

В. А. Огородников, А. Г. Иванов, В. И. Лучинин, А. А. Хохлов, А. П. Цой

О ПРИРОДЕ МАСШТАБНОГО ЭФФЕКТА ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ РАЗРУШЕНИИ (ОТКОЛЕ)

Представлены результаты экспериментального исследования откольной прочности меди при изменении масштаба системы в 10 раз. Установлено, что масштабный эффект при разрушении в условиях высокоскоростной одномерной деформации имеет энергетическую природу. Удельная (на единицу поверхности) энергия разрушения при отколе — есть возрастающая функция времени.

Исследование масштабного эффекта (МЭ) (зависимости прочности конструкционных материалов при разрушении от объема исследуемого объекта) имеет первостепенное значение для понимания соотношения запасов прочности, найденных расчетным путем и имеющихся фактически. Особенно это важно для уникальных крупногабаритных сооружений, запасы прочности которых определяются только расчетно. Не менее важен при этом правильный выбор критериев разрушения, имеющих ясный физический смысл и позволяющих данный вид разрушения объекта логически связать с разрушением в существенно отличных условиях.

Существует несколько точек зрения на природу МЭ, таких как систематическая, временная (кинетическая) и энергетическая. В обширной литературе, посвященной данному вопросу, наиболее широко распространен систематический подход к описанию МЭ. Авторы настоящей работы разделяют мнение, высказанное в работе [1], что статистическое описание МЭ по существу только удобный способ описания имеющегося эксперимента, не более. Действительно, если принять во внимание, что разрушение есть акт совершения работы непосредственно за счет упругой деформации, то при постановке экспериментов по МЭ необходим учет возможных источников энергии. Очевидно, что это требование относится к экспериментам и при попытке использования кинетического подхода. Фактически же оно в большинстве экспериментальных исследований по МЭ не выполнено [2], что, естественно, ставит под сомнение корректность результатов. Но оно легко реализуется в опытах по ударно-волновому разрушению геометрически подобных систем при одномерной деформации, а также при использовании в качестве нагружающей «машины» продуктов взрыва [2]. В связи с этим представляет интерес привлечь результаты экспериментов по разрушению (разделению на части первоначально целого объекта) в условиях одномерной деформации (при отколе) для ответа на основной вопрос, что составляет физическую основу МЭ — изменение вероятности числа дефектов с вариацией типоразмеров образцов, различие в степени развития дефектов в зависимости от скорости деформации материала образцов или различие запасов упругой энергии в них.

В [2, 3] впервые предпринята попытка объяснения с позиции энергетического подхода зависимости напряжения разрушения образца σ_p от времени τ его пребывания под напряжением как проявление МЭ. Предполагалось, как и в механике разрушения, что работа по отколу материала совершается за счет запаса упругой энергии в образце. Это необходимое условие без наложения каких-либо ограничений на сам механизм разрушения дает связь напряжения разрушения и толщины отколовшегося слоя материала δ для падающего импульса давления прямоугольной формы:

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

где λ — удельная на единицу поверхности работа отрыва материала; E , ν — модуль Юнга, коэффициент Пуассона соответственно. При этом предполагалось $\lambda = \text{const}$. В [4, 5] установлено, что последнее предположение не совсем верно из-за существования временной зависимости $\lambda(\tau)$. С учетом этого

зависимость σ_p от δ или τ более слабая и имеет вид $\sigma_p^n \delta \sim \sigma_p^n \tau = \text{const}$, причем для ряда металлов $n = 2 \div 5$.

В [6] также исследовалось влияние масштаба системы на откольную прочность образцов из Ст. 6, отличающихся размерами в 8 раз. В экспериментах с постоянной скоростью ударников показано, что с увеличением толщины образцов наблюдается более интенсивное раскрытие берегов трещины, вплоть до визуально наблюдаемого разделения образца на части. Эти результаты вполне укладываются в рамки энергетического подхода: в образцах большого размера при постоянной скорости ударника имеется больший запас упругой энергии. Однако оценки, сделанные в [6] с использованием профилей давления, измеренных на границе раздела образец — оргстекло, в рамках идеально упругопластической модели материала, показали заметный рост σ_p с уменьшением размеров образцов. В результате наблюдаемый МЭ связывался с изменением скорости деформации материала образцов в плоскости откола. Если сделать оценки λ с использованием σ_p из [6], то получается $\lambda = \text{const}$ для всех моделей, что противоречит выводам [4, 5], которые следуют также из [7] для алюминия.

