

А. В. Радченко, П. А. Радченко, Г. Я. Полевщиков

Численное моделирование поведения хрупких анизотропных материалов и конструкций из них при динамических нагрузках

A. V. Radchenko, P. A. Radchenko, G. Y. Polevshikov

Numerical Modeling of Behavior of Brittle Anisotropic Materials and Designs from them at Dynamic Loadings

Численно моделируется деформирование и разрушение хрупких анизотропных материалов и конструкций из них при ударных и импульсных нагрузках. Рассмотрено высокоскоростное взаимодействие стальных ударников с анизотропными преградами в диапазоне скоростей 700–2000 м/с, импульсное всестороннее сжатие ортотропного шара и падение заполненной оболочечной конструкции, имитирующей ракетный двигатель на твердом топливе, на жесткое основание. Проводится сравнение с имеющимися экспериментальными данными. Исследуется влияние анизотропии на напряженно-деформированное состояние, ударно-волновые процессы и разрушение материала. Численное моделирование проводится методом конечных элементов в трехмерной постановке в рамках феноменологического подхода механики сплошной среды. Поведение анизотропного материала описывается упруго-хрупкой моделью, учитывающей различия в прочности анизотропного материала при сжатии и растяжении, для описания поведения стального ударника используется упругопластическая модель.

Ключевые слова: анизотропия, прочность, упругость, разрушение, численное моделирование.

DOI 10.14258/izvasu(2014)1.1-25

Влияние анизотропии на напряженно-деформированное состояние. Численное моделирование поведения изотропных и анизотропных материалов при динамических нагрузках проводится в рамках феноменологического подхода механики сплошной среды [1], методом конечных элементов [2] в трехмерной постановке. Учет анизотропных свойств материала существенно усложняет задачу исследования поведения таких материалов как на стадии математического моделирования, так и при анализе полученных результатов. Потому необходимо определить диапазон скоростей взаимодействия, в котором анизотропия свойств для рас-

считываемого материала является существенным фактором. В таблице приведены расчетные значения запреградных скоростей компактного стального ударника массой $m = 20$ г после пробития трансформных преград из органопластика с различной степенью анизотропии $n = E_x / E_z$: от 0,1 до 10, $n = 1$ соответствует случаю изотропной пластины, E_x, E_z — модули Юнга в направлении X и Z . Толщина преград составляла $h = 24$ мм, начальная скорость ударника $v_0 = 2000$ м/с и $v_0 = 1000$ м/с. Величина δ_{it} — относительное отклонение запреградной скорости ударника по сравнению с изотропным случаем.

Key words: anisotropy, strength, elasticity, fracture, numerical modeling.

* Работа выполнена при частичной поддержке СО РАН (интеграционный проект №99).

Запреградные скорости ударника при взаимодействии с трансропными преградами с различной степенью анизотропии

n	0,1	0,3	1	6,4	10
$U_0 = 2000 \text{ м/с}$					
$U_1, \text{ м/с}$	1054	1051	1082	1060	1035
$\delta_{vi}, \%$	2,9	2,9	0	2,0	4,0
$U_0 = 1000 \text{ м/с}$					
$U_1, \text{ м/с}$	533	557	578	468	371
$\delta_{vi}, \%$	8,0	4,0	0	19,0	36,0

Анализ результатов позволяет сделать вывод, что влияние анизотропии уменьшается с увеличением скорости взаимодействия. Зависимость скоростей распространения волн напряжений от на-

правления в анизотропном материале определяет качественные и количественные отличия в динамике напряженно-деформированного состояния от изотропного материала. На рисунке 1 представлено распределение изолиний напряжения σ_z в изотропной и анизотропной преградах при ударе со скоростью 1000 м/с.

За счет того, что в трансропной преграде скорость распространения волн в направлении X больше, чем в направлении Z ($c_x/c_z=2,6$), в ней наблюдается сужение области сжатия. Характерной особенностью поведения анизотропного материала является влияние на прочность гидростатического давления. Если для изотропных материалов постулируется отсутствие влияния на прочность гидростатического давления — всестороннее сжатие не может приводить к разрушению, то для анизотропного материала этот постулат не выполняется. Уже на стадии сжатия в анизотропном материале возникают области сдвиговых напряжений, в которых происходит разрушение материала.

