

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОБИВАНИЯ МНОГОСЛОЙНОЙ ПРОЗРАЧНОЙ БРОНИ

И.Ф. Кобылкин

В.В. Шакирзянова

valyusha95@mail.ru

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

Аннотация

Показано, что основными причинами разрушения многослойного стеклопакета в процессе проникания в него высокоскоростного ударника являются высокие напряжения в зоне воздействия ударника и растягивающие напряжения, возникающие при изгибе слоев стекла на границах раздела. Интенсивное разрушение слоев стекла (кроме лицевого) начинается не от границы раздела с предыдущим слоем, а от границы раздела с последующим слоем в зоне действия растягивающих напряжений, возникающих из-за изгиба рассматриваемого слоя, и распространяется навстречу ударному воздействию. Малопрочный клеевой слой между слоями стекла задерживает и даже останавливает распространение волны разрушения из предыдущего слоя стекла в последующий. Анализ кривых торможения ударников в стеклопакетах одинаковой суммарной толщины показал, что более жесткое торможение ударник испытывает в моноблочной преграде и в преградах, состоящих из меньшего числа слоев

Ключевые слова

Пробивание, прозрачная броня, многослойный стеклопакет, изгиб, разрушение, торможение ударника

Поступила 29.03.2019

Принята 05.04.2019

© Авторы, 2020

Введение. Прозрачная броня является важным компонентом противопульного и противоосколочного бронирования современной военной техники. В качестве материалов для изготовления прозрачной брони широко используются неорганические стекла и прозрачные полимеры. Как правило, конструктивно прозрачная броня представляет собой многослойные стеклопакеты, в которых отдельные слои из стекла и прозрачных полимеров соединены между собой прозрачным синтетическим клеем. Для предотвращения проникания вторичных (откольных) осколков в защищаемую зону тыльный слой многослойных стеклопакетов изготавливается из прозрачного пластичного полимера — поликарбоната или по-

крывается защитной прозрачной полимерной пленкой [1, 2]. Фотография трехслойной прозрачной преграды после воздействия пули пистолета ПМ (пистолет Макарова) приведена на рис. 1. Сложная конфигурация возникающих трещин обусловлена действием в зоне удара радиальных, тангенциальных и осевых напряжений [3, 4]. Зачастую слои стекла разрушаются независимо друг от друга, т. е. трещины в предыдущем слое не продолжают в последующем.



Рис. 1. Трехслойная прозрачная преграда после воздействия пули пистолета ПМ

Первоначально прозрачную броню как в СССР, так и за рубежом начали интенсивно разрабатывать еще до Второй мировой войны для противопульной защиты самолетов. На исходе войны прозрачная броня имела достаточно высокие характеристики и при толщине 50...60 мм и погонной массе $\sim 120 \text{ кг/м}^2$ обеспечивала защиту от бронебойных пуль калибра 7,62...7,92 мм при обстреле как по нормали, так и под углом. В среднем при одинаковой со стальной броней пулестойкостью прозрачная стеклянная броня имела немного большую массу и в 4 раза большую толщину. В последние десятилетия развитие получила также прозрачная броня для противопульной и противоосколочной защиты наземной техники [5]. На основе накопленных опытных данных был разработан ГОСТ 30826–2014 «Стекло многослойное. Технические условия», в котором изложены требования и к защитным противопульным стеклам.

Несмотря на многолетнюю историю применения, создание многослойной прозрачной брони до сих пор остается эмпирическим процессом.

Показательные результаты экспериментальных исследований распространения волн нагружения и разрушения в многослойных стеклянных преградах при высокоскоростном ударе представлены в работах [6, 7]. Эти результаты получены в основном на тонких в направлении, перпендикулярном направлению удара, преградах. По мнению авторов, в таких преградах на распространение волн нагружения и разрушения стекла весьма существенно влияет боковая разгрузка.