В данной работе исследуется влияние масштаба системы ударник — образец на величину откольной прочности меди, как одного из наиболее изученных металлов в рассматриваемых условиях нагружения.

Эксперименты с плоским соударением проводили на установке БУТ-76 [8] при остаточном давлении в стволе ~ 10 Торр. Образцы из меди М1 выполнялись из прутка в состоянии поставки со средним размером зерна $\sim 0,1$ мм и микротвердостью $H_V = 90$ кг/мм². Образцы в форме диска диаметром $d = 60$ мм запрессовывались в стальную обойму с наружным диаметром 90 мм. В отдельных опытах образцы делали с $d = 90$ мм, а при $d = 60$ мм со стороны свободной поверхности делалась проточка шириной 0,5 мм на глубину, равную половине толщины образца, которая заливалась сплавом Вуда. Эти меры приняты для устранения влияния краевых эффектов. Мишени нагружались медным ударником с $d_{уд} = 75$ мм и толщиной $\Delta_{уд}$, равной половине толщины мишени Δ_m . Толщины пар ударник — мишень выбирались из условия обеспечения одномерности деформации материала образцов и составляли в миллиметрах 0,75 — 1,5; 1,25 — 2,5; 2,5 — 5,0; 5,0 — 10,0 и 7,5 — 15,0. Для каждой пары ударник — мишень проводилось по 5—10 опытов, в которых изменялась скорость ударника таким образом, что реализовывались следующие условия нагружения образцов в мишени: А — отсутствие дефектов разрушения, наблюдаемых в микрошлифах продольного сечения образцов при увеличении в 500 раз; Б — появление в плоскости откола отдельных зародышей разрушения в виде микротрещин или микропор; В — слияние отдельных зародышей разрушения в магистральную трещину; Г — полное разделение образца на части. В терминах [7] условия А — Г соответствуют степени повреждения образцов $\approx 0, 1/3, 3/4$ и 1.

В каждом опыте емкостным датчиком с охранным кольцом непрерывно регистрировалась скорость свободной поверхности образца $W(t)$. В зависимости от условий нагружения диаметр емкостного датчика изменялся от 20 до 40 мм, а величина зазора между обкладками конденсатора от 0,8 до 1,1 мм. Для проверки возможных искажений профилей $W(t)$ из-за завалов регистрируемых фронтов проведены специальные исследования по трансляции электрических импульсов заданной формы по используемой измерительной схеме, которые показали, что эти завалы не превышают 0,01—0,02 мкс и не могут заметно повлиять на форму зависимости $W(t)$ даже для образцов минимальной толщины ($\Delta_m = 1,5$ мм).

Дополнительно в опытах измерялась скорость подлета ударника к мишени W_3 с точностью не хуже 0,5 %, что позволяло производить надежную нормировку зависимости $W(t)$, полученную емкостным датчиком с меньшей точностью. Величины максимальных растягивающих напряжений при отколе определялись по профилю $W(t)$: $\sigma_p = 0,5\rho_0 c_0 \Delta W$, где ρ_0 — плотность материала; c_0 — объемная скорость звука; ΔW — разница скоростей в первом максимуме (W_1) и первом минимуме (W_2) зависимости $W(t)$ с учетом упругопластической поправки [9]. Условия и результаты опытов приве-

