

ФИЗИКА РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ УДАРЕ

*С.И.Анисимов, А.В.Бушман, Г.И.Канель, А.Б.Константинов,
Р.З.Сагдеев, С.Г.Сугак, В.Е.Фортгов*

Предложена физическая модель разрушения твердых тел под действием высокоскоростного удара. Выполнены численные расчеты динамики разрушения защитных экранов космического зонда Вега при прохождении через пылевое облако кометы Галлея.

Вопрос о механизмах разрушения твердых тел при высокоскоростном ударе тесно связан с целым рядом проблем астрофизики и космической физики: исследованием метеоритных кратеров, развитием некоторых гипотез о происхождении планетных атмосфер, созданием систем противометеоритной защиты космических аппаратов и др. Особый интерес к проблеме высокоскоростного удара возник в последние годы в связи с разработкой трех проектов запуска космических аппаратов в окрестность кометы Галлея¹. Согласно расчетам, скорость движения аппаратов через пылевое облако кометы должна быть от 60 до 80 км/с. Это предъявляет весьма высокие требования к системе противопылевой защиты аппаратов.

Имеющаяся в настоящее время информация о высокоскоростном ударе относится к области скоростей, не превышающих 20 км/с, и получена, в основном, экспериментальным путем. Важная для приложений¹⁻³ область скоростей порядка 100 км/с недоступна для прямого экспериментального исследования. В связи с этим особое значение приобретает теоретический анализ и численное моделирование высокоскоростных ударных явлений. В настоящей статье описана физическая модель и приведены результаты численных расчетов разрушения металлических экранов при ударе микрометеоритов со скоростью порядка 100 км/с. Область параметров, в которой проводилось моделирование, отвечает условиям прохождения космического аппарата Вега через пылевое облако кометы Галлея в марте 1986 г.

Последовательность событий при высокоскоростном ударе такова. В момент контакта в ударнике и преграде возникают сильные ударные волны. Начальная плотность энергии за волной на два – три порядка превышает удельную энергию испарения, поэтому в волне разгрузки некоторая часть вещества полностью испаряется. По мере затухания ударной волны испарение становится частичным, а затем сменяется плавлением и механическим дроблением вещества. Выход ударной волны на тыльную сторону экрана может вызвать отколы. Для количественного описания всех стадий разрушения в рамках модели сплошной среды необходимо иметь уравнение состояния в широкой области параметров, включающей кризисную область плавления и двухфазную область, а также детальную информацию о прочностных и релогических свойствах материала преграды. Заметим, что описанные в литературе^{4,5} примеры расчетов высокоскоростного удара основаны на весьма упрощенных моделях среды и дают лишь качественное описание отдельных стадий процесса разрушения. Предлагаемая ниже модель позволяет дать количественное описание процесса в целом.

В настоящей работе использовано полуэмпирическое широкодиапазонное уравнение состояния, удовлетворяющее отмеченным выше требованиям. Принципы его построения изложены в⁶. Уравнение имеет правильные асимптотики во всех предельных случаях (большие и малые плотности, высокие температуры) и содержит около 20 свободных параметров, определяемых из эксперимента и квантовомеханических расчетов. Значения параметров для алюминия приведены в⁷, для других металлов – в⁸. В экспериментально изученной области фазовой диаграммы уравнение состояния имеет точность 1 – 3%.

Образование трещин и разрушение металла под действием растягивающих напряжений описывалось континуальной моделью. В качестве меры разрушения принимался удельный

объе V_c трещин V_c . Полный объем разрушаемой среды представлялся суммой объемов сплошной компоненты и трещин. Изменение V_c описывалось кинетическим уравнением ⁹

$$\dot{V}_c = \begin{cases} k_1 \left(\sigma - \sigma_0 \frac{a}{a + V_c} \right) (V_c + k_2 \sigma^n), & \sigma > \sigma_0 \frac{a}{a + V_c}, \\ 0 & \sigma < \sigma_0 \frac{a}{a + V_c} \end{cases},$$

где σ — наибольшее (по модулю) из трех главных напряжений, σ_0 — динамический предел прочности для растягивающих напряжений, k_1, k_2, a, n — константы, определяемые из эксперимента. Обработка опытов по изучению откольных явлений в алюминии при субмикросекундных временах нагружения дает следующие значения констант: $k_1 = 1 \cdot 10^8 \text{ ГПа}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$, $k_2 = 1,5 \cdot 10^{-3} \rho^{-1} \text{ ГПа}^{-4}$, $\sigma_0 = 0,5 \text{ ГПа}$, $a = 10^{-2} \rho^{-1}$, $n = 4$.

