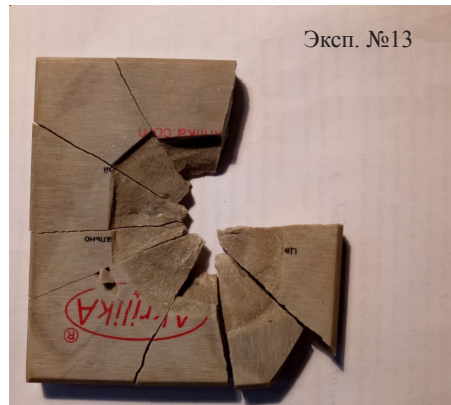


Рис. 14. Эксперимент №13: разрушение первого слоя (искусственный полиакриловый камень). Боковая поверхность каверны

В проведенных экспериментах характер разрушения пластин из оргстекла в целом соответствовал описанию из п. 1. Следует отметить, что при пробивании пластин из оргстекла при скоростях ударника порядка 300 м/с наблюдалось явление разветвления трещин. Это можно видеть на рис. 10 и 12. Разрушение керамических пластин характеризовалось образованием сетки из радиальных и концентрических трещин, что приводило к рассыпанию мишени (см. рис. 8 и 9). При разрушении пластин из искусственного камня, как и при разрушении пластин из оргстекла, наблюдалось образование небольшого числа радиальных трещин и каверны с конической боковой поверхностью. В отличие от оргстекла, эта поверхность была не ступенчатой, а более ровной (см. рис. 14).

В статье [13] авторы на основе модели, предложенной А. Флоренсом [6], определяют оптимальный порядок укладки керамических слоев разной плотности с целью увеличить предельную баллистическую скорость ударника. Показано, что плотность слоев для этого должна возрастать в направлении движения ударника. Из приведенных в таблице 1 данных можно сделать вывод, что для всех выбранных пар материалов больший баллистический предел достигался, когда плотность первой пластины превосходила плотность второй. Однако следует заметить, что проведенные эксперименты не полностью соответствовали расчетной модели, предложенной в [13]. В эксперименте не присутствовал последний пластичный («ductile») слой, описанный в статье [13].

Некоторые замечания и выводы

Представлены результаты экспериментального изучения процесса пробивания жесткими ударниками пластин из хрупких материалов: оргстекла, керамики, искусственного камня (полиакрил, кварц). Проведено экспериментальное исследование по пробиванию пластин из оргстекла жесткими сферическими телами при скоростях соударения 100–200 м/с. Рассматривались как однородные пластины, так и композитные пакеты из отдельных пластин, склеенных между собой, составленных вместе без склеивания или разнесенных друг относительно друга. Выявлены качественные особенности характера разрушения при различных скоростях соударения. Отмечено, что пакет из разнесенных пластин более эффективно гасил скорость ударника при пробивании, чем пакет из пластин, составленных вместе.

Также экспериментально исследовалось пробивание стальным шаром двух со-
вмещенных пластин из разных материалов (например, керамического слоя и слоя
оргстекла). Изучалось влияние на баллистический предел порядка размещения слоев.
Из экспериментов следует, что для всех выбранных пар материалов больший бал-
листический предел достигался, когда за более плотной керамической пластиной
(или пластиной из искусственного полиакрилового или кварцевого камня) распола-
гался менее плотный и менее хрупкий слой оргстекла. Обратный порядок слоев
приводил к снижению баллистического предела.

