

Из рис. 5 и 6 видно, что при разрыве пористой среды, так же как и при разрушении сплошной [4], имеет место отставание фронта жидкости в трещине от ее вершины («носика»), однако в пористой среде оно более значительно и увеличивается с уменьшением прочностных ее характеристик.

В заключение отметим, что снижение вязкости рабочей жидкости, увеличение фильтрационной проницаемости пористой среды и ее прочности ведут к уменьшению размеров зон разрыва за счет роста фильтрационных потерь и квазихрупкого сопротивления среды разрыву.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михалюк А. В. Торпедирование и импульсный гидроразрыв пластов. — Киев: Наук. думка, 1986.
2. Вовк А. А., Войтенко Ю. И., Михалюк А. В., Белонван А. Ф. Приближенный расчет размеров вертикальных трещин при осесимметричном гидроразрыве пород // Пробл. прочности. — 1985. — № 5.
3. Вовк А. А., Войтенко Ю. И., Михалюк А. В., Белонван А. Ф. Оценка необратимых размеров радиально-кольцевых трещин при гидроразрыве пород // Пробл. прочности. — 1985. — № 6.
4. Вовк А. А., Войтенко Ю. И., Михалюк А. В. Импульсный разрыв полиметилметакрилата // ПМТФ. — 1986. — № 5.
5. Христианович С. А., Желтов Ю. П. О гидравлическом разрыве нефтеносного пласта // Механика сплошной среды. — М.: Наука, 1981.
6. Чернов О. И., Фролов Г. А., Красников С. Я., Шенелев Л. Н. Результаты экспериментов по гидродинамической стратификации монолитного породного массива с целью его разупрочнения // ФТПРПИ. — 1985. — № 6.

г. Киев

Поступила 13/III 1990 г.,
в окончательном варианте — 19/IX 1990 г.

УДК 620.178.7

А. Г. Иванов, В. А. Огородников

РАЗЛИЧАЮТСЯ ЛИ ХРУПКИЕ И ПЛАСТИЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПРИ ОТКОЛЕ?

Рассмотрено энергетическое описание откола для хрупких и пластичных материалов. Приведены экспериментальные данные, подтверждающие правомерность использования для них одних и тех же соотношений.

Успехи механики разрушения показали плодотворность энергетического подхода в описании хрупких разрушений. Однако ввиду специфики разрушения материала при отколе прямое использование механики разрушения затруднено. Поэтому в [1] сделана попытка применить баланс упругой энергии деформации и работы по отрыву материала в качестве необходимого условия разрушения без наложения каких-либо ограничений на сам механизм разрушения.

Это необходимое условие записано в форме

$$(1) \quad \int_0^{\delta} \frac{\sigma^2 dx}{AE} \geq \lambda,$$

где σ — напряжение растяжения; x — координата, отсчитанная от свободной границы материала; E — модуль Юнга; λ — удельная на единицу поверхности работа отрыва материала; A — функция коэффициента Пуассона ν , равная $2(1 - \nu)[(1 + \nu)(1 - 2\nu)]^{-1}$.

Из уравнения (1) следует, что напряжение разрушения σ_r и толщина отколовшегося слоя материала δ связаны неравенством

$$(2) \quad \sigma_r^2 \delta \geq \alpha \lambda E A.$$

Здесь коэффициент α лежит в интервале от 1 до 3 в зависимости от формы падающего импульса давления. Так, треугольному импульсу соответ-

ствуется $\alpha = 3$, прямоугольному $\alpha = 1$. Считается, что условие (1) является и достаточным, поскольку при отколе разрушение инициируется одновременно в громадном количестве точек*.

В [1] для импульса треугольной формы соотношение (1) записано через $dp/dt = \sigma_p/2\delta = E\dot{\epsilon}/2$ в форме

$$(3) \quad \sigma_p = (6\lambda c \rho dp/dt)^{1/3} = (3\rho c E \dot{\epsilon})^{1/3},$$

где dp/dt — скорость спада давления за фронтом падающей волны; $\dot{\epsilon}$ — скорость деформации в волне растяжения; ρ и c — плотность и скорость звука в неограниченной среде.

