

Земли, а именно при математическом моделировании процессов взаимодействия МКТ с атмосферами планет, представляется вполне перспективным.

Таблица 1.2

Основные характеристики разрушения твердого тела

Вид разрушения	Область диаграммы состояний на рис. 1.1	Энергетические затраты на деформацию перед разрушением	Скорость процесса разрушения	Характерные параметры разрушения	НДС при разрушении
Пластический срез	Порог хрупкости не достигнут	$\approx 100\%$ (практически вся энергия израсходована на деформацию перед актом разрушения)	Порядка скорости деформирования материала	σ, ϵ и их комбинации	За пределом текучести ($\sigma > \sigma_T$)
Хрупкий отрыв	За порогом хрупкости (большие размеры и скорости деформации, низкие температуры)	≈ 0	Сопоставима со скоростью звука в материале	G_{IC}, K_{IC}	Разрушение возможно при любом напряжении, вплоть до $\sigma \approx 0$

1.3. Приложение интегрального подхода к анализу разрушения МКТ в атмосфере

Активные исследования по математическому моделированию процессов взаимодействия МКТ с атмосферами планет начались во второй половине XX века. В первых работах в этом направлении [28–30] рассматривались МКТ сферической формы с диаметром D , внедряющиеся с гиперзвуковой скоростью V_0 в атмосферу

под некоторым углом к горизонту и преодолевающие ее сопротивление при дальнейшем движении по инерции. При этом скоростной (или АД) напор определяется давлением атмосферного газа на МКТ по известной формуле аэродинамики [31]

$$p = \rho_a V^2 / 2, \quad (1.12)$$

где ρ_a – плотность атмосферы, V – текущее значение скорости. Впервые расчет НДС такого МКТ опубликован в [28]. Здесь АД напор воздействовал только на переднюю полусферу с максимумом на ее полюсе и уменьшением к экватору до нуля по закону:

$p = \rho_a V^2 \cos \varphi$, где φ – угол между нормалью к поверхности шара и направлением движения. На задней полусфере $p = 0$, и на ее полюсе достигалось максимальное растягивающее напряжение $\sigma \approx 0,365 \rho_a V^2$. Максимальная интенсивность касательных напряжений внутри шара достигалась при $\varphi \approx 60^\circ$ на окружности, отстоящей на $\approx (0,125-0,175)D$ от центра шара, и составляла $\approx 0,265 \rho_a V^2$. Позднее, в [32], была использована более точная аппроксимация $p(\varphi)$ и получены более полные и подробные результаты, с которыми и данные [28] согласуются удовлетворительно.

В указанных работах и в ряде иных работ в качестве локального критерия разрушения принимаются весьма удобные в расчетах теории прочности СМ, такие, как предел прочности при сдвиге [28] или равенство касательных напряжений пределу прочности при растяжении [32] (здесь подробно показан и процесс разрастания в МКТ области, внутри которой достигается выполнение заданного критерия разрушения). Автор [30, 33, 34] считает, что как только АД сопротивление достигает критического значения порядка напряжения разрушения $(\rho_a V^2 \square \sigma_{cr})$, по МКТ побежит волна дробления, и за время порядка D/C_b (C_b – объемная скорость звука в теле) МКТ будет полностью разрушено (потеряет сплошность). Согласно [30], раздробленная масса становится близкой по свойствам к жидкости и уносится газовым потоком, обтекаю-

щим МКТ. В [34], предполагая, что фрагмент ядра кометы Шумейкерова–Леви 9 (Ш–Л 9) является ледяным шаром с $D = 800$ м, входящим в атмосферу Юпитера под углом 45° при скорости 65 км/с, автор получил полное разрушение фрагмента в интервале высот от 459 до 426 км, т. е. за 0,7 с, что соответствует $\approx D/C_b$. Аналогичные расчеты проводились и при моделировании разрушения Тунгусского и Сихотэ-Алинского МКТ.

В работе [35] использовались те же критерии разрушения, что и в [28, 30, 32–34], с той разницей, что форма МКТ была принята цилиндрической. Отмечено, что на стадии разрушения «превалирует вид дезинтеграции материала, обусловленный действием сдвиговых напряжений». Такой вид разрушения объясняется авторами как результат отсутствия УВ достаточной интенсивности для разрушения трещинами отрыва. Процесс дальнейшего взаимодействия диспергированного МКТ с атмосферой описывается по типу внедрения кумулятивной струи в преграду [28, 30, 33–35].

