

Влияние применения различных критериев прочности на поведение анизотропных материалов при динамическом нагружении

Радченко П.А.¹, Радченко А.В.²

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, ²Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск

Проведен сравнительный анализ результатов расчетов разрушения ортотропных преград с использованием различных критериев разрушения при различных скоростях ударного нагружения преград. Рассмотрены особенности деформирования и разрушения материалов преград при использовании критериев разрушения Цая-Ву, Хоффмана, Ашкенази, Мизеса-Хилла. В этих критериях используются в различных комбинациях значения прочности материала при сжатии и растяжении, текущее значение гидростатического напряжения, значения прочности материала под углом 45° относительно осей симметрии материала, а также данных, полученных при двухосном нагружении материала. Задача решалась численно методом конечных элементов в трехмерной постановке.

Большинство композиционных материалов изначально обладает анизотропией механических свойств. Часто при расчете прочности таких материалов их механические характеристики усредняют, и материал полагают изотропным. Это может приводить к погрешностям в расчетах прочности композиционных материалов. Не менее важным является вопрос выбора критерия прочности при моделировании разрушения анизотропного материала. На сегодняшний день существует множество критериев разрушения для анизотропных материалов. Однако каждый из них имеет ограниченную сферу применимости. В данной работе приведены результаты численных расчетов разрушения ортотропного материала с использованием различных критериев разрушения.

Полученные результаты расчетов деформирования и разрушения ортотропных преград сравнивались с результатами расчетов разрушения изотропной преграды, упругие характеристики которой получены методом усреднения Фогта-Рейса-Хилла.

Целью данной работы является исследование влияния применения различных критериев разрушения на результаты численного моделирования деформирования и разрушения анизотропных преград. В качестве численного метода используется метод конечных элементов, модифицированный Г. Р. Джонсоном для задач удара [1].

Рассматривается деформирование преград из ортотропного материала, оси анизотропии материала совпадают с осями системы координат. Так же как и для изотропной среды, система уравнений, описывающая нестационарные адиабатные движения сжимаемой

анизотропной среды включает в себя: уравнение неразрывности, уравнения движения сплошной среды, уравнение энергии [2].

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

В качестве критериев разрушения для ортотропного материала применялись следующие критерии прочности: критерий разрушения Цая-Ву, Хоффмана, Мизеса-Хилла и Ашкенази.

Хрупкое разрушение изотропного материала преграды моделировалось с помощью критерия разрушения Мизеса (критерий разрушения Мизеса-Хилла при равенстве характеристик прочности материала во всех направлениях обращается в критерий Мизеса).

Рассматривается взаимодействие компактного цилиндрического стального ударника, диаметром и высотой 15мм, с преградой из органопластика. Материал ударника, Сталь 3, имеет следующие механические свойства: $\rho_0=7850\text{кг/м}^3$, $E=204\text{ГПа}$, $G=79\text{ГПа}$, $\sigma_{0.2}=1,01\text{ГПа}$. Преграда имеет толщину 30мм, диаметр 120мм. Деформирование ортотропного материала преграды описывается упруго-хрупкой моделью и обладает упругими свойствами, указанными в табл. 1 [3], где E_i — модули Юнга, G_{ij} — модули сдвига, ν_{ij} — коэффициенты Пуассона.

Таблица 1. Упругие характеристики преграды.

	E_x , МПа	E_z , МПа	E_y , МПа	G_{xy} , МПа	G_{zx} , МПа	G_{yz} , МПа	ν_{xy}	ν_{zx}	ν_{yz}
Ортотропный	48600	7141,5	21300	930	850	900	0,28	0,037	0,26
Изотропный	8692			3272			0,328		

Прочностные свойства материала преграды: $X_{11}=2,67\text{ГПа}$, $X_{22}=1,18\text{ГПа}$, $X_{33}=0,395\text{ГПа}$, $X'_{11}=0,37\text{ГПа}$, $X'_{22}=0,5\text{ГПа}$, $X'_{33}=1,94\text{ГПа}$, $X_{12}=0,975\text{ГПа}$, $X_{23}=0,8\text{ГПа}$, $X_{31}=0,607\text{ГПа}$, $X_{11}^{(12)}=2,3\text{ГПа}$, $X_{11}^{(13)}=2\text{ГПа}$, $X_{22}^{(12)}=1\text{ГПа}$, $X_{22}^{(23)}=0,9\text{ГПа}$, $X_{33}^{(13)}=0,31\text{ГПа}$, $X_{33}^{(23)}=0,35\text{ГПа}$, $X_{12}^{(45)}=1,85\text{ГПа}$, $X_{13}^{(45)}=1,215\text{ГПа}$, $X_{23}^{(45)}=1,8\text{ГПа}$, $X=1,413\text{ГПа}$.

