

Влияние ориентации механических свойств композиционных материалов на динамическое разрушение преград из них при высокоскоростном нагружении

Радченко А.В.¹, Радченко П.А.²

¹Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск,

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск

Рассматривается задача нормального взаимодействия стального изотропного компактного цилиндрического ударника с ортотропной пластиной на пределе пробития в диапазоне скоростей удара от 50м/с до 400м/с. Материалом преграды является как органопластик с начальной ориентацией механических свойств, так и материал, чьи свойства получаются поворотом на 90° относительно оси ОУ исходного материала. Исследовано разрушение преград, проведен сравнительный анализ эффективности их защитных свойств в зависимости от ориентации упругих и прочностных свойств анизотропного материала. Задача решается численно, методом конечных элементов в трехмерной постановке. Поведение материала ударника описывается упругопластической моделью, поведение анизотропного материала преграды описывается в рамках упруго-хрупкой модели с учетом различных пределов прочности материала на сжатие и растяжение.

Реакции изотропного и анизотропного материалов на внешнюю нагрузку имеют существенные количественные и качественные различия. Причем, если при статических нагрузках такие различия обусловлены тем, что в анизотропном материале от направления зависят такие характеристики материала как модули упругости и прочностные параметры, то при динамических нагрузках дополнительным фактором, влияющим на напряженно-деформированное состояние анизотропного материала, будет являться зависимость от направления скорости распространения волн напряжений.

Несмотря на то, что новейшие материалы с заданной направленностью свойств имеют широкое применение в качестве конструкционных, количество работ, посвященных исследованию их свойств при динамических нагрузках, крайне незначительно. Анализ поведения таких материалов проводится, как правило, с использованием инженерных методик и позволяет получить приблизительные оценки интегральных параметров для условий, допускающих понижение размерности задачи с трех (поведение анизотропных материалов, как правило, трехмерное) до двух. Подобные случаи ограничиваются осесимметричным воздействием на транслопный материал. Но такие ключевые факторы, как динамика разрушения, сравнительный анализ поведения материалов с различной симметрией свойств, эволюция волновых

процессов, влияние ориентации свойств, которые могут стать определяющими при динамических процессах, остаются за рамками подобных методик.

В работе рассматриваются особенности деформирования и разрушения хрупких анизотропных материалов при ударном нагружении стальными ударниками. Исследуется влияние поворота как упругих, так и прочностных свойств органопластика на пробитие преград в диапазоне скоростей 50–400 м/с. Учитывается различная прочность материала на растяжение и сжатие. Исследование поведения материала при низкоскоростном взаимодействии позволяет проследить закономерности зарождения и развитие разрушения в анизотропном материале.

Рассматривается трехмерная задача ударного взаимодействия компактного (диаметр ударника, равный его высоте, составляет 15 мм) цилиндрического ударника (область D_1) с преградой (область D_2). Толщина преграды составляет 15 мм, диаметр 60 мм. Материал ударника — изотропная сталь марки Сталь 3 ($\rho_0=7850\text{кг/м}^3$, $E=204\text{ГПа}$, $G=79\text{ГПа}$, $\sigma_d=1,01\text{ГПа}$), материал преград — ортотропный органопластик ($\rho_0=1350\text{кг/м}^3$). Ориентация свойств ортотропного материала изменяется путем поворота осей симметрии исходного материала вокруг оси OY на угол $\beta=90^\circ$. В качестве исходного материала ($\beta=0^\circ$) преград рассматривается ортотропный органопластик со следующими упругими и прочностными характеристиками [6]: $E_x=48.6\text{ГПа}$, $E_y=21.3\text{ГПа}$, $E_z=7.14\text{ГПа}$, $c_x=6000\text{м/с}$, $c_y=3970\text{м/с}$, $c_z=2300\text{м/с}$, $\nu_{xy}=0.28$, $\nu_{yz}=0.26$, $\nu_{xz}=0.25$, $\sigma_x^p=2.67\text{ГПа}$, $\sigma_y^p=1.18\text{ГПа}$, $\sigma_z^p=0,39\text{ГПа}$, $\sigma_x^c=0.37\text{ГПа}$, $\sigma_y^c=0.5\text{ГПа}$, $\sigma_z^c=1,94\text{ГПа}$, $\tau_{xy}=0.975\text{ГПа}$, $\tau_{yz}=0.8\text{ГПа}$, $\tau_{xz}=0.607\text{ГПа}$. Здесь E_x , E_y , E_z и c_x , c_y , c_z — модули упругости и скорости звука в соответствующих направлениях; ν_{xy} , ν_{yz} , ν_{xz} — коэффициенты Пуассона; σ_x^p , σ_x^c , τ_{xy} — прочностные параметры на растяжение, сжатие и сдвиг. Исследован диапазон начальных скоростей ударника от 50 до 400 м/с. Угол встречи (угол между нормалью к преграде и продольной осью ударника) составлял $\alpha=0^\circ$ (нормальный удар).

