

Кривая 8 соответствует бездилатансионному течению за фронтом ($\Lambda = 0$), а 9 — дилатансионному течению ($\Lambda = 0,2$). Видно, что учет дилатансии приводит к увеличению размеров зоны разрушения и к уменьшению радиуса взрывной полости. Этот результат соответствует опубликованному в работе [3].

В заключение заметим, что немонотонный ход $\rho(r)$ может быть получен при учете зависимости скорости дилатансии $\Lambda(m_0, \sigma_r(R))$ от пористости и давления, на что обратил наше внимание В. К. Сироткин.

Авторы благодарят В. К. Сироткина и А. М. Масленникова за обсуждение.

Поступила 3 VI 1981

ЛИТЕРАТУРА

1. Николаевский В. Н. О связи объемных и сдвиговых деформаций и об ударных волнах в мягких грунтах. — ДАН СССР, 1967, т. 177, № 3.
2. Дунин С. З., Сироткин В. К. Расширение газовой полости в хрупкой породе с учетом дилатансионных свойств грунта. — ПМТФ, 1977, № 4.
3. Артышев С. Г., Дунин С. З. Ударные волны в дилатирующих и недилатирующих средах. — ПМТФ, 1978, № 4.
4. Николаевский В. Н. и др. Эффекты дилатансии при подземном взрыве. — ДАН СССР, 1980, т. 250, № 1.
5. Андрианкин Э. И., Коряков В. П. Ударная волна в переменнo уплотняемой пластической среде. — ДАН СССР, 1959, т. 128, № 2.
6. Губкин К. Е., Кузнецов В. М., Шацкевич А. Ф. О тепломассообмене при взрыве в твердых телах. — ПМТФ, 1978, № 6.

УДК 532.593

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОТКОЛЬНЫХ РАЗРУШЕНИЙ В МЕДИ

Л. К. Романычева, А. И. Рузанов

(Горький)

В последнее время при исследовании разрушения как в статических, так и в динамических задачах широкое распространение получила концепция накопления повреждений, которая берет в основу изменение структуры материала в течение процесса деформирования. При этом следует иметь в виду, что нельзя описать все процессы в телах просто динамикой напряженного состояния и необходим, дополнительный учет процессов, происходящих в теле, дополнительная кинетика, учитывающая обратное влияние разрушения на поля напряжений и деформаций [1]. В условиях разрушения при динамических нагрузках напряженное состояние существенно меняется обычно на расстояниях, значительно превышающих размер несплошностей, образующихся в начальной стадии процесса разрушения, и такую среду можно рассматривать в среднем как сплошную, т. е. не следить за развитием отдельных трещин, а учитывать их суммарное действие. Оно заключается в возникновении большого числа трещин или пор и в уменьшении за счет этого прочности.

В [2] на базе исследований [3, 4] развита модель разрушения, учитывающая образование в материале пор и их дальнейший рост под действием растягивающих напряжений. Ниже эта модель используется для численного анализа откольных разрушений в меди и результаты вычислений сопоставляются с экспериментальными данными [5, 6].

1. Вычислительная модель, развитая в [2], построена из двух составных частей: 1) уравнений, описывающих законы зарождения несплошностей и их развития (принята конкретная структура микродефектов — поры сферической формы); 2) уравнений, определяющих упругопластическое поведение материала с учетом релаксации напряжений и изменения механических свойств (снижение прочности) вследствие появления и роста большого количества полостей (пор).

Уравнение для изменения во времени относительного объема пор может быть приведено к виду [2—4]

$$(1.1) \quad V_n = V_{n0} \exp \frac{3(p_s - p_{s0}) \Delta t}{4\eta} + 8\pi \dot{N} R_n^3 \Delta t,$$

где V_{n0} — относительный объем пор в момент времени t ; p_s — давление в твердом теле; p_{g0} , η — некоторые постоянные; \dot{N} — скорость зарождения микропор в единице объема; R_n — параметр распределения вновь образованных пор за время от t до $t + \Delta t$.

