Доклады Академии наук СССР
1975. Том 220, № 3

УДК 539.4.019 ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

А. Г. ИВАНОВ, В. Н. МИНЕЕВ

О МАСШТАБНОМ КРИТЕРИИ ПРИ ХРУПКОМ РАЗРУШЕНИИ КОНСТРУКЦИЙ

(Представлено академиком Ю. Б. Харитоном 28 I 1974)

В работе ([1]) сформулировано необходимое условие хрупкого разрушения ударно нагруженных подобных объектов (образцов материала, простейших конструкций). Это условие является следствием закона сохранения энергии и требует, чтобы запас упругокинетической энергии был достаточен для совершения работы по продвижению сквозной трещины через объект. Такой подход позволил объяснить сильный масштабный фактор * (м.ф.), экспериментально зарегистрированный при взрывном разрушении подобных стальных сосудов. Отметим, что впервые идея о решающей роли запаса упругой энергии на м.ф. была выдвинута Н. Н. Давиденковым ([2]), а наиболее явное экспериментальное подтверждение в статических испытаниях получено в работе ([3]).

Возникает вопрос о применимости этого условия к другим случаям хрупкого разрушения подобных объектов, о связи этого условия с условием разрушения, вытекающим из кинетического подхода к процессу разрушения, а также о месте и роли условия хрупкого разрушения в описании общего процесса разрушения.

Ниже условие хрупкого разрушения, выраженное через характерные для объекта напряжение и линейный размер, использовано для описания явления отрыва материала при отколе. Показано также, что это условие, совместно с уравнением долговечности кинетической теории прочности, дает основу для построения общей теории разрушения материалов.

1. Выразим условие хрупкого разрушения через характерные значения напряжения разрушения при растяжении σ и размер объекта l. Так как удельная упругая энергия пропорциональна σ^2/E, то

$$l^3\sigma^2/E=Al^2\lambda. \tag{1}$$

В уравнении (1) E — модуль Юнга, λ — удельная работа, затрачиваемая при продвижении трещины, и A — константа, зависящая от напряженного состояния и формы объекта. Из равенства (1) следует

$$\sigma^2 l=A\lambda E=\mathrm{const}. \tag{2}$$

Уравнение (2), являющееся условием хрупкого разрушения подобных объектов по форме и размерности, совпадает с условием распространения трещины в теории Гриффитса; существенное отличие заключается в том, что в уравнении (2) σ и l характеризуют объект испытания, а не дефект материала — зародышевую трещину. Уравнение (2) и устанавливает количественное значение м.ф. при разрушении подобных объектов.

---

* Под м.ф. понимаем явление уменьшения прочности при разрушении и увеличения склонности к трещинообразованию объектов при увеличении их геометрических размеров. Мы не рассматриваем влияние поверхностных эффектов (коррозионное и адсорбционное воздействие среды, наклеп в тонких слоях материала и т. п.), которые могут существенно усложнить явление разрушения.

2. В отличие от логарифмической зависимости напряжения разрушения σ от долговечности τ в формуле Журкова кинетической теории прочности [4], в уравнении (2) зависимость $\sigma(l)$ более сильная. Поэтому при ударных нагрузках, когда существенны волновые процессы и оба аргумента τ и l линейно связаны через скорость звука c, следует ожидать, что определяющим условием разрушения будет уравнение (2). Заметим, что как в кинетическом подходе к описанию разрушения, так и в уравнении (2) σ стремится к нулю при неограниченном росте аргумента.

3. Рассмотрим явление отрыва материала при ударном растяжении материала — отколе. Имея в виду волновой характер явления и тот факт, что источник энергии, необходимый для совершения этой работы, содержится только в самом воздействующем импульсе, опишем отрыв материала, используя уравнение (2).