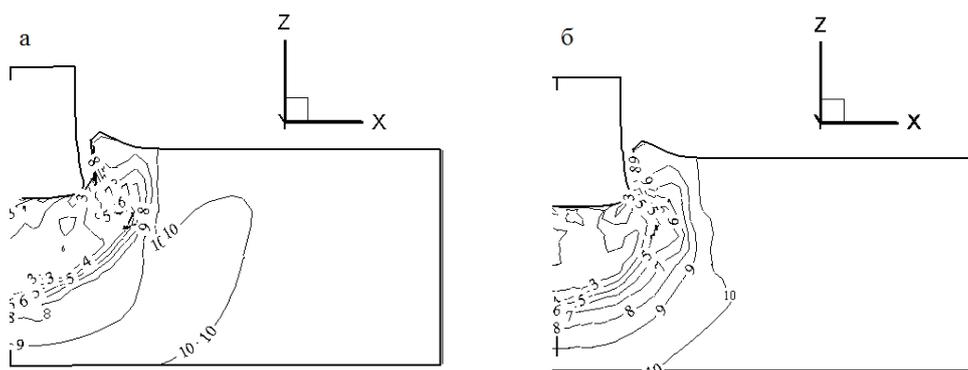


Рис. 1. Распределение изолиний σ_z в изотропной (а) и трансропной (б) преградах. $t = 5 \text{ мкс}$; $h = 19 \text{ мм}$; $m = 10 \text{ г}$; 10–10, 9–120, 8–230, 7–340 МПа

На рисунке 2 представлены зоны разрушения в ортотропном шаре, нагружаемом импульсом всестороннего сжатия амплитудой 3ГПа в течение 3 мкс.

Еще на стадии сжатия в шаре образуются области растягивающих напряжений, приводящих к разрушению материала.

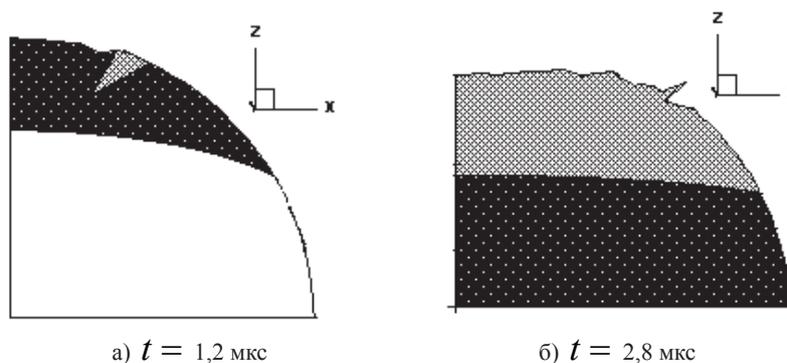


Рис. 2. Области разрушения. ■ — сжатие; ▨ — растяжение

Взаимодействие оболочечных конструкций с жестким основанием. Для адекватного описания поведения конструкций необходимо учитывать пространственный характер реализующегося в них напряженно-деформированного состояния, обусловленный несколькими факторами: наличие элементов, приводящих к геометрической несимметричности; учет реальных условий нагружения, — как правило, они не симметричны; анизотропия физико-механических свойств материалов элементов конструкций. Наличие хотя бы одного из вышеперечисленных факторов делает необходимым проведение анализа в трехмерной постановке, что является весьма сложной и трудоемкой задачей, так как в этом случае, помимо создания адекватной модели поведения материалов, необходимо наиболее реально учитывать геометрию и пространственное расположение различных элементов конструкции.

Рассмотрим деформирование и разрушение заполненной оболочечной конструкции (рис. 1), моделирующей ракетный двигатель на твердом топливе, при падении на жесткое основание. Такая ситуация весьма реальна в процессе транспортировки и погрузки и касается как эксплуатационной безопасности ракетного двигателя на твердом топливе, так и экологической безопасности окружающей среды. В результате удара возможна детонация топлива или повреждения элементов конструкций, которые сделают невозможным дальнейшую эксплуатацию двигателя. Материал оболочки и сферических вставок — стеклопластик, поведение которого задано моделью [1]. Оболочка и вставки скреплены между собой и с упругим низко модульным наполнителем, моделирующим твердое топливо. Конструкция имела следующие соотношения геометрических параметров: $L/R = 1,4$, $H/R = 0,03$, $h/R = 0,7$, $r_1/R = 0,26$, $l_1/R = 1,2$, где R — внешний радиус оболочки; H — толщина оболочки; h — толщина вставки; h_1 — толщина слоя наполнителя; r_1 , l_1 — радиус и длина вставки. Рассмотрено

падение конструкции с высоты от 5 до 50 м, под углами от 0 до 30°.