В случае если прочностные характеристики материала преграды при растяжении и при сжатии полагались одинаковыми (критерий Мизеса-Хилла, Ашкенази), они полагались равными прочностным характеристикам материала при растяжении.

Проведено численное моделирование нормального ударного нагружения ортотропных преград стальным цилиндрическим ударником при скоростях взаимодействия 200м/с, 600м/с, 1000м/с с применением различных критериев прочности. Результаты

расчетов сравнивались с результатами моделирования ударного нагружения преграды из изотропного материала с усредненными упругими (по методу Фогта-Рейса-Хилла) и прочностными характеристиками. Качественно картину разрушения преград характеризуют рис. 1 – рис. 3, на которых представлены распределения в сечениях преград массовых долей разрушенных элементов. Сечение преград сделаны в плоскости ZOХ, материал имеет максимальные упругие свойства в направлении оси OZ (направление ударного нагружения) и минимальные в направлении оси OX. Из применяемых в данной работе критериев разрушения минимальное количество допущений имеет критерий Цая-Бу (рис. 1а). В критерии Хоффмана (рис. 1б) уже отсутствуют характеристики материала при двухосном нагружении и картина разрушения материала преграды имеет некоторые отличия: меньшую глубину при близком радиусе кратера.

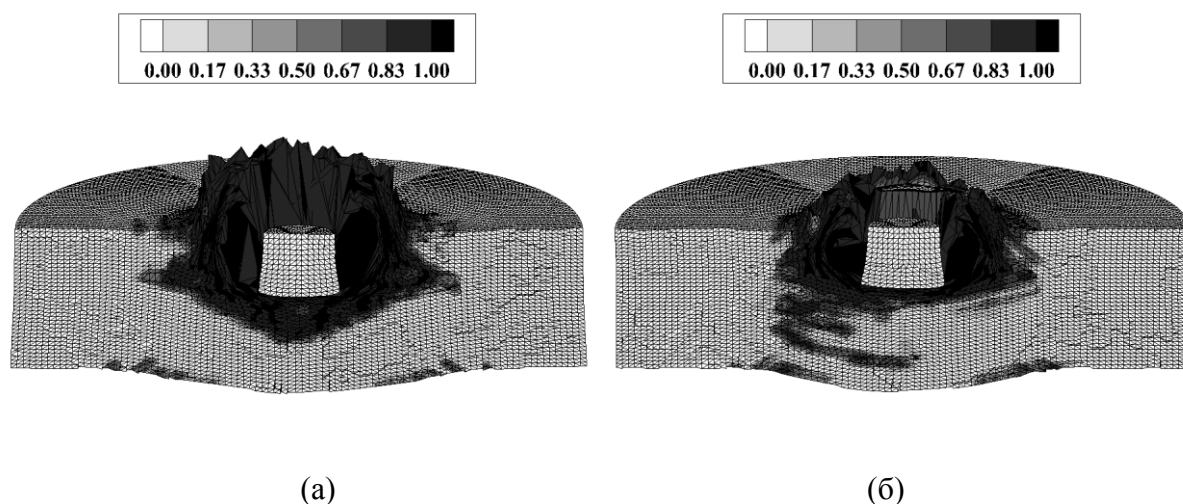


Рис. 1

При использовании критерия разрушения Мизеса-Хилла (рис. 2а), наиболее применяемого критерия предельного состояния анизотропных материалов, не учитываются иные пределы прочности материала преграды при сжатии, а также не учитывается влияние гидростатического напряжения на разрушение. На рисунке наблюдается развитие трещин примерно под углом 45° к направлению осей симметрии материала преграды [4]. В критерии разрушения Ашкенази (рис. 2б) также не учитываются иные пределы прочности материала преграды при сжатии в направлении осей симметрии материала, но дополнительно учитываются значения пределов прочности под углом 45° к осям симметрии материала преграды и также как и в критериях разрушения Цая-Бу и Хоффмана учитывается влияние гидростатического напряжения на разрушение. Материал преграды при использовании критериев Мизеса-Хилла и Ашкенази разрушается по типу выбивания “пробки” при наличии “трещин”, распространяющихся под углом 45° к направлению осей симметрии материала преграды. Таким образом, и в критерии Мизеса-Хилла и критерии Ашкенази учитываются

