

УДК 533.06.01

ОБ АДЕКВАТНОСТИ ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ В РАСЧЕТАХ НА ЭВМ

А. Г. Иванов

Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, 607190 Саров

Проведен анализ ряда работ, посвященных описанию внедрения космического тела в атмосферу планеты. Показано, что адекватную качественную картину явления можно получить при использовании интегрального критерия разрушения, который основан на выполнении необходимого энергетического условия разрушения. Использование традиционных критериев разрушения сопротивления материалов не дает корректного описания рассматриваемого процесса.

В середине XX в. необходимость объяснения причин катастрофических хрупких разрушений крупногабаритных объектов привела к пересмотру установившихся критериев разрушения. Была развита линейная механика разрушения (ЛМР), основанная на критерии Гриффитса перехода хрупкой трещины в неустойчивое состояние [1]. В ЛМР разрушение есть результат совершения работы, которая выполняется упругой энергией деформации. Возникла необходимость пересмотра критериев разрушения, а также разработки новых методов испытания материалов на прочность. Роль традиционных критериев прочности, таких как критические значения напряжения отрыва σ_* , напряжения сдвига τ_* , деформации ε_* или их комбинации, ограничилась сравнением материалов в стандартных условиях испытания. Потребовалось введение новых критериев разрушения, включающих удельную на единицу поверхности работу разрушения G_{Ic} , используемую, как правило, в виде $G_{Ic}E \sim K_{Ic}^2$ (E — модуль Юнга, K_{Ic} — критическое значение коэффициента интенсивности напряжений в устье трещины). Разработаны и методы их определения. Традиционные критерии прочности материалов соответствовали особым точкам диаграммы деформирования материала и легко находились. В ЛМР для получения величин G_{Ic} или K_{Ic} требуется проведение серии испытаний на специальных геометрически подобных разномасштабных образцах [2]. Так, по мнению автора [3], «прочность конструкции всегда представляет собой некоторую случайную величину, так как, во-первых, точное расположение всех дефектов заранее неизвестно, а, во-вторых, если бы это расположение и было точно известно, решение соответствующей математической задачи было бы невозможно из-за ее сложности». Рекомендация последовательности действий при расчете на прочность дается в [3, прил. 1].

В некоторых случаях выход из столь сложного положения состоит в использовании решений ряда относительно простых задач, где вместо произвольно расположенных трещин рассматриваются один или несколько разрезов определенной длины, ориентированных некоторым образом относительно рассматриваемого образца материала и приложенных сил [4]. Большое число таких задач (задачи К-тарировки) приведено в [3, прил. 1]. Из анализа этих задач, как и из экспериментальных исследований по разрушению геометрически подобных объектов в упругой области деформирования [5], следует, что возможно проявление сильных масштабных эффектов энергетической природы (МЭЭП). Физическая природа этих эффектов состоит в следующем. При переходе от некоторого объекта к его

геометрически подобному аналогу большего размера упругая энергия деформации возрастает как L^3 , а работа на прохождение трещины при разрушении увеличивается только как L^2 (L — характерный размер геометрически подобного объекта). Следствием такого перехода является снижение удельной прочности (напряжения разрушения) более крупного объекта. Проиллюстрируем это на примере разрушения космического тела (КТ) при внедрении его в атмосферу планеты [6–11].

Ряд авторов, понимая сложность, а порой и невозможность применения ЛМР, рекомендуют использовать критерии прочности сопротивления материалов в расчетах на ЭВМ. При этом МЭЭП не учитываются, что дает основание отнестись критически к результатам таких работ.

Расчет напряженного состояния КТ в форме шара проведен в [6, 10]. Так, в работе [6] давление P на поверхности шара задавалось распределенным по закону Ньютона:

$$\begin{aligned} P &= \rho v^2 \cos^2 \varphi & \text{для } 0 \leq \varphi \leq \pi/2, \\ P &= 0 & \text{для } \pi/2 \leq \varphi \leq \pi, \end{aligned}$$

где ρ — плотность атмосферы; v — скорость космического тела; φ — угол между нормалью к поверхности шара и направлением его движения. Растягивающее напряжение σ , как и следовало ожидать, достигается в точке, противоположной критической, и его максимальное значение составляет $\sigma \sim 0,365\rho v^2$. Интенсивность касательных напряжений T максимальна внутри шара по окружности $\varphi \sim 60^\circ$ на расстоянии $0,25\text{--}0,35$ радиуса от центра и достигает величины $T \sim 0,265\rho v^2$.