Для анализа поведения материала в процессе деформирования и разрушения используется теория пластичности пористых тел.

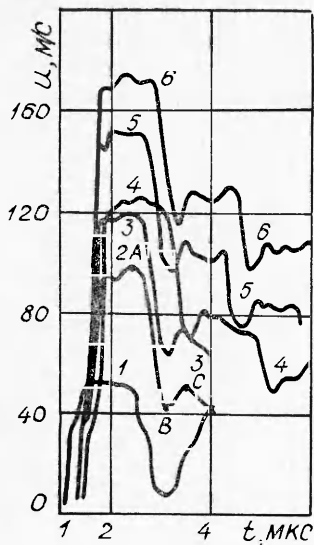
Исследуемое тело (или система тел) разбивается на части (некоторые эталонные объемы), размер которых достаточно велик по сравнению с характерным размером зародышевых трещин. С другой стороны, размеры этих частей должны быть достаточно малы по сравнению с характерными масштабами изменения макроскопических напряжений в исследуемом теле. В эталонном объеме поле напряжений считается не зависящим от координат. При использовании численных методов в качестве эталонного объема берется ячейка конечно-разностной сетки, и в ней прослеживается кинетика напряженно-деформированного состояния и кинетика развития несплошностей.

2. В [5] проводились эксперименты по соударению плоских плит из меди с целью определения трех критических значений напряжений, характеризующих различные степени разрушения. При приблизительно одной и той же толщине пластины-ударника удары производились по неподвижной пластине (мишени) с разными скоростями. Затем проводился тщательный анализ микроструктуры образцов и определялась степень нарушения сплошности.

Путем решения одномерной упругопластической задачи о соударении пластин проведено моделирование на ЭВМ описанных экспериментов. При численном исследовании моделей простейших (одномерных, квазиодномерных) экспериментов, при реализации которых нет необходимости решать сложные краевые задачи, сокращаются погрешности, вносимые в результаты самой конечно-разностной схемой решения. Проведение таких расчетов, сопоставление их результатов с результатами физических экспериментов позволит наиболее чисто оценить выбранную модель. Численные результаты получены при следующих данных для меди [3,5]: плотность $\rho_0 = 8,86 \text{ г/см}^3$, модуль сдвига $G = 41 \text{ ГПа}$, модуль объемного сжатия $K = 114,9 \text{ ГПа}$, предел текучести $\sigma_T = 0,3 \text{ ГПа}$, константы в соотношении (1.1) — $p_{n0} = 0,5 \text{ ГПа}$, $p_{g0} = 0,5 \text{ ГПа}$, $\eta = 20 \text{ Па}\cdot\text{с}$. Расчетам предшествовал анализ влияния параметров конечно-разностной схемы (шага по пространственной координате, шага по времени) на результаты численного эксперимента. Указанные величины подбирались таким образом, чтобы их влияние на результаты решения задачи было минимальным. В частности, выяснено, что относительный объем полостей целесообразно сопоставлять только при одинаковом шаге по пространственной координате. Результаты расчетов и сопоставление их с экспериментальными данными представлены в табл. 1 и на фиг. 1—4. В табл. 1 u означает скорость пластины-ударника, h_1 — ее толщина, h_2 — толщина образца (мишени), σ — амплитуда импульса сжимающих напряжений, V_n — отно-

Т а б л и ц а 1

Номер варианта	u , м/с	h_1 , см	h_2 , см	σ , ГПа	V_n , %	
1	53,34	0,312	0,493	0,95	$3 \cdot 10^{-2}$	Б
2	99,36	0,292	0,597	1,77	4	В
3	122,22	0,289	0,599	2,18	11,6	В
4	128,02	0,350	0,650	2,28	14,7	В—Г
5	156,36	0,307	0,617	2,78	29,2	Г
6	176,78	0,335	0,604	3,15	39,5	Г
7	205,44	0,302	0,587	3,66	45	Г
8	221,89	0,305	0,587	3,95	>65	Г
9	253,59	0,297	0,610	4,51	>89	Г
10	38,1	0,150	0,637	0,68	Нет	А
11	153	0,155	0,551	2,72	22,9	В—Г