Несколько позже аналогичный способ описания дробления материала при всестороннем растяжении, а также при отколе был использован в [3]. Соответствующее уравнение для описания откола в хрупких материалах получено в виде

$$(4) \quad \sigma_p = (3\rho c K_c^2 \dot{\epsilon})^{1/3}.$$

Так как $K_c^2 = 2\gamma E$, а величина энергии образования поверхности 2γ есть аналог λ , то формулы (3) и (4) совпадают**.

Убедившись в идентичности описания хрупких материалов в [1, 3], перейдем к описанию пластичных материалов при отколе. Понятие хрупкий или пластичный материал связано с его поведением при разрушении. Не уменьшая общности, ради простоты рассмотрения ограничимся материалами с билинейной зависимостью напряжение — деформация в виде $\sigma = \epsilon E$ для $\epsilon \leq \epsilon_T$ и $\sigma = \sigma_T + (\epsilon - \epsilon_T)M$ для $\epsilon \geq \epsilon_T$ (σ_T и ϵ_T — максимальные значения σ и ϵ в области упругости, M — модуль упрочнения).

При макроскопическом рассмотрении (без анализа поверхности разрушения) материал принято считать хрупким, если в условиях стандартных статических испытаний на растяжение он разрушается при $\epsilon_p \leq \epsilon_T$, и пластичным, если $\epsilon_p > \epsilon_T$.

Заметим, что такое деление носит условный характер. Известно, что с увеличением размера объекта испытания материал охрупчивается, а с уменьшением размеров хрупкий материал может приобрести пластические свойства и разрушаться при $\sigma_p < \sigma_T$. Таким образом, свойство материала быть пластичным или хрупким, помимо зависимости от температуры, скорости деформации и напряженного состояния, существенно зависит от размеров объекта испытания [4].

Известно, что при статическом растяжении образцов хрупкого и пластичного материала имеется существенное различие при их разрушении. Разрушение хрупкого материала протекает за счет энергии упругой деформации прохождением быстрораспространяющейся трещины фактически в условиях одномерной деформации при $\sigma_p < \sigma_T$. Для разрушения пластичного материала недостаточно энергии упругой деформации. Перед разрушением образца пластичного материала затрачивается энергия на пластическое деформирование всего образца, как правило, намного большая энергии, затраченной непосредственно на разделение материала. Процесс разрушения протекает при одноосном состоянии. Сохранится ли столь существенное различие между хрупкими и пластичными материалами при ударно-волновом разрушении отколом? Покажем, что нет. Такое утверждение обусловлено двумя причинами, связанными с ударно-волновым нагружением: резким увеличением упругой энергии деформации и

* В предельном случае при взаимодействии ударных волн растяжения характерное расстояние между точками инициирования может быть оценено как $\sim 10^{-6}$ м [2].

** Совпадение числовых коэффициентов в формулах (3) и (4), по-видимому, случайно. В [3] отношение площади поверхности разрушения на единицу объема взято как $6/\delta$. Для одномерного случая, характерного для откола, это отношение в 3 раза меньше. Не учитывался также и рост напряжения с координатой в волне растяжения. Поэтому различие коэффициентов в 2—3 раза было бы допустимо.

малой величиной энергии, диссипируемой на пластическое течение материала, в сравнении с энергией упругой деформации. Рассмотрим эти причины.

1. Ввиду одномерной деформации материала эффективное значение предела текучести возрастает в $k_1 = (1 - \nu)(1 - 2\nu)^{-1}$ раз. При $\nu = 0,3$ $k_1 = 1,75$. Вследствие динамичности нагружения с ростом $\dot{\epsilon}$ до $\sim 10^4 - 10^5 \text{ с}^{-1}$ для многих материалов увеличивается σ_T (для мягких сталей в $k_2 = 4,5$ раза). Таким образом, эффективное значение σ_T и упругая энергия деформации имеют тенденцию к резкому росту, достаточному для перехода материала из класса пластичного к хрупкому в рассматриваемом выше смысле. Так, для мягкой стали эффективное значение σ_T увеличивается в $k = k_1 k_2 = 8$ раз, а энергия упругой деформации (в предположении неизменности E) — в 64 раза. Порог хрупкости* этого материала уменьшится с 640 до 10 мм. Таким образом, мягкая сталь при откольном разрушении должна вести себя как хрупкий материал.