В [10] использована более точная аппроксимация $P(\varphi)$ и получены более полные и подробные результаты расчетов, которые вполне согласуются с [6]. В качестве локального критерия разрушения, весьма удобного в расчетах, в работах принимается предел прочности на сдвиг [6] или равенство касательных напряжений пределу прочности при растяжении [10]. Авторы работ [7–9] считают, что как только значение аэродинамической нагрузки достигнет критического значения напряжения разрушения ($\rho v^2 \sim \sigma_*$), по телу побежит волна дробления и за время $\tau \sim D/C$ (D — диаметр шара, C — объемная скорость звука) космическое тело будет полностью разрушено (материал его потеряет связность). Согласно [8] раздробленная масса становится близкой по свойствам к жидкости, растекается и уносится потоком. В работе [10] тремя графиками подробно проиллюстрирован процесс увеличения области внутри КТ, где достигается выполнение заданного критерия разрушения. Считая ядро кометы Шумейкеров — Леви шаром диаметром 800 м ($v = 65$ км/с, материал — лед, угол вхождения в атмосферу Юпитера $\varphi = 45^\circ$), получено, что полное разрушение его происходит в интервале высот от 459 до 426 км, т. е. за 0,7 с, что соответствует $\tau \sim D/C$. Аналогичные расчеты представлены и по разрушению Тунгусского космического тела и Сихотэ-Алинского метеорита.

В работе [11] использовались те же критерии разрушения, что и в [6–10], с той разницей, что форма космического тела выбрана в форме цилиндра. Отмечается, что на стадии разрушения «...превалирует вид дезинтеграции материала, обусловленный действием сдвиговых напряжений». Такой вид разрушения объясняется авторами [11] отсутствием ударных волн достаточной интенсивности для разрушения трещинами отрыва.

Дальнейший процесс взаимодействия диспергированного материала КТ с атмосферой планеты описывается по типу внедрения кумулятивной струи в преграду [6–9, 11].

Насколько верно описание стадии дробления, диспергирования [7], потери связности [9], полного разрушения [10], дезинтеграции [11] в рассматриваемых работах? Считаем, что КТ состоит из непористого материала с плотностью $\rho > 1$ г/см³ и, как всякое реальное тело, содержит некоторое количество дефектов структуры. Низкая температура (~ 100 К), большие размеры (~ 10 м и более) и высокая скорость нагружения КТ при

его вхождении в атмосферу планеты ($\sim 10^{-1} \div 10^2 \text{ с}^{-1}$ и более) дают основание считать разрушение хрупким, протекающим в упругой области деформирования.

Обратимся к опыту. Нагружение КТ в процессе его вхождения в атмосферу планеты носит квазистатический характер. При таких нагрузках хрупкие тела разрушаются, как правило, на две части*, и только при переходе к ударному нагружению с ростом его интенсивности будет увеличиваться число образующихся осколков. Так, мы не раз наблюдали, как омовцы ударом ребра ладони раскалывают на две части кирпич. Это типичное квазистатическое нагружение, так как время нагружения примерно в 100 раз превышает время циркуляции упругой волны по кирпичу. Если же принять во внимание инерционные силы, действующие на КТ при его движении в атмосфере планеты, то качественно будут близки и напряженные состояния КТ и кирпича.

Обратим внимание на некоторые обстоятельства. Разрушение при сжатии непористого тела происходит только в том случае, когда имеется возможность реализации поперечной положительной деформации тела. Как следует из результатов расчетов [10], при дроблении КТ такая деформация отсутствует. Однако процесс дробления непористого КТ не может протекать без увеличения его объема за счет образующихся пустот между фрагментами. Поэтому выполнение в некоторой области внутри КТ заданного в расчете условия разрушения отнюдь не означает, что материал в этой области оказался раздробленным.

