

ОСОБЕННОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ПЛАСТИНЫ ИЗ ХРУПКОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С УДАРНИКОМ

С.Б. Сапожников¹, О.А. Кудрявцев²

Рассмотрены аспекты повреждения пластин из хрупкого материала при высокоскоростном ударе. Численный анализ напряженного состояния пластины при ударе показал, что в зоне контакта возникают значительные растягивающие напряжения, определяющие возможность откола и образования радиальных трещин. На основании модели эквивалентной пробки построена аналитическая зависимость, позволяющая оценить скорость ударника после пробоя пластины из хрупкого материала.

Ключевые слова: напряженное состояние, керамика, удар, пробой, стекло.

Введение

Основным механизмом разрушения пластин из хрупких материалов при взаимодействии с твердым ударником является образование развитой системы радиальных трещин и коноида в месте контакта [1]. Для толстых пластин из малопластичных материалов, например броневых сталей, характерно выбивание пробки и отсутствие радиальных трещин, поскольку трещиностойкость сталей существенно превышает трещиностойкость современных технических керамик [1]. Поэтому для металлов механизм разрушения по схеме выбивания пробки считается классическим, на котором основаны даже численные оценки сопротивления преград пробиванию твердыми ударниками [2]. Ситуация с численным моделированием разрушения керамик намного сложнее, в работах [1, 3–5] предлагаются схемы метода конечных элементов с уничтожением элементов, с двойными узлами и их разделением по аналогии с адгезионными процессами при склейке, что приводит к возникновению дефекта массы, к существенному возрастанию размерности задачи при расчетах. Здесь следует также заметить, что в литературе для хрупких материалов нет даже приближенных методов оценки сопротивления пробоем. Данная статья является попыткой восполнить этот пробел на примере модельного материала – силикатного стекла.

Определение механических свойств стекла

Для типичного силикатного стекла механические свойства хорошо изучены: модуль упругости равен 70–75 ГПа, а предел прочности на растяжение – величина, существенно зависящая от степени дефектности поверхности и лежащая в достаточно широких пределах: 15–150 МПа [6, 7]. Следы реза стекла создают на кромках острые микротрещины, поэтому испытания на растяжение стандартных образцов-полосок не могут дать корректных результатов. В данной работе предложен способ определения предела прочности стекла при растяжении $\sigma_{вр}$, реализующий изгиб пластины размерами 100×100×5,6 мм: образец устанавливается на кольцо внутренним диаметром 70 мм и нагружается в центре усилием P . Диаметр опорного кольца был подобран из соображения минимизации влияния краевых дефектов вырезки пластины на результаты испытаний с использованием зависимостей теории круглых пластин [8].

При таком нагружении в центре пластины с тыльной стороны создается двухосное растяжение. Зная из эксперимента на изгиб нагрузку разрушения пластины, можно, используя теорию круглых пластин, определить максимальное главное напряжение (предел прочности по первой теории). Для рассматриваемого в данной работе стекла значение предела прочности составило 120–150 МПа (испытано 10 образцов).

Ударные испытания

Испытания проводили на настольном разгонном стенде ЮУрГУ, в котором шар диаметром 8 мм из стали ШХ15 ускорялся энергией газов монтажного патрона при движении по каналу длиной 150 мм. Скорость шара на выходе из канала измеряли хронографом с точностью до 1 м/с. После пробоя мишени шар попадает во фрикционный тормоз – стальную трубку, заполненную

¹ Сапожников Сергей Борисович – профессор, доктор технических наук, кафедра прикладной механики, динамики и прочности машин, Южно-Уральский государственный университет.

E-mail: ssb@susu.ac.ru

² Кудрявцев Олег Александрович – студент-дипломник, кафедра прикладной механики, динамики и прочности машин, Южно-Уральский государственный университет.

Краткие сообщения

тканевой набивкой, и останавливается, передавая остаточный импульс трубке. Последняя смещается на некоторое расстояние, преодолевая силы трения с опорой. Проведенная предварительно тарировка фрикционного тормоза позволяет далее по его смещению определять остаточную скорость шара после пробоя мишени.

В первой серии испытаний стеклянные пластины пробивали, фиксируя начальную и остаточную скорости шара (рис. 1, точки 3). Из пластины выбивается часть материала, в окружающей зоне возникает система трещин.