Теоретическое исследование поведения многослойной прозрачной брони при воздействии высокоскоростных ударников, в основном численным моделированием, началось после развития модели динамического деформирования упруго-хрупких материалов Джонсона — Холмквиста [8, 9] и ее внедрения в программные комплексы ANSYS Autodyn и LS Dyna [10]. Среди последних работ следует отметить работы Andersen'a, Templton'a, Strassburger'a [11–14], в которых была показана возможность моделирования процессов разрушения и проникания в многослойную прозрачную броню высокоскоростных ударников. К сожалению, в перечисленных работах практически нет результатов, которые можно было использовать при разработке прозрачной брони.

На баллистическую стойкость многослойной прозрачной брони влияет большое число таких параметров, как физико-механические характеристики слоев стекла, их число и толщина, материал и толщина полимерных клеевых прослоек и др. Для оптимизации структуры стеклопакета необходимо понимание механики процессов разрушения и пробивания многослойной прозрачной брони при воздействии кинетических средств поражения. Сокращению трудоемкости и времени разработки оптимальных структур многослойной прозрачной брони способствует также наличие расчетных методик, позволяющих оценивать ее баллистическую стойкость.

Настоящая статья посвящена численному изучению особенностей пробивания многослойной прозрачной брони с целью разработать расчетную методику определения предельной скорости пробития и выявить основные факторы, влияющие на ее величину.

Численное моделирование. Численное моделирование осуществлялось в двумерной постановке в пакете программ ANSYS Autodyn лагранжевым методом, с квадратными ячейками с длиной стороны 0,5 мм, как для ударника, так и для материалов преграды. Механическое поведение стекла описывалось моделью Джонсона — Холмквиста [8, 9], стального ударника — моделью Джонсона — Кука [15]. Для поликарбоната и полиуретанового или поливинилбутиралевого клеев использовались стан-

дартные модели пластмасс, интегрированные в библиотеку материалов Autodyn. Модель Джонсона — Кука является эмпирической и позволяет учитывать эффекты деформационного и кинематического (динамического) упрочнения и термическое разупрочнение. В этой модели напряжение пластического течения Y определяется формулой

$$Y = \left(A + B\varepsilon_p^n \right) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \left(1 - \left(\frac{T - T_0}{T_{\text{пл}} - T_0} \right)^m \right),$$

где A — предел текучести материала в исходном состоянии; B — коэффициент (модуль) деформационного упрочнения; ε_p — интенсивность пластических деформаций; n — показатель деформационного упрочнения; C — коэффициент упрочнения при высокоскоростном деформировании; $\dot{\varepsilon}_p$ — интенсивность тензора скоростей пластических деформаций; $\dot{\varepsilon}_0 = 1$ — масштабная скорость деформаций; T_0 — начальная температура; $T_{\text{пл}}$ — температура плавления; m — показатель термического разупрочнения. Материал ударника — сталь, близкая по свойствам к стали У12, предел прочности на растяжение равен 1570 МПа.

Материал, описываемый моделью Джонсона — Кука, считается разрушенным, если параметр поврежденности D становится равным единице:

$$D = \sum \frac{\Delta\varepsilon_p}{\varepsilon_f},$$

где $\Delta\varepsilon_p$ — изменение интенсивности пластической деформации;

$$\varepsilon_f = \max \left(\left[D_1 + D_2 \exp \left(D_3 \frac{p}{\sigma_{\text{эф}}} \right) \left[1 + D_4 \ln \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right] \left[1 + D_5 \left(\frac{T - T_0}{T_{\text{пл}} - T_0} \right) \right] \right], EF_{\min} \right)$$

— деформация разрушения (D_1, \dots, D_5 — параметры разрушения; p — давление; $\sigma_{\text{эф}}$ — эффективное напряжение; EF_{\min} — минимальное значение деформации, при котором происходит разрушение материала). Более подробные сведения можно найти в работе [6].