Заметим также, что затраты упругой энергии на диспергирование материала КТ во столько раз больше, чем при делении его на две части, во сколько поверхность образовавшихся частиц больше поверхности одной сквозной трещины, пересекающей КТ. Последняя ситуация энергетически более выгодна, и она должна реализоваться. Ранее отмечались трудности прямого использования ЛМР. В рассматриваемом случае, когда принципиально невозможно получить информацию о дефектности КТ, эти трудности возросли. Вместе с тем, как показано выше, отказавшись от ЛМР и используя критерии разрушения сопротивления материалов, оставляем вне рассмотрения возможность проявления МЭЭП. Поэтому целесообразно обратиться к интегральному подходу в проблеме разрушения [5], который, как и ЛМР, основан на энергетическом рассмотрении явления, и в некоторых случаях его использование оправданно.

Обозначая через q , S и V соответственно удельное значение упругой энергии, площадь поверхности сквозной трещины и объем объекта, сформулируем в общем случае условие неразрушения:

$$\int_V q dV < \int_S G_{Ic} dS. \quad (1)$$

Использование интегрального подхода позволяет существенно упростить нахождение решения, как это сделано, например, при определении природы катастрофических разрушений магистральных трубопроводов [12] и разработке концепции эксплуатационной надежности трубопроводного транспорта [13].

Изменив в (1) знак неравенства на противоположный, получим необходимое условие разрушения. Однако, для того чтобы оно реализовалось, должен быть дефект критического размера, с которого «стартует» трещина. Размер этого дефекта тесно связан с избытком упругой энергии деформации. Естественно, что такой информацией мы не располагаем. Очевидно, что по мере вхождения КТ в атмосферу запас упругой энергии в нем растет и в некоторый момент наступает разрушение. Ситуация во многом подобна разрушению материала отколом при взаимодействии волн разрежения, где также исходная дефектность

*В работе не рассматривается разрушение специально подготовленных бездефектных материалов, в которых можно создать большой запас упругой энергии, а их разрушение будет носить взрывной характер с большим числом осколков.

материала первоначально не исследуется. Тем не менее в таких опытах легко определяется величина λ (аналог G_{Ic}) в предположении, что в выражении (1) стоит знак равенства [14]. Значение λ , найденное в опытах с органическим и неорганическим стеклами и несколькими видами стали, примерно в 30 раз превышает G_{Ic} . Очевидно, что для разрушения КТ левая часть (1) должна во столько же раз превосходить правую. Такие действия не очень корректны и могут привести к заметным количественным погрешностям, однако мы получаем физически правильную качественную картину разрушения КТ.

Следует отметить, что впервые попытка учета масштабного фактора предпринята Ю. И. Фадеенко в [6], где использована статистическая теория прочности, которая не описывает эксперимент [3], и принята гипотеза равновесного дробления.

В работах [15, 16] рассмотрен Тунгусский феномен без учета тепловых эффектов. При описании явления в соответствии с ЛМР и интегральным подходом сделан переход от традиционных критериев разрушения, основанных на удельной величине силы, к энергетическим соотношениям. Заменяя в (1) знак неравенства на равенство (имея в виду использование эффективного значения G_{Ic}) и оценив величину q как

$$\bar{q} = \frac{\sigma^2}{2E} = \frac{\rho^2 v^4}{2E},$$

получим условие разрушения КТ в форме шара диаметром D_0 :

$$\rho^2 v^4 = 3K_{Ic}^2/D_0. \quad (2)$$

Образовавшиеся осколки вновь рассматриваем как шары, но диаметром $D_1 = 2^{-1/3}D_0$. По мере увеличения аэродинамического сопротивления уравнение (2) при замене D_0 на D_1 будет удовлетворено. Произойдет следующее деление образовавшихся осколков и так далее вплоть до прекращения роста аэродинамического сопротивления.

Произведенные расчеты на ЭВМ показали следующее:

- процесс дробления КТ при его вхождении в атмосферу вследствие проявления МЭЭП носит многоэтапный характер;
- нагружение осколков в промежутке времени между моментами разрушения является сугубо квазистатическим;
- при остановке процесса дробления КТ характерный размер осколка определяется скоростью движения его и прочностными характеристиками материала.

