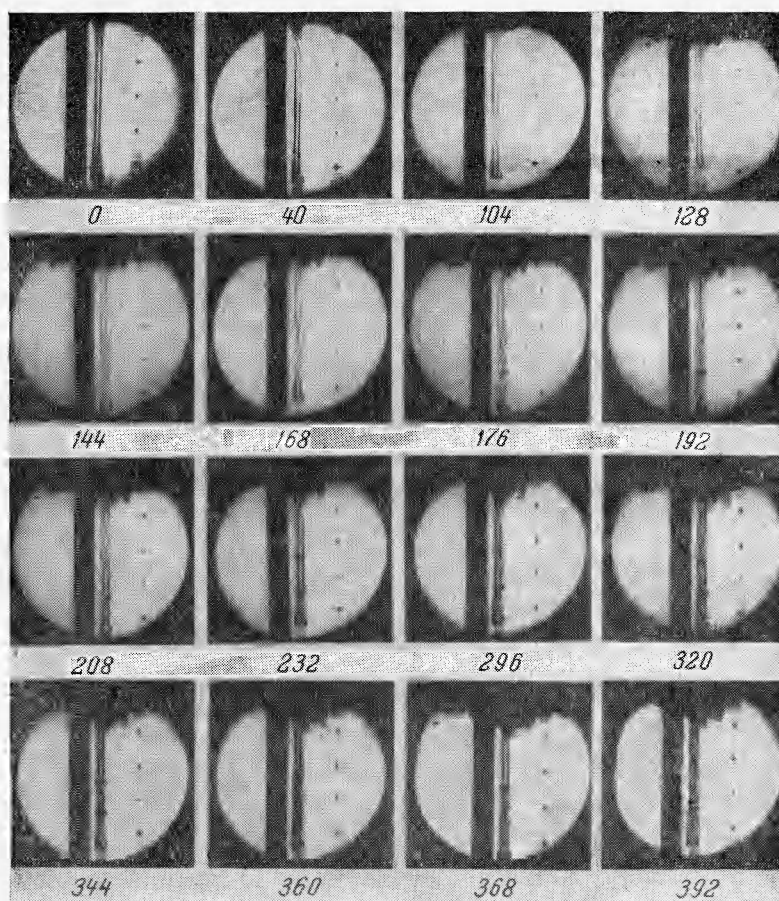


О ПРОЦЕССЕ РАЗРУШЕНИЯ СТЕРЖНЕЙ ДЕЙСТВИЕМ ВОЛН НАПРЯЖЕНИЙ

В. Г. Журба

(Днепропетровск)

Исследования проводились на стержнях из органического стекла. Нагружение стержней производилось взрывом на торце заряда ВВ (тэн), или ударом по торцу металлического ударника, метаемого взрывом заряда ВВ. Для регистрации смещений поперечных сечений стержня в направлении его продольной оси был использован метод муаровых полос. Движение муаровых полос и процесс разрушения регистрировались при помощи сверхскоростной фоторегистрирующей установки СФР.



Движение муаровых полос и развитие процесса разрушения стержня под действием взрыва заряда ВВ

На фигуре представлены отдельные кадры регистрации движения муаровых полос и процесса разрушения стержня под действием взрыва заряда ВВ. Нагружаемый конец стержня несколько вынесен за верхнюю часть поля съемки, свободный конец — в нижней части кадров. Под кадрами приведено время в микросекундах от момента взрыва.

Муаровые полосы в ненагруженном стержне (первый кадр на фигуре) были параллельны его продольной оси. При прохождении по стержню волны напряжений полосы смещаются в направлении, перпендикулярном продольной оси стержня и изменяют свою кривизну. Смещение муаровой полосы в данной точке стержня прямо пропорционально смещению проходящего через эту точку поперечного сечения стержня в направлении его продольной оси.

Угол наклона полосы в данной точке стержня к положению полосы до прихода волны напряжений соответственно пропорционален составляющей тензора деформаций в направлении продольной оси стержня (которую для простоты изложения в дальнейшем условимся называть продольной деформацией или просто деформацией) в поперечном сечении, проходящем через эту точку стержня.

