

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Рябинин И.А., Черкесов Г.Н. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем. - М.: Радио и связь, 1981.

2. A. Satyanarayana, A.Prabhakar. New topological formula and rapid algorithm for reliability analysis of complex networks.// IEE Trans. Reliability, vol 27. 1978. – P. 82-110.

3.К.К Aggarwal, Y.C.Chopra, J.S.Bajwa. Capacity consideration in reliability analysis of communication systems// IEE Trans. Reliability, vol. R-31, 1982. –P 177-180.

УДК 629.7.017.1

Лукашев Л.Г., Каргин Н.Т., Zhou Jinsong, Yang Dezhuang.

О КРИТЕРИЯХ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ КРАТЕРОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МЕТЕОРНО-ТЕХНОГЕННЫХ ЧАСТИЦ НА ЭЛЕМЕНТЫ КОНСТРУКЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Увеличение скорости полета летательных аппаратов до космических поставило новую проблему обеспечения живучести при возможном высокоскоростном соударении с ними частиц и тел естественного или искусственного происхождения. К частицам и телам естественного происхождения могут относиться пылевые, дождевые или градовые облака, камни, частицы метеорного вещества. Если для первого поколения космических аппаратов (КА), стартующих вертикально и часто под обтекателем ракеты-носителя, пылевые, дождевые или градовые облака, а также камни большой опасности не представляли, то для воздушно-космических самолетов, которые проектируются в настоящее время, а «Спейс Шаттл» и эксплуатируется, эти частицы и тела естественного происхождения представляют опасность.

Одной из важнейших проблем является безопасность космических полетов с учетом факторов внешней среды. К одному из этих факторов можно отнести возможное воздействие на элементы конструкций КА и их системы высокоскоростных механических частиц естественного и искусственного происхождения (частицы метеорного вещества и частицы космического мусора - space debris) Эти частицы при высоких скоростях соударения могут вызвать

повреждения конструкций и систем, которые, в свою очередь, приведут к невыполнению поставленной КА задачи.

Проблема создания конструкции повышенной живучести требует решения совокупности задач высокоскоростного соударения, остаточной прочности поврежденной конструкции, функциональной надежности и т.д. Решением этих задач обусловлена необходимость исследования физики высокоскоростного процесса внедрения частицы в преграду и пробоя тонкостенных конструктивных элементов КА.

В последнее время интенсивные экспериментальные и теоретические исследования проводятся в таком разделе баллистики, как высокоскоростное соударение. Много усилий тратится как для накопления экспериментальных данных, так и для формулировки феноменологических теорий, объясняющих поведение материалов под воздействием динамического высокоскоростного нагружения и многих сопутствующих ему явлений.

При теоретических исследованиях процессов высокоскоростного соударения возникают трудности, обусловленные математическим описанием мощных ударных волн и связанных с этим интегрированием нелинейных дифференциальных уравнений. При проведении натуральных экспериментов по исследованию воздействия метеорного вещества и частиц космического мусора на элементы конструкций КА возникают трудности технического и временного характера. Все это вынуждает исследователей обращаться к моделированию процессов соударений.

В работах отраслевой научно-исследовательской лаборатории летательных аппаратов (ОНИЛ-17) Самарского государственного аэрокосмического университета особое внимание уделено методам физического моделирования, как прямого, так и с использованием аналогий.

При моделировании высокоскоростного воздействия необходимо выбирать характеристики материала и критерии оценки сопротивления материала. Например, при моделировании кратерообразования часто используют твердость по Бринеллю как критерий этого сопротивления. Этот критерий очень удобен и прост, но тем не менее нуждается в уточнении.

В некоторых случаях при численном моделировании процессов высокоскоростного соударения нельзя не учитывать фазовые переходы в материале.

В СССР и США вопросам высокоскоростного соударения уделялось большое внимание. В лабораторных условиях имитировались процессы соударения ударников с различными конструкционными материалами.

