

О ВРЕМЕННОЙ ЗАВИСИМОСТИ ЭНЕРГИИ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ ОТКОЛЕ

В. А. Огородников, А. Г. Иванов

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607190 Саров

На основе экспериментальных данных по откольному разрушению геометрически подобных образцов ряда металлов и откольному разрушению образцов из стали (Ст. 3) в ударных волнах разрежения анализируется вид временной зависимости в диапазоне $10^{-6} \div 10^{-13}$ с максимальных растягивающих напряжений при отколе и удельной (на единицу поверхности) энергии разрушения. При разрушении отколом в металлах наблюдались сильные масштабные эффекты энергетической природы.

За последние десятилетия в литературе накоплен большой объем экспериментальных и теоретических результатов исследований деформации и разрушения простейших объектов при динамическом нагружении. Предметом исследований являлись геометрически подобные цилиндрические и сферические оболочки и образцы плоской геометрии, характерные размеры которых изменялись от нескольких миллиметров до нескольких метров, а их масштаб — в пределах $4 \div 32$ раз. Интересно отметить, что если разрушение объекта малого размера происходило в пластической области деформации, то с увеличением его размера (при соблюдении геометрического подобия) разрушение переходило в упругую область. Медленно текущее разрушение переходило в хрупкое, пороговое разделение объекта на части. Все это указывало на возможность проявления сильных масштабных эффектов, что имеет большое значение для понимания соотношения экспериментально-расчетных и реальных запасов прочности конструкций. В связи с этим исследование зависимости динамической прочности конструкционных материалов от размеров исследуемого объекта является важной практической задачей. Один из возможных путей ее корректного решения может быть связан с использованием ударно-волновых экспериментов по разрушению геометрически подобных объектов при одномерной деформации. В этом случае создаются условия, при которых надежно обеспечивается учет возможных источников подвода энергии к исследуемому объекту, что не выполняется, как правило, в квазистатических испытаниях.

С позиций современной механики разрушения разделение целого на части — акт со-

вершения работы, причем работа минимальна при одномерной деформации. Но и в этом случае фактические затраты энергии разрушения для металлов оказываются, как правило, на 2–4 порядка больше теоретического значения, что связано с потерей энергии на дефектообразование и пластическое течение в окрестности поверхности разрушения. Ситуация прямо противоположна установившемуся пониманию теоретической прочности как максимальной величины прочности, недостижимой для реальных материалов.

Условия разрушения при одномерной деформации достигаются и при взаимодействии волн разрежения. Такие разрушения называются отколом, а их описание с энергетических позиций современной механики разрушения дано в [1] в предположении, что удельная (на единицу поверхности) работа разделения материала (λ) есть величина постоянная при данной температуре, как и у ее аналога G_{1c} при разрушении материала магистральной трещиной. Связь напряжения разрушения σ_p при отколе в образце толщиной 2δ от удара пластиной из того же материала толщиной δ дается выражением

$$\sigma_p^2 \delta = 2\lambda E(1 - \nu)[(1 + \nu)(1 - 2\nu)]^{-1}, \quad (1)$$

где E — модуль Юнга, ν — коэффициент Пуассона. Формула (1) получена из баланса упругой энергии растяжения и работы отрыва. В [2] предложено для материалов высокой пластичности использовать откольное разрушение с тем, чтобы оценить величину G_{1c} .