Значения констант модели Джонсона — Кука для стали У12А следующие: модуль сдвига $G = 65,08$ ГПа; плотность составляет 7810 кг/м³; предел текучести $A = 1370$ МПа; предел прочности равен 1570 МПа; $B = 476,8$ МПа; $n = 0,18$; $C = 0,012$; $m = 1$; $C_p = 477$; начальная температура 293 К; температура плавления 1873 К; параметры модели разрушения —

$D_1 = -0,8$; $D_2 = -2,1$; $D_3 = -0,5$; $D_4 = -0,002$; $D_5 = -0,61$; $EF_{\min} = 0,09$; коэффициенты уравнения (уравнения состояния) ударной адиабаты $a = 4569$ м/с; $b = 1,49$; параметр Грюнайзена (Γ) равен 1,7.

Уравнение состояния керамики — полиномиальное, механическое поведение керамики, описанное с помощью модели деформирования и разрушения упруго-хрупких материалов Джонсона — Холмквиста [8, 9]. В этой модели предел прочности хрупкого материала σ в процессе его разрушения меняется от значения предела прочности исходного неповрежденного материала σ_0 до предела прочности полностью разрушенного (измельченного) материала σ_p . Соответствующее уравнение имеет вид

$$\sigma = \sigma_0 - D(\sigma_0 - \sigma_p),$$

где D — поврежденность ($0 \leq D \leq 1$), определяется как относительная накопленная необратимая (пластическая) деформация. Пределы прочности неповрежденного и полностью разрушенного материалов зависят от текущих давления и скорости деформации $\dot{\epsilon}$:

$$\sigma_0 = A(P + T_p)^N \left(1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right); \quad \sigma_p = BP^M \left(1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right),$$

где $P = p/Y$ — безразмерное давление; T_p — безразмерное максимальное всестороннее напряжение, которое может выдержать материал без разрушения; Y — гюгониевский предел упругости; A, N, C, B, M — постоянные.

Предел прочности разрушенной керамики ограничен сверху величиной $\sigma_{p\max} = gY$ (g — постоянная). Более подробные сведения о модели Джонсона — Холмквиста можно найти в работах [2, 4]. Значения констант этой модели для натрийсиликатного стекла следующие: плотность составляет 2530 кг/м³; модули сдвига и упругости равны $30,4$ и 72 ГПа; предел прочности на растяжение равен 260 МПа; $A = 0,93$; $B = 0,35$; $C = 0,003$; $M = 0,4$; $N = 0,77$; $Y = 2,92$ МПа; $g = 0,5$; $T_p = 0,15$ ГПа.

Модели Джонсона — Кука и Джонсона — Холмквиста интегрированы в программный комплекс ANSYS. Поэтому для других материалов значения постоянных можно выбирать либо из блоков уравнений состояния ANSYS Autodyn либо из таблиц 9B1 и 9B8 книги [2, с. 572, 579].

Анализ механизмов разрушения. Наиболее подробно анализировалось проникание стального ударника диаметром $7,62$ мм и длиной 30 мм в многослойную прозрачную броню, состоящую из четырех слоев натрий-

силикатного стекла и тыльного слоя поликарбоната толщиной 3 мм, приклеенного к тыльной стороне стеклопакета. Толщина лицевого слоя составляла 10 мм, остальные три слоя были толщиной 12 мм. Все слои склеены полиуретановым клеем. Толщина клеевой пленки составляла 0,8 мм. Боковые размеры стеклопакета 250×250 мм. Именно такой стеклопакет экспериментально подробно исследовался в работе [13]. Экспериментальные данные из этой статьи использовались для валидации разработанной расчетной методики.

На последующих рисунках показано формирование и распространение зон повреждения в разных слоях стекла, поскольку именно эти процессы оказывают основное влияние на сопротивление прониканию ударника в стеклопакет и, следовательно, определяют предельную скорость пробития. На рис. 2 приведены результаты расчета пробития четырехслойного стеклопакета при скорости ударника 805 м/с.