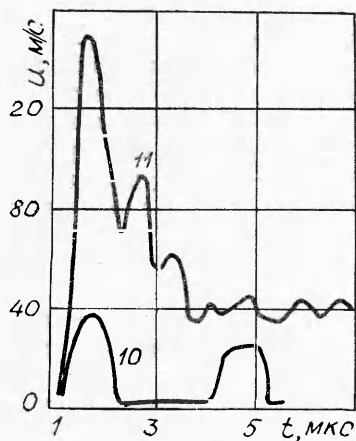


Фиг. 1

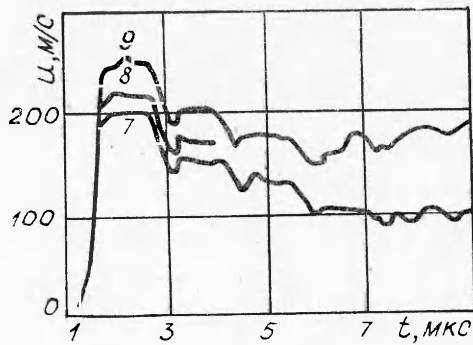
нарушений сплошности; Б — образование в образце трещин или пор, выявляемых на шлифе (начальный откол); В — образование в мишени большого числа полостей, часть которых вырастает до величины, превышающей диаметр зерна (промежуточный откол); Г — наличие сформировавшейся поверхности разрушения (полный откол).

На фиг. 1—3 по оси абсцисс отложено время, а по оси ординат — скорость свободной поверхности образцов; на фиг. 4 представлено изменение во времени объемной доли полостей и напряжений в плоскости откола для различных условий соударения. Номера кривых на фиг. 1—4 соответствуют номерам вариантов в табл. 1.

Возникающая в мишени волна сжимающих напряжений (ее величина определяется скоростью соударения) отражается от свободной поверхности мишени и при ее взаимодействии с встречной волной разгрузки, идущей от свободной поверхности ударяющей пластины, в мишени образуется область растягивающих напряжений (фиг. 4). При достижении растягивающими напряжениями (давлением) порогового значения p_{n0} в мишени начинают образовываться поры. С ростом концентрации пор происходит разгрузка материала в зоне растущих полостей, величина растягивающих напряжений снижается (фиг. 4), что вызывает распростра-

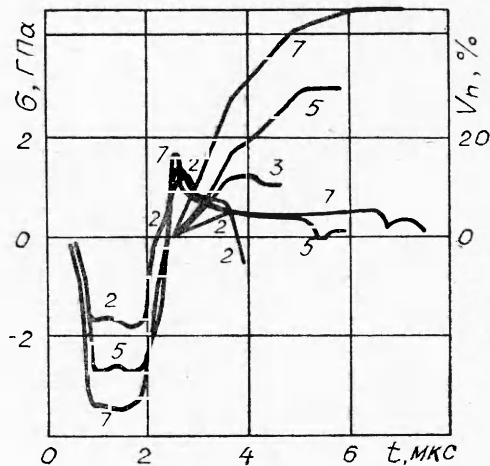


Фиг. 3



Фиг. 2

нительный объем пор в плоскости откола. За плоскость откола принималась плоскость в мишени, на которой имеет место максимальная величина повреждения. В последнем столбце табл. 1 представлена степень повреждения, определенная в [5]. Для качественной характеристики степени повреждения в табл. 1 приняты следующие обозначения: А — отсутствие



Фиг. 4

нение возмущения (откольного импульса) в обе стороны от зоны разрушения. При достижении откольным импульсом свободной поверхности мишени ее скорость резко возрастает (см. фиг. 1—3), при отсутствии же повреждений возрастание скорости происходит с приходом уже отраженного от поверхности контакта ударника и мишени импульса напряжений (кривая 10 на фиг. 3).