Тензор напряжений в упругой области рассчитывался с использованием закона Гука для связи между скоростью деформации и скоростью изменения девиаторного напряжения. Переход к пластической деформации задавался условием текучести Мизеса. Учитывалось повышение предела текучести вследствие деформационного упрочнения и его снижение вследствие образования микротрещин.

Изучались нестационарные течения с осевой симметрией, отвечающие нормальному падению пылевой частицы на экран. Из-за больших деформаций, характерных для начальной стадии удара, использование лагранжева формализма нецелесообразно. Уравнения гидродинамики на этой стадии интегрировались методом частиц в ячейках ¹⁰. Этот метод неудобен, однако, для описания стадии механического разрушения из-за возникновения нефизической "диффузии" микротрещин по эйлеровой сетке. Поэтому расчет заключительной стадии разрушения, когда деформации в твердой фазе относительно невелики, производился в лагранжевом представлении с использованием результатов расчета методом частиц в качестве начальных условий.

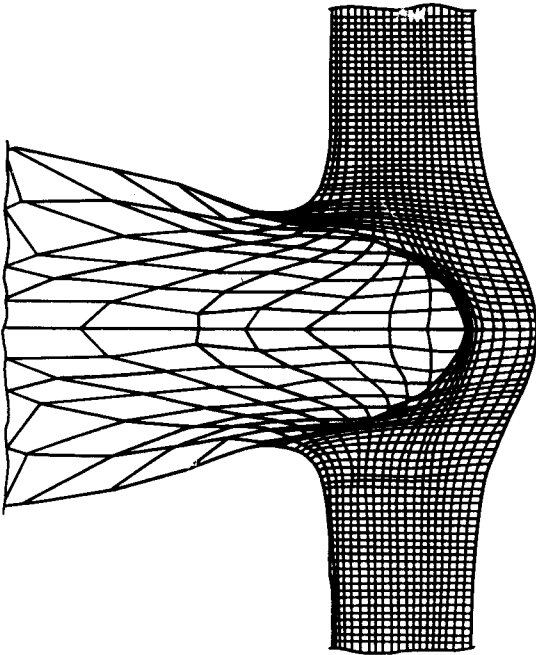


Рис. 1. Поле течения, вызванного ударом частицы массой $6 \cdot 10^{-7}$ г по алюминиевой пластине толщиной 0,5 мм

Приведем некоторые результаты расчетов. На рис. 1 показано состояние алюминиевого экрана толщиной 0,5 мм через 170 нс после удара пылевой частицы с плотностью 1 г/см^3 и

массой $6 \cdot 10^{-7}$ г, налетающей со скоростью 80 км/с. Процесс пробивания еще не закончился. В экране образовался кратер, из которого выбрасывается ионизованный парожидкостный факел¹⁾. Кромка кратера имеет тенденцию к закручиванию, которое наблюдается на опыте (при меньших скоростях). На рис. 2 приведены изолинии степени разрушения, $V_c = \text{const}$, в разные моменты времени. В начале область разрушения зарождается на передней поверхности экрана вблизи края растущего кратера. После выхода ударной волны на тыльную поверхность и отражения от нее в виде волны разрежения на оси удара вблизи тыльной поверхности возникает второй очаг разрушения, растущий со временем и переходящий в откольную область. Для частицы массой $6 \cdot 10^{-7}$ г скорость откольных элементов составляет 1,5 км/с, толщина $2,5 \cdot 10^{-3}$ см и диаметр $3 \cdot 10^{-2}$ см. Расчет показывает, что такие осколки не наносят заметных повреждений алюминиевому экрану толщиной 1 мм.

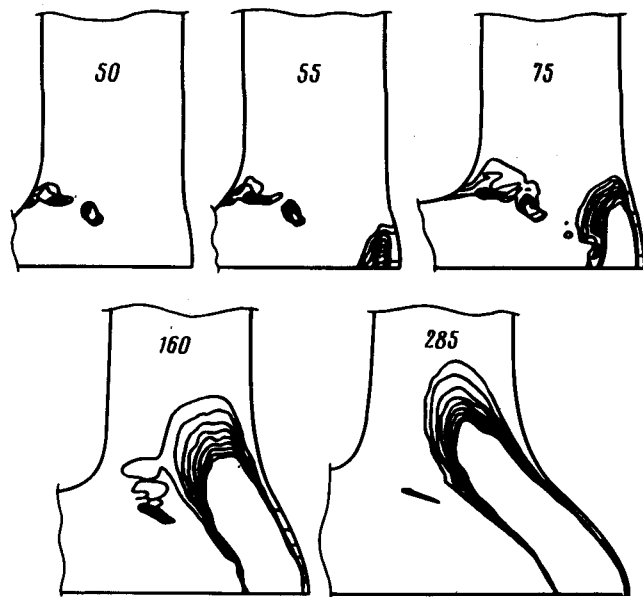


Рис. 2. Динамика разрушения. Показана половина области над осью симметрии. Масса частицы $6 \cdot 10^{-7}$ г. Разность значений V_c на соседних изолиниях равна 10^{-2} . Указано время от момента контакта (в нс)

