

ДЕФОРМАЦИЯ И РАЗРУШЕНИЕ ТОНКОГО ДИСКА ПРИ СЖАТИИ

Г. Т. Афанасьев, В. К. Боболев, А. В. Дубовик

(Москва)

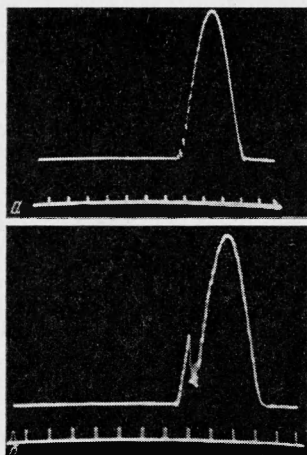
Приводятся результаты экспериментального исследования поведения тонких образцов двух твердых органических веществ (янтарной и щавелевой кислот) в условиях медленного сжатия и при сжатии ударом; рассматриваются характер деформации и механизм хрупкого разрушения.

Для деформирования тонких слоев, как известно, требуются напряжения, значительно превышающие предел текучести материала слоя. Это обстоятельство, затрудняя обработку металлов давлением, в то же время позволяет применять простейшие методы для исследования свойств вещества под давлением. Так, Бриджменом для изучения влияния давления на некоторые свойства веществ широко использовался метод сжатия тонкого диска между плоскими твердыми поверхностями [1-3]. Для жестко-пластической и упруго-пластической сред в этих условиях найдено распределение напряжений в деформирующемся образце [4, 5]. При этом величина среднего давления P_* связана с пределом текучести среды σ , толщиной образца h и диаметром D (при $h/D < 0.125$) следующим образом:

$$P_* = \sigma \left(1 + \frac{D}{3\sqrt{3}h} \right) \quad (1)$$

Для пластичных металлов как распределение напряжений, так и соотношение (1) подтверждены экспериментально [4]. Соотношение (1) также выполняется при хрупком разрыве диска в случае прочного сцепления его с пуансонами, при этом σ означает предел прочности [5].

В качестве объектов исследования были выбраны малопрочные органические вещества: янтарная кислота (ЯК) и кристаллогидрат щавелевой кислоты (КЩК). Пуансонами служили подшипниковые ролики диаметром 10 мм, на два порядка превышающие исследуемые вещества по модулю упругости. Образцы получались из дисперсной массы прессованием до 5000 атм. Перед прессованием ЯК высушивалась до постоянного веса. В случае удара нижний ролик с библиарной обмоткой из константановой проволоки являлся тензометрическим датчиком давления. Изготовление датчиков, измерение давления и процедура обчета осциллограмм описана в работе [6]. Испытания производились на вертикальном копре; высота сбрасывания груза 10 кг изменялась от 5 до 80 см. Осциллограмма давления при ударе по роликам без образца приведена на фиг. 1, а (метки времени следуют через 200 мксек). Процесс сжатия на копре является квазистатическим, так как время пробега звука по роликам ($\sim 10^{-6}$ сек) много меньше времени удара.



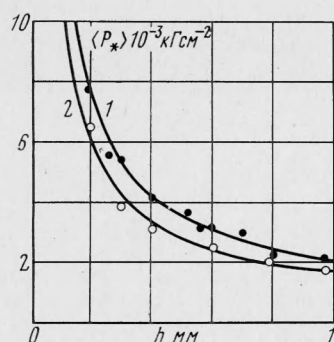
Фиг. 1

При ударе по образцу (фиг. 1, б) в некоторый момент времени происходит резкий сдвиг давления, что свидетельствует о разрушении образца. Разрушение сопровождается выбросом части вещества из области сжатия. Относительная деформация образца до разрушения, как показывает обчет осциллограмм давления, обычно не превышает 10%. Поэтому с хорошей степенью точности можно отождествить толщину, при которой происходит разрушение, с начальной толщиной образца. Для каждой толщины производилось не менее 5-10 испытаний. По измеренным величинам давления P_* , приводящего к разрушению, и соотношению (1) находились значения σ , которые затем усреднялись. Кривые прочности (фиг. 2) строились по формуле (1) и этим усредненным значениям $\langle \sigma \rangle$. Для ЯК и КЩК они соответственно равны 730 (кривая 1) и 580 кг/см² (кривая 2). Точки на графике соответствуют значениям $\langle P_* \rangle$, представляющим собой результат усреднения величин P_* , полученных для каждой толщины. Отклонение $\langle P_* \rangle$ от кривых не превышает 10%. Результаты отдельных измерений независимо от толщины диска могут отклоняться от кривой прочности вплоть до 25%. Причиной столь большого разброса прочности образцов, очевидно, является их неоднородность, о чем свидетельствует колебание плотности образцов, в ряде случаев на 15% не достигающей плотности монокристалла.