Для изотропного ударника используется модель упругопластического поведения материала с использованием уравнения состояния Ми-Грюнаизена. Для преграды применяется модель упруго-хрупкого поведения материала.

В направлении оси Z исходный материал обладает наибольшей прочностью на сжатие и наименьшей прочностью на растяжение. Переориентированный материал,

наоборот, вдоль оси Z имеет наименьшую прочность на сжатие и наибольшую прочность на растяжение. Помимо различных пределов прочности на растяжение и сжатие на динамику разрушения существенно будут влиять скорости распространения волн сжатия и разгрузки, которые в анизотропном материале зависят от направления.

На свободных поверхностях ударника и преград выполняются условия отсутствия напряжений $\mathbf{T}_{mn} = \mathbf{T}_{ns} = \mathbf{T}_{nr} = 0$, на контактных поверхностях между ударником и преградой и между пластинами разнесенной преграды реализуются условия скольжения без трения $\mathbf{T}_{nn}^+ = \mathbf{T}_{nn}^-$, $\mathbf{T}_{nr}^+ = \mathbf{T}_{nr}^- = \mathbf{T}_{ns}^+ = \mathbf{T}_{ns}^- = 0$, $\mathbf{v}_n^+ = \mathbf{v}_n^-$. Здесь \mathbf{n} — единичный вектор нормали к поверхности в рассматриваемой точке, $\boldsymbol{\tau}$ и \mathbf{s} — единичные векторы, касательные к поверхности в этой точке, \mathbf{T}_n — вектор силы на площадке с нормалью \mathbf{n} , \mathbf{v} — вектор скорости. Нижние индексы у векторов \mathbf{T}_n и \mathbf{v} означают проекции на соответствующие вектора базиса; знак плюс "+" характеризует значение параметров в материале на верхней границе контактной поверхности, знак минус "-" — на нижней.

На рис. 1 – рис. 2 представлены конфигурации ударника и преград с распределением изолиний относительного объема разрушений для различных скоростей взаимодействия в момент времени $t=40\text{мкс}$. Слева от оси симметрии даны конфигурации для исходной ориентации материала преграды, справа — для переориентированного материала.

Для случая начальной ориентации свойств органопластика при скорости 50м/с (рис. 1а, слева от оси симметрии) на лицевой поверхности преграды по периметру ударника и на контактной поверхности в центре преграды формируются конические зоны разрушения, ориентированные под углом 45° к направлению удара. Эти зоны возникают в начальный период взаимодействия за счет действия растягивающих напряжений в волнах разгрузки, распространяющихся с лицевой поверхности преграды и боковой поверхности ударника. Дальнейшее развитие этих зон разрушения обусловлено действием растягивающих напряжений в результате внедрения ударника. При начальной скорости 50м/с нет сквозного пробития преграды. К 30мкс скорость ударника падает до нуля и наблюдается отскок ударника от преграды. В табл. 1 представлены значения вертикальной составляющей скорости центра масс ударника v_z и доли разрушенного материала преграды на растяжение D_t и сжатие D_p в момент времени $t=50\text{мкс}$.

