

Особенности деформирования и разрушения пластин из хрупких материалов при ударном нагружении

В. В. Харченко^а, А. Л. Майстренко^б, А. И. Бабуцкий^а, Е. А. Кондряков^а

^а Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, Украина

^б Институт сверхтвердых материалов НАН Украины, Киев, Украина

Рассмотрены особенности деформирования и разрушения пластин из хрупких материалов при ударном нагружении. Представлены результаты численного моделирования ударного взаимодействия бойка с многослойными пластинами, содержащими хрупкий слой. Развита методика испытаний хрупких материалов на сжатие и пробой. Проведено сопоставление результатов экспериментальных и численных исследований.

Ключевые слова: деформирование, разрушение, хрупкие материалы, керамика, оргстекло, ударное нагружение.

Эффективность разрабатываемых защитных конструкций зависит от степени понимания механизмов деформирования и разрушения материалов бойка и преграды при их ударном взаимодействии. С точки зрения повышения энергопоглощающей способности преград перспективными конструкциями являются многослойные пластины, каждый слой которых выполняет определенную функцию, а среди материалов, обеспечивающих высокое энергопоглощение преграды, рассматривают различные виды конструкционной керамики.

Оптимизация защиты обычно проводится на основе результатов баллистических испытаний либо путем численного моделирования. В последнем случае важную роль играют используемые модели деформирования материалов и критерии разрушения. Сложность определения параметров таких моделей и критериев сдерживает расширение практического применения численных расчетов процессов ударного взаимодействия. Наиболее эффективен комплексный подход, сочетающий достоинства экспериментального, численного и аналитического моделирования и натуральных испытаний [1, 2].

Процессы, сопровождающие ударное нагружение пластин, имеют сложную природу и зависят от многих факторов: скорости и направления удара, размеров и формы проникающего тела, физических и механических свойств материалов и др. Исследования влияния ряда этих факторов на процессы деформирования и разрушения пластин из таких хрупких материалов, как керамика (карбид кремния) и ПММА (оргстекло), при ударе являются целью данной работы.

При ударных испытаниях керамики со скоростями порядка 500...1000 м/с следует различать несколько стадий процесса: пластическое деформирование бойка, образование конуса в керамическом слое, множественное разрушение керамического слоя и деформирование тыльного слоя пластины. На рис. 1 показан внешний вид керамической пластины из горячепрессованного SiC (поперечное сечение) после ударного воздействия, на рис. 2 – разру-

шение пластин из ПММА. Как видно, область разрушения ограничена поверхностью, близкой к конической, с вершиной в области контакта, при этом область материала внутри коноида может быть фрагментирована. До момента образования конуса в хрупком слое, т.е. пока слой сохраняет свою целостность, боек вызывает в лицевом слое преграды только незначительные деформации, сам же претерпевает существенное формоизменение в головной части – происходит образование так называемой грибообразной формы головной части (рис. 3).

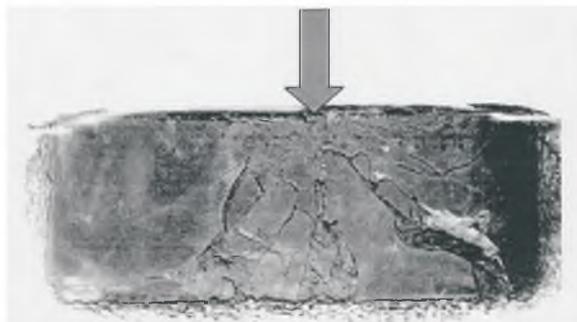


Рис. 1. Поперечное сечение керамической преграды из горячепрессованного карбида кремния после ударного нагружения (стрелкой указано место воздействия).

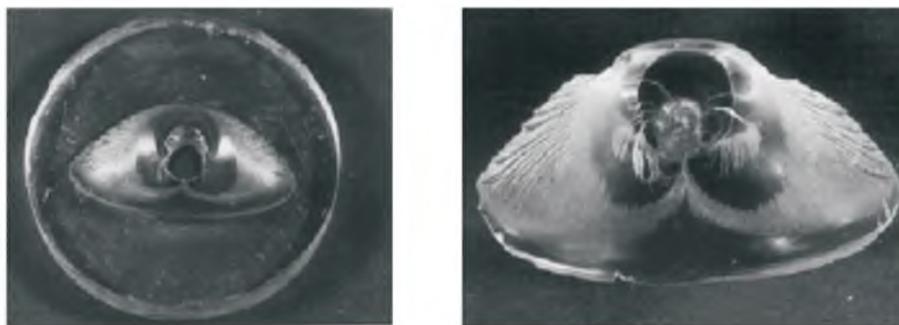


Рис. 2. Разрушение пластин из ПММА толщиной 10 мм при ударе со скоростью 6 м/с.