Численным дифференцированием смещений, полученных при обработке картин муаровых полос, были найдены значения деформаций ϵ и массовых скоростей v для волны напряжений. По картине полос определялась скорость продольной волны c . Напряжения определялись по формуле

$$\sigma = \rho c v \quad (1)$$

где ρ — объемный вес.

Статический модуль упругости $E_1 = 25.7 \cdot 10^3 \text{ кг/см}^2$. Предел пропорциональности составляет 200 кг/см^2 , временное сопротивление отрыву — $470 \div 550 \text{ кг/см}^2$, при деформациях соответственно $0.023 \div 0.030$.

Динамический модуль упругости определялся по формуле

$$E_2 = \rho c^2$$

Величина E_2 в зависимости от скорости продольной волны изменяется в пределах $55 \cdot 10^3 \div 65 \cdot 10^3 \text{ кг/см}^2$, т. е. более чем в два раза превышает величину E_1 .

Основываясь на данных проведенных экспериментов, рассмотрим основные принципиальные факторы механизма разрушения стержней. При нагружении стержня взрывом и интенсивным ударом часть стержня, прилегающая к нагружаемому концу, испытывает интенсивное дробление. В стержне по направлению к свободному концу распространяется волна сжатия. (Под понятием волны сжатия и волны растяжения здесь подразумеваются импульсы напряжений одного знака, в которых напряжения, нормальные фронту волны, являются соответственно сжимающими или растягивающими.)

Максимальные продольные деформации в волне сжатия вблизи нагружаемого конца стержня имеют величину не более $0.027 \div 0.030$. Увеличение интенсивности нагружения приводит к увеличению зоны местного разрушения нагружаемого конца и к более интенсивному дроблению этой зоны, но не увеличивает максимальной деформации в волне сжатия, распространяющейся в неразрушенную часть стержня. Прилегающая к контакту нагружения зона пластических деформаций как бы «не пропускает» в неразрушенную часть стержня параметры волны с продольными деформациями, превышающими некоторую критическую для волны сжатия деформацию, составляющую для органического стекла $0.027 \div 0.030$.

Нагружаемый конец стержня не испытывал разрушения при напряжениях непосредственно вблизи контакта нагружения 1300 кг/см^2 и деформациях соответственно 0.022 .

Скорость распространения максимальных деформаций, имеющих величину $0.027 \div 0.030$, на $7 \div 8\%$ ниже скорости переднего фронта волны, что указывает на наличие пластичности при данных деформациях.

Величина максимума волны деформаций, по мере ее движения, уменьшается, причем скорость этого уменьшения монотонно понижается. При достаточно большой длине стержня максимальные параметры волны могут уменьшиться до таких размеров, при которых не произойдет разрушения свободного конца стержня.

Волна сжатия, отражаясь от свободного конца стержня, преобразуется в волну растяжения.

Как показывают данные экспериментов, если максимальная деформация превышает величину $0.022 \div 0.023$, что равно минимально необходимому для разрушения значению деформации при статическом испытании на растяжение, то волна растяжения вызывает процесс трещинообразования. Таким образом, деформацию $0.022 \div 0.023$ для органического стекла можно считать критической деформацией волны растяжения. Если максимальная деформация волны растяжения не намного превышает критическую, то трещинообразование в стержне возникнет при полном отражении волны сжатия, на расстоянии от свободного конца не меньшем, чем половина длины волны, что согласуется с данными, полученными А. Н. Ханукаевым [1, 2]. Если максимальная деформация волны больше критической, то трещинообразование в стержне начнется в тот момент, когда деформация растяжения превысит критическую, т. е. когда процесс отражения волны сжатия еще не закончен. В этом случае процесс трещинообразования начинается на расстоянии от свободного конца, меньшем половины длины волны.

Согласно теории прочности Гриффитса [3] центрами трещинообразования являются микротрещины, которые существуют даже в ненапряженном материале.

Теория разрушения М. В. Мачинского [4] предполагает, что «зачатие трещин» появляется при прохождении волны напряжений через «слабые» места в породе.

Результаты проведенных экспериментов согласуются с теориями Гриффитса и М. В. Мачинского. Например, когда максимальная деформация в волне растяжения

несколько меньше критической, трещинообразование в стержне не наблюдается. Если же в этом случае на поверхности стержня имеется дефект (например, неглубокая поперечная царапина), даже на расстоянии нескольких длин волн от свободного конца стержня, то этот дефект является центром трещинообразования, в то время как на других участках стержня от действия волны растяжения трещины не образуются.