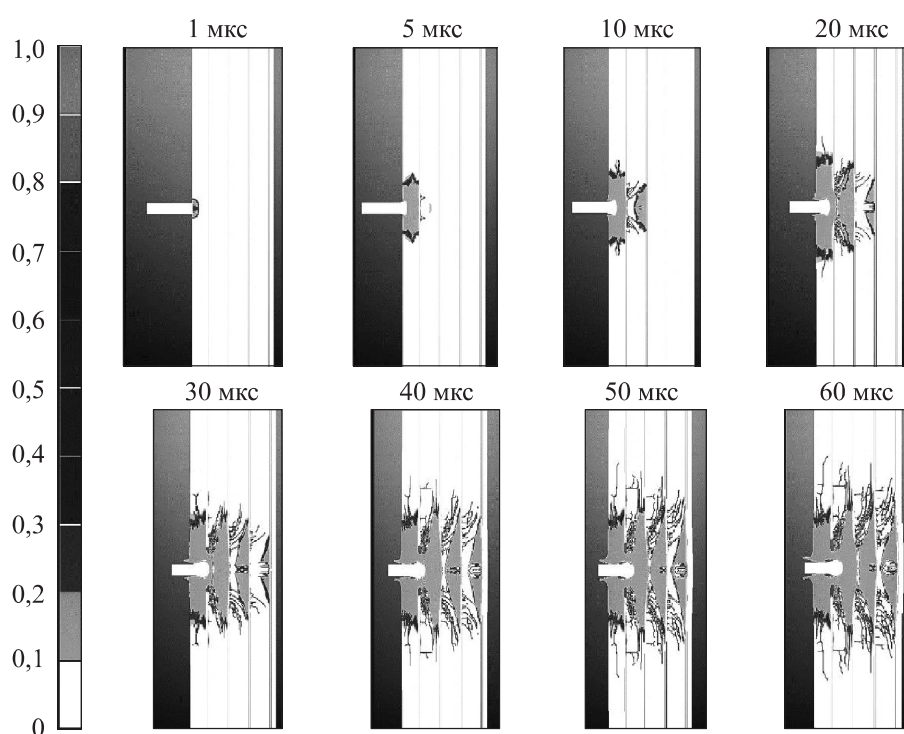


Рис. 2. Разрушение четырехслойного стеклопакета при воздействии стального ударника со скоростью 805 м/с

На этом рисунке неповрежденное стекло (параметр повреждения $D = 0$) окрашено в белый цвет, тогда как полностью разрушенные области стекла ($D = 1$) серого цвета. Из анализа характера распространения зон

разрушения следует, что разрушение стекла первоначально происходит в зоне воздействия ударника. Причем это разрушение в течение ~ 5 мкс локализовано в первом слое стеклопакета. В последующем, через ~ 8 мкс начинает разрушаться второй слой стекла. Но интенсивное разрушение этого слоя начинается не от границы раздела с первым слоем, а от границы раздела с третьим слоем в зоне действия растягивающих напряжений, возникающих из-за изгиба второго слоя, и распространяется навстречу ударному воздействию. Аналогично разрушаются третий и четвертый слои стекла. Обнаруженный в численном эксперименте эффект подтверждает ранее сделанный в [1] вывод о том, что малопрочный слой клея останавливает волну разрушения — при подходе к границе раздела с невысокой прочностью на растяжение трещина не может передаться в следующий слой преграды и будет остановлена.

Таким образом, основными причинами разрушения многослойного стеклопакета являются или высокие напряжения в зоне воздействия ударника или растягивающие напряжения, возникающие при изгибе слоев стекла на границах раздела. Откольные разрушения в волнах разгрузки выявить не удалось. Отметим, что проникание ударника, кроме начальной стадии, происходит в разрушенное стекло.

Поскольку разработанная численная методика позволила получить конфигурацию разрушения четырехслойного стеклопакета, близкую к полученной в [8], то с ее помощью была сделана попытка оценить зависимость баллистической стойкости стеклопакета от толщины слоев стекла. Для этого были выполнены расчеты пробития тем же ударником стеклянных преград в виде моноблока, двух- и восьмислойных стеклопакетов с одинаковой суммарной толщиной.