Проведенные исследования включали определение механических характеристик материала по данным механических испытаний, экспериментальное моделирование процессов пробивания, численное моделирование и анализ результатов.

Авторами была разработана методика и изготовлено устройство для динамических испытаний хрупких материалов. Экспериментальная установка представляет собой вертикальную трубу, жестко прикрепленную к неподвижной матце. Труба служит в качестве направляющей для ударника массой 4,5 кг, имеющего цилиндрическую форму. С обеих сторон к грузу прикреплены алюминиевые стаканы, позволяющие ему свободно передвигаться по трубе. В верхнем торце цилиндра есть отверстие с резьбой, которое служит либо для закрепления рым-болта для подъема груза, либо для дополнительного наращивания массы ударника. В качестве модельного материала использовалось оргстекло как наиболее дешевое и доступное.

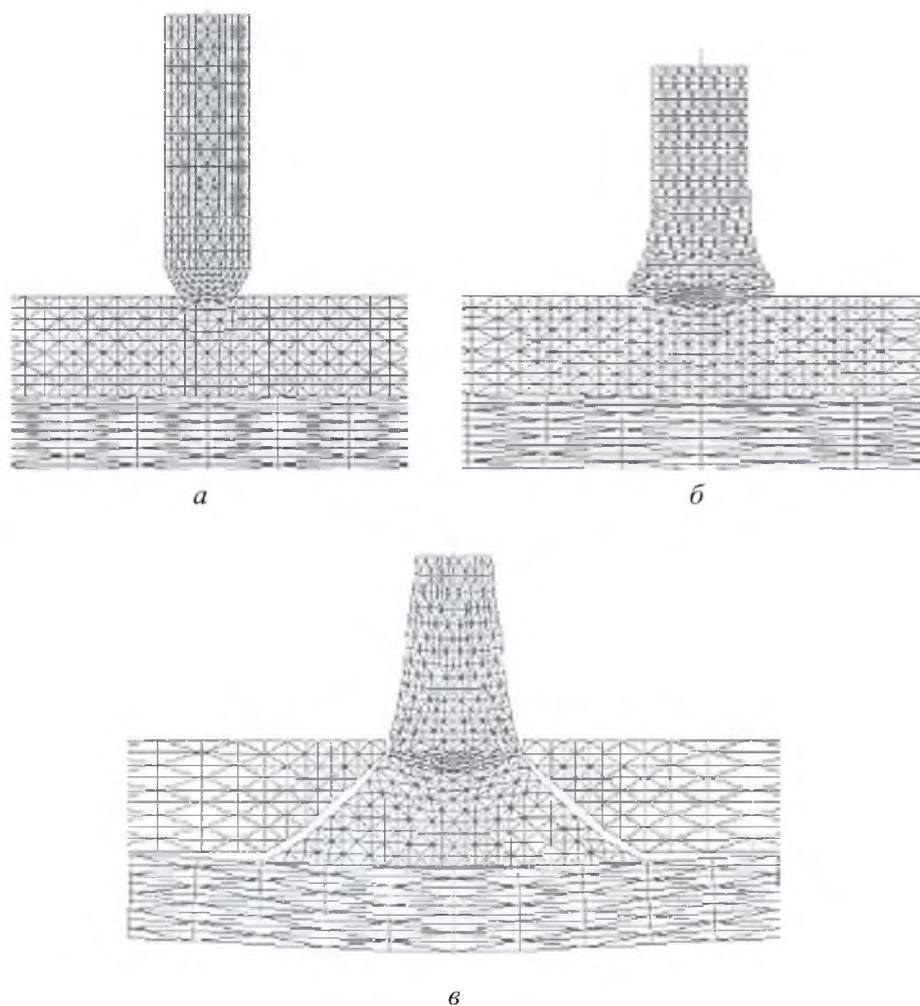


Рис. 3. Кинетика формоизменения соударяющихся тел: $a - t = 2,5$ мкс; $b - t = 8$ мкс; $в - t = 18$ мкс.

Кроме того, благодаря его хорошим оптическим свойствам можно было визуально наблюдать повреждения внутри образца. Были проведены испытания двух видов: на динамическое сжатие и на пробивание.