Для приближенных вычислений остаточной скорости сделана замена выбитой части пластины эквивалентной в энергетическом смысле срезаемой по диаметру ударника цилиндрической пробкой, подобно тому, как это делалось для преград из пластичных материалов. На основании закона сохранения энергии получена приближенная расчетная зависимость скорости шара после пробивания образца от его начальной скорости:

$$V_r = \sqrt{\frac{2E - 2A}{M}} = \sqrt{\frac{mV_0^2 - \tau^* \pi d h^2}{m + \rho \frac{\pi d^2}{4} h}}, \quad (1)$$

где E – кинетическая энергия снаряда до удара; A – работа на преодоление сил трения на поверхности пробки; $M = m + m_p$ – суммарная масса ударника и пробки; V_0 – скорость снаряда до удара; τ^* – сдвиговые напряжения, препятствующие выбиванию пробки; d – диаметр ударника; h – толщина пластины; ρ – плотность материала пластины; V_r – скорость снаряда после пробивания.

Расчеты остаточной скорости по формуле (1) удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными (рис. 1, кривая 2) при $\tau^* = 120$ МПа, т.е. сдвиговое напряжение при пробое равно пределу прочности стекла при растяжении $\sigma_{вр}$; масса шарика 2,2 г; плотность стекла 2500 кг/м³. Для пластичного материала мишени напряжение сдвига обычно составляют половину предела текучести при растяжении – в этом основное отличие хрупкого материала от пластичного при пробое. Расчетная величина баллистического предела (215 м/с) показана на рис. 1 звездочкой.

На рис. 2 представлены два механизма разрушения образцов: со сквозной пенетрацией (б) и без нее (а). При рассмотрении фотографий можно сделать вывод о наличии четкой тенденции к изменению характера повреждаемости материала при увеличении энергии ударника. При малых скоростях выбивается коноид (пунктир на рис. 2, а), поглощая основную часть энергии, а оставшаяся часть, связанная с изгибом пластины, рассеивается системой радиальных трещин. При высоких скоростях ударника выбитый коноид может поглотить небольшую часть энергии, а основная рассеивается плотной системой трещин (преимущественно радиальных).

В предлагаемой модели эквивалентной пробки энергия, затраченная на ее сдвиг, является суммарной энергией образования новых поверхностей в системе густых трещин.

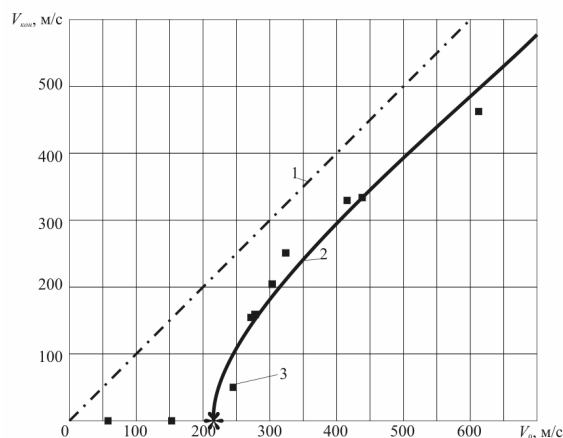


Рис. 1. Зависимость скорости ударника после пробоя от начальной скорости: 1 – отсутствие мишени; 2 – аналитическая зависимость (1); 3 – эксперимент

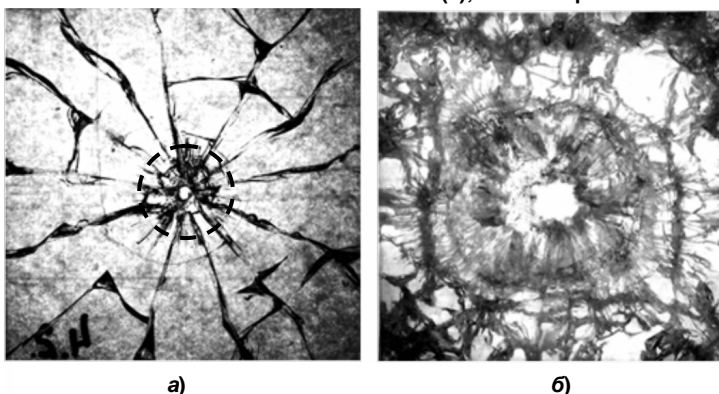


Рис. 2. Характер разрушения образцов: а) без сквозной пенетрации ($V_0 < 200$ м/с); б) сквозная пенетрация ($V_0 > 200$ м/с)

Расчетная часть

Попадание снаряда в преграду вызывает в ней сложные волновые явления (волны Римана, Лэмба, сдвиговые и др.), которые оказывают влияние на механизм разрушения керамики. Чтобы получить представление о распространении волн (на примере стеклянной пластины при ударе стальным шариком) в пакете ANSYS, реализующем метод конечных элементов, была решена соответствующая задача (рис. 3). Материал ударника и пластины принимали идеально упругим; пластину считали незакрепленной. В зоне контакта сетка конечных элементов (восьмиузловых тетраэдров) была измельченной до 0,25 мм, во внешней части элементы имели размер около 1 мм.