На рис. 3, а показано развитие зон разрушения стеклянного моноблока при воздействии стального ударника со скоростью 805 м/с. Четко прослеживается развитие лицевой и тыльной зон разрушения и их смыкание на 18 мкс. В течение ~ 5 мкс скорость лицевой волны разрушения, имеющей сферическую форму, составляет ~ 2000 м/с, затем скорость убывает до 1800 м/с.

Скорость обратной волны разрушения колеблется в диапазоне 1300...1400 м/с. Для сравнения скорость распространения в стекле продольных волн составляет 5680 м/с, а поперечных 3570 м/с [13, 14]. При пробивании двухслойного стеклопакета (рис. 3, б) наиболее контрастно проявляется роль клеевого слоя, который задерживает распространение волны разрушения из первого слоя стекла во второй более чем на 30 мкс.

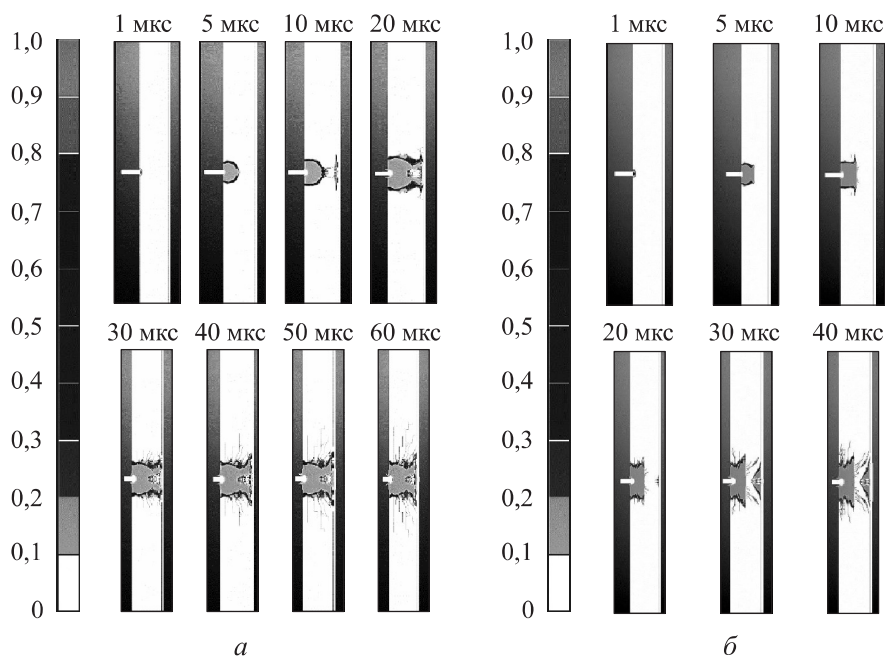


Рис. 3. Разрушение стеклянного моноблока (а) и двухслойного стеклопакета (б) при воздействии стального ударника со скоростью 805 м/с

Формирование и распространение зон разрушения при пробивании восьмислойного стеклопакета представлено на рис. 4.

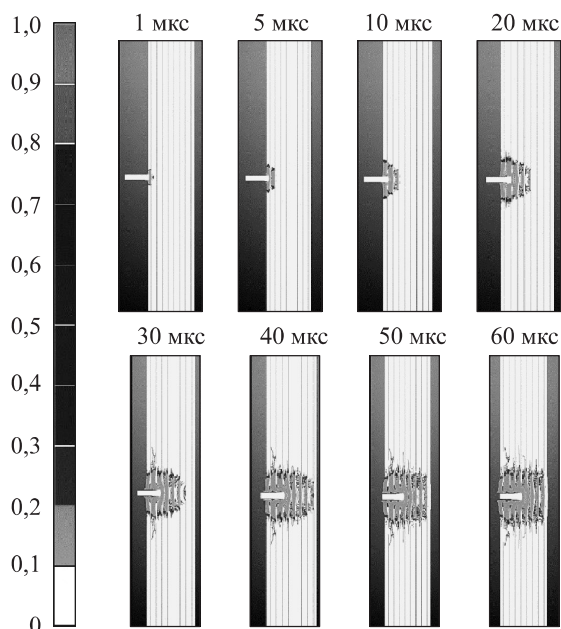


Рис. 4. Разрушение восьмислойного стеклопакета при воздействии стального ударника со скоростью 805 м/с