В настоящей работе дан анализ результатов экспериментальных исследований высокоскоростного удара сферической частицы из материала ШХ-15 по образцам из конструкционных материалов: Д-16, АМГ6-Т, АМГ6-М, 30ХГСА-М, 30ХГСА-Т, ВТ-5 при нормальном соударении.

При исследовании высокоскоростного взаимодействия частицы с полубесконечными мишенями получены зависимости относительной глубины и относительного диаметра кратера от скорости соударения (рис. 1 и 2). Относительная глубина и относительный диаметр кратера представляют собой соответственно отношение глубины (P_c) и диаметра (D_c) кратера к диаметру частицы: $\bar{P} = \frac{P_c}{d}$ и $\bar{D} = \frac{D_c}{d}$.

В процессе разгона частицы в воздухе с используемым кумулятивным устройством размер ее уменьшается от абляции. Была найдена следующая зависимость

$$d = d_0 - 0,45H d_0^{1/3} (v_0 - 1), \quad (1)$$

где d_0 - исходный диаметр частицы, H - расстояние между начальным местом частицы и мишенью, v_0 - скорость соударения (км/с).

«Провал» на рис. 1 и 2 объясняется тем, что с учетом температуры давления при соударении значительно больше прочности частицы. Поскольку «провал» кривой характерен для материалов с низкими физико-механическими свойствами, то можно сделать вывод, что он определяется свойствами материала частицы. Отметим, что при скорости частицы, приближающейся к 4,9 км/с, «провал» достигает нижней точки. Эта скорость соответствует скорости звука в материале ШХ-15.

Хотя не существует точной математической формулы, которой можно оценить повреждение мишени при высокоскоростном ударе, в многочисленных литературных источниках есть много ценных эмпирических или полуэмпирических формул, с помощью которых можно с определенной точностью оценить параметры повреждения. При моделировании соударения считали, что кратер имеет форму полусферы. После нахождения его глубины можно рассчитать его диаметр и объем.

На рис. 3 приведены экспериментальные данные зависимости глубины кратера от скорости соударения для мишеней из Д-16 и 30ХГСА, а также кривые, рассчитанные по формуле [1]:

$$\frac{P_c}{d} = 2,28 \left(\frac{\rho_a}{\rho_0} \right)^{1/2} \left(\frac{v_0}{c_0} \right)^{3/4}, \quad (2)$$

где ρ_n и ρ_0 - плотность материала мишени и частицы, соответственно; v_0 - скорость соударения; c_0 - скорость звука в материале частицы.

Отметим, что величины относительной глубины, определенные по формуле (2), существенно превышают экспериментальные значения.

При моделировании процесса с использованием теории размерностей параметры соударяемых пар представлены в таблице 1.

В соответствии с π -теоремой теории размерностей из перечисленных пятнадцати, включая глубину кратера, параметров можно составить двенадцать независимых безразмерных комбинаций, функциональная связь между которыми должна дать в неявной форме уравнение, описывающее процесс соударения в предельно широком диапазоне скоростей:

$$\frac{P_c}{L_0} = F \left(\frac{\rho_1 v_0^2}{Hb_1}, \frac{\rho_2}{\rho_1}, \frac{Hb_2}{Hb_1}, K_0, \frac{L_0}{d_0}, \frac{a_2}{Q_1}, a_1, \sqrt{\frac{\rho_1}{Hb_1}}, b_1, b_2, \frac{\rho_0 Q_1}{Hb_1}, \frac{Q_2}{Q_1} \right), \quad (3)$$

где P_c - глубина кратера, Hb_1 - твердость мишени по Бринеллю. Остальные обозначения приведены в табл. 1.

Из анализа этого уравнения целесообразно перейти к несколько измененной системе безразмерных параметров:

$$\frac{P}{L_0} = F \left(\frac{\rho_1 v_0^2}{Hb_1}, \frac{\rho_2}{\rho_1}, \frac{Hb_2}{Hb_1}, K_0, \frac{L_0}{d_0}, \frac{\rho_2 a_2}{\rho_1 a_1}, a_1, \sqrt{\frac{\rho_1}{Hb_1}}, b_1, b_2, \frac{\rho_1 Q_1}{Hb_1}, \frac{Q_2}{Q_1} \right). \quad (4)$$

Отсюда непосредственно следует в наиболее общем виде система критериев моделирования изучаемого процесса.