2. В интервале интенсивностей ударных волн, при которых возможны откольные разрушения ($\sigma > \sigma_T$), диссипация энергии на пластическое течение мала. Доказательством такого утверждения служит факт сохранения закона удвоения массовой скорости материала при нормальном отражении ударной волны от свободной границы, а также эксперименты по прямой регистрации петли гистерезиса при ударном нагружении и последующей разгрузке. Так, для типичного представителя пластичных материалов (меди) расхождения ударной и холодной кривых в плоскости давление — сжатие и как следствие нарушения закона удвоения надо ожидать при $p > 40 \text{ ГПа}$, что существенно выше интервала напряжений откола. Аналогичная картина характерна для мягкого алюминия и других пластичных материалов.

Информация о величине петли гистерезиса при ударном сжатии и последующей разгрузке, например, для поликарбоната дана в [5]. При сжатии до $p \sim 0,5 \text{ ГПа}$, что в несколько раз больше напряжения откола, это значение не превышает 4 %. Аналогичную оценку для алюминия можно получить из [6]. И здесь петля гистерезиса в несколько раз меньше упругой энергии деформации.

Эти соображения дают основание при описании откольного разрушения пластичных (в обычных условиях) материалов рассматривать их как хрупкие. Для них, как и для хрупких материалов, следует ожидать проявления масштабных эффектов энергетической природы, т. е. справедливости соотношения (1) — (4).

Принятый выше подход к делению материалов на хрупкие и пластичные не является единственным. В [3] за такой критерий принят вид микродефектов, развитие, рост и объединение которых приводят к образованию поверхности отрыва материала при отколе. Считается, что если разрушение идет через развитие микротрещин, то материал хрупкий, если же через зарождение, рост и слияние пузырьков, то пластичный. К последним относятся мягкий алюминий, медь, олово, свинец [3]. Такое определение пластичных материалов дало основание в уравнении баланса энергии использовать в качестве удельной поверхностной энергии величину $\sigma_T \epsilon_c = \delta$ ($\epsilon_c \sim 0,15$ — критическое значение деформации). Найденное напряжение разрушения приняло вид

$$(5) \quad \sigma_p = 2\rho c^2 \sigma_T \epsilon_c = 0,3 \sigma_T E,$$

где σ_p не зависит от δ или ϵ , так как значения σ_T , согласно [3], как и E в [1, 3], принимаются постоянными.

Таким образом, при геометрически подобном изменении размеров экспериментальной сборки или при вариации $\dot{\epsilon}$ для хрупких и пластич-

* Согласно определению [4], порог хрупкости L_0 есть минимальное значение ребра кубика, растягиваемого за противоположные грани с силой σL^2 . При этом энергии упругой деформации еще достаточно для хрупкого разрушения ($L_0 = 2 \lambda E / \sigma_T^2$).

ных материалов, согласно [1], справедливо

$$(6) \quad \sigma_p^2 \delta / \lambda = \text{const} \text{ или } \sigma_p^3 / (\lambda \dot{\epsilon}) = \text{const},$$

а согласно [3], для хрупких материалов также имеет место (6), в то время как для пластичных справедливо (5) или

$$(7) \quad \sigma_p = \text{const}.$$

Обратимся к эксперименту. В [3] мягкий алюминий и медь относятся к пластичным материалам. Выполняется ли для них условие (7)? Нет. В ряде работ используются экспериментальные результаты [7] по откольной прочности мягкого алюминия. Из них следует, что при увеличении $\dot{\epsilon}$ в 7 раз σ_p возрастает в 2,8 раза. Там же приведены данные по меди и свинцу. Для меди увеличение $\dot{\epsilon}$ в 3,2 раза привело к увеличению σ_p в 1,8 раза. Тенденция к росту σ_p с увеличением $\dot{\epsilon}$ наблюдается и для свинца, что отмечается также в [8].