значения прочности ортотропного материала только при растяжении (а они минимальны в материале преграды в направлении ударного нагружения), и не учитываются значения прочности материала при сжатии в направлении ударного нагружения. Композиционные материалы нередко имеют различные значения прочности материала при растяжении и при сжатии, и это обстоятельство при моделировании разрушения следует учитывать.

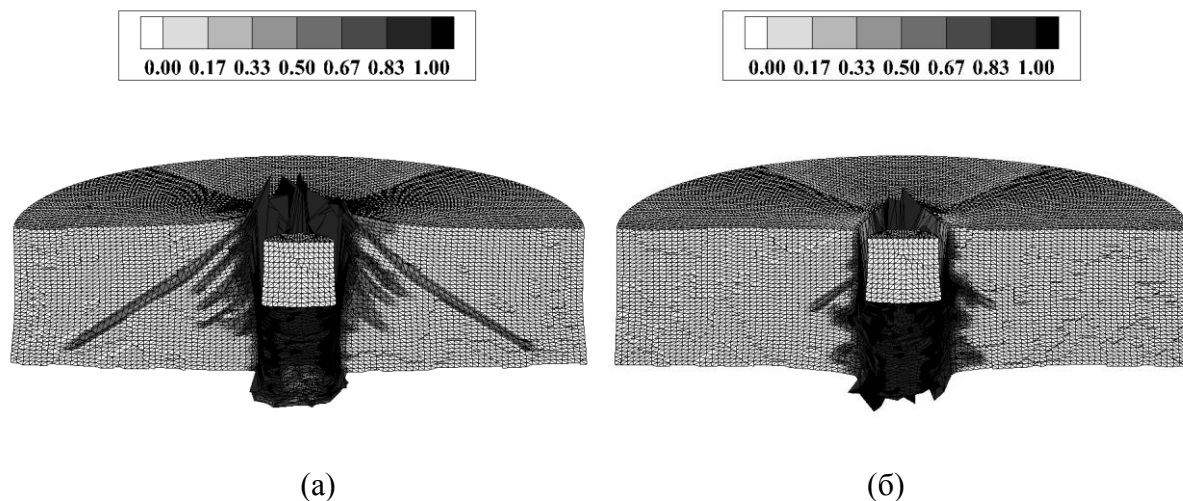


Рис. 2

Усреднение упругих характеристик ортотропного материала приводит к изменению волновой картины деформирования в материале преграды, а усреднение прочностных характеристик ортотропного материала приводит к уменьшению доли разрушенного материала [4]. Сравнение зоны разрушения в изотропном материале преграды с зонами разрушения, полученными с применением различных критериев разрушения анизотропных материалов (рис. 1 – рис. 3) это подтверждает. При использовании изотропного критерия разрушения не учитывается: влияние гидростатического напряжения, различных значений прочности при растяжении и при сжатии, значений прочности под углом 45° относительно осей симметрии материала, а также значений прочности при двухосном нагружении материала на разрушение материала. Разрушение материала при использовании критерия Мизеса-Хилла наиболее близко к случаю изотропного критерия разрушения. Это объясняется тем, что критерий разрушения Мизеса-Хилла не позволяет учитывать влияние гидростатического напряжения, а также значения различных пределов прочности материала при растяжении и при сжатии, как и изотропный критерий разрушения. На рис. 3 видна область разрушения изотропного материала подобно рис. 2а (разрушение ортотропного материала с использованием критерия Мизеса-Хилла), но поскольку в результате усреднения в материале преграды предел прочности значительно превышает значение минимального значения прочности ортотропного материала, в целом объем разрушения значительно меньше.