Анализ напряженного состояния пластины показал, что в зоне контакта развиваются высокие напряжения сжатия, а на границе контактной зоны – напряжения растяжения в окружном направлении, которые приводят к генерации радиальных трещин на ударной поверхности. Импульс сжатия достаточно быстро достигает тыльной стороны пластины и отражается, вызывая появление квазистатических напряжений изгиба в пластине, подобно нагружению сосредоточенной силой на упругом основании.

Волновые процессы в радиальном направлении протекают медленнее и волна изгиба создает на лицевой и тыльной поверхностях в радиальном направлении волны растяжения-сжатия. При рассмотрении двух равноудаленных от центра точек А и В (рис. 3), находящихся на лицевой и тыльной поверхностях пластины на расстоянии 15 мм от точки удара, видно, что в то время как в радиальном направлении на лицевой стороне идет фаза растяжения, на тыльной стороне начинается сжатие (рис. 4); растяжение здесь начинается лишь спустя 10 мкс.

Кинетика напряжений (рис. 4) иллюстрирует наличие волны изгиба, амплитуда которой нерегулярно осциллирует. Следует отметить, что радиус пластины равен 50 мм и волна Римана дойдет до границы пластины за 10 мкс и вернется в тт. А и В через 17 мкс. Далее начнется общее движение пластины на фоне волн изгиба с меньшей амплитудой. В зоне контакта максимальные растягивающие напряжения в стекле достигают величины 6 ГПа, а сжимающие – 18 ГПа, что гарантирует разрушение материала.

При меньших скоростях соударения (менее 300 м/с) зона высоких напряжений очень ограничена, что может привести к отсутствию сквозной пенетрации пластины ударником. В зоне контакта ударника по толщине на оси симметрии пластины напряжения растяжения все еще будут достаточны для разрушения материала (рис. 5). Наибольшие значения напряжений развиваются в момент времени 12–17 мкс (скорости 300–50 м/с), когда шар начинает отрываться от пластины.

В подповерхностной зоне пластины нормальные напряжения в этот момент времени инициируют коническую трещину, распространяющуюся к тыльной стороне благодаря напряжениям сдвига, которая формирует коноид разрушения. Анализ графиков на рис. 5 показывает, что предел прочности стекла на растяжение дос-

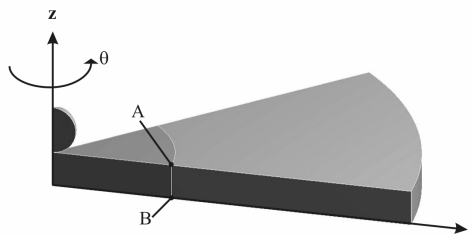


Рис. 3. Модель для расчета упругого удара шара по пластине. Скорость шара 300 м/с

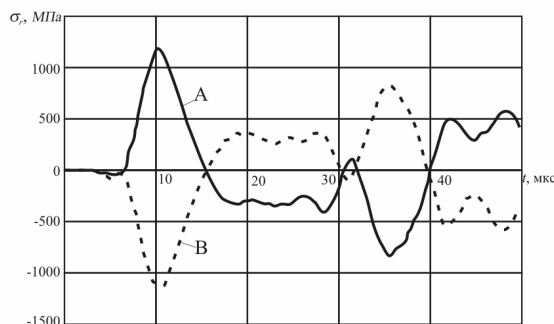


Рис. 4. Зависимость радиальных растягивающих напряжений в точках А и В от времени

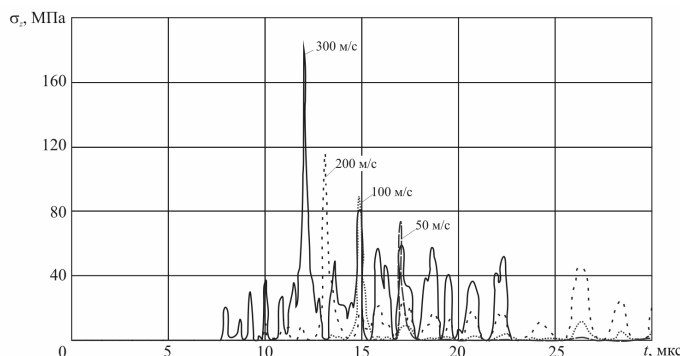


Рис. 5. Изменение во времени растягивающих напряжений σ_r на оси симметрии пластины при различных скоростях ударника

Краткие сообщения

тигается при скорости удара 200–250 м/с, что хорошо согласуется с экспериментально полученной величиной баллистического предела – 215 м/с, рис. 1.

За время контакта пластины и шара последний передает получившемуся коноиду импульс, достаточный для его выбивания из пластины. В соответствии с законом сохранения импульса при упругом ударе ударник отлетает от пластины в противоположную сторону. Таким образом, на ударной стороне пластины образуется лишь небольшое отверстие, а на тыльной поверхности повреждения намного больше. Число радиальных трещин при таком типе разрушения невелико (рис. 2, а) и зависит от энергии, переданной ударником преграде.