Прочность на откол меди при изменении $\dot{\epsilon}$ в широком интервале (в $10-10^3$ раз) исследовалась и в [9-11]. В координатах $\sigma_p - \delta$ эти результаты можно описать соотношением $\sigma_p^n \delta = \text{const}$. Для экспериментальных данных [9] $n \simeq 6,4$, а для [10, 11] $n \simeq 5,3$ и $5,4$ соответственно. Таким образом, имеющиеся экспериментальные результаты для пластичных материалов в определении, приведенном в [3], не подтверждают соотношение (7).

Причина невыполнения (7), по нашему мнению, связана с использованием в качестве удельной поверхностной энергии для пластичных материалов величины λ , представляемой как $\sigma_t \epsilon_c \delta$. Такая запись эквивалентна допущению, что накопление дефектов структуры идет по всему объему материала. Как показывают многочисленные эксперименты, независимо от микромеханизма развития разрушения (микротрещины или пузырьки) дефекты локализуются в окрестности поверхности отрыва. Поэтому нет оснований и для изменения правой части уравнения баланса энергии (1) при изменении микромеханизма разрушения. А это означает, что принципиального отличия между хрупкими и пластичными материалами при отколе нет.

Впервые попытки экспериментальной проверки соотношения (6) при отколе в предположении $\lambda = \text{const}$ сделаны в [12], где отмечено, что фактические значения показателя степени при δ_p в формуле (6) составляют для ряда материалов (сталь, сплавы алюминия, медь, титан, алюминий, оргстекло) от 2 до 5,2 при среднем значении $\sim 3,5$. В [13] исследован сплав алюминия ($\sigma_t = 333$ МПа, $\sigma_b = 449$ МПа) на откол. Опыты проведены методом соударения пластин на геометрически подобных сборках при изменении масштаба в 4 раза. Полученные результаты хорошо представимы соотношением $\sigma^n t = \text{const}$ при $n = 2,63$. Этим же соотношением при $n \simeq 3,4$ описываются и опыты по урану [3]. Так что зависимость σ_p от δ или t (времени действия растягивающего импульса) более слабая, чем (6). Наиболее существенной причиной является зависимость $\lambda(t)^*$. Предположение, что $\lambda = \text{const}$, строго говоря, неоправдано. Так, известно, что даже для такого хрупкого материала, как стекло, 2γ (аналог λ) существенно больше удельной энергии образования свободной поверхности λ_0 , это различие для разных материалов достигает 10^4 раз. Куда тратится энергия при отколе? Разрушения с затратой энергии λ_0 можно достичь, прикладывая растягивающие усилия за две соседние кристаллические плоскости. При реальном разрушении усилия к этим плоскостям передаются через множество промежуточных плоскостей. Последние ничем не отличаются от рассматриваемых. Естественно допустить, что частичные разрушения будут и в них, что подтверждается микрофотографиями.

* При оценке $\lambda(t)$ в [14] ошибочно было указано, что эта зависимость слабая.