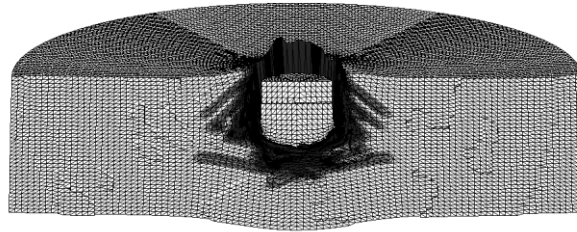
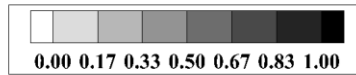


Рис. 3

Количественно деформационное поведение и разрушение преград характеризуют зависимости скорости центра масс ударников от времени, представленные на рис. 4. Во всех случаях учета анизотропии механических свойств материала преграды в материале преграды имеются разрушения. Торможение ударника при его начальной скорости 200м/с, в случае моделирования преграды со свойствами изотропного материала отражает факт отсутствия разрушений в преграде (кривая 5 на рис. 4а). При начальной скорости ударника 600м/с в изотропном материале преграды имеются разрушения (рис. 3). С увеличением скорости нагружения кривые торможения ударников при использовании критериев разрушения Цая-Ву и Хоффмана для материалов преграды сближаются и пересекаются, то есть влияние характеристик, связанных с двухосным нагружением материала, используемых в критерии разрушения Цая-Ву уменьшается.

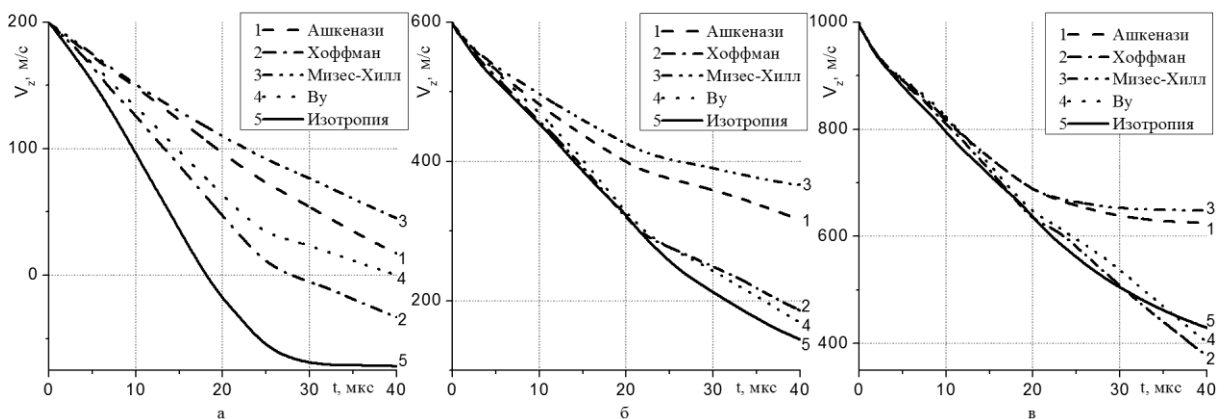


Рис. 4

Таким образом, выбор критерия разрушения анизотропного материала должен зависеть от многих факторов: от анизотропии характеристик материала при растяжении и при сжатии, зависимости свойств материала от гидростатического напряжения, от наличия экспериментальных данных, полученных не только в одномерных опытах, но и двумерных. При повышении скорости нагружения влияние учета характеристик, связанных с двухосным

нагрузением материала, используемых в критерии разрушения Цзя-Бу уменьшается. Для анизотропных материалов, характеризующихся заметным различием значений прочности при растяжении и сжатии, увеличивается роль этих различий при увеличении скорости нагружения.

Литература

1. Johnson G.R. High velocity impact calculation in three dimensions // J. Appl. Mech. - 1977. - V. 44, №3. - P. 95-100.
2. Седов Л. И. Механика сплошных сред. - М.: Наука, 1976. - Т. 2. - 574 с.
3. Кривошеина М. Н., Радченко А. В., Кобенко С. В. Разрушение ортотропного и изотропного сферических тел под действием импульса всестороннего сжатия // Механика композиционных материалов и конструкций. - 2001. - Т. 7, № 1. - С. 95-102.
4. Кривошеина М.Н., Туч Е.В, Кобенко С.В. Усреднение свойств композиционных анизотропных материалов при численном моделировании их разрушения // Физическая мезомеханика. - 2010. - Т. 13, № 2. - С. 55-61.