Список литературы

1. Rosenberg Z., Dekel E. *Terminal Ballistic*. Berlin: Springer-Verlag, 2012. 323 p.
2. Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T. *High-Speed Penetration Dynamics: Engineering Models and Methods*. Singapore: World Scientific Publishing, 2013. 696 p.
3. Wilkins M.L. Mechanics of penetration and perforation. *International Journal of Engineering Science*. 1978. Vol. 16. Iss. 11. P. 793–807. [https://doi.org/10.1016/0020-7225\(78\)90066-6](https://doi.org/10.1016/0020-7225(78)90066-6).
4. Myseless M., Goldsmith W., Virostek S.P., Finnegan S.A. Impact of ceramic targets. *Journal Applied Mechanics*. 1987. Vol. 54. No 2. P. 373–378.
5. Shocky D.A., Marchand A.H., Skaggs S.R. et al. Failure phenomenology of confined ceramic targets and impacting rods. *International Journal of Engineering Science*. 1990. Vol. 9. No 3. P. 263–275.
6. Florence A.L. Interaction of projectiles and composite armor. *Report AMMRC-CR-69-15, Part 2*. Menlo Park, CA: Stanford Research Institute, 1969.
7. Zaera R., Sánchez-Gálvez V. Analytical modelling of normal and oblique ballistic impact on ceramic/metal lightweight armours. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 1998. Vol. 21. Iss. 3. P. 133–148. DOI: 10.1016/S0734-743X(97)00035-3.
8. Goncalves D.P., De Melo F.C.L., Klein A.N., Al-Qureshi H.A. Analysis and investigation of ballistic impact on ceramic/metal composite armour. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2004. Vol. 44. No 2-3. P. 307–316. DOI:10.1016/j.ijmachtools.2003.09.005.
9. Sánchez-Gálvez V., Sánchez Paradelo L. Analysis of failure of add on armour for vehicle protection against ballistic impact. *Engineering Failure Analysis*. 2009. Vol. 16. Iss. 6. P. 1837–1845. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2008.09.007.
10. Krishnan K., Sockalingam S., Bansal S., Rajan S.D. Numerical simulation of ceramic composite armor subjected to ballistic impact. *Composites. Part B: Engineering*. 2010. Vol. 41. Iss. 8. P. 583–593. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2010.10.001>.
11. Zaera R. Ballistic impacts on polymer matrix composites, composite armor, personal armor. In: *Impact Engineering of Composite Structures*. Ed. S. Abrate. Wien–New York: Springer, 2011. P. 305–403.
12. Naik N.K., Kumar S., Ratnaveer D., Joshi M., Akella K. An energy-based model for ballistic impact analysis of ceramic-composite armours. *International Journal of Damage Mechanics*. 2013. Vol. 22. No 2. P. 145–187. DOI:10.1177/1056789511435346.
13. Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T. Optimization of ballistic properties of layered ceramic armor with a ductile back plate. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*. 2018. Vol. 46. Iss. 1. P. 18–22. <https://doi.org/10.1080/15397734.2016.1261035>.
14. Кобылкин И.Ф., Горбатенко А.А. Аналитическая модель пробития керамико-металлических защитных преград и их оптимизация. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*. 2018. № 2. С. 17–30. DOI: 10.18698/0236-3941-2018-2-17-30.
15. Sonmez F.O. Optimum design of composite structures: A literature survey (1969–2009). *Journal of Reinforced Plastics & Composites*. 2017. Vol. 36. No 1. P. 3–39. <https://doi.org/10.1177/0731684416668262>.
16. Rosenberg Z., Bless S.J., Yeshurun Y., Okajima K. A new definition of ballistic efficiency of brittle materials based on the use of thick backing plates. In: *Impact Loading and Dynamic Behavior of Materials*. Vol. 1. Eds. C.Y. Chiem, H.D. Kunze, L.W. Meyer. Oberursel: DGM-Informationsgesellschaft, 1988. P. 491–498.

