О ПРИРОДЕ «ПИНЧ-ЭФФЕКТА» И НЕКОТОРЫХ ДРУГИХ ВОПРОСАХ ТЕОРИИ РАЗРУШЕНИЯ

Г. П. Черепанов (Москва)

В книге П. Бриджмена [1] описано несколько видов разрушений твердого тела, характерных для больших давлений. Ниже предлагается объяснение этих явлений на основе современных представлений о разрушении хрупкого и пластического тела.

1°. Явление «пинч-эффекта» заключается в следующем. «Сплошной цилиндр подвергается давлению, действующему только на наружную цилиндрическую поверхность; края же остаются не подверженными давлению. Когда давление достигает величины, численно примерно равной пределу прочности при чисто растягивающей нагрузке, то части цилиндра обычно разрываются где-либо около середины и очень редко в зоне, примыкающей к сальникам. Впечатление создается такое, как будто цилиндр разорван растягивающей силой, приложенной непосредственно к его выступающим концам... Если прут сделан из хрупкого материала, например стекла или стали, обладающей твердостью стекла, разрыв образует ясно выраженную плоскость, перпендикулярную к оси, но если прут сделан из материала, который до разрыва обладает текучестью, как, например, из мягкой стали, то получается значительное сужение площади в месте излома; вообще своим видом излом очень похож на тот, который получается при обыкновенном испытании на разрыв» ([1], стр. 96]. Объяснение «пинч-эффекта», данное Бриджменом и основанное на критерии максимального удлинения, представляется неудовлетворительным.

Главные упругие напряжения в цилиндре, очевидно, равны

$$\sigma_r = -p, \qquad \sigma_\theta = -p, \qquad \sigma_z = 0 \tag{1}$$

Здесь r, θ, z — цилиндрические координаты (ось z совпадает с осью цилиндра), p — величина бокового давления.

Цилиндр из идеально пластического материала, очевидно, разрушится при давлении p, равном σ_s, где σ_s — предел текучести, так как именно при этом давлении он переходит в пластическое состояние ($2\max\tau = |\sigma_r - \sigma_z| = \sigma_s$). Эта величина разрушающего давления, а также направление площадок скольжения совпадают с соответствующими величинами для случая растяжения стержня напряжением $\sigma_z = \sigma_s$.

Будем теперь считать материал цилиндра идеально хрупким или квазихрупким [2]. Характерным свойством таких материалов является наличие на их поверхности большого числа микротрещин-дефектов. Согласно теории хрупкого разрушения [2], прочность стержня на растяжение равна σ

$$\sigma = \frac{K}{\sqrt{R}} f(\alpha_1, \ldots, \alpha_n) \tag{2}$$

Здесь K — модуль сцепления, R — радиус цилиндра. Функция $f(\alpha_1, \ldots, \alpha_n)$ зависит от безразмерных геометрических параметров $\alpha_1, \ldots, \alpha_n$; она полностью определяется геометрией поверхностных микротрещин. При этом наибольшую роль играют максимальные по размерам и нормальные к поверхности стержня трещины. В опытах Бриджмена давление на боковую поверхность цилиндра передавалось посредством жидкости или газа. Очевидно, жидкость или газ проникали в поверхностные микротрещины и производили давление на их стенки, равное давлению на боковую поверхность цилиндра. Решая соответствующую задачу теории трещин, нетрудно сообразить, что, по крайней мере, в том случае, когда все микротрещины нормальны к поверхности стержня, разрывающее давление будет совпадать с величиной σ, определяемой формулой (2). Строго говоря, функция $f(\alpha_1, \ldots, \alpha_n)$ для различных стержней одинаковой длины и радиуса будет различной; однако для стержней из одинакового материала с одной и той же технологией изготовления, одинаковой предысторией и одной и той же температурой, при которой производится эксперимент, весьма достоверным является предположение о несущественном различии этих функций. Отсюда получается результат Бриджмена о примерном равенстве предельного давления пределу прочности на растяжение.