В случае воздействия сферического ударника с плоской мишенью ($K_0=1$ и $L_0=d_0$, [2]) для металлов в соответствии с экспериментальными данными [3] можно принять

$$Q_1 \sqrt{\frac{\rho_1}{Hb_1}} \approx \text{const} \quad \text{и} \quad b_1 = b_2 \approx \text{const}.$$

Процесс высокоскоростного соударения должен осложняться явлением взрыва лишь тогда, когда скорость соударения v_0 превысит некоторое, свое для каждой пары соударяющихся тел, пороговое значение $v_{нп}$. В связи с этим при описании процесса соударения тел при скорости соударения допорогового диапазона ($v_0 \leq v_{нп}$) из системы определяющих параметров процесса могут быть исключены энергии сцепления Q_1 и Q_2 и, соответственно, мо-

гут быть исключены безразмерные отношения $\frac{\rho_1 Q_1}{Hb_1}, \frac{Q_2}{Q_1}$. Тогда в первом приближении можно

исключить $\frac{\rho_2 a_2}{\rho_1 a_1}$ и записать уравнение в форме

$$\frac{\rho_c}{d} = F_2 \left(\frac{\rho_1 v_0^2}{Hb_1}, \frac{\rho_2}{\rho_1}, \frac{Hb_2}{Hb_1} \right). \quad (5)$$

Для того, чтобы уравнение было явным, запишем его в следующем виде

$$\frac{\rho_c}{d} = X_1 \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^{X_2} \left(\frac{Hb_2}{Hb_1} \right)^{X_3} \left(\frac{\rho_1 v_0^2}{Hb_1} \right)^{X_4}, \quad (6)$$

где X_i ($i = \overline{1,4}$) являются искомыми коэффициентами, d_0 - диаметр частицы.

Для нахождения X_i используется метод перебора. Вначале выбирается интервал

$X_{i \min} \leq X_i \leq X_{i \max}$. Изменяя X_i в данном интервале

$$X_i = X_{i \min} + (X_{i \max} - X_{i \min}) / M_i,$$

где M_i - фактор, определяющий шаг изменения искомого X_i . Далее по результатам экспериментов рассчитывается функция

$$F = \sum_{i=1}^n \left[P_i - X_i \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^{X_2} \left(\frac{Hb_2}{Hb_1} \right)^{X_3} \left(\frac{\rho_1 v_0^2}{Hb_1} \right)^{X_4} \right]^2 = \sum [P_3 - P_T]^2, \quad (7)$$

где P_3 - относительная глубина кратера; P_T - величина относительной глубины по расчету по формуле 4 для выбранных X_i ; F - математическое ожидание; n - число экспериментов.

Значения X_i являются наиболее достоверными при минимальном значении F .

Закономерности изменения относительной глубины и относительного диаметра кратера с увеличением скорости соударения сходны.

Соответствующие формулы расчета параметров повреждения приведены в табл.2.

Сравнение результатов расчетов по эмпирическим формулам с экспериментальными данными приведены на рис. 4 и 5. Отметим, что оба результата хорошо совпадают.

Сравнение формулы расчета при относительно низкой скорости соударения с формулой при относительно высокой скорости соударения показывают:

показатель степени отношения плотностей уменьшается от 0,62 до 0,5 при увеличении скорости соударения от 2,6 до 7 км/с. Экстраполяция этого результата к метеорным скоростям соударения показывает, что влияние плотности частицы на проникновение может стать незначительным;

скорость соударения является самым важным фактором, влияющим на проникновение частицы в мишень при высокоскоростном соударении. Так, глубина и диаметр кратера увеличиваются по скорости в степени 0,68 при скорости более 5 км/с. При скорости менее 4 км/с только в степени 0,48.