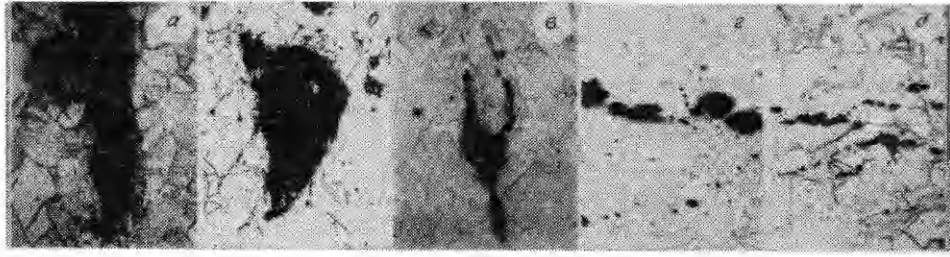


Рис. 1. Фотографии микрошлифов продольного сечения образцов. $\times 100$.
 Δ_m , мм: а — 15,0, б — 7,5, в — 5,0, г — 2,5, д — 1,5.

дены в таблице, где значения $\frac{\partial W}{\partial t}$ взяты перед первым минимумом;
 $\sigma_0 = 0,5\rho_0 c_0 W_0$; $\dot{\epsilon}_1 = W_0/2\Delta_{уд}$ и $\dot{\epsilon}_2 = \frac{\partial W}{\partial t} / 2c_0$ — скорости деформации материала в плоскости откола [10, 11].

На рис. 1 приведены фотографии микрошлифов продольного сечения образцов после их нагружения (случай Б). Для толстых образцов (см. рис. 1, а — в) очаги разрушения представляли собой микротрещины, ориентированные вдоль оси образца, а для малых моделей (см. рис. 1, г, д) — микропоры. Аналогичный характер изменения формы очагов разрушения отмечался в [10] при изменении размеров ударник — образец с 1,5—3,0 до 0,25—0,5 мм для алюминиевого сплава 6061-Т6.

На рис. 2 приведены профили $W(t)$. В случае отсутствия разрушения (А) профиль $W(t)$ повторяет форму импульса сжатия в образце. Разрушение материала растягивающими напряжениями сопровождается появлением волны сжатия, выход которой на свободную поверхность образца приводит к росту W . Последующие затухающие колебания W связаны с реверберацией откольного импульса в отрывающейся или оторвавшейся пластине. Для случая появления отдельных очагов разрушения (Б) профили $W(t)$ имеют нерегулярный характер и оценки величин σ_p по разности ΔW будут, по-видимому, не вполне корректны. При образовании магистральной трещины (В) или полного разделения образца на части (Г), судя по соотношению времен первого и последующих колебаний W , для больших моделей заметной задержки разрушения нет, и полученные значения σ_p практически соответствуют началу разрушения. Поскольку дисперсия откольного импульса определяется длительностью процесса разрушения [11], то для малых моделей, когда длительность процесса разрушения становится соизмеримой или может превышать период реверберации откольного импульса, наблюдается затянутое торможение отрывающейся пластины. Значения σ_p , вычисленные по разности ΔW , в этом случае сугубо оценочные. Таким образом, из анализа

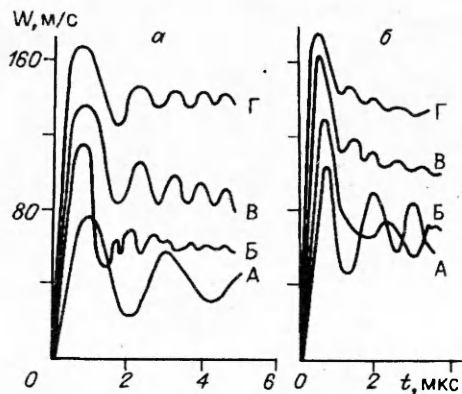


Рис. 2. Профили скорости свободной поверхности образцов.
 Δ_m , мм: а — 5, б — 2,5.

рис. 2 следует, что несмотря на то, что оценки σ_p по профилю $W(t)$ и являются в настоящий момент наиболее представительными из всех существующих косвенных методов определения максимальных растягивающих напряжений в плоскости откола, к ним следует относиться с осторожностью. Не случайно в [12], где впервые были проанализированы границы применимости формулы для σ_p , указывается, что в тех случаях, когда нельзя пренебрегать сдвиговой прочностью или релаксационными процессами, она может приводить к заметным ошибкам.