Используя поэтапный процесс дробления КТ, можно дать описание процесса образования цепочки фрагментов кометы Шумейкеров — Леви и объяснить возможный путь образования тектитов, а также определить природу возникновения множества воронок (~ 100) от Сихотэ-Алинского метеорита. В последнем случае нет необходимости полагать, что метеорит представлял собой «склеенное» из отдельных кусков КТ, как это принималось в [10]. Данный феномен интересен также тем, что информация о числе воронок и материале КТ позволяет более корректно оценить эффективную величину G_{Ic} .

Рассмотренные в работе примеры взаимодействия КТ с атмосферой планеты, по нашему мнению, достаточно ярко высветили проблему выбора критериев разрушения для расчетов на ЭВМ. Применение традиционных, устоявшихся со времен Галилея критериев разрушения, основанных на критических значениях напряжения, деформации и т. п., не позволяет адекватно описать процесс разрушения даже в наиболее простой линейной области деформирования и разрушения. Очевидно, что использование других, отличных от рассмотренных критериев локального разрушения в программах ЭВМ должно быть апробировано на тестовых задачах по разрушению, моделирующих эксперимент. В частности, в тестовых задачах ЛМР при расчете геометрически подобных объектов различного масштаба такие расчеты должны проводиться с учетом МЭЭП.

Автор выражает благодарность академику Ю. Б. Харитону за интерес, проявленный к данной работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Griffith A. A. The phenomenon of rupture and flow in solids // Philos. Trans. Roy. Soc. London. 1920. V. A221. P. 163–198.
2. 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.
3. Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения. М.: Наука, 1974.
4. Партон В. З. Механика разрушения: От теории к практике. М.: Наука, 1990.
5. Иванов А. Г. Динамическое разрушение и масштабные эффекты // ПМТФ. 1994. Т. 35, № 3. С. 116–131.
6. Фадеенко Ю. И. Разрушение метеоритных тел в атмосфере // Физика горения и взрыва. 1967. Т. 3, № 2. С. 276–280.
7. Григорян С. С. К вопросу о природе Тунгусского метеорита // Докл. АН СССР. 1976. Т. 231, № 1. С. 57–60.
8. Григорян С. С. О движении и разрушении метеоритов в атмосферах планет // Космич. исслед. 1979. Т. 17, вып. 6. С. 875–893.
9. Григорян С. С. О столкновении кометы Шумейкеров — Леви-9 с Юпитером в июле 1994 г. // Докл. РАН. 1994. Т. 338, № 6. С. 752–754.
10. Коробейников В. П., Власов В. И., Волков Д. Б. Моделирование разрушения космических тел при движении в атмосферах планет // Мат. моделирование. 1994. Т. 6, № 8. С. 61–75.
11. Кондауров В. И., Ломов И. Н., Фортвов В. Е. Деформирование, разрушение и испарение вещества фрагмента кометы Шумейкеров — Леви-9 при движении в атмосфере Юпитера // Докл. РАН. 1995. Т. 344, № 2. С. 184–188.
12. Иванов А. Г. О природе катастрофических разрушений трубопроводов // Докл. АН СССР. 1985. Т. 285, № 2. С. 357–360.
13. Махутов М. А., Сериков С. В., Котоусов А. Г. Эскалационное разрушение трубопроводов // Пробл. прочности. 1992. № 12. С. 10–15.
14. Иванов А. Г. Откол в квазиакустическом приближении // Физика горения и взрыва. 1975. Т. 11, № 3. С. 475–480.
15. Иванов А. Г., Рыжанский В. А. Возможная природа взрыва Тунгусского метеорита и распада кометы Шумейкеров — Леви // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 6. С. 117–124. (Поправка в ФГВ. 1996. Т. 32, № 3.)
16. Иванов А. Г., Рыжанский В. А. Фрагментация малого небесного тела при его взаимодействии с атмосферой планеты // Докл. РАН. 1997. Т. 353, № 3. С. 334–337.

*Поступила в редакцию 28/III 1997 г.,
в окончательном варианте — 28/VII 1997 г.*