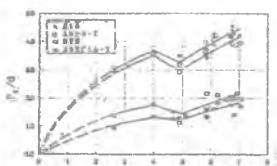
в формуле расчета диаметра кратера не существует члена отношения твердостей, причем показатель степени плотностей такой же небольшой, как при высокой скорости соударения, так и при низкой. Это показывает, что диаметр кратера, как и глубина, зависят, главным образом, от скорости соударения и слабо зависят от отношения плотностей и твердости соударяемых пар.

Таблица 2

$\frac{P_c}{d} = 0,5 \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^{0,62} \left(\frac{Hb_2}{Hb_1} \right)^{0,15} \left(\frac{\rho_1 v_0^2}{Hb_1} \right)^{0,24}$	при $v \square 4$ км/с
$\frac{D_k}{d} = 0,9 \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^{0,1} \left(\frac{\rho_1 v_0^2}{Hb_1} \right)^{0,9}$	
$\frac{P_c}{d} = 0,38 \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^{0,5} \left(\frac{Hb_2}{Hb_1} \right)^{0,12} \left(\frac{\rho_1 v_0^2}{Hb_1} \right)^{0,34}$	при $v \square 5$ км/с
$\frac{D_k}{d} = 0,6 \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^{0,06} \left(\frac{\rho_1 v_0^2}{Hb_1} \right)^{0,34}$	

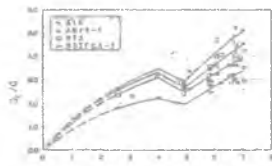
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- A. C. Charters, J.L. Summers. Some Comments on the Phenomena of High Speed Impact. Procuding of the Decimal Symposium, 1959.
- Л.В.Альтшулер, С.Б.Кормер, А.А.Баканова и др. Уравнения состояния алюминия, меди и свинца для области высоких давлений. ЖЭТФ. 1960, т.3., вып.3, с. 790 - 798.
- Ф.Ф.Витман, В.А.Степанов, Б.А. Леденев и др. ЖЭТФ, 1958, т.34, № 4, с.874.



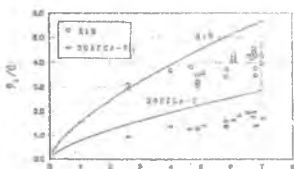
скорость соударения, V_0 (км/с)

Рис. 1. Зависимость относительной глубины (P_c/d) от скорости соударения (V_0)



скорость соударения, V_0 (км/с)

Рис. 2. Зависимость относительного диаметра (D/d) от скорости соударения (V_0)



скорость соударения, V_0 (км/с)

Рис. 3. Сравнение относительной глубины кратеров в мишени Д16 и ЗОХГСА точки - экспериментальные результаты, линия - результаты расчетов по формуле (2)

скорость соударения, V_0 (км/с)

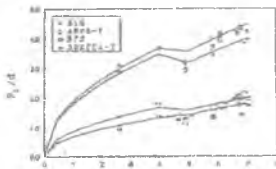


Рис. 4. Теоретическая зависимость относительной глубины от скорости соударения по сравнению с экспериментальными данными

скорость соударения, V_0 (км/с)

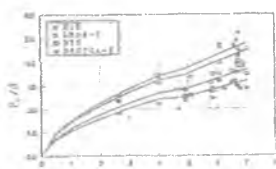


Рис. 5. Теоретическая зависимость относительного диаметра от скорости соударения по сравнению с экспериментальными данными

Таблица 1

Параметры соударяемых тел

Параметры	Обозначение	Размерность
Скорость соударения	V_0	$L \cdot T^{-1}$
Прочность	σ_1, σ_2	$ML^{-1}T^{-2}$
Плотность мишени и частицы	ρ_1, ρ_2	ML^{-3}
Энергия сцепления мишени и частицы	Q_1, Q_2	L^2T^{-2}
Характеристики сжимаемости мишени и частицы	β_1, β_2	$L \cdot T^{-1}$
	b_1, b_2	безразмерная величина
Размер частицы поперечный	d_0	L
Размер частицы продольный	l_0	L
коэффициент головной части	K_0	безразмерная величина