Насколько верны описание стадии разрушения МКТ в виде полного разрушения [32], раздробления [33], потери связности [34] или дезинтеграции [35] в указанных работах? Чтобы ответить на этот вопрос, примем, что МКТ состоит из непористого материала с плотностью $\rho_b \geq 0,4 \text{ г/см}^3$ и, как всякое реальное тело, содержит некоторое количество дефектов структуры, чему способствует воздействие интенсивной проникающей радиации в условиях космоса. Наряду с этим низкая (космическая) температура МКТ (≈ 100 К), достаточно большие размеры (~ 10 м и более) и повышенная скорость нагружения при внедрении в атмосферу ($\sim 10^{-1} - 10^2 \text{ с}^{-1}$ и более) дают основание полагать, что его разрушение является хрупким, происходящим при упругих деформациях в условиях квазистатического нагружения.

При таком нагружении хрупкие тела разрушаются, как правило, на две части, и только при переходе к ударному нагружению с ростом его интенсивности будет возрастать и число образующихся осколков. Здесь уместна такая аналогия: многие наблюдали, как десантник, демонстрируя свою мощь, ударом ребра ладони разби-

вает кирпич, который при этом обычно раскалывается на две примерно равные части. Это обусловлено как раз типично квазистатическим характером нагружения, которое испытывает кирпич, так как время нагружения примерно в 100 раз превышает время циркуляции упругой волны по кирпичу. Если же принять во внимание инерционные силы, действующие на МКТ при его торможении в атмосфере, то НДС его и кирпича будут качественно близки.

При этом следует иметь в виду ряд следующих дополнительных обстоятельств. Так, известно, что разрушение непористого тела при сжатии происходит только в том случае, когда имеется возможность реализации его поперечной деформации расширения. А как следует из расчетов [36]*, при дроблении МКТ такая деформация отсутствует. Однако процесс дробления непористого МКТ не может протекать без увеличения его объема за счет пустот, образующихся между фрагментами. Поэтому выполнение в некоторой области внутри МКТ заданного в расчете условия разрушения отнюдь не означает, что материал в этой области оказался раздробленным.

Заметим также, что по сравнению с разрушением МКТ на две части, при его раздроблении затраты УЭ во столько раз больше, во сколько раз общая поверхность образовавшихся фрагментов больше поверхности одной трещины, разделившей МКТ. Последняя ситуация энергетически выгоднее, и поэтому ее реализация наиболее вероятна. Выше отмечались трудности прямого использования МХР. В случае с МКТ, когда невозможно заранее получить информацию о его дефектности, эти трудности возросли. Вместе с тем, как показано выше, отказ от МХР и использование критериев разрушения СМ приводит к игнорированию возможности проявления МЭЭП. Поэтому проблема разрушения МКТ требует обращения к ИП в современной МР. Применение такого подхода позволяет существенно упростить решение проблемы, как это сделано, на-

*Летом 1996 года материалы были представлены в докладе А. Г. Иванова «Об адекватности описания процесса разрушения в расчетах на ЭВМ» на международной конференции «Параллельные вычисления и математическое моделирование» в Сарове.

пример, при определении природы катастрофических разрушений магистральных трубопроводов и разработке концепции эксплуатационной надежности трубопроводного транспорта [4, 37].

Как известно, разрушение отрывом всегда вызывается действием нормальных растягивающих напряжений [38]. В [28, 32] показано, что в случае сферического МКТ, движущегося в атмосфере, они максимальны в полюсе его задней полусферы, на которой давление существенно ниже, чем на передней, нагруженной АДС (поэтому, например, в расчетах [28] принято, что давление на задней полусфере отсутствует). При этом интенсивность напряжений в МКТ однозначно связана с АД напором, который максимален на полюсе передней полусферы. С позиций ИП это означает, что, независимо от базового размера объекта, в данном случае D , замена в (1.2) или (1.3) знака неравенства на знак равенства будет вводить одну и ту же систематическую неточность, которая, впрочем, может быть устранена путем проведения достаточно точных расчетов.