Трещины от действия волны растяжения в стержнях, на поверхности которых нанесена сетка поперечных очень мелких царапин, почти всегда возникают в местах нанесения царапин.

При наличии незначительной трещины дальнейшее ее развитие происходит при деформациях, значительно меньших критических. С теориями Гриффитса и М. В. Мачинского согласуется и тот факт, что разрушения в стержнях при идентичных условиях не строго идентичны, что может быть объяснимо влиянием слабых мест (микротрещин, дефектов структуры и т. д.), определяющих места зарождения трещин.

Наличие слабых мест не позволяет, исходя из параметров волны, с большой точностью указать места возникновения трещин, так как критическая деформация в зависимости от вида и величины дефекта может в некоторых пределах изменять свою величину.

Чем больше максимальная деформация волны растяжения, тем более незначительные микротрещины и дефекты превращаются в зачатки трещин. Для дальнейшего развития трещин самым важным фактором является длительность действия волны растяжения, даже при незначительной ее интенсивности.

При развитии трещины от вновь образованной поверхности по стержню в направлении движения волны растяжения распространяется волна разгрузки.

Отделенная трещиной часть волны растяжения, «оставшаяся» в откольном куске, отражаясь от вновь образованной поверхности, превращается в волну сжатия.

При отражении оставшейся части волны растяжения от вновь образованной поверхности происходит относительное смещение откольного куска от остальной части стержня, т. е. происходит размыкание трещины, величина которого пропорциональна импульсу оставшейся в откольном куске части волны.

За время образования трещины разделяемые ею участки стержня получают импульсы вращения от действия отражения части волны растяжения от вновь образованной поверхности и одновременного прохождения другой части волны растяжения через участок поперечного сечения стержня, по которому еще не распространилась трещина. Импульсы вращения разделенных трещиной участков стержня равны по величине и противоположны по знаку, так как момент количества движения стержня в целом, как замкнутой системы, есть величина постоянная.

Распространяющаяся от вновь образованной поверхности в сторону движения волны растяжения волна разгрузки останавливает дальнейшее развитие трещин, не успевших значительно развиться. Длина «погашенной» волной разгрузки трещины прямо пропорциональна скорости ее развития и расстоянию между погашенной и ранее образованной трещиной и обратно пропорциональна скорости распространения волны разгрузки.

Откол возникает при условии, когда трещина успевает развиться на всю ширину стержня до прихода волны разгрузки от ранее образованной трещины. Таким образом, при однократном действии непосредственно основной волны растяжения, длина откольного куска не может быть меньше определенной величины при данной скорости развития трещин и при данной ширине стержня, представляющей собой минимальное расстояние по фронту волны между слабыми местами, в которых может начаться трещинообразование.

Распространяющаяся от вновь образованной трещины по направлению к свободному концу стержня волна сжатия, отражаясь от образованной ранее трещины или от свободного конца, превращается в волну растяжения, которая, несмотря на то, что максимальная деформация в ней может быть во много раз меньше критической, приводит к дальнейшему развитию погашенных или не успевших развиться ранее трещин и к дроблению, таким образом, ранее образованных откольных кусков.

Интенсивность и длина волны растяжения, отдающей часть энергии на трещинообразование, деформацию и движение откольных кусков, могут уменьшиться настолько, что не вызовут дальнейшего образования или значительного развития образованных трещин.

Длина откольных кусков в направлении от свободного к нагружаемому концу увеличивается, так как при уменьшении интенсивности волны трещины могут возникать только в наиболее слабых местах.

Волна сжатия, образованная отражением волны растяжения от нагружаемого конца стержня, может частично проходить через ранее образованные сквозные трещины, если величина их раскрытия не больше некоторого для данного импульса волны значения.

От действия отраженных при прохождении через трещины волн растяжения и преломленных волн сжатия, отразившихся затем от других свободных поверхностей,

происходит дальнейшее развитие трещин и зачатков трещин, образованных при первом прохождении волны растяжения, что приводит к образованию новых и к дальнейшему дроблению ранее образованных откольных кусков. При этом происходит смыкание и размыкание трещин, волны сжатия переходят из одного куска в другой, от соударения кусков образуются новые волны сжатия.