Для испытаний на динамическое сжатие использовались цилиндрические и кубические образцы размерами 10×10 мм. Образец помещался между жесткими цилиндрами. При ударном нагружении конический индентор на нижнем цилиндре оставлял отпечаток на алюминиевом образце-свидетеле. По размеру отпечатка определялась величина действующей на образец нагрузки. При испытаниях варьировались скорость удара, масса ударника и форма образца. Для кубических образцов проведено по четыре испытания при массе бойка 5 кг, скорости удара 6,24 м/с и при массе бойка 10 кг, скорости удара 2,08 м/с, для цилиндрических образцов – по шесть испытаний при массе бойка 5 кг, скорости удара 6,24 м/с и при массе бойка 10 кг, скорости удара 2,08 м/с.

В качестве образцов при испытаниях на пробивание использовались круглые пластины диаметром 60 и 90 мм и толщиной от 5 до 25 мм. Образец клеивался с помощью эпоксидной смолы в стальное кольцо, которое жестко фиксировалось двумя металлическими стаканами и устанавливалось на массивное основание. При ударных испытаниях со скоростью 4...7 м/с характер разрушения зависел от толщины пластины. В случае относительно тонких пластин (5–8 мм) разрушение происходило путем образования круговой конической трещины. Кроме того, на тыльной поверхности пластин имели место и радиальные трещины. Пластины толщиной 10–15 мм разрушились в результате образования круговой конической трещины, но выбитая пробка в виде коноида дополнительно не фрагментировалась. На рис. 2 показана фотография разрушившейся пластины из ПММА толщиной 10 мм при ударе со скоростью 6 м/с. Пробивания толстых пластин (толщиной 20 мм и более) при данных скоростях удара не происходило, хотя в зоне контакта отмечалось интенсивное выкрашивание, а в объеме материала наблюдались трещины в виде фрагмента поверхности коноида, которые распространились примерно на половину толщины пластин.

Выполнено численное моделирование приведенных выше испытаний образцов из керамики и оргстекла при ударном нагружении. Для численных расчетов использовался оригинальный компьютерный код “ИМПРО”, основанный на методе конечных элементов [2]. При этом в качестве характеристик материала использовались данные, полученные из экспериментов на ударное сжатие.

Рассматривался случай соударения по нормали стального бойка в виде цилиндрического тела с головной частью в виде усеченного конуса или сферы с пластиной из хрупкого материала, закрепленной в стальной обойме и опирающейся на стальное кольцо. При расчетах варьировались толщина преграды, длина бойка и форма его головной части, характеристики материалов, скорость удара.

На рис. 4, 5 представлена кинетика интенсивности деформации в бойке и двухслойной преграде (лицевой слой – из керамики, тыльный – из композиционного материала) – изменение во времени общей кинетической энергии и скорости различных точек соударяющихся тел. В центральной части преграды скорость перемещений составляет около 50 м/с в течение 5...10 мкс после соударения, а скорость тыльной поверхности бойка практически не отличается от начальной (падение до 8%). К 8-й мкс интенсивность деформации в головной части бойка и потеря последним кинетической энергии превышают 50%, а преграда приобрела около 10% начальной кинетической энергии бойка, т.е. общие потери кинетической энергии к рассматриваемому моменту составили примерно 40%. Увеличение прочности керамической преграды в 1,5 раза незначительно изменяет потерю кинетической энергии бойком на начальном этапе деформирования (больше примерно на 10%).

В верхнем слое нагружаемых ударом пластин сдвиговые деформации являются самыми “опасными”, что видно из распределений деформаций в момент времени $t = 50$ мкс (рис. 6). Максимальные значения сдвиговой деформации γ_{xy} и интенсивности деформации ε_i наблюдаются в области преграды, расположенной на расстоянии радиуса бойка от оси симметрии.

Значения сдвиговой деформации достигают 2%. Деформации ε_y в лицевом слое преграды в области контакта являются сжимающими, а на расстояниях от оси симметрии, больших радиуса бойка, – растягивающими (~0,5%). Другие компоненты тензора деформации в лицевом слое – сжимающие.