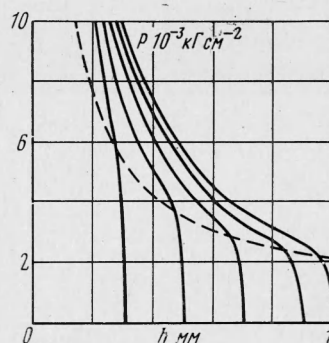
Как показали эксперименты, значения $\langle P_* \rangle$ и $\langle \sigma \rangle$ в пределах ошибки измерений (10%) не зависят от дисперсности веществ и скорости груза при соударении (скорость

изменялась в четыре раза). Таким образом, можно сделать вывод, что величины $\langle P_* \rangle$ зависят только от прочности и толщины образцов и довольно хорошо описываются зависимостью (1). Измерение величины $\langle \sigma \rangle$ при ударе по тонкому диску можно рекомендовать как метод измерения прочности хрупких малопрочных материалов.

Для образцов ЯК различной толщины при медленном нагружении на прессе измерялась величина остаточной деформации в зависимости от давления (фиг. 3). Кривая прочности ЯК, полученная при ударе, нанесена на графике пунктиром. При давлениях ниже кривой прочности остаточная деформация довольно мала, затем с ростом давления она существенно возрастает. Наблюдающаяся пластическая деформация сопровождается при этом упрочнением, так как кривые медленного нагружения идут выше и круче, чем кривая прочности. При этом выше кривой прочности также может происходить разрушение образца. Оно наблюдается тем чаще и тем при



Фиг. 2



Фиг. 3

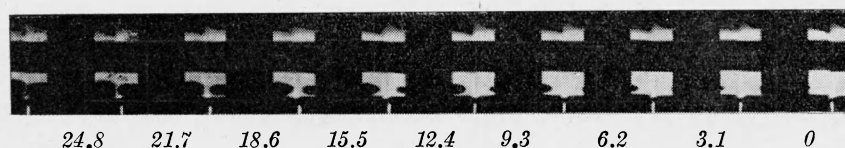
меньшем давлении, чем толще образец и быстрее нагружение. Подобные разрушения при увеличении толщины слоя для широкого круга веществ были получены Бриджменом [2].

Объяснение разного поведения веществ при ударе и медленном нагружении, по видимому, следует искать в двух факторах: влиянии скорости нагружения, которая в сопоставляемых случаях различается на 4-5 порядков, и влиянии давления. От скорости нагружения, как известно, зависит возможность протекания релаксационных процессов и при ее достаточном увеличении должен происходить переход к хрупкости. Однако влияния одной лишь скорости недостаточно, поскольку образцы с $h/D \approx 1$ ведут себя хрупко как при ударе, так и при медленном нагружении. На механические свойства твердых тел существенно влияет и давление: оно увеличивает величину пластической деформации металлов до разрыва, а многие материалы (например, мрамор), хрупкие при обычных условиях, при высоком давлении становятся пластичными [3]. Если, однако, пластически продеформировать материал под давлением и затем снять давление, то хрупкость восстанавливается. В связи с этим интересны следующие опыты: образцы, продеформированные при медленном нагружении до некоторой толщины h_1 , заметно отличающейся от начальной h , и до давления, намного превышающего $P(h_1)$ по кривой прочности, подвергались затем удару. При этом были получены значения $P(h_1)$, соответствующие кривой прочности. Таким образом, деформационное пластическое упрочнение образцов при снятии давления также снижается.