17. Frank K. Armor-penetrator performance measures. *Memorandum Report ARBRL-MR-03097*. Aberdeen, USA: Army ballistic research lab., 1981.
18. Yaziv D., Rosenberg G., Partom Y. Differential ballistic efficiency of appliqué armor. *Proceedings of the 9th International Symposium on Ballistics*. 29 Apr. – 1 May 1986. Shrivenham, UK. 1986. P. 315–319.
19. Johnson G.R., Holmquist T.J. A computational model for brittle materials subject to large strains, high strain rates and high pressures. In: *Shock Wave and High Strain Rates Phenomena in Materials*. Ed. M.A. Meyers. Jolla, California: CRC Press, 1992. P. 1075–1081.
20. Johnson G.R., Holmquist T.J. An improved computational constitutive model for brittle materials. *AIP Conference Proceedings*. 1994. Vol. 309. No 1. P. 981–984. DOI:10.1063/1.46199.
21. Madhu V., Ramanjaneyulu K., Bhat T.B., Gupta N.K. An experimental study of penetration resistance of ceramic armour subjected to projectile impact. *International Journal of Impact Engineering*. 2005. Vol. 32. Iss. 1–4. P. 337–350. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2005.03.004.
22. Børvik T., Forrestal M.J., Hopperstad O.S., Warren T.L., Langseth M. Perforation of AA5083-H116 aluminium plates with conical-nose steel projectiles-calculations. *International Journal of Impact Engineering*. 2009. Vol. 36. Iss. 3. P. 426–437. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2008.02.004.
23. Grytten F., Børvik T., Hopperstad O.S., Langseth M. Low velocity perforation of AA5083-H116 aluminium plates. *International Journal of Impact Engineering*. 2009. Vol. 36. Iss 4. P. 597–610. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2008.09.002.
24. Savio S.G., Ramanjaneyulu K., Madhu V., Bhat T.B. An experimental study on ballistic performance of boron carbide tiles. *International Journal of Impact Engineering*. 2011. Vol. 38. No 7. P. 535–541. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2011.01.006.
25. Pawar M.J., Patnaik A., Biswas S.K., Pandel U., Bhat I.K., Chatterjee S., Mukhopadhyay A.K., Banerjee R., Babu B.P. Comparison of ballistic performances of Al₂O₃ and AlN ceramics. *International Journal of Impact Engineering*. 2016. Vol. 98. P. 42–51. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2016.08.002.
26. Wang C., Xu W., Li T. Experimental and numerical studies on penetration of shaped charge into concrete and pebble layered targets. *International Journal of Multiphysics*. 2017. Vol. 11. No 3. P. 295–314. DOI: 10.21152/1750-9548.11.3.295.
27. Jinzhu L., Liansheng Z., Fenglei H. Experiments and simulations of tungsten alloy rods penetrating into alumina ceramic/603 armor steel composite targets. *International Journal of Multiphysics*. 2017. Vol. 101. P. 1–8. DOI:10.1016/j.ijimpeng.2016.09.009.
28. Venkatesan J., Iqbal M.A., Madhu V. Ballistic performance of bilayer alumina/aluminium and silicon carbide/aluminium armours. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 173. P. 671–678. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.12.141.
29. Баничук Н.В., Иванова С.Ю., Макеев Е.В. Проникание жестких ударников в слоистые пластины и некоторые задачи глобальной многоцелевой структурной оптимизации. *Проблемы прочности и пластичности*. 2012. Вып. 74. С. 124–133. <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2012-74-1-124-133>.
30. Баничук Н.В., Иванова С.Ю. Игровой подход к решению задачи оптимизации формы ударника и структуры слоистой среды при высокоскоростном пробивании. *Проблемы прочности и пластичности*. 2016. Т. 78. №4. С. 426–435. <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2016-78-4-426-435>.
31. Баничук Н.В., Иванова С.Ю. *Оптимизация: контактные задачи и высокоскоростное проникание*. М.: Физматлит, 2016. 176 с.

References

1. Rosenberg Z., Dekel E. *Terminal Ballistic*. Berlin. Springer-Verlag. 2012. 323 p.
2. Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T. *High-Speed Penetration Dynamics: Engineering Models and Methods*. Singapore. World Scientific Publishing. 2013. 696 p.
3. Wilkins M.L. Mechanics of penetration and perforation. *Int. J. Eng. Sci.* 1978. Vol. 16. Iss. 11. P. 793–807. [https://doi.org/10.1016/0020-7225\(78\)90066-6](https://doi.org/10.1016/0020-7225(78)90066-6).