Доля разрушений, вызванных волной, отраженной от нагружаемого конца стержня, довольно велика в общем объеме разрушений.

В условиях проведенных экспериментов разрушений от действия волны при втором ее отражении от нагружаемого конца не наблюдалось.

А. Н. Ханукаев определяет суммарную длину оторвавшихся кусков равной половине эффективной части волны сжатия.

Как показали данные проведенных экспериментов, суммарная длина оторвавшихся кусков больше общей длины волны и во много раз больше эффективной части волны. Число оторвавшихся кусков А. Н. Ханукаев определяет кратным от деления величины максимальных растягивающих напряжений на величину предела прочности отрыву. Но, как показали данные проведенных экспериментов, максимально возможное значение растягивающих напряжений в стержнях из органического стекла не превышает 1600 кг/см^2 , минимальное значение предела прочности отрыву равно $1300 \div 1400 \text{ кг/см}^2$, т. е. отношение этих величин не может быть большим 1, 2.

Число оторвавшихся кусков, как видно из сказанного выше, зависит от большого числа факторов. Если же иметь в виду только параметры волны напряжений, то следует сказать, что число возникших при прохождении волны напряжений трещин зависит от максимума волны, конечная же длина каждой возникшей трещины зависит от длительности волны напряжений.

Поступила 16 IV 1966

ЛИТЕРАТУРА

1. Ханукаев А. Н. Энергия волн напряжений при разрушении пород взрывом. Госгортехиздат, 1962.
2. Ханукаев А. Н. Исследование механизма разрушения стержней под действием ударной волны с помощью скоростной кино съемки. Усп. научн. фотографии, 1959, № 4.
3. Griffith A. A. The theory of rupture. Proc. 1-st Intern. Congr. Appl. Mech. Delft, 1924.
4. Мачинский М. В. Теория расчета зарядов. Взрывное дело, 1936, № 27, 8.

УПРОЧЕНИЕ СТАЛИ ПРИ КУМУЛЯТИВНОМ ВЗРЫВЕ

Л. И. Миркин, Н. П. Новиков

(Москва)

Многочисленными исследованиями установлено, что импульсная деформация металлов приводит к повышению их прочностных характеристик. Так, по данным [1] при взаимодействии металлических пластинок, сталкивающихся с преградой со скоростями $200-300 \text{ м/сек}$, наблюдается упрочение металла, а увеличение скорости до 3300 м/сек приводит к возрастанию эффекта упрочения [2]. Рассмотрение ударных волн, возникающих в пластинках при ударе, позволяет определить параметры металла при сверхвысоких давлениях [3]. Согласно этим расчетам при высокоскоростных взаимодействиях давление в металлических пластинках резко возрастает, что, вероятно, и приводит к упрочению. Гидродинамическое рассмотрение сходящихся цилиндрических волн показывает, что, используя такие волны, можно получать еще более высокие параметры в сжатом металле. Так, например, при высокоскоростном (3250 м/сек) соударении пластины, обжатой взрывом, с тонкостенной трубой возникает цилиндрическая, сходящаяся к оси трубки ударная волна, что приводит к дальнейшему упрочению материала [4] по сравнению с эффектами упрочения в [2]. Одним из способов получения очень больших давлений при сжатии является кумуляция. Как известно [5], в результате кумулятивного взрыва образуется кумулятивная струя, распространяющаяся с большой скоростью и определяющая пробивание преграды и пест, в котором сосредоточена основная масса материала облицовки, всесторонне обжатой продуктами взрыва.

В данной работе изучались результаты обжатия облицовки кумулятивной выемки и связанные с ним структурные изменения материала песта.

Эксперименты проводились с зарядами бризантного взрывчатого вещества типа ТГ50/50. Диаметр зарядов равнялся 76 мм , высота составляла 240 мм , угол конусности кумулятивной выемки — 30° . Облицовка кумулятивной выемки изготовлялась из стали — 10 , толщина облицовки равнялась 2.5 мм . Иницирование заряда производилось с торца, противоположного кумулятивной выемке.