Бриджмен описал также другой случай разрушения, когда удлинение не определяет разрыва, а каждое отдельное напряжение и деформация являются сжимающими. Стальной цилиндр конечной длины плотно пригнан внутрь эбонитовой трубки той же длины. В таком виде и то, и другое подвергается гидростатическому давлению, действующему на всю внешнюю поверхность. Разрыв происходит так, как если бы в трубку был введен конус, растягивающий ее до точки разрыва. Объяснение этого явления аналогично объяснению «пинч-эффекта» и основано на том, что напряжение σ_θ в трубке по абсолютной величине всегда меньше внешнего давления. Нетрудно найти величину разрушающего внешнего давления p^*, используя высказанные ранее предположения

$$p^* = \frac{E_1\sigma_p}{(1-2\nu_2)E_1-(1-2\nu_1)E_2} \tag{3}$$

Здесь σ_p — прочность на растяжение материала трубки (эбонита); ν — коэффициент Пуассона, E — модуль Юнга; индекс 1 относится к материалу сплошного цилиндра (стали), индекс 2 — к материалу трубки (эбониту).

2°. Рассмотрим вопрос о пределе прочности на сжатие в случае хрупких или квазихрупких тел. Этот вопрос представляет также интерес в связи с опытами Бриджмена по разрушению толстостенных хрупких цилиндров [1].

Пусть сплошной хрупкий цилиндр со свободной боковой поверхностью подвергается осевому сжатию. Казалось бы, нет причины, вызывающей разрушение, так как пластическое или вязкое течения исключаются. Однако наличие в реальном хрупком теле большого числа микротрещин и дефектов, особенно вблизи его поверхности, приводит к тому, что тело, как бы разбиваемое дефектами на ряд стержней очень сложной формы, теряет упругую устойчивость и разрушается. При этом критическое давление полностью определяется величиной и расположением дефектов. Точный расчет здесь невозможен, однако на основе соображений анализа размерностей и некоторых естественных предположений можно получить оценочные формулы.

Пусть характерный размер трещин в хрупком теле обозначен через l, а характерный размер концевой области трещины, в которой действуют силы сцепления,— через d. Пусть интенсивность сил сцепления в концевой области трещины имеет порядок G. Параметры l, d, G будут определяющими.

Прочность хрупкого тела на сжатие σ_-, очевидно, можно записать в виде

$$\sigma_- = GF(l/d) \tag{4}$$

Отметим, что формула (4) не учитывает влияния размера самого образца; очевидно, это влияние пренебрежимо мало лишь тогда, когда характерный размер трещины мал по сравнению с характерным линейным размером тела.

Следуя Г. И. Баренблатту [2], примем естественное предположение

$$d \ll l \tag{5}$$

При этом формулу (4) можно записать в виде

$$\sigma_- \sim G \tag{6}$$

или, вспоминая [2], что модуль сцепления K имеет порядок $G\sqrt{d}$, а прочность на растяжение σ_+ — порядок $Kl^{-1/2}$, в виде

$$\sigma_- / \sigma_+ \sim \sqrt{l/d} \tag{7}$$

Очевидно, для идеально хрупкого тела интенсивность сил сцепления имеет порядок модуля Юнга E, а для пластического или близкого к нему тела — порядок предела текучести. Поэтому близость прочности на сжатие к величине модуля Юнга E, согласно формуле (6), может служить качественной характеристикой близости соответствующего материала к идеально хрупкому. Формулу (7) можно использовать для проверки выполнимости гипотезы малости (5) в случае естественных микротрещин, всегда имеющихся в реальном теле, на основе макроскопических испытаний.

Приведем для сравнения данные о механических характеристиках некоторых квазихрупких материалов; цифры (в *кг/мм*^{2}) взяты из справочника [3]:

силикатные стекла

$$\sigma_+ = 3-9, \qquad \sigma_- = 50-200, \qquad E = (5-8.5)\cdot 10^3$$

каменное литье

$$\sigma_+ = 2, \qquad \sigma_- = 20, \qquad E = 11.000$$

кислотоупорные керамические изделия

$$\sigma_+ = 1.15-11, \qquad \sigma_- = 35-160, \qquad E = 42-70$$

фарфор

$$\sigma_+ = 2.5-3.5, \qquad \sigma_- = 45-55, \qquad E = 60-80$$

Небольшая величина прочности на сжатие σ_- по сравнению с модулем Юнга в случае стекол и других вязкоупругих тел объясняется интенсивной релаксацией напряжений в окрестности концов трещин.

Поступила 8.X 1964

ЛИТЕРАТУРА

1. Bridgman P. The Physics of High Pressure. London, 1931 (русск. перев. Бриджмен П. Физика высоких давлений. М.— Л., 1935).
2. Баренблатт Г. И. Математическая теория равновесных трещин, образующихся при хрупком разрушении. ПМТФ, 1961, № 4.
3. Справочник по машиностроительным материалам, т. 4. Гостехиздат, М., 1960.