С учетом этих замечаний можно отметить, что из таблицы не следует возрастающей зависимости $\sigma_p(\dot{\epsilon})$, как

Номер опыта	$\Delta_{уд}$, мм	Δ_M , мм	W_0 , м/с	W_1 , м/с	W_2 , м/с	$\frac{\partial W}{\partial t}$, м/с ²	σ_0 , ГПа	σ_p , ГПа	$\dot{\epsilon}_1 \cdot 10^{-4}$, 1/с	$\dot{\epsilon}_2 \cdot 10^{-4}$, 1/с	δ , мм	λ , Дж/см ⁻²	Степень повреждения
1	7,5	15,0	60,0	60,5	20	—	1,06	—	0,4	—	—	—	А
2			77,2	78,3	25,8	42	1,36	1,01	0,5	0,5	7,0	7,0	Б
3			90,6	90,3	41,9	37	1,60	0,92	0,6	0,5	7,0	9,7	В
4			112,5	115,0	59,0	30	1,98	1,04	0,8	0,4	7,0	15,0	Г
5			138,7	139,5	91,2	45	2,43	0,92	0,9	0,6	7,0	22,3	Г
6			140,8	140,0	90,0	37	2,48	0,95	0,9	0,5	7,0	23,2	Г
7	5,0	10,0	64,4	67,0	10,6	—	1,14	—	0,4	—	—	—	А
8			82,6	82,5	37,5	50	1,46	0,86	0,8	0,6	4,5	5,1	Б
9			117,7	115,5	70,0	55	2,08	0,86	1,0	0,7	4,5	10,5	В
10			135,0	135,0	82,0	90	2,40	1,05	1,4	1,2	4,5	14,0	Г
11			149,0	150,0	98,0	55	2,62	0,98	1,5	0,7	4,5	16,7	Г
12			168,6	167,3	129,0	80	2,97	0,77	1,7	1,0	4,5	21,4	Г
13	2,5	5,0	80,7	80,0	21,2	—	1,42	—	1,6	—	—	—	А
14			111,0	113,0	48,0	165	1,96	1,28	2,0	2,0	2,3	4,8	Б
15			137,8	136,6	81,0	120	2,43	1,07	2,8	2,1	2,3	7,3	В
16			150,0	—	—	—	2,65	—	3,0	—	2,3	8,7	Г
17			173,4	168,7	121,7	110	3,06	0,90	3,5	1,4	2,3	11,6	Г
18	1,25	2,5	112,0	111,0	44,0	—	1,98	—	4,5	—	—	—	А
19			127,0	131,5	72,8	170	2,24	1,09	5,0	2,1	1,1	3,1	Б
20			140,5	143,8	110	120	2,48	0,63	5,6	1,5	1,1	3,7	В
21			146,5	145,0	98,0	120	2,58	0,86	5,9	1,5	1,1	4,1	В
22			165,0	165,5	111,0	300	2,91	1,07	6,6	3,8	1,1	5,0	В
23			172,5	169,5	123,0	160	3,04	0,86	6,9	2,0	1,1	5,5	В
24			178,0	178,0	144,2	120	3,43	0,63	7,0	1,5	1,1	7,0	Г
25			206,0	206,5	156,5	220	3,63	0,95	8,2	2,8	1,1	7,8	Г
26	0,75	1,5	110,0	109,0	50,0	—	1,94	—	—	—	—	—	А
27			141,0	140,5	94,0	170	2,48	0,85	9,0	2,2	0,6	2,0	Б
28			179,5	179,0	144,0	400	3,17	0,70	12,0	5,1	0,6	3,3	В
29			186,5	186,0	148,0	240	3,29	0,71	13,3	3,0	0,6	1,5	В
30			215,0	212,6	182,6	150	3,79	0,55	15,0	1,9	0,6	4,7	Г
31			260,0	260,5	238,5	135	4,59	0,41	18,6	1,7	0,6	6,8	Г