4. Myseless M. Impact of ceramic targets. *J. Appl. Mech.* 1987. Vol. 54. No 2. P. 373–378.
5. Shocky D.A., Marchand A.H., Skaggs S.R. et al. Failure phenomenology of confined ceramic targets and impacting rods. *Int. J. Eng. Sci.* 1990. Vol. 9. No 3. P. 263–275.
6. Florence A.L. Interaction of projectiles and composite armor. *Report AMMRC-CR-69-15, Part 2.* Menlo Park, CA. Stanford Research Institute. 1969.
7. Zaera R., Sánchez-Gálvez V. Analytical modelling of normal and oblique ballistic impact on ceramic/metal lightweight armours. *Int. J. Imp. Eng.* 1998. Vol. 21. Iss. 3. P. 133–148. DOI: 10.1016/S0734-743X(97)00035-3.
8. Goncalves D.P., De Melo F.C.L., Klein A.N., Al-Qureshi H.A. Analysis and investigation of ballistic impact on ceramic/metal composite armour. *Int. J. Mach. Tools Manufact.* 2004. Vol. 44. No 2-3. P. 307–316. DOI:10.1016/j.ijmachtools.2003.09.005.
9. Sánchez-Gálvez V., Sánchez Paradela L. Analysis of failure of add on armour for vehicle protection against ballistic impact. *Eng. Fail. Analysis.* 2009. Vol. 16. Iss. 6. P. 1837–1845. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2008.09.007.
10. Krishnan K., Sockalingam S., Bansal S., Rajan S.D. Numerical simulation of ceramic composite armor subjected to ballistic impact. *Composites. Part B: Engineering.* 2010. Vol. 41. Iss. 8. P. 583–593. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2010.10.001>.
11. Zaera R. Ballistic impacts on polymer matrix composites, composite armor, personal armor. In: *Impact Engineering of Composite Structures.* Ed. S. Abrate. Wien. New York. Springer. 2011. P. 305–403.
12. Naik N.K., Kumar S., Ratnaveer D., Joshi M., Akella K. An energy-based model for ballistic impact analysis of ceramic-composite armors. *Int. J. Damage Mech.* 2013. Vol. 22. No 2. P. 145–187. DOI: 10.1177/1056789511435346.
13. Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T. Optimization of ballistic properties of layered ceramic armor with a ductile back plate. *Mech. Based Des. Struct. Mach.* 2018. Vol. 46. Iss. 1. P. 18–22. <https://doi.org/10.1080/15397734.2016.1261035>.
14. Kobylkin I.F., Gorbatenko A.A. Analiticheskaya model probityi keramiko-metallicheskih zashchitnykh pregrad i ikh optimizatsiya [Analytical model of trough-penetration of ceramic-metal protective barriers and optimization of such barriers]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya Mashinostroenie [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering]*. 2018. No 2. P. 17–30. DOI: 10.18698/0236-3941-2018-2-17-30 (In Russian).
15. Sonmez F.O. Optimum design of composite structures: A literature survey (1969–2009). *J. Reinforced Plastics Compos.* 2017. Vol. 36. No 1. P. 3–39. <https://doi.org/10.1177/0731684416668262>.
16. Rosenberg Z., Bless S.J., Yeshurun Y., Okajima K. A new definition of ballistic efficiency of brittle materials based on the use of thick backing plates. In: *Impact Loading and Dynamic Behavior of Materials.* Vol. 1. Eds. C.Y. Chiem, H.D. Kunze, L.W. Meyer. Oberursel. DGM-Informationsgesellschaft. 1988. P. 491–498.
17. Frank K. Armor-penetrator performance measures. *Memorandum Report ARBRL-MR-03097.* Aberdeen, USA. Army ballistic research lab. 1981.
18. Yaziv D., Rosenberg G., Partom Y. Differential ballistic efficiency of appliqué armor. *Proceedings of the 9th International Symposium on Ballistics.* 29 Apr. – 1 May 1986. Shrivenham, UK. 1986. P. 315–319.
19. Johnson G.R., Holmquist T.J. A computational model for brittle materials subject to large strains, high strain rates and high pressures. In: *Shock Wave and High Strain Rates Phenomena in Materials.* Ed. M.A. Meyers. Jolla, California. CRC Press. 1992. P. 1075–1081.
20. Johnson G.R., Holmquist T.J. An improved computational constitutive model for brittle materials. *AIP Conference Proceedings.* 1994. Vol. 309. No 1. P. 981–984. DOI:10.1063/1.46199.
21. Madhu V., Ramanjaneyulu K., Bhat T.B., Gupta N.K. An experimental study of penetration resistance of ceramic armour subjected to projectile impact. *Int. J. Imp. Eng.* 2005. Vol. 32. Iss. 1–4. P. 337–350. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2005.03.004.
22. Børvik T., Forrestal M.J., Hopperstad O.S., Warren T.L., Langseth M. Perforation of AA5083-H116 aluminium plates with conical-nose steel projectiles-calculations. *Int. J. Imp. Eng.* 2009. Vol. 36. Iss. 3. P. 426–437. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2008.02.004.
23. Grytten F., Børvik T., Hopperstad O.S., Langseth M. Low velocity perforation of AA5083-

H116 aluminium plates. *Int. J. Imp. Eng.* 2009. Vol. 36. Iss 4. P. 597–610. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2008.09.002.