Табл. 1

$v_0, \text{м/с}$	50		100		200		400	
β	0°	90°	0°	90°	0°	90°	0°	90°
$v_z, \text{м/с}$	-5,17	4,08	9,05	12,97	49,97	127,6	191,55	303,69
D_t	0,012	0,005	0,056	0,011	0,162	0,128	0,502	0,282
D_p	0,006	0,002	0,043	0,029	0,104	0,021	0,112	0,019

В случае переориентированного материала (рис. 1а, справа от оси симметрии) картина развития разрушения качественно иная. В этом случае прочность материала на сжатие в направлении оси Z (направление удара) минимальна. Это приводит к тому, что материал разрушается в волне сжатия, формирующейся в момент удара и распространяющейся по толщине преграды. Внедрение ударника при этом происходит в уже ослабленный материал. Хотя сквозного пробития в данном случае также нет, ударник проникает на большую глубину, и полное его торможение наблюдается в 50мкс. С увеличением скорости удара растет объем областей разрушения. При скорости 100м/с (рис. 1б) области разрушения распространяются на большую глубину по толщине преграды. Причем для исходного материала преграды выраженную ориентацию (45°) сохранила только трещина, распространяющаяся с лицевой поверхности по периметру ударника. Трещина, расположенная вблизи оси симметрии уже не идентифицируется. Это вызвано тем, что с увеличением скорости удара растет амплитуда волны сжатия — ее величина уже достаточна для разрушения материала в верхней половине преграды.

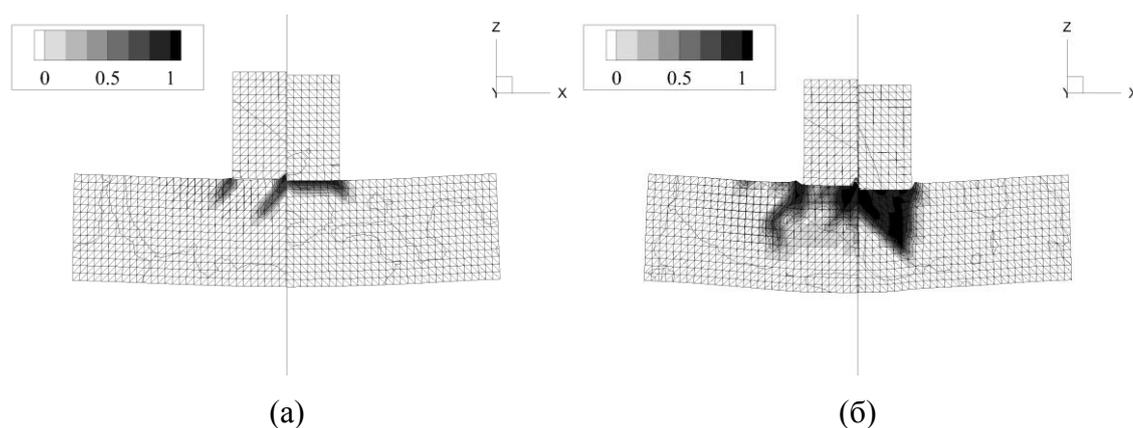


Рис. 1

В случае переориентированного материала волна разгрузки, распространяющаяся от тыльной поверхности преграды, понижает уровень сжимающих напряжений, что приводит к меньшему распространению области разрушения по толщине вблизи оси симметрии (рис. 1б). Для скорости 100м/с также не наблюдается сквозного пробития

преград, при этом в случае исходного материала скорость ударника до нуля падает к 45мкс, в случае переориентированного материала — к 60мкс.

Для скоростей удара 200м/с и выше (рис. 2) уже наблюдается сквозное пробитие преград из обоих типов материалов. Но при этом пластина из исходного материала оказывает большее сопротивление внедрению ударника по сравнению с пластиной из переориентированного материала. Например, при начальных скоростях 200м/с (рис. 2а) и 400м/с (рис. 2б) запреградная скорость ударника после пробития пластин из исходного материала составляет 37м/с и 187м/с соответственно, а запреградная скорость после пробития пластин из переориентированного материала 125м/с и 300м/с. Большее сопротивление внедрению ударника пластин из исходного материала обусловлено различной картиной разрушения, которая определяется ориентацией упругих и прочностных свойств по отношению к внешней нагрузке. Для скоростей удара свыше 200м/с наблюдается разрушение переориентированного материала в волне разгрузки, распространяющейся с тыльной поверхности преграды (рис. 2), что увеличивает объем разрушенного материала перед ударником, существенно снижая сопротивление внедрению. Такая динамика разрушения объясняется различными скоростями распространения волн в исходном и переориентированном материалах.