Анализ первых экспериментальных данных [3, 4] по определению величины λ и различию в степени повреждения материала образца вблизи плоскости откола в зависимости от ха-

ракторного времени действия растягивающих напряжений (τ) показал, что удельная (на единицу поверхности) работа разрушения не является постоянной величиной, а есть достаточно сильная функция времени ($\lambda = \lambda(\tau)$) или скорости деформации ($\lambda = \lambda(\dot{\epsilon})$). В опытах с геометрически подобными образцами зависимости $\lambda(\tau)$ и $\lambda(\delta)$ эквивалентны и однозначно связаны с зависимостью $\lambda(\dot{\epsilon})$ материала при его разрушении. В общем случае изменение скорости деформации материала $\dot{\epsilon}$ можно достичь, не меняя размер сборки, путем вариации, например, интенсивности нагружения. Конечные результаты, по-видимому, будут различны. Заметим, что аналогичная зависимость при разрушении материала магистральной трещиной весьма слабая. Так, согласно [5] для сталей изменение $\dot{\epsilon}$ на пять порядков приводит к изменению коэффициента трещиностойкости K_{Ic} всего в 1,5–2 раза. При линейной зависимости $K_{Ic}(\dot{\epsilon})$ увеличение $\dot{\epsilon}$ на порядок соответствует росту G_{Ic} всего на 0,03 ÷ 0,04 %.

Для описания экспериментов по отколу с геометрически подобными сборками в [6–8] была принята зависимость

$$\lambda_j = \lambda_i \left(\frac{\delta_j}{\delta_i} \right)^m = \lambda_i \left(\frac{\tau_j}{\tau_i} \right)^m, \quad (2)$$

где значения λ_i и δ_i известны. В области $\delta_j \approx \delta_i$ согласно (2) $\lambda_j = \lambda_i$ и допустимо использовать (1), индексами i и j обозначены значения, полученные в опытах с разным масштабом. Однако в общем случае уравнения (1) и (2) приводят к соотношению, существенно отличному от (1):

$$\sigma^{2/(1-m)} \delta = \left[\frac{4\gamma_0 E(1-\nu)}{\delta_0^m (1+\nu)(1-2\nu)} \right]^{1/(1-m)} = \sigma^n \delta = \text{const}, \quad (3)$$

где $n = 2/(1-m)$, $\lambda_0 = 2\gamma_0$ — удельная энергия связи двух межатомных плоскостей, δ_0 — межатомное расстояние.

В работах [6–8] было использовано соотношение (2) для описания экспериментов по отколу в образцах толщиной $2\delta = 1,5 \div 15$ мм. В [9] эти данные были дополнены опытами с композитным материалом Al+20% SiC и свинцом. Здесь же данные работ [6–8] и [9] были пересчитаны с использованием зависимости (2) и значения δ_i , равного параметру решетки δ_0 , а в качестве λ_i взято значение удельной энергии связи двух плоскостей решетки ($\lambda_i = 2\gamma_0$).

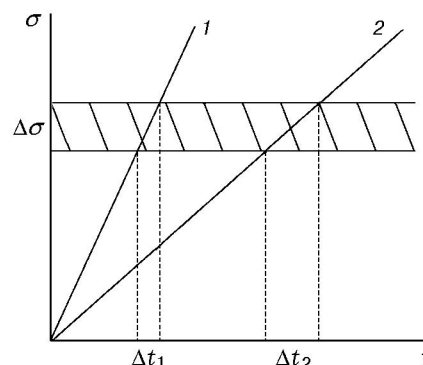


Рис. 1. Схема, иллюстрирующая зависимость шероховатости поверхности материала при отколе от скорости деформации:

1, 2 — рост растягивающих напряжений при различных скоростях деформирования материала

Такое рассмотрение резко увеличило интервал возможного изменения δ от нескольких миллиметров до $\delta_0 \approx 10^{-10}$ м. Одновременно этот интервал оказался привязанным, по существу, к двум точкам: к указанной выше области δ , в которой изменение δ порядка 10^{-2} м, и к параметру решетки $\approx 10^{-10}$ м.

Целью настоящей работы является нахождение промежуточной экспериментальной точки со значением δ вдали от $\delta \approx 10^{-2}$ м и $\delta_0 \approx 10^{-10}$ м, а также проверка возможности описания зависимости $\lambda(\delta)$ формулой (2) и, соответственно, проверка соотношения (3). Для решения этой задачи воспользуемся экспериментами по отколу в армко-железе или мягкой стали при взаимодействии ударных волн разрезания [10, 11].