Итак, современная прикладная МХР, особенно при использовании ИП, остается эффективным средством решения задач и в области проблемы метеоритной опасности. С этих позиций следует ожидать, что дробление сферического МКТ (рис. 1.2) будет представлять последовательное разделение его на две части по большому кругу, как только выполнится необходимое условие разрушения (1.2). При $q = \sigma^2/2E$, $v_0 = \pi D_0^3/6$, $S_0 = \pi D_0^2/4$, $G_{IC}E = K_{IC}^2$ и $\sigma = \sigma_{cr} = p$, где p – АД напор (1.12), оно принимает вид

$$\rho_a^2 V^4 = 12K_{IC}^2/D_0. \quad (1.13)$$

При этом в соответствии с [37] зарождение трещины произойдет в зоне нормальных растягивающих напряжений, т. е. на полюсе задней полусферы, откуда и начнется развитие разрушения.

Естественно, возникает вопрос, как будет протекать раздробление МКТ другой формы, ведь сферические МКТ – часто используемая идеализация (такие в природе почти не встречаются). Форма известных МКТ обычно неправильная, часто угловатая. Поэтому рассмотрим, например, другую крайнюю форму – прямоугольный

параллелепипед. При этом АД нагрузка действует на лобовую поверхность МКТ с максимумом в ее центре (как и у его сферического аналога), поэтому силы инерции обеих половин МКТ направлены вперед, вызывая его изгиб, при котором на тыльной поверхности возникает зона растяжения. Отсюда, как и при разрушении сферического МКТ, тоже стартует трещина, развитие которой приводит к разрушению, и тоже пополам. Возвращаясь к аналогии кирпича, разбиваемого лихим десантником, заметим, что последний обычно бьет по кирпичу, лежащему плашмя, так как при этом у кирпича и опасное сечение, и его момент сопротивления минимальны, поэтому и усилие для разрушения требуется минимальное. Что же касается МКТ, то обычно оно беспорядочно вращается в пространстве, но для разрушения МКТ в форме кирпича положение плашмя относительно АД напора тоже энергетически выгоднее, поскольку лобовая поверхность и, следовательно, АДС максимальны, а опасное сечение и расстояние от центра масс до лобовой грани минимальны. Поэтому, вероятнее всего, разрушение произойдет при такой ориентации. Если у МКТ с базовой длиной ребра L_0 соотношение ребер $2^{-1/3} : 1 : 2^{1/3}$ (рис. 1.2)*, то при разломе пополам по минимальному сечению (его площадь $S_0 = 2^{-1/3} L_0^2$) образуются фрагменты, геометрически подобные прототипу (родительскому телу). Тогда необходимое условие разрушения (1.2) примет вид

$$\rho_a^2 V^4 = 2^{8/3} K_{IC}^2 / L_0. \quad (1.14)$$

Как и следовало ожидать, уравнения (1.13) и (1.14) оказались аналогами уравнения (1.7), описывающего МЭЭП. Следовательно, чем меньше размер МКТ, тем большее усилие нужно приложить, чтобы его разрушить. Это означает, что для разрушения половинок МКТ потребуется увеличение нагрузки, т. е. усилие АДС, что возможно только при снижении в более плотные слои атмосферы.

* Данное соотношение ребер – не такая уж и абстракция: оно близко к распространенному соотношению размеров, например, железных метеороидов (0,5:1:1,5) [38].

Эта же схема сохранится и для последующих фрагментов. Поэтому раздробление МКТ будет не одномоментным и тотальным, как показано в [28, 30, 32, 34] при использовании локальных критериев разрушения на основе теорий прочности СМ, а дискретным, разделенным в пространстве и времени.