Таким образом, с уменьшением длины растягивающего импульса до $t \sim 10^{-13}$ с значение λ должно упасть до λ_0 , а σ_p возрасти до теоретической прочности σ_{p0} . Согласно [12], для меди при $t = 3 \cdot 10^{-7}$ с $\lambda \simeq 4$ Дж/см² и $\sigma_p = 0,75$ ГПа, а при $t \sim 10^{-13}$ с $\lambda_0 = 3,3 \cdot 10^{-4}$ Дж/см² и $\sigma_{p0} = 35$ ГПа. Считая $\sigma^n t = \text{const}$, используя σ_p и t и полагая $\lambda = \text{const}$, получим $n \simeq 3,9$. Воспользовавшись другой парой независимых величин λ и t , полагая $\lambda \sim t^m \sim \delta^m$, найдем $m = 0,63$. Подставив в уравнение (6) $\lambda(t)$, имеем $\sigma^{5,4} t = \text{const}$ или $\sigma^{5,4} \delta = \text{const}$. Рассмотренный пример учета зависимости $\lambda(t)$ при разрушении отколом говорит о том, что фактическая зависимость $\sigma_p(\delta)$ значительно слабее и значения показателя степени в (1), (2) и т. п. могут быть в 1,5—3 раза больше 2. Этот результат позволяет снять остроту вопроса в расхождении экспериментально найденных для ряда металлов значений показателя степени, лежащих от 2 до 5,2 [13]. Следует отметить, что первой работой, где обращено внимание на возможную зависимость $\lambda(t)$, была [15].

Итак, независимо от вида разрушения материала при статическом растяжении (хрупкое или пластическое) или механизма образования и развития разрушения на микроуровне (посредством микротрещин или пузырьков) нет принципиального различия при энергетическом описании откольного разрушения материалов; ввиду специфики откольного разрушения наиболее консервативная величина λ зависит от времени действия растягивающих усилий (или масштаба объекта). Поэтому фактическое значение показателя степени при σ_p в уравнении (2) и у его аналогов может возрасти в 1,5—3 раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов А. Г. Откол в квазиакустическом приближении // ФГВ.— 1975.— № 3.
2. Иванов А. Г., Новиков С. А., Тарасов Ю. И. Откольные явления в железе и стали, вызванные взаимодействием ударных волн разрежения // ФГВ.— 1962.— Т. 4, вып. 1.
3. Grady D. E. The spall strength of condensed matter // J. Mech. Phys. Solids.— 1988.— V. 36, N 3.
4. Иванов А. Г. О возможности построения единой теории разрушения // ПМТФ.— 1990.— № 1.
5. Curran D. R., Shockley D. A., Seaman L. Dynamic fracture criteria for a polycarbonate // J. Appl. Phys.— 1973.— V. 44, N 9.
6. Asay J. R., Lipkin J. A self-consistence technique for estimating the dynamic yield strength of a shock-loaded material // J. Appl. Phys.— 1978.— V. 49, N 7.
7. Breed B. R., Mader Charles L., Venable Douglas. Technique for the determination of dynamic-tensile-strength characteristics // J. Appl. Phys.— 1967.— V. 38, N 8.
8. Голубев В. К., Новиков С. А., Соболев Ю. С., Юкина И. А. Разрушение и вязкость свинца при отколе // ПМТФ.— 1982.— № 6.
9. Tuler F. R. Tensile strain as a criterion for spallation in metals // Shock Wave and the Mechanical Properties of Solids.— Syracuse: Syracuse University Press, 1974.
10. Канель Г. И., Разоренов С. В., Фортгов В. Е. Откольная прочность металлов в широком диапазоне длительностей нагрузки // ДАН СССР.— 1984.— Т. 275, № 2.
11. Новиков С. А., Погорелов А. П., Синицын В. А. Исследование временной зависимости разрушающих напряжений при отколе в меди, никеле и титане // ПМТФ.— 1983.— № 3.
12. Иванов А. Г., Минеев В. Н. О масштабных эффектах при разрушении // ФГВ.— 1979.— № 5.
13. Shen Letian, Bai Vilong, Zhao Shida. Experimental study of spall damage in an aluminium alloy // Intense Dynamic Loading and its Effects: Proc. of the Intern. Symp., Beijing China, 1986.
14. Иванов А. Г. Феноменология разрушения и откол // ФГВ.— 1985.— № 2.
15. Голубев В. К., Новиков С. А., Синицын В. А. О разрушении материалов при нагружении взрывом листового заряда ВВ // ПМТФ.— 1981.— № 2.

г. Арзамас

Поступила 23/VII 1990 г.