В экспериментальных работах по отколу было замечено, что шероховатость поверхности отрыва материала не столько определяется размером зерна, сколько зависит от градиента растягивающих напряжений. На рис. 1 линиями 1 и 2 схематично представлен рост растягивающих напряжений во времени для двух случаев, отличающихся скоростью деформирования материала $\dot{\epsilon} \approx \Delta\sigma/\Delta t$. Дисперсию прочности материала $\Delta\sigma$ на разрыв считаем неизменной величиной. Тогда шероховатость $h_{1,2} \approx c\Delta t$ в случае 1 будет меньше, чем в случае 2. Наглядным подтверждением этих соображений является шероховатость обычного откола, возникающего при подрыве заряда взрывчатого вещества (ВВ) на торцевой поверхности цилиндрических образцов из различных металлов. При одинаковом диаметре заряда ВВ и образца металла шероховатость от-

Материал	$\delta_0 \cdot 10^{10}$, м	λ_0 , Дж/м ²	m
Медь М1	2,3	3,8	0,57 (0,6 ± 0,05)
12Х18Н10Т	2,3	4,0	0,67 (0,69 ± 0,10)
Титан ПТ-3В	2,7	6,0	0,71 (0,72 ± 0,12)
Свинец С1	3,2	1,3	0,55 (0,54 ± 0,08)
Al + 20% SiC	2,6	3,0	0,60 (0,6 ± 0,08)
Ст. 3	2,3	4,0	0,61

кола резко уменьшается к периферии образца, т. е. к области, охваченной боковой разгрузкой, где спад давления за фронтом ударной волны происходит гораздо быстрее, чем в центральной части образца.

Особенно ярко зависимость шероховатости от скорости деформации проявляется в опытах по взаимодействию ударных волн разрезания в армо-железе и мягкой стали [10, 11], где поверхность откола оказывается близкой к зеркальной [12], что отвечает значению $h \approx 2 \cdot 10^{-6}$ м, а согласно прямым измерениям в стали Ст. 3 [13] $h = 7 \cdot 10^{-6}$ м. Принимая во внимание, что зона шероховатости h , согласно [9], простирается на глубину $\approx 0,23\delta$ от поверхности отрыва значению $h = 7 \cdot 10^{-6}$ м будет соответствовать эффективное значение $\delta = h/0,23 = 3,04 \cdot 10^{-5}$ м [3]. Следуя [14], оцененные по экспериментам [13] значения σ_p находятся в интервале $10 \div 15$ ГПа. Имея в виду достаточно узкий интервал σ_p и пользуясь формулой (1), находим, что $\lambda = 4030 \div 9067$ Дж/м² при $\delta = 30,0 \cdot 10^{-6}$ м. С другой стороны, из соотношения (2) при $\delta = 3,04 \cdot 10^{-5}$ м и при δ_0 и λ_0 , соответствующих Ст. 3 (см. таблицу), имеем $\lambda = 4522$ Дж/м². Итак, найденное согласно (2) значение λ лежит в интервале возможных значений λ , оцененных на основе прямых экспериментов [13, 14]. Аппроксимация зависимости $\lambda(\delta)$ или $\lambda(\tau)$ формулой (2) оправдана*.