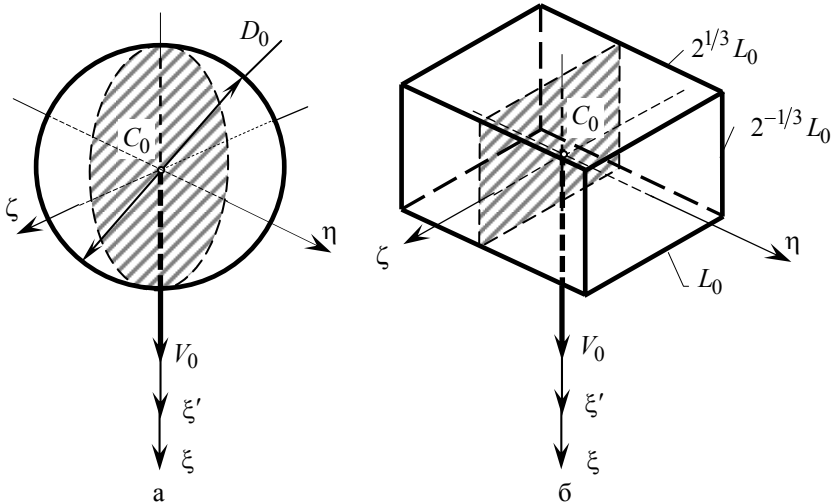


Рис. 1.2. Схема фрагментации МКТ в форме сферы (а) и параллелепипеда (б). Штриховкой обозначена поверхность разрушения, C_0 – центр массы, ξ – траекторная ось, $\xi' - \eta - \zeta$ – подвижная ортогональная система координат, связанная с центром массы

Литература

1. Иванов А. Г., Минеев В. Н. О масштабном критерии при хрупком разрушении конструкций // Доклады АН СССР. 1975. Т. 220. № 3. С. 575–578.
2. Ботвина Л. Р., Опарина И. Б. Кинетика разномасштабного множественного разрушения // Доклады АН. 1998. Т. 362, № 6. С. 762–765.

3. Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения. – М.: Наука. 1974.
4. Иванов А. Г. О природе катастрофических разрушений трубопроводов // Доклады АН СССР. 1985. Т. 285, № 2. С. 357–360.
5. Иванов А. Г. Роль инерционных и упругих сил при динамическом разрушении в пластической области // Там же. 1991. Т. 321, № 5. С. 28–32.
6. Ivanov A. G., Raevskii V. A., Vorontsova O. S. On the contribution of elastic and inertial forces for dynamic fracture // DYMAT jour. 1995. Vol. 1, № 1. P. 63–68.
7. Ivanov A. G. Possible Development of the Unified Fracture // High Energy Rate Fabrication. Proc. of X Inter. Conf, Ljubljana, Yugoslavia. 1989. P. 601–611. (то же: Доклады АН СССР. 1990. Т. 310, № 4. С. 866–870).
8. Yeshurun Y., Rosenberg G. and Rosenberg Z. Measurements of compressive and tensile wave in a shock loaded Pyrex glass // Shock Waves in Condensed Matter. 1986. Plenum Press. N.Y. P. 431–434.
9. Брар Н., Сингх, Эпиноза Х. Д. Обзор макрокинетики волн разрушения в силикатных стеклах // Химическая физика. 1998. Т. 17. С. 54–73.
10. Mashimo T., Uchino M. Shock compression behavior of boron carbide (B_4C) // Shock compression of condensed Matter. 1995. Proc. of the conf. Amer. Phys. Soc. Seattle, Washington. August 13–18. 1995. Part 1. P. 531–533.
11. Novikov S. A., Pushkov V. A., Eremenko A. S. Determination of Granite Crack Resistance under Dynamic Loading // Jour. de Physique IV. 1997. Vol. 7. P. 1011–1013. Proc. 5-th Int. Conf. on Mech. and Phys. Behaviour of Materials under Dynamic Loading. September 22–26. 1997. Toledo. Spain.
12. Weimer R. J., Rogers H. C. Dynamic fracture in high-strength steels // J. Appl. Phys. 1979. Vol. 50, № 12. P. 8025–8030.
13. Grady D. E. Steady-Wave Rise time and Spall Measurements on Uranium (3–15 GPa) // Met. Appl. SW and H-S-R Ph. New York, Decker. 1986. P. 763–780.

14. Клещевников О. А., Тюняев Ю. Н., Софронов В. Н. и др. Динамический предел текучести и удельная работа отрыва при отколе ряда конструкционных сталей // Физика горения и взрыва. 1986. Т. 22, № 4. С. 102–106.

15. Куран Д. Р. Динамическое разрушение // Динамика удара. – М.: Мир. 1985. С. 257–291.

16. Вессел Э., Кларк У., Прайл У. Расчеты стальных конструкций с крупными сечениями методами механики разрушения // Новые методы оценки сопротивления металлов хрупкому разрушению. – М.: Мир. 1972. С. 213–244.