Пусть на свободную границу $x=0$ из полубесконечного пространства, заполненного материалом, при $t=0$ выходит фронт волны сжатия с начальным давлением P_0. За фронтом давление линейно спадает до нуля на расстоянии l_0. Задача одномерна. Характерным размером является длина нагружающего импульса l_0. Примем акустическое приближение. Очевидно, что после завершения процесса отражения в обратном направлении будет распространяться волна разрежения с амплитудой $\sigma_0=-P_0$. Одномерность задачи позволяет считать, что вся упругая энергия волны растяжения затрачивается на отрыв материала и определяет напряженное состояние последнего. Поэтому постоянная

$$A=2(1-\mu)\,[(1+\mu)(1-2\mu)]^{-1}; \tag{3}$$

здесь μ — коэффициент Пуассона.

Переходя к интегральной форме в записи уравнения (2) и подставляя значение A, получим

$$\int_0^{ct}\sigma^2\,dx=\lambda E\cdot 2(1-\mu)\,[(1+\mu)(1-2\mu)]^{-1}. \tag{4}$$

Если запас упругой энергии в волне растяжения точно равен работе на отрыв материала, откол произойдет сразу после завершения формирования волны растяжения. Более интересен случай, когда упругой энергии в волне заведомо больше, чем необходимо на работу отрыва. Тогда откол будет происходить в процессе формирования волны растяжения. Растягивающие напряжения по мере удаления от $x=0$ нарастают как

$$\sigma=\sigma_0(2x/l_0) \tag{5}$$

(см., например, [5]). Совместное решение уравнений (4) и (5) позволяет найти положение фронта волны растяжения, когда упругой энергии в волне будет достаточно для совершения отрыва материала. В каком сечении произойдет отрыв? Логично допустить, что таким сечением будет наиболее поврежденное. В соответствии с данными работы Журкова и Томашевского [6] для рассматриваемой задачи это сечение соответствует максимуму функции $(t_p-x/c)/\tau[\sigma(x)]$, где t_p — время движения фронта волны растяжения. Проведенные оценки для металлов показали, что это сечение с хорошей точностью совпадает с фронтом волны растяжения. Решив совместно уравнения (4) и (5) и подставив соотношение $dP/c\,dt=\sigma_0/l_0$, найдем

$$\sigma^3(dP/dt)^{-1}=12\lambda E(1-\mu)\,[c(1+\mu)(1-2\mu)]^{-1}=\text{const}. \tag{6}$$

На рис. 1 приведены экспериментальные данные по отколу для ряда металлов, полученные Бридом с сотрудниками и Номани [7, 8] и пересчитанные в координаты $(dP/dt)-\sigma$ Златиным и Иоффе [5]. Обработанные методом наименьших квадратов, эти данные позволили, используя формулу (6), найти значения λ. Так, для стали ($E=2\cdot10^{12}$ дин/см², $c=4{,}6\cdot10^5$ см/сек, $\mu=0{,}3$) $\lambda=0{,}9\cdot10^8$ эрг/см² и находится в хорошем согласии с результатами статических измерений удельной энергии хрупкого разрушения низколегированной стали, равной $(1-4)\cdot10^8$ эрг/см² ([9]). Оценки, проведенные с найденным значением λ для стали, показывают вполне удовлетворительное согласие между запасом упругой энергии и работой, затраченной на разрыв подобных сосудов, описанных в работах ([1], [10]). Значения λ для никеля, меди и алюминия, полученные в этой работе, составили соответственно 0,6; 0,3 и $0{,}2\cdot10^8$ эрг/см². Заметим, что для описания результатов опытов по отколу (рис. 1) с позиции одной кинетической теории прочности, без привлечения масштабного критерия (2), необходимо допустить, что при уменьшении времени нахождения материала под нагрузкой с 10^{-3}—10^7 до 10^{-6}—10^{-5} сек. энергия активации разрушения возрастает в 3—6 раз, в то время как при $\tau=10^{-3}$—10^7 сек. она с хорошей точностью совпадает с энергией сублимации.