Анализируя характер изменения напряжений в плоскости максимального повреждения (фиг. 4) и сопоставляя их с историей накопления повреждений, можно отметить следующее. Скорость накопления относительного объема полостей существенно возрастает с увеличением скорости соударения. Если относительный объем полостей меньше 12—15%, то после растягивающих напряжений в плоскости откола развиваются сжимающие напряжения и происходит некоторое сжатие пор (кривая 3 на фиг. 4). Большие уровни повреждений (до 30%) накапливаются уже в два этапа: на кривой 5 фиг. 4 видно, что относительный объем полостей на первом этапе (до 4 мкс) возрастает со скоростью гораздо большей, чем на втором этапе. При этом характер изменения напряжений в плоскости откола становится качественно другим: увеличивается длительность действия растягивающих напряжений (кривая 5, фиг. 4), уплотнения пор не происходит. Это связано с тем, что с увеличением интенсивности импульса напряжений скорость порообразования возрастает, в результате чего формируется более мощный откольный импульс, который, отражаясь от свободной поверхности мишени, приходит к зоне разрушения в виде растягивающих напряжений и способствует дальнейшему росту поврежденности. При небольших повреждениях происходит лишь незначительное увеличение длительности растягивающих напряжений в плоскости максимального повреждения [2]. При уровнях повреждения, больших 30% (кривая 7 на фиг. 4), на графике роста относительного объема полостей можно отметить три фазы, на которых скорости роста существенно различны, при этом скорость роста относительного объема полостей от этапа к этапу уменьшается. При еще больших уровнях повреждения скорость роста их несколько замедляется после первой фазы, а затем постоянно возрастает, при этом длительность фазы растягивающих напряжений в плоскости откола начинает уменьшаться. Вышеотмеченные особенности соответствуют, очевидно, различным стадиям процесса разрушения.

В вариантах 1—9 отношение толщины мишени к толщине пластины ударника равно примерно двум. Варианты 10, 11 соответствуют удару по такой же, как и в первых случаях, мишени, однако толщина снаряда меньше. Результаты этих расчетов представлены на фиг. 3, 5. Здесь длительность сжимающих напряжений порядка 0,8 мкс против 1,5—1,9 мкс в первых случаях. Из результатов видно, что скорость соударения (напряжение), требуемая для получения определенного уровня поврежденности, в данном случае должна быть больше, что известно еще при ранних исследованиях процесса откола [1].

Как отмечено выше, изменение скорости свободной поверхности образца по сравнению с ее движением при отсутствии разрушения обусловлено распространением возмущения, образующегося в зоне растущих пор. В связи с этим часто из непосредственной обработки профилей скорости свободной поверхности определяют критическую величину растягивающих напряжений [7, 8], а также размер уровня разрушения [9].

Величина разрушающих напряжений определяется согласно следующему соотношению:

$$(2.1) \quad \sigma_p = 0,5\rho_0 c_0 (u_A - u_B)_s$$

где $u_A - u_B$ — разность максимальной и минимальной скоростей движения свободной поверхности (фиг. 1); ρ_0 — начальная плотность; c_0 — скорость звука.

Результаты вычисления σ_p по формуле (2.1) представлены в табл. 2. Видно, что для вариантов 2—9 напряжение σ_p слабо зависит от скорости удара и значение его равно примерно 1,1 ГПа. Это значение находится

Таблица 2

Номер варианта	2	3	4	5	6	7	8	9	11
σ_p , ГПа	1,12	1,12	1,08	1,10	1,14	1,16	1,16	1,16	1,53
R	0,52	0,608	0,63	0,72	0,74	0,8	0,795	0,8	0,617