Следует заметить, что соответствие пределов прочности образцов, измеренных при ударе, зависимости (1) указывает на то, что $\langle \sigma \rangle$ не зависит от давления. Обратимся в связи с этим к опытам Бриджмена [2], где измерялось усилие поворота одного из пуансонов в зависимости от приложенного давления. Сильное возрастание этого усилия при увеличении давления было истолковано Бриджменом как увеличение предела текучести вещества под давлением. Подобное толкование вызвало возражение в работе [7], где было показано, что связь предела текучести с усилием поворота и давлением более сложна, чем это предполагалось Бриджменом. Учет данного обстоятельства, однако, не может объяснить столь сильной зависимости усилия поворота от давления, которая получена в эксперименте. Этот эффект, исходя из описанных выше опытов при медленном нагружении, может быть объяснен повышением предела прочности материала в результате пластического упрочнения при сдвиговой деформации образца под давлением. Подобное упрочнение должно происходить на начальной стадии поворота, а затем удельная сила трения на контактной плоскости должна быть равна увеличившемуся пределу прочности вещества на сдвиг. Следует заметить, что многочисленные «щелчки», наблюдавшиеся Бриджменом для большинства веществ при повороте, как раз характеризуют хрупкий тип поведения материала.

Разрушение тонких образцов может также происходить при быстром понижении давления после предварительного медленного нагружения. Разрушение при этом наблюдается тем чаще, чем быстрее снимается нагрузка, что указывает на кинетический характер процесса. Разрушение предварительно нагруженных образцов при быстром снижении давления для большого числа различных веществ было получено в работе [8].

Во всех случаях, будь то при ударе, медленном нагружении или последующем снижении давления, разрушение тонкого диска приводит к интенсивному выбросу части вещества из области сжатия и резкому спаду давления. Часто разрушение сопровождается сильным звуковым эффектом особенно при высоких давлениях и происходит как бы взрывообразно. Будучи обнаружено Бриджменом, это явление вызвало



Фиг. 4

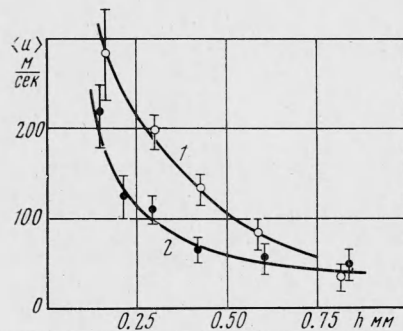
большой интерес с точки зрения влияния давления на устойчивость химических соединений, особенно органических. Как, однако, оказалось, гидростатическое давление на химическую устойчивость органических веществ практически не влияет, а рассматриваемое явление возникает только при наличии сдвиговых напряжений. Обратив внимание на то, что при сжатии диска это явление существенно зависит от толщины, Бриджмен [9] объяснил его чисто механическими причинами, а встречающиеся случаи частичного химического разложения — вторичным процессом — разогревом вещества из-за трения при разрушении. Тем не менее в недавно вышедшей статье [10] было предложено два объяснения «детонации сахара», поводом чему, по-видимому, явилось «взрывообразное» разрушение тонкого слоя. В работе [8] этому дается экспериментальное опровержение.

Для выяснения динамической картины разрушения были поставлены опыты по измерению скоростей выброса вещества из области сжатия при разрушении тонкого диска. Производилась высокоскоростная фотосъемка процесса разлета вещества при ударе; применялась ждущая лупа времени ЖЛВ-2. Случай удара позволяет синхронизовать импульс подсветки с наблюдаемым процессом [8]. Общность исследования разрушения тонкого диска при этом не нарушается, так как сжатие при ударе носит квазистатический характер. Съемка производилась в двух вариантах: сбоку в проходящем свете, так что наблюдалась теневая картина, и снизу через стеклянную наковальню в отраженном свете. На фиг. 4 представлены снятые сбоку последовательные кинокадры поведения образца ЯК толщиной 0.3 мм; цифры под кадрами указывают время в мксек.