Обращает на себя внимание больший по сравнению с уже рассмотренными бронепакетами объем разрушения стекла, хотя механика разрушения стекла при этом не меняется. Средняя скорость радиального расширения зон разрушения при пробивании как четырехслойного, так и восьмислойного стеклопакетов составляет 1500 м/с.

Баллистическую стойкость проанализированных стеклопакетов можно сравнить, сопоставляя кривые торможения ударников при проникании в

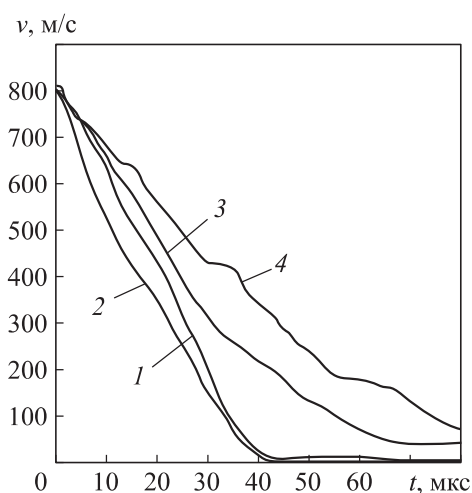


Рис. 5. Кривые торможения ударника многослойными стеклянными преградами одной и той же суммарной толщины; начальная скорость ударника 805 м/с: 1 — один слой; 2 — два слоя; 3 — четыре слоя; 4 — восемь слоев

эти стеклопакеты. На рис. 5 приведены соответствующие кривые торможения — зависимости скорости ударников от времени.

Оказалось, что наиболее жесткое торможение ударник испытывает в моноблочной преграде и в преграде, состоящей из двух слоев. При увеличении числа слоев время торможения заметно увеличивается. Кажется бы, из этого следует вывод о преимуществе использования моноблочных преград или преград с малым числом слоев. Однако следует принимать во внимание то, что с уменьшением числа слоев возрастает вероятность разрушения преграды на отдельные крупные фрагменты опасные для защищаемого броневое объема. При воздействии на многослойные преграды, состоящие из относительно тонких склеенных слоев стекла, разделения преграды на отдельные фрагменты не происходит (см. рис. 2).

Выводы. 1. Основными причинами разрушения многослойного стеклопакета в процессе проникания в него высокоскоростного ударника являются или высокие напряжения в зоне воздействия ударника или растягивающие напряжения, возникающие при изгибе слоев стекла на границах раздела.

2. Интенсивное разрушение слоев стекла (кроме лицевого) начинается не от границы раздела с предыдущим слоем, а от границы раздела с последующим слоем в зоне действия растягивающих напряжений, воз-

никающих из-за изгиба рассматриваемого слоя, и распространяется навстречу ударному воздействию.

3. Малопрочный клеевой слой между слоями стекла задерживает и даже останавливает распространение волны разрушения из предыдущего слоя стекла в последующий.