На рис. 2 приведены результаты работ [6–9]. При построении зависимостей были использованы значения δ_0 и λ_0 [15], приведен-

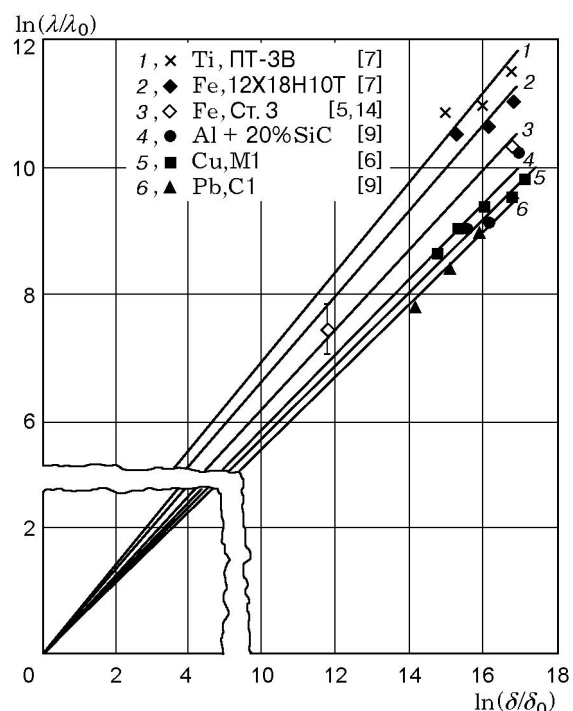


Рис. 2. Зависимости $\ln(\lambda/\lambda_0)$ от $\ln(\delta/\delta_0)$, построенные с использованием соотношения (2) и данных таблицы

ные в таблице. Значения m фактически совпадают с полученными в работе [9] и приведенными в скобках в таблице. На рис. 2 нанесена также точка для стали Ст. 3, полученная при $\delta = 5 \cdot 10^{-3}$ м и $\lambda = 10^5$ Дж/м² [5], для которой вычисленное значение составило $m = 0,61$. Заметим, что снижение δ от $5 \cdot 10^{-3}$ м до $3 \cdot 10^{-5}$ м в 22 раза уменьшило значения λ . Таким образом, специфика откольного разрушения приводит к появлению зависимости λ от δ и τ , что, как отмечалось выше, фактически не наблюдается при разрушении в условиях одномерной деформации магистральной трещиной.

На рис. 3 для рассмотренных выше металлов приведены зависимости $\sigma_p(\delta)$, построенные с использованием соотношений (3) и данных таблицы. Видно, что экспериментальные точки из [6, 7, 9] в целом хорошо соответствуют расчетным кривым.

Поскольку рост масштаба геометрически подобной сборки опережает рост λ в 1,5–3 раза при одновременном падении значений σ_p , есть основание с феноменологической точки зрения считать, что и разрушение отколом сопровождается масштабными эффектами энергетической природы. Это обстоятельство используется в ряде современных взрывных технологий.

*Заметим, что аналогичный результат следует из [18, 19].

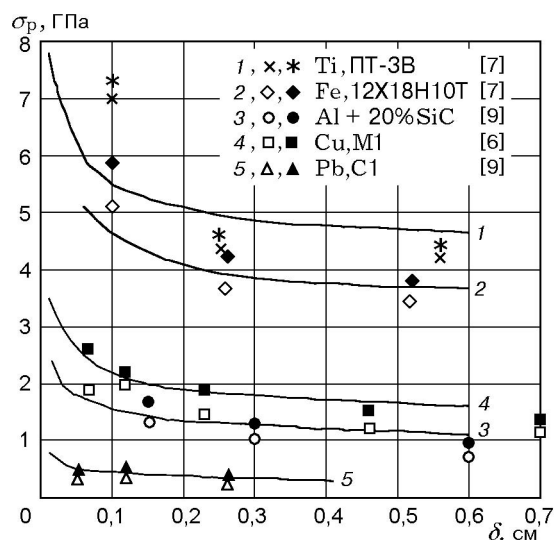


Рис. 3. Графики зависимости $\sigma_p(\delta)$, построенные с использованием соотношения (3) и данных таблицы:

светлые точки — отсутствие откольного разрушения, темные — начало откольного разрушения; значки соответствуют рис. 2

Например, использование ударных волн разрежения при резке стальных конструкций (опор нефтяных платформ, трубопроводов и т. п.) позволяет на порядок и более сократить затраты используемых для этих целей взрывчатых веществ [16, 17].