17. Иванов А. Г., Синицын В. А., Новиков С. А. Масштабные эффекты при динамическом разрушении конструкций // Доклады АН СССР. 1970. Т. 194, № 2. С. 316–319.

18. Иванов А. Г., Учаев А. А., Рыжанский В. А. и др. Импульсное разрушение геометрически подобных объектов // Там же. 1981. Т. 261, № 4. С. 868–871.

19. Иванов А. Г., Минеев В. Н. О масштабных эффектах при разрушении // Физика горения и взрыва. 1979, № 5. С. 70–105.

20. Nakayama N., Ohashi M., Sano T. et al. Dynamic Stress Concentration Factor in the Strip Plate with Fillet // Journ. de Physique IV. 1997. Vol. 7. P. 295–299. (5 Inter. Conf. on Mech. and Phys. Beh. of Materials under Dynamic Loading. Sept. 22–26. 1997. Toledo. Spain).

21. Федоренко А. Г., Цыпкин В. И., Иванов А. Г. и др. Особенности динамического деформирования и разрушения цилиндрических стеклопластиковых оболочек // Мех. композитных материалов. 1983, № 1. С. 90–94.

22. Иванов А. Г., Новиков С. А., Тарасов Ю. И. Откольные явления в железе и стали, вызванные взаимодействием ударных волн разрежения // Физика твердого тела. 1962. Т. 146. С. 1136–1140.

23. Бартенев Г. М., Измайлова Л. К. Бездефектные стеклянные волокна // Доклады АН СССР. 1962. Т. 146, № 5. С. 1136–1140.

24. Фридман В. М., Щербань М. И. О влиянии масштабного фактора на прочность твердых сплавов // Проблемы прочности. 1980, № 11. С. 111–113.

25. Shockey D. A., Seaman L., Curran D. R. The influence of microstructure features on dynamic fracture // Metallurgical Effects at High Strain Rates. – N.-Y.-L.: Plenum. 1979. P. 473–493.

26. Черепанов Г. П. О разрушении трубопроводов // Доклады АН СССР. 1983. Т. 272, № 3. С. 590–593.

27. Партон В. З. Механика разрушения. От теории к практике. – М.: Наука. 1990.

28. Фадеенко Ю. И. Разрушение метеорных тел в атмосфере // Физика горения и взрыва. 1967. Т. 3, № 2. С. 276–280.

29. Baldwin B., Sheaffer Y. Ablation and breakup of large meteoroids during atmospheric entry // Journal of Geophysical Researches. 1971. Vol. 76, № 19. P. 4653–4668.

30. Григорян С. С. О движении и разрушении метеоритов в атмосферах планет // Космические исследования. 1979. Т. 17, № 6. С. 875–893.

31. Кузьмичев В. Е. Законы и формулы физики. – Киев: Наукова думка. 1989. С. 129, 135.

32. Коробейников В. П., Власов В. И., Волков Д. Б. Моделирование разрушения космических тел при движении в атмосферах планет // Математическое моделирование. 1994. Т. 6, № 8. С. 61–75.

33. Григорян С. С. К вопросу о природе Тунгусского метеорита // Доклады АН СССР. 1976. Т. 231, № 1. С. 57–60.

34. Григорян С. С. О столкновении кометы Шумейкеров–Леви 9 с Юпитером в июле 1994 г. // Доклады АН. 1994. Т. 338, № 6. С. 752–754.

35. Кондауров В. И., Ломов И. Н., Фортвов В. Е. Деформирование, разрушение и испарение вещества фрагмента кометы Шумейкеров–Леви 9 при движении в атмосфере Юпитера // Доклады АН. 1995. Т. 344, № 2. С. 184–188.

36. Иванов А. Г. Об адекватности описания процесса разрушения в расчетах на ЭВМ // Прикладная механика и техническая физика. 1999. Т. 40, № 3. С. 191–195.

37. Махутов М. А., Сериков С. В., Котоусов А. Г. Эскаляционное разрушение трубопроводов // Проблемы прочности. 1992, № 12. С. 10–15.

38. Авербах Б. Л. Некоторые физические аспекты разрушения // Разрушение. – М.: Мир. 1973. Т. 1. С. 471–504.

39. Зоткин И. Т., Цветков В. И. О форме железных метеороидов // Астрономический вестник. 1983. Т. 17, № 1. С. 60–62.