это имеет место, например, для Ст. 6 в [6] или для меди [11]. При этом, если значения σ_p , оцененные по зависимости $W(t)$ (случаи В, Г), для больших моделей близки к аналогичным из [11], то для малых моделей этого не наблюдается. Более того, для малых моделей, особенно при $\Delta_m = 1,5$ мм, величина σ_p меньше, чем для больших моделей. Кроме того, для образцов больших моделей оценки скорости деформации с использованием акустического приближения $\dot{\epsilon}_1$ и по профилю $W(t)$ $\dot{\epsilon}_2$ близки, чего не наблюдается для образцов малых моделей, где $\dot{\epsilon}_2 < \dot{\epsilon}_1$. Не исключено, что это связано с отмеченными выше особенностями кинетики разрушения. При этом остается неизвестным на какой циркуляции образуется магистральная трещина или образец полностью разделяется на части, что ставит под сомнение представительность оценок величин σ_p .

В то же время из таблицы однозначно следует, что скорости ударников для любого критического события (А — Г) возрастают с уменьшением масштаба системы, свидетельствуя о существовании МЭ. Естественно в качестве критерия разрушения использовать величину, имеющую размерность удельной (на единицу поверхности) работы, в качестве которой можно использовать запас упругой энергии в образце (и принять $\sigma_p = \sigma_0$).

Рассмотрим опыты 5, 6, 10, 11, 15, 20, 21 и 27, проведенные при $W_0 = \text{const}$ [6]. Из таблицы следует качественно аналогичный с [6] вывод: с увеличением масштаба системы в 10 раз степень повреждения материала образца в плоскости откола возрастает от появления отдельных зародышей разрушения до полного разделения образца на части. При этом зона материала, охваченная разрушением, увеличивается с $\sim 0,1$ до 1,0 мм (тоже в ~ 10 раз). Наблюдаемое явление однозначно связано с ростом запаса упругой энергии в образцах с 2,0 до 23,2 Дж/см². Из опытов, объединенных по признаку одинаковой степени повреждения материала в плоскости откола,

можно определить величину показателя степени $n = \lg \frac{\delta_2}{\delta_1} / \lg \frac{\sigma_{01}}{\sigma_{02}}$: для случая Б средние значения $n = 4,2$ для В $n = 4,7$ и для Г $n = 4,1$, что вполне удовлетворительно согласуется с $n = 3,9$ для меди из [5]. Из этих же опытов с учетом соотношения $\delta = c\tau$, можно получить временную зависимость $\lambda(\tau)$. В пределе с уменьшением длины растягивающего импульса до периода колебаний атомов в решетке $\tau = \tau_0 \approx 10^{-13}$ с величина λ должна уменьшиться до значения удельной энергии образования поверхности $\lambda_0 = 2\gamma$ (для меди $\lambda_0 = 3,3 \cdot 10^{-4}$ Дж/см²). С учетом этого и данных таблицы зависимость $\lambda(\tau)$ может быть представлена в исследованном диапазоне скоростей деформации в виде $\lambda = 2\gamma (\tau/\tau_0)^{0,6}$.

Таким образом, МЭ при разрушении в условиях высокоскоростной одномерной деформации имеет энергетическую природу. Разрушение в образцах большего размера происходит при больших запасах упругой энергии, что проявляется в большей степени разрушения материала в плоскости откола. Аналогично ведут себя при разрушении с изменением масштаба системы, например, оболочечные конструкции при их импульсном нагружении, подтверждая тезис о единстве законов природы. Однако в отличие от разрушения оболочек одной или несколькими трещинами, при отколе разрушения развивается по поверхности в громадном количестве точек, о чем можно судить по степени шероховатости откольных поверхностей. Так, в предельном случае, при взаимодействии ударных волн разрежения поверхности близки к зеркальным [13] и количество зародышей разрушения составляет $\sim 4 \cdot 10^8$ см⁻². При откольном разрушении удельная (на единицу поверхности) энергия разрушения является возрастающей функцией времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кобл Р. Л., Парих Н. М. Разрушение поликристаллической керамики // Разрушение/Под ред. Г. Либовица. — М.: Мир, 1976. — Т. 7, Ч. 1. — С. 236—299.
2. Иванов А. Г., Минеев В. Н. О масштабных эффектах при разрушении // ФГВ. — 1979. — 15, № 5. — С. 70—95.