ЛИТЕРАТУРА

- Иванов А. Г. Феноменология разрушения и откол // Физика горения и взрыва. 1985. Т. 31, № 6. С. 130–139.
- Степанов Г. В. Корреляция между энергетическими характеристиками разрушения — распространением трещины и отколом // Проблемы прочности. 1983. № 3. С. 16–20.
- Иванов А. Г., Минеев В. Н. О масштабных эффектах при разрушении // Физика горения и взрыва. 1979. Т. 15, № 5. С. 70–95.
- Иванов А. Г., Огородников В. А. Различаются ли хрупкие и пластичные материалы при отколе? // Прикл. механика и техн. физика. 1992. № 1. С. 102–106.
- Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения. М.: Наука, 1974.
- Огородников В. А., Иванов А. Г., Лучинин В. М. и др. О природе масштабного эффекта при высокоскоростном разрушении (отколе) // Физика горения и взрыва. 1993. Т. 29, № 6. С. 88–93.
- Огородников В. А., Иванов А. Г., Лучинин В. И. и др. Влияние масштабного и технологического факторов и представительной деформации на высокоскоростное разрушение (откол) титанового сплава ПТ-3В и стали 12X18H10T // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 6. С. 130–139.
- Ogorodnikov V. A., Ivanov A. G. On the nature of scale effect (SE) in high-rate fracturing // Proc. of Conf. of the Amer. Phys. Soc. Top. Group on Shock Cond. Matter. Seattle, Washington, 1995. P. 615–618.
- Огородников В. А., Иванов А. Г., Лучинин В. И. и др. Масштабный эффект при динамическом разрушении (отколе) хрупких и вязких материалов // Физика горения и взрыва. 1999. Т. 35, № 1. С. 108–114.
- Иванов А. Г., Новиков С. А. Об ударных волнах разрежения в железе и стали // Журн. эксперим. и теор. физики. 1961. Т. 40, вып. 6. С. 1879–1882.
- Erkman John O. Smooth spalls and the polymorphism of iron // J. Appl. Phys. 1961. N 5. P. 936–944.
- Иванов А. Г. Динамическое разрушение и масштабные эффекты // Прикл. механика и техн. физика. 1994. Т. 35, № 3. С. 116–131.
- Молодец А. М. Длительность процесса откольного разрушения // Нестационарные проблемы гидродинамики / Динамика сплошной среды. Новосибирск: Ин-т гидродинамики СО АН СССР. 1980. Вып. 48. С. 111–115.
- Ахмадеев Н. Х., Болотнова Р. Х. Откол в пластинах из армо-железа и стали Ст.3, испытывающих $\alpha \leftrightarrow \epsilon$ фазовые превращения // Труды VIII Всесоюз. симпоз. по горению и взрыву. Ташкент, 1986. С. 23–26.
- Авербах Б. Л. Некоторые физические аспекты разрушения // Разрушение. М.: Мир, 1973. Т. 1. С. 616.
- Способ резки конструкций и генератор взрывной волны: Пат. России № 2105946, 1996 / Батьков Ю. В., Новиков С. А., Синицина Л. М. Б. И. 1998. № 6.
- Новиков С. А., Абакумов А. И., Батьков Ю. В. и др. Взрывная технология демонтажа глубоководных нефтяных платформ // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Теорет. и прикл. физика. 1996. Вып. 1–2. С. 69–72.
- Иванов А. Г., Новиков С. А., Тарасов Ю. И. Откольные явления в железе, вызванные взаимодействием ударных волн разрежения // Физика твердого тела. 1962. Т. 4, вып. 1. С. 249–260.
- Новиков С. А., Дивнов И. И., Иванов А. Г. Исследование разрушения стали, алюминия и меди при взрывном нагружении // Физика металлов и металловедение. 1966. Т. 21, вып. 4. С. 608–615.