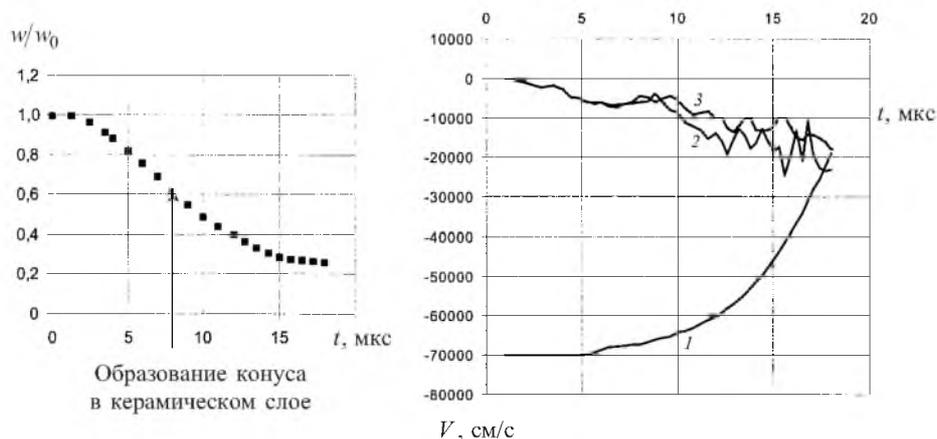


Рис. 4. Изменение общей кинетической энергии во времени при ударном взаимодействии бойка с многослойной преградой.

Рис. 5. Изменение скорости во времени при ударном взаимодействии бойка с многослойной преградой: 1 – тыльная поверхность бойка; 2 – контактная поверхность бойка с лицевым слоем преграды; 3 – контактная поверхность между лицевым и тыльным слоем преграды.

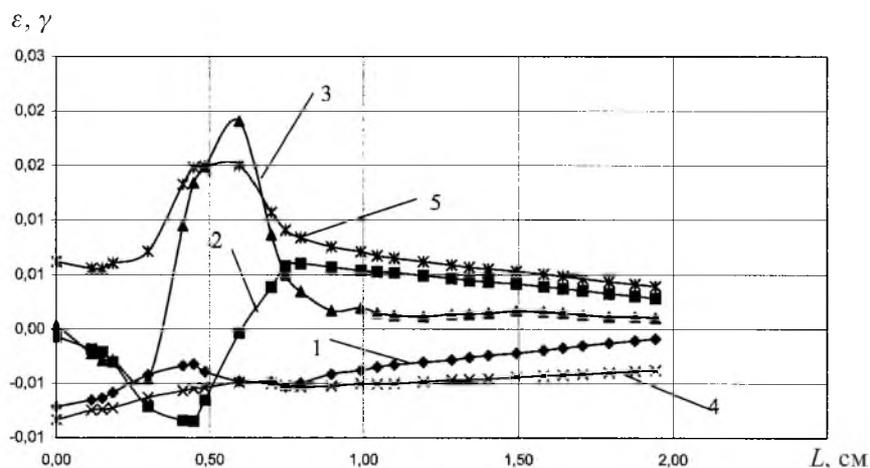


Рис. 6. Распределение деформаций в верхнем слое пластины из оргстекла (толщина 15 мм, диаметр 60 мм) в момент времени $t = 50$ мкс при скорости удара 10 м/с: 1 – ε_x ; 2 – ε_y ; 3 – γ_{xy} ; 4 – ε_θ ; 5 – ε_z .

Анализ результатов расчетов показал, что для относительно тонких пластин у их тыльной поверхности преобладают растягивающие окружные деформации, которые по достижении критической величины вызывают появление радиальных трещин. Для толстых пластин наибольшими будут сдвиговые деформации, достигающие максимума у лицевой поверхности в области, расположенной непосредственно в зоне контакта. Изучение кине-

тики напряженно-деформированного состояния в пластинах свидетельствует о том, что трещины сдвига, возникшие в этой области, при распространении должны преобразовываться в трещины отрыва, что согласуется с полученными экспериментальными результатами и известными данными фрактографических исследований.

Резюме

Розглянуто особливості деформування і руйнування пластин із крихких матеріалів під дією ударного навантаження. Представлено результати числового моделювання ударної взаємодії бойка з багаточисловими пластинами, до складу яких входить крихкий шар. Розвинуто методики досліджень крихких матеріалів на стиск і пробій. Проведено зіставлення результатів експериментальних і числових досліджень.

1. *Степанов Г. В.* Упругопластическое деформирование и разрушение материалов при импульсном нагружении. – Киев: Наук. думка, 1991. – 288 с.
2. *Харченко В. В.* Моделирование процессов высокоскоростного деформирования материалов с учетом вязкопластических эффектов. – Киев: ЛОГОС, 1999. – 280 с.

Поступила 06. 11. 2001