3. Иванов А. Г. Откол в квазиакустическом приближении // Там же.— 1975.— 11, № 3.— С. 475—480.
4. Иванов А. Г. Феноменология разрушения и откол // Там же.— 1985.— 21, № 2.— С. 97—104.
5. Иванов А. Г., Огородников В. А. Различаются ли хрупкие и пластичные тела при отколе? // ПМТФ.— 1992.— № 1.— С. 102—106.
6. Романченко В. И., Степанов Г. В. Влияние масштаба системы на откольную прочность стали // Проблемы прочности.— 1983.— № 8.— С. 45—48.
7. Letian Shen, Yilong Bai. Experimental study of spall damage in an aluminium alloy // Proc. Int. Symp. on Intense Dynamic Loading and its Effects, June 3—7, 1986, Beijing (China).
8. Минеев В. Н., Погорелов В. П., Иванов А. Г. и др. Установка для исследования поведения материалов и конструкций при динамических нагрузках // ФГВ.— 1978.— 14, № 3.— С. 129—133.
9. Степанов Г. В. Откольное разрушение металлов плоскими упругопластическими волнами // Проблемы прочности.— 1976.— № 8.— С. 66—69.
10. Grady D. E. The spall strength of condensed matter // J. Mech. Phys. Solids.— 1988.— 36, № 3.— Р. 353—384.
11. Канель Г. И., Разоренов С. В., Фортвов В. Е. Откольная прочность металлов в широком диапазоне длительностей нагрузки // Докл. АН СССР.— 275, № 2.— С. 369—371.
12. Новиков С. А., Чернов А. В. Об определении величины откольной прочности по измеренным значениям скорости свободной поверхности образца // ПМТФ.— 1982.— № 5.— С. 126—129.
13. Иванов А. Г., Новиков С. А. Об ударных волнах разрезания в железе и стали // ЖЭТФ.— 1961.— 40, № 6.— С. 1880—1882.

г. Арзамас-16

Поступила в редакцию 30/X 1992

УДК 541.126.662.62+001.573

А. М. Липанов

ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ НА ПОДВИЖНОЙ ГРАНИЦЕ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ВНУТРЕННЕЙ БАЛЛИСТИКИ

(феноменологический подход)

Рассматриваются граничные условия при решении дву- и трехмерных задач расчета параметров продуктов сгорания в разгорающихся каналах. Такие задачи решаются при определении параметров в РДТТ, различного рода газогенераторах, МГД-установках на твердом топливе и т. д., а также в оружейных системах, если специально рассчитывается распределение параметров вдоль пороховых элементов или вдоль каналов внутри пороховых шашек. Можно назвать класс задач (например, для периода постепенного воспламенения), когда аналогичные граничные условия необходимо использовать и в неразгорающихся каналах: перед воспламенением, после тушения топлива, между двумя воспламенениями топлива. Это тем более важно, что собственно горению всегда предшествуют определенные физико-химические процессы, происходящие в прогревом слое или на поверхности топлива.

Необходимо последовательно рассмотреть вопрос о граничных условиях на границе Г — К (газообразные вещества — конденсированная фаза), которая не только перемещается, но от нее при горении топлива оттекают продукты сгорания (ПС), уносящие массу, энергию и импульс. Постановка граничных условий здесь связана с необходимостью определения не только потоков массы и энергии, но и скорости перемещения границы. Этот важный вопрос с однозначностью до сих пор тоже не обсуждался.

Поскольку граница Г — К перемещается не только вследствие физико-химических процессов превращения твердого топлива (ТТ) в ПС, но и механически, в результате деформирования (для зарядов, прочно скрепленных с корпусом, при увеличении или уменьшении давления, действующего на заряд), то будем отличать скорость горения u_g от скорости деформирования u_d . При расширении канала они направлены вдоль местной нормали в глубину топлива, а величина скорости перемещения границы Г — К будет характеризоваться их суммой. Скорость u_d определяется из решения задачи о напряженно-деформированном состоянии (НДС) заряда [1], и нахождение ее — самостоятельная проблема. При рассмотрении вопроса о граничных