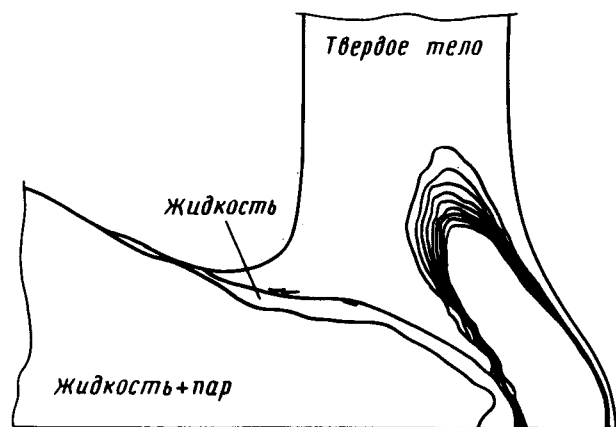


Рис. 3. Положение фазовых границ и изолиний разрушения при ударе частицы массой 10^{-7} г по алюминиевой пластине толщиной 0,5 мм. Показана верхняя половина области

¹⁾ В связи с задачами масс-спектрометрии пылевых частиц изучалась неравновесная рекомбинация в расширяющемся факеле. Этот процесс не влияет на разрушение экрана и в данной работе не рассматривается.

Из расчетов следует, что масса частицы 10^{-7} г (при плотности 1 г/см^3 и скорости 80 км/с) близка к критической для пробивания алюминиевого экрана толщиной $0,5 \text{ мм}$. На рис. 3 показаны положения границ фаз и изолиний разрушения для этого случая на момент времени 310 нс . Частично ионизованная двухфазная смесь, занимающая основную часть объема факела, отделена от твердой фазы тонким слоем жидкости. В экране толщиной 1 мм частица массой 10^{-7} г оставляет кратер глубиной $0,3 \text{ мм}$ и диаметром $0,5 \text{ мм}$. Тыльная сторона экрана остается недеформированной. Отношение максимальной толщины пробивания к глубине кратера примерно равно двум в широком диапазоне масс пылевых частиц.

Выполненные по описанной схеме гидродинамические расчеты подтверждают скейлинг разрушения, предложенный в работе ².

Авторы благодарны А.А.Галееву, В.Д.Шапиро и В.И.Шевченко за многочисленные полезные обсуждения результатов работы.

Литература

1. Reinhard R. Space Missions to Halley's Comet and Related Activities. ESA-Bulletin, 1982, № 29, p. 68.
2. Sagdeev R.Z., Anisimov S.I., Galeev A.A., Shapiro V.D., Sherchenko V.I. Adv. Space Res., 1983, 2, 133.
3. Proc. Impact Fusion Workshop. Los Alamos Sci. Lab. Report LA-8000-C 1979.
4. Kreyenhagen K.H., Schuster S.H. In: Impact and explosion cratering. Eds. Roddy D.J., Pepin R.O., Merrill R.B., N.Y., Pergamon, 1977.
5. Высокоскоростные ударные явления. Ред. Кинслоу Р., М.: Мир, 1973.
6. Бушман А.В., Фортвов В.Е. УФН, 1983, 140, 177.
7. Бушман А.В., Ни А.Л., Фортвов В.Е. Сб. Уравнение состояния в экстремальных условиях. Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР, 1981, с. 3.
8. Альшутлер Л.В., Бушман А.В., Жерноклетов М.В., Зубарев В.Н., Леонтьев А.А., Фортвов В.Е. ЖЭТФ, 1980, 78, 741.
9. Сугак С.Г., Канель Г.И. и др. Физ. горения и взрыва, 1983. 19, 121.
10. Харлоу Ф. Сб. Вычислительные методы в гидродинамике. Ред. Олдер Б., М.: Мир, 1967.

Институт теоретической физики

им. Л.Д.Ландау

Академии наук СССР

Поступила в редакцию

20 октября 1983 г.