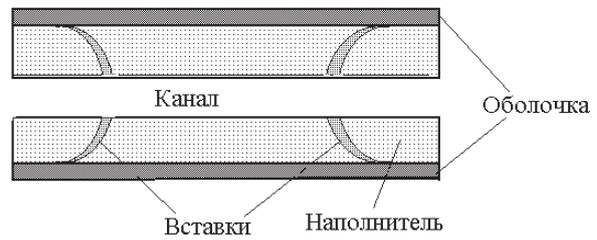


Рис. 3. Продольное сечение ракетного двигателя на твердом топливе

На рисунке 4 приведено распределение изолиний напряжения (а) σ_z (в МПа) в продольном и поперечном сечениях в момент времени 1,5 мс и поперечное сечение конструкции вблизи левого торца в месте нахождения вставки с обозначением областей разрушения в 20 мс после начала взаимодействия (б) при падении с высоты 5 м. Вставка имеет сферическую форму — в сечении отображается только ее средняя область, а области, прилегающие к оболочке и каналу, не отображаются. Как показывают расчеты, разрушение вставок начинается с 1,5 мс после взаимодействия в нижней части конструкции, и к 12 мс вставки в секторе $0^\circ \leq \varphi \leq 55^\circ$ разрушаются практически полностью. Оболочка также подвергается разрушению, но менее значительному, зона разрушения в оболочке ограничена сектором $30^\circ \leq j \leq 35^\circ$. Разрушение вставок происходит за счет инерционного воздействия на них наполнителя, возникающего в результате торможения конструкции при ударе и обусловленного различием физико-механических свойств наполнителя и вставок. В месте нахождения вставок наблюдается резкий скачок напряжений (рис. 4б).

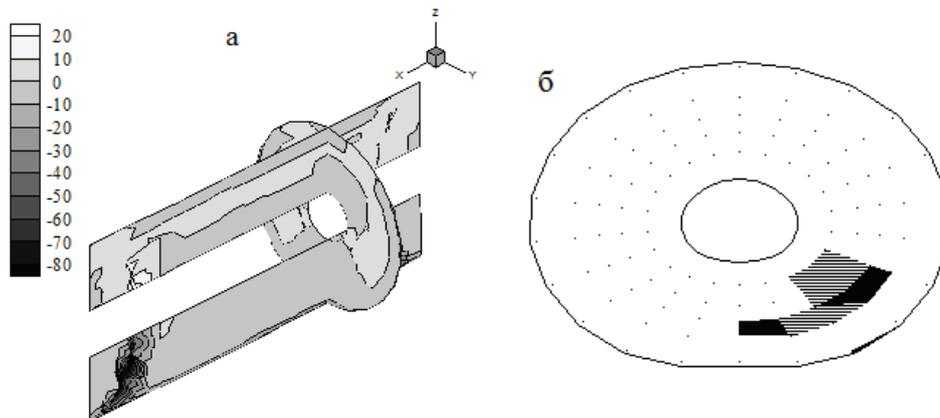


Рис. 4. а — распределение σ_z в плоскостях ZOX и ZOY . $h_0 = 5$ м, $t = 1,5$ мс; б — области разрушения во вставке, $t = 20$ мс

В наполнителе уровень напряжений лежит в пределах $-0,1-0,1$ МПа. Пики напряжения во вставках и прилегающих областях наблюдаются в начальный период взаимодействия. С течением времени в результате разрушения вставок напряжения в этой области уменьшаются. Наличие

сферических вставок увеличивает жесткость конструкции и обеспечивает уменьшение объема разрушений в оболочке. В то же время вставки являются зонами концентрации напряжений и потенциальными очагами зарождения детонационных процессов в наполнителе.

Библиографический список

1. Радченко А. В. Модель поведения хрупких анизотропных материалов при динамических нагрузках и ее приложения // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. — 2003. — № 2.

2. Johnson G. R. High velocity impact calculations in three dimension // J. Appl. Mech. — 1977. — V. 44, № 1.