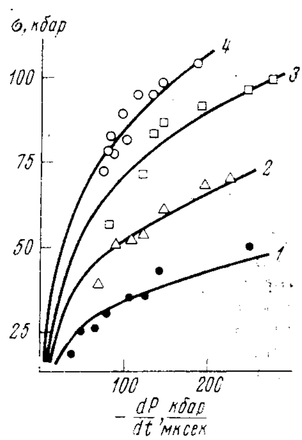

Рис. 1. Связь разрушающих напряжений σ со скоростью изменения давлений в падающем импульсе сжатия для алюминия (*1*), меди (*2*), никеля (*3*) и мягкой стали (*4*) по данным работы ([5]). Кривые соответствуют уравнению (6), для которого константы равны $0{,}43\cdot10^{15}$ (*1*), $1{,}25\cdot10^{15}$ (*2*), $3{,}65\cdot10^{15}$ (*3*) и $6{,}2\cdot10^{15}$ г²см⁻²сек⁻³ (*4*)

4. Задача об отколе и результаты работ ([1], [10]) показали, что кинетический подход к проблеме разрушения не является всеобъемлющим, но что при описании хрупкого разрушения определяющим является энергетический подход. Так как не существует чисто хрупкого или чисто вязкого разрушения, то в проблеме описания разрушения необходимо искать единый подход, который позволил бы объяснить ее многообразные аспекты.

С этих позиций процесс разрушения следует рассматривать как двухстадийный. Первая — кинетическая — стадия протекает, когда запаса упругой энергии недостаточно для хрупкого разрушения. Она описывается уравнением Журкова, приводит к накоплению повреждений в материале и, по-видимому, к уменьшению величины λ. Для материалов, которым свойственно упрочнение с ростом деформации, эта стадия приводит также к увеличению запаса упругой энергии. Первая стадия наиболее важна для объектов с малыми характерными размерами, для конструкций, изготовленных из материалов с низким пределом текучести и работающих в условиях высоких температур и малых скоростей деформации. Для таких материалов и условий нагружения эта стадия разрушения является определяющей, и масштабные эффекты могут проявляться в увеличении пластической деформации перед разрушением с уменьшением характерного размера объекта испытания.

Вторая стадия — отрыв материала, расчленение объекта, завершает процесс разрушения. Она наступает тогда, когда запас упругой энергии растяжения в объекте оказывается достаточным для совершения работы отрыва, разделения объекта на части *. Количественно эта стадия описывается уравнением (2). Для высокопрочных материалов и условий, приводящих к увеличению предела текучести, т. е. к возможному увеличению запаса упругой энергии,— низкие температуры, высокие скорости деформации, большие размеры объектов испытания,— эта стадия является определяющей в процессе разрушения. В соответствии с уравнением (2) для та-

* При оценке запаса упругой энергии растяжения, способной разрушить объект испытания, который имеет более одного характерного размера (например, тонкостенная оболочка, длинный стержень), определяющим будет наименьший размер.

ких материалов и условий испытаний объектов будут наблюдаться сильные масштабные эффекты. Изменением значения λ в процессе разрушения на этой стадии можно пренебречь.

Авторы глубоко признательны акад. Ю. Б. Харитону за интерес к работе и ценные замечания.

Поступило
28 VIII 1973

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

[1] *А. Г. Иванов, В. А. Синицын, С. А. Новиков,* ДАН, т. 194, № 2, 316 (1970). [2] Предисловие к кн. Л. С. Мороз, С. С. Шураков, Проблемы прочности цементированной стали, Л., 1947. [3] *Е. М. Шевандин, А. И. Разов и др.*, ДАН, т. 113, № 5, 1057 (1957). [4] *В. Р. Регель, А. И. Слуцкер, Э. Е. Томашевский,* УФН, т. 106, в. 2, 193 (1972). [5] *М. А. Златин, Б. С. Иоффе,* ЖТФ, т. 42, в. 8, 1740 (1972). [6] Сб. ст. Некоторые проблемы прочности твердого тела, Изд. АН СССР, 1959, стр. 68. [7] *B. R. Breed, C. L. Mader, D. Venable,* J. Appl. Phys., v. 38, № 8, 3271 (1967). [8] *G. Nahmani*, Centre Nat. Res. Sci., Coll. Intern., № 109, Paris, 1962, p. 451. [9] Сб. ст. Ударные испытания металлов, М., 1973, стр. 199. [10] *А. Г. Иванов, С. А. Новиков, В. А. Синицын,* Физика горения и взрыва, т. 8, № 1, 124 (1972).