24. Savio S.G., Ramanjaneyulu K., Madhu V., Bhat T.B. An experimental study on ballistic performance of boron carbide tiles. *Int. J. Imp. Eng.* 2011. Vol. 38. No 7. P. 535–541. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2011.01.006.

25. Pawar M.J., Patnaik A., Biswas S.K., Pandel U., Bhat I.K., Chatterjee S., Mukhopadhyay A.K., Banerjee R., Babu B.P. Comparison of ballistic performances of Al₂O₃ and AlN ceramics. *Int. J. Imp. Eng.* 2016. Vol. 98. P. 42–51. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2016.08.002.

26. Wang C., Xu W., Li T. Experimental and numerical studies on penetration of shaped charge into concrete and pebble layered targets. *Int. J. Multiphysics.* 2017. Vol. 11. No 3. P. 295–314. DOI: 10.21152/1750-9548.11.3.295.

27. Jinzhu L., Liansheng Z., Fenglei H. Experiments and simulations of tungsten alloy rods penetrating into alumina ceramic/603 armor steel composite targets. *Int. J. Multiphysics.* 2017. Vol. 101. P. 1–8. DOI:10.1016/j.ijimpeng.2016.09.009.

28. Venkatesan J., Iqbal M.A., Madhu V. Ballistic performance of bilayer alumina/aluminium and silicon carbide/aluminium armours. *Proc. Eng.* 2017. Vol. 173. P. 671–678. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.12.141.

29. Banichuk N.V., Ivanova S.Yu., Makeev E.V. Pronikanie zhestkih udarnikov v sloistye plastiny i nekotorye zadachi global'noj mnogocelevoj strukturnoj optimizacii [Penetration of rigid strikers in layered plates and some problems of global multipurpose structural optimization]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2012. Iss. 74. P. 124–133. <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2012-74-1-124-133> (In Russian).

30. Banichuk N.V., Ivanova S.Yu. Igrovoj podhod k resheniyu zadachi optimizacii formy udarnika i struktury sloistoj sredy pri vysokoskorostnom probivanii [The game approach to solution of an impactor shape and layered structure medium optimization problem for high speed perforation]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2016. Vol. 78. No 4. P. 426–435. <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2016-78-4-426-435> (In Russian).

31. Banichuk N.V., Ivanova S.Y. *Optimal Structural Design. Contact Problems and High-Speed Penetration*. Berlin. Boston. Walter de Gruyter. 2017. 191 p.

EXPERIMENTAL STUDY ON PERFORATION OF BRITTLE LAYERED OBSTACLES

Banichuk N.V., Ivanova S.Yu., Osipenko K.Yu.

*Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation*

An experimental study of the process of perforation of plates made of brittle materials by rigid strikers has been carried out. The strikers were accelerated to the required speed with a pneumatic gun. Both homogeneous plates and obstacles from several plates glued together, put together without gluing, or spaced relative to each other were considered as targets. The results of experiments on the perforation of plexiglass plates by rigid spherical bodies at impact velocities of 100–200 m/s are presented. Qualitative features of the fracture at different velocities of impact are revealed. For the samples considered, it was found that spaced plates reduce the velocity of the striker during penetration more effectively than the same plates putted together. A set of experiments were also carried out on perforation of two combined plates made of various brittle materials: plexiglass, ceramics, artificial stone (polyacryl, quartz) by a rigid spherical striker for a velocity range of 200–350 m/s. For each considered combination of plates, a ballistic limit (ballistic limit velocity, BLV, at which the striker penetrates the obstacle with zero exit speed) was experimentally established, which characterizes the protective properties of the barrier. The effect on the ballistic limit of the order of the layers was studied. As a result, it was found that for all selected pairs of materials, a larger ballistic limit was achieved when a less dense and less brittle plexiglass layer was located

behind a denser plate (made of ceramic or artificial polyacrylic or quartz stone). The reverse order of the layers led to a decrease in the ballistic limit in all cases. Photographs illustrating the nature of the destruction of the plates are presented.

Keywords: perforation, ballistic limit, brittle layered obstacles.