4. Анализ кривых торможения ударников в стеклопакетах одинаковой суммарной толщины показал, что более жесткое торможение ударник испытывает в моноблочной преграде и в преградах, состоящих из меньшего числа слоев. При увеличении числа слоев, а следовательно уменьшении их толщин время торможения заметно увеличивается.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Кобылкин И.Ф., Селиванов В.В. Материалы и структуры легкой бронезащиты. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014.
- [2] Crouch I.G., ed. The science of armour materials. Woodhead Publ., Elsevier, 2017.
- [3] Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. М., Наука, 1974.
- [4] Никифоровский В.С., Шемякин Е.И. Динамическое разрушение твердых тел. Новосибирск, Наука, 1979.
- [5] Grujicic M., Bell W.C., Pandurangan B. Design and material selection guidelines and strategies for transparent armor systems. *Mater. Des.*, 2012, vol. 34, pp. 808–819. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.07.007
- [6] Bless S.J., Chen T., Russell R. Impact on glass laminates. *Proc. 23rd Int. Symp. Ballistics*, 2007, pp. 873–881.
- [7] Strassburger E., Patel P., McCauley J.W., et al. Wave propagation and impact damage in transparent laminates. *Proc. 23rd Int. Symp. Ballistics*, 2007, pp. 1381–1391.
- [8] Johnson G.R., Holmquist T.J. An improved computational constitutive model for brittle materials. In: High pressure science and technology. AIP Press, 1993.
- [9] Johnson G.R., Holmquist T.J. A computational constitutive model for glass subjected to large strains, high strain rates and high pressures. *J. Appl. Mech.*, 2011, vol. 78, no. 5, art. 051003. DOI: 10.1115/1.4004326
- [10] ANSYS Autodyn tutorial manual. Version 12. SAS IP, 2009.
- [11] Anderson J., Holmquist T. Application of a computational glass model to compute propagation of failure from ballistic impact of borosilicate glass targets. *Int. J. Impact Eng.*, 2013, vol. 56, pp. 2–11. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2012.06.002
- [12] Templeton D.W., Holmquist T.J. A computational study of ballistic transparencies. *WIT Trans Modelling Simul.*, 2005, vol. 40, pp. 1–9.
- [13] Strassburger E., Bauer S., Popko G. Damage visualization and deformation measurement in glass laminates during projectile penetration. *Defence Technol.*, 2014, vol. 10, no. 2, pp. 226–238. DOI: 10.1016/j.dt.2014.05.008

[14] Fountzoulas C.G., Cheeseman B.A., Dehmer P.G., et al. Computational study of laminated transparent armor impacted by FSP. *Proc. 23rd Int. Symp. Ballistics*, 2007, pp. 873–881.

[15] Johnson G.R., Cook W.H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. *Proc. 7th Int. Symp. Ballistics*, 1983, pp. 541–547.

Кобылкин Иван Федорович (31.08.1951–19.01.2020) — д-р техн. наук, профессор, работал на кафедре «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Шакирзянова Валентина Валерьевна — инженер кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Кобылкин И.Ф., Шакирзянова В.В. Численное моделирование пробивания многослойной прозрачной брони. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2020, № 1, с. 16–28. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2020-1-16-28>

NUMERICAL SIMULATION OF PROJECTILE PENETRATION INTO LAMINATED TRANSPARENT ARMOUR

I.F. Kobylkin

V.V. Shakirzyanova

valyusha95@mail.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper shows that the main reasons behind a laminated glass panel failing while penetrated by a high-velocity projectile are the high stresses in the region affected by the projectile and tensile stresses at the interface that are caused by the glass layers bending. For all the glass layers but the frontal one, intense fracturing does not start at the interface with the previous layer but at the interface with the subsequent layer, in the region of the tensile stresses generated by the current layer bending. The fracturing propagates towards the impact. A low-strength adhesive layer between glass layers inhibits and even stops the fracture-inducing wave propagating from the previous layer into the subsequent one. Analysis of the projectile deceleration plots in laminated glass panels of the same total thickness showed that the projectile undergoes more dramatic deceleration in a single-layer barrier and in barriers consisting of fewer layers

Keywords

Penetration, transparent armour, laminated glass panel, bending, fracture, projectile deceleration