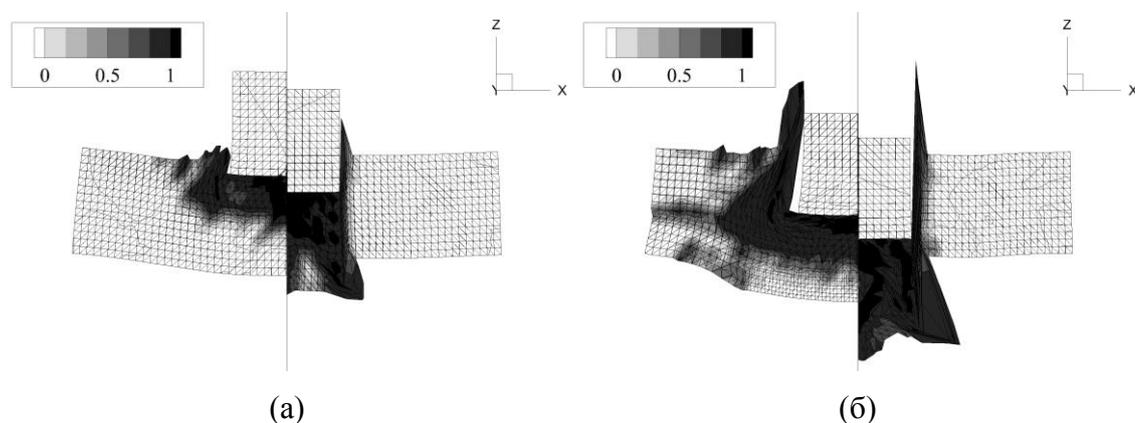


Рис. 2

В исходном материале скорость распространения волн наибольшая в направлении оси X — перпендикулярном направлении удара, поэтому волны разгрузки с лицевой поверхности преграды и боковой поверхности ударника понижают напряжения в волне сжатия до выхода ее на тыльную поверхность, что не приводит к разрушению материала в волне сжатия в нижней половине пластины и волне разгрузки с тыльной поверхности преграды, имеющей небольшую амплитуду за счет ослабления волны сжатия.

В переориентированном материале скорость распространения волн максимальна в направлении оси Z, поэтому волна сжатия теряет энергию только на разрушении

материала и отражаясь от тыльной поверхности интенсивной волной разгрузки, разрушающей материал.

Проведен количественный и качественный анализ разрушения анизотропных пластин конечной толщины при низкоскоростном ударе — на пределе пробития. Установлено, что формирование и направление развития зон разрушения в преграде определяется ориентацией упругих и прочностных свойств анизотропного материала по отношению к направлению удара. В зависимости от ориентации свойств возможно развитие конических трещин, обусловленных комбинированным действием растягивающих напряжений в волнах с разгрузки и за счет внедрения ударника, либо разрушение материала в волне сжатия и разгрузки.

Литература

1. Радченко А.В. Моделирование поведения анизотропных материалов при ударе // Механика композиционных материалов и конструкций. 1998. Т.4. № 4. С. 51-61.
2. Уилкинс М.Л. Расчет упругопластических течений // В кн.: Вычислительные методы в гидродинамике. М.: Мир, 1967. С. 212—263.
3. Горельский В.А., Радченко А.В., Хорев И.Е. Кинетические механизмы процесса пробития двухслойных пластин // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. 1988. № 6. С. 185—189.
4. Радченко А.В., Кобенко С.В. Зависимость разрушения анизотропного материала от ориентации упругих и прочностных свойств при ударе // ДАН. 2000. Т. 373. № 4. С. 479—482.
5. Ву Э.М. Феноменологические критерии разрушения анизотропных сред. // В кн.: Механика композиционных материалов. М.: Мир, 1985. С. 401—491.
6. Ашкенази Е. К., Ганов Э. В. Анизотропия конструкционных материалов. Справочник. Л.: Машиностроение, 1980. 248 с.