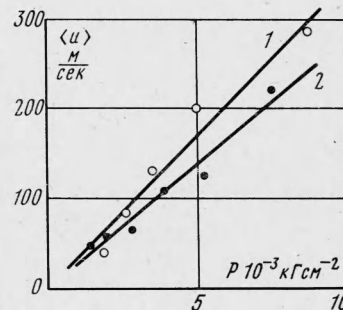
В начальной стадии удара, соответствующей участку постепенного повышения давления до величины P_* (фиг. 1, б), выдавливания вещества практически не наблюдается. При достижении P_* вещество резко выбрасывается из межроликового пространства в радиальном направлении. После небольшого участка ускорения (≤ 1 мм) движение вещества при выбросе происходит со скоростями порядка 100 м/сек; величина скорости тем больше, чем тоньше разрушающийся диск. На фиг. 5 приведены результаты измерения скорости движения фронта выброса для ЯК (кривая 1) и КШК (кривая 2) в зависимости от начальной толщины образцов. При регистрации разрушения наблюдается некоторая разновременность выброса с противоположных сторон образца. Она увеличивается с уменьшением толщины и, как показала съемка снизу, может достигать 10-15 мксек. Скорость движения вещества при этом выше с той стороны, где выброс запаздывает. Разница этих скоростей в большинстве опытов не превышала 20%, но в некоторых случаях на самых тонких образцах она достигала 50%. Значения $\langle u \rangle$, нанесенные на фиг. 5, соответствуют усредненным значениям скорости как по числу опытов (3-5), так и по противоположным сторонам выброса. На фиг. 5 показаны также максимальные имевшиеся отклонения скорости от значений $\langle u \rangle$. Измерение скоростей производилось на базе, приблизительно равной радиусу образца (5 мм). Точность измерения для всех опытов составляла 10%. При разлете в свободное пространство вещество расширяется под углом $35^\circ (+10^\circ)$. Какой-либо связи этого угла со скоростью разлета не замечено. Следует также заметить, что осмотр вылетевшего и собранного после опытов вещества не показал никаких следов химического разложения.

Таким образом, можно видеть, что при разрушении тонких слоев действительно происходят взрывообразные механические процессы. Измеренные величины скоростей

указывают на волновой характер разлета, при котором основная доля упругой энергии, запасенной при сжатии, переходит в кинетическую энергию. Исследуемый процесс разлета можно рассматривать как один из наиболее удобных случаев для проверки моделей волны самоподдерживающегося разрушения в напряженном хрупком теле



Фиг. 5



Фиг. 6

[11, 12]. Действительно, в тонком слое сдвиговые напряжения по сравнению с объемными чрезвычайно малы. Остановимся на простейшем виде связи массовой скорости с давлением

$$u = p / \rho c$$

где ρ — плотность вещества и c — скорость звука. На фиг. 6 для ЯК и КЩК приведены значения $\langle u \rangle$ в зависимости от разности $p = \{ \langle P_* \rangle - \frac{2}{3} \langle \sigma \rangle \}$, которая соответствует среднему по радиусу давлению гидростатического сжатия. Как видно, пропорциональность между ними соблюдается вполне удовлетворительно. Расчет скорости звука по углу наклона при этом дает 1900 м/сек для ЯК и 2200 м/сек для КЩК — значения, весьма характерные для подобных материалов.

Поступила 15 VIII 1969

ЛИТЕРАТУРА

1. Bridgman P. W. Effect of high mechanical stress on certain solid explosives. J. Chem. Phys., 1947, vol. 15, No. 5.
2. Бриджмен П. В. Новейшие работы в области высоких давлений. М., Изд-во иностр. лит., 1948.
3. Бриджмен П. В. Исследования больших пластических деформаций и разрыва. М., Изд-во иностр. лит., 1955.
4. Унксон Е. П. Инженерная теория пластичности. М., Машгиз, 1959.
5. Бакши О. А., Качанов Л. М. О напряженном состоянии пластической прослойки при осесимметричной деформации. Изв. АН СССР, Механика, 1956, № 2.
6. Афанасьев Г. Т., Боболев В. К., Дубовик А. В., Жученко В. С. О механизме возбуждения и развития взрыва при механических воздействиях. Сб. «Взрывное дело», № 63/20, М., «Недра», 1967.
7. Огибалов П. М., Кийко И. А. Очерки по механике высоких параметров. М., Изд-во МГУ, 1966.
8. Malmgrud S., Claesson S. A high pressure explosive phenomenon. Arkiv Kemi, 1966, vol. 25, No. 3.
9. Bridgman P. W. Shearing phenomena at high pressures, particularly in inorganic compounds. Proc. Amer. Acad., 1937, vol. 71, No. 9, pp. 387—460.
10. Teller E. On the speed of reactions at high pressures. J. Chem. Phys., 1962, vol. 36, No. 4.
11. Галин Л. А., Черепанов Г. П. О самоподдерживающемся разрушении напряженного хрупкого тела. Докл. АН СССР, 1966, т. 167, № 3.
12. Слепьян Л. И. О волне хрупкого разрушения. Инж. ж. МТТ, 1968, № 4.