Received 29.03.2019

Accepted 05.04.2019

© Author(s), 2020

REFERENCES

- [1] Kobylkin I.F., Selivanov V.V. *Materialy i struktury legkoy bronzashchity* [Materials and structures for lightweight armor protection]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2014.
- [2] Crouch I.G., ed. *The science of armour materials*. Woodhead Publ., Elsevier, 2017.
- [3] Cherepanov G.P. *Mekhanika khрупkogo razrusheniya* [Mechanics of brittle fracture]. Moscow, Nauka Publ., 1974.
- [4] Nikiforovskiy V.S., Shemyakin E.I. *Dinamicheskoe razrushenie tverdykh tel* [Dynamic fracture of solid bodies]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1979.
- [5] Grujicic M., Bell W.C., Pandurangan B. Design and material selection guidelines and strategies for transparent armor systems. *Mater. Des.*, 2012, vol. 34, pp. 808–819. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.07.007
- [6] Bless S.J., Chen T., Russell R. Impact on glass laminates. *Proc. 23rd Int. Symp. Ballistics*, 2007, pp. 873–881.
- [7] Strassburger E., Patel P., McCauley J.W., et al. Wave propagation and impact damage in transparent laminates. *Proc. 23rd Int. Symp. Ballistics*, 2007, pp. 1381–1391.
- [8] Johnson G.R., Holmquist T.J. An improved computational constitutive model for brittle materials. In: *High pressure science and technology*. AIP Press, 1993.
- [9] Johnson G.R., Holmquist T.J. A computational constitutive model for glass subjected to large strains, high strain rates and high pressures. *J. Appl. Mech.*, 2011, vol. 78, no. 5, art. 051003. DOI: 10.1115/1.4004326
- [10] ANSYS Autodyn tutorial manual. Version 12. SAS IP, 2009.
- [11] Anderson J., Holmquist T. Application of a computational glass model to compute propagation of failure from ballistic impact of borosilicate glass targets. *Int. J. Impact Eng.*, 2013, vol. 56, pp. 2–11. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2012.06.002
- [12] Templeton D.W., Holmquist T.J. A computational study of ballistic transparencies. *WIT Trans Modelling Simul.*, 2005, vol. 40, pp. 1–9.
- [13] Strassburger E., Bauer S., Popko G. Damage visualization and deformation measurement in glass laminates during projectile penetration. *Defence Technol.*, 2014, vol. 10, no. 2, pp. 226–238. DOI: 10.1016/j.dt.2014.05.008
- [14] Fountzoulas C.G., Cheeseman B.A., Dehmer P.G., et al. Computational study of laminat transparent armor impacted by FSP. *Proc. 23rd Int. Symp. Ballistics*, 2007, pp. 873–881.
- [15] Johnson G.R., Cook W.H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. *Proc. 7th Int. Symp. Ballistics*, 1983, pp. 541–547.


Kobylkin I.F. (31.08.1951–19.01.2020) — Dr. Sc. (Eng.), Professor, worked at the Department of High-Precision Airborne Devices, Bauman Moscow State Technical University.

Shakirzyanova V.V. — Engineer, Department of High-Precision Airborne Devices, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Kobylkin I.F., Shakirzyanova V.V. Numerical simulation of projectile penetration into laminated transparent armour. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2020, no. 1, pp. 16–28 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2020-1-16-28>



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышло в свет учебное пособие автора
Ю.Г. Драгунова

**«Обеспечение прочности и ресурса
реакторных установок с водо-водяными
энергетическими реакторами»**

Изложены подходы к обоснованию безопасности реакторных установок с водо-водяными энергетическими реакторами, в частности прочности оборудования, с учетом нагрузок и изменений свойств материалов в условиях нормальной эксплуатации и при авариях. Рассмотрены вопросы управления ресурсом критических элементов оборудования реакторных установок с водо-водяными энергетическими реакторами. Пособие адресовано студентам специальности «Ядерные реакторы и материалы», может быть полезно для студентов и аспирантов, обучающихся по направлению подготовки «Ядерная энергетика и технологии», а также специалистов, работающих в области создания оборудования для ядерной индустрии.

По вопросам приобретения обращайтесь:
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1
+7 (499) 263-60-45
press@bmstu.ru
<http://baumanpress.ru>