Выводы

Для оценки прочности на растяжение хрупких материалов в виде пластин предложен способ нагружения, в котором дефекты на кромках не оказывают влияния на измеряемую механическую характеристику. Предложена модель сквозного пробоя индентором пластины из хрупкого материала на основе эквивалентной «пробки», получена аналитическая зависимость для оценки скорости ударника после пробоя пластины из хрупкого материала с напряжениями сдвига, равными пределу прочности материала мишени на растяжение. Это дает возможность определять баллистический предел расчетным путем. Анализ напряженного состояния пластины при ударе с разными скоростями показал качественное и количественное соответствие с результатами экспериментов на пробой.

Литература

1. Hazell, P.J. Ceramic armour: Design and Defeat Mechanisms / P.J. Hazell. – Canberra: Argos Press, 2006. – 168 p.
2. Форенталь М.В. Динамика локального деформирования и разрушения металлической пластины / М.В. Форенталь // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2009. – Вып. 14. – № 33 (166). – С. 4–11.
3. Lightweight ballistic composites. Military and law-enforcement applications / Edited by A. Bhatnagar. – Cambridge: Woodhead publishing limited, 2006. – 429 p.
4. Advances in Ceramic Armor IV. A Collection of Papers Presented at the 32nd International Conference on Advanced Ceramics and Composites January 27-February 1, 2008, Daytona Beach, Florida / Edited by L.P.Franks. – Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2009. – 230 p.
5. Advances in Ceramic Armor VII. A Collection of Papers Presented at the 35nd International Conference on Advanced Ceramics and Composites January 22-28, 2011, Daytona Beach, Florida / Edited by J.J. Swab. – Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2011. – 272 p.
6. <http://ru.wikipedia.org/wiki/Стекло.html>.
7. ГОСТ 111-2001. Стекло листовое. Технические условия. – М.: ГУП ЦПП, 2002. – 41 с.
8. Тимошенко, С.П. Пластинки и оболочки / С.П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер; под ред. Г.С. Шапиро. – 2-е изд., стереотипное. – М.: Наука, 1966. – 636 с.

Поступила в редакцию 6 августа 2012 г.

ASPECTS OF BRITTLE PLATE FRACTURE DUE TO INTERACTION WITH INDENTER

S.B. Sapozhnikov¹, O.A. Kudryavtsev²

In this paper different aspects of brittle material plate fracture at high velocity impact were investigated. Numerical analysis of contact region showed that there are significant tensile stresses may led to dishing and radial cracks. On the base of equivalent plug's model there was developed analytical formula to estimate residual indenter velocity after penetration of plate made from brittle material.

Keywords: stress-strain state, ceramics, impact, penetration, glass.

References

1. Hazell P.J. *Ceramic armour: Design and Defeat Mechanisms*. Canberra: Argos Press, 2006. 168 p.
2. Forental M.V. *Vestnik YuUrGU. Seriya «Mashinostroenie»*. 2009. Issue 14. no. 33(166). pp. 4–11. (in Russ.).
3. Bhatnagar A. (ed.) *Lightweight ballistic composites. Military and law-enforcement applications*. Cambridge: Woodhead publishing limited, 2006. 429 p.
4. Franks L.P.(ed.) *Advances in Ceramic Armor IV. A Collection of Papers Presented at the 32nd International Conference on Advanced Ceramics and Composites*. January 27 – February 1, 2008, Daytona Beach, Florida. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2009. 230 p.
5. Swab J.J. (Ed.) *Advances in Ceramic Armor VII. A Collection of Papers Presented at the 35nd International Conference on Advanced Ceramics and Composites*. January 22–28, 2011, Daytona Beach, Florida. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2011. 272 p.
6. <http://ru.wikipedia.org/wiki/Стекло.html>
7. *GOST 111-2001. Steklo listovoe. Tekhnicheskie usloviia* (Sheet glass. Technical specifications). Moscow: GUP TsPP, 2002. 41 p. (in Russ.).
8. Timoshenko S.P., Voinovskii-Kruger S. *Plastinki i obolochki*. Moscow: Nauka, 1966. 636 p. (in Russ.).

¹ Sapozhnikov Sergei Borisovich is Dr. Sc. (Engineering), Professor, Applies Mechanics, Dynamic and Strength of Machines Department, South Ural State University.

E-mail: ssb@susu.ac.ru, sbsapozhnikov@mail.ru

² Kudryavtsev Oleg Alexandrovich is Graduate student, Applies Mechanics, Dynamic and Strength of Machines Department, South Ural State University.