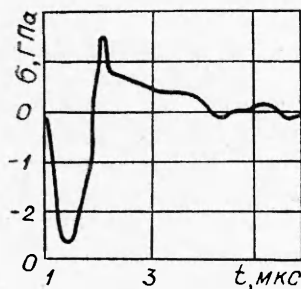
между определенными в [5] пределом начального откола, равным 0,6 ГПа, и пределом промежуточного откола, равным 1,6 ГПа. Для более тонких пластин-ударников (вариант 11) $\sigma_p = 1,53$ ГПа. При еще большем увеличении толщины пластины-ударника значение σ_p уменьшается. Так, при ударе пластиной $h_1 = 2$ см о мишень $h_2 = 4$ см $\sigma_p = 0,83$ ГПа, при ударе пластиной $h_1 = 5$ см о мишень $h_2 = 10$ см $\sigma_p = 0,76$ ГПа. При этом в последних двух случаях наблюдается уменьшение величин σ_p с увеличением скорости удара (приведены наибольшие значения). Это указывает на то, что формулой (2.1) для толстых пластин-ударников нужно пользоваться с осторожностью.

В [9] предложено для оценки степени разрушения использовать величину

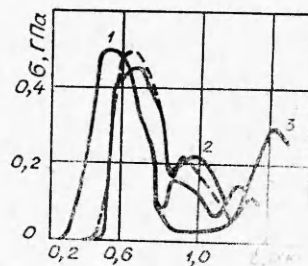
$$(2.2) \quad R = u_c/u_A.$$

Результаты вычисления R по формуле (2.2) представлены в табл. 2. Сопоставление величины R с относительным объемом полостей V_n (табл. 1) показывает, что значение R возрастает с увеличением V_n , пока уровень повреждения ниже определенного. Если повреждение растет в два этапа и более, то R все меньше коррелирует с величиной относительного объема полостей. Это объясняется тем, что в данных случаях образование и рост пор продолжают происходить и после момента времени, соответствующего точке C .

Для изучения свойств материалов при динамических нагрузках часто применяется несколько другая схема эксперимента, чем исследованная выше. Пластина из изучаемого материала, прилегающая одной стороной к материалу меньшей акустической жесткости, по другой поверхности нагружается ударом пластины, как и в [5]. С помощью диэлектрического датчика, например, регистрируется напряжение на границе раздела исследуемый материал — материал меньшей акустической жесткости. На фиг. 6 представлено решение подобной задачи и сопоставление его с численными и экспериментальными результатами [6]. В данном случае пластиной-ударником из меди толщиной 0,622 мм наносился удар по неподвижному образцу из меди толщиной 1,587 мм. С другой стороны образец прилегал к материалу типа оргстекла. Физико-механические характеристики для меди были взяты такими же, как и в предыдущих расчетах, для оргстекла — $\rho_0 = 1,2$ г/см³, $K = 8,95$ ГПа, $G = 0,96$ ГПа. Цифрой 1 на фиг. 6 обозначено настоящее решение с учетом процесса разрушения, 3 — без учета разрушения, 2 — экспериментальные данные



Фиг. 5



Фиг. 6

[6], штриховой линией — численные данные [6]. Повышение напряжения около 0,8 мкс объясняется приходом на границу раздела меди и оргстекла возмущения, обусловленного возникновением и ростом в мишени пор. Результаты решения данной задачи качественно и по порядку величин совпали с результатами [6], что можно также рассматривать как подтверждение используемой модели разрушения. Имеющиеся расхождения, в частности сдвиг по времени, могут быть объяснены различиями либо в толщине мишени, либо в свойствах материала.

Поступила 8 IX 1981

ЛИТЕРАТУРА

1. Никифоровский В. С., Шемякин Е. И. Динамическое разрушение твердых тел. Новосибирск: Наука, 1979.
2. Рузанов А. И. Численное моделирование процессов разрушения твердых тел при импульсных нагрузках. — В сб.: Прикладные проблемы прочности и пластичности. Статика и динамика деформируемых систем. Горький: изд. Горьк. ун-та, 1980.
3. Barbee T. W., Seaman L. et al. Dynamic fracture criteria for ductile and brittle metals. — J. Materials, 1972, vol. 7, N 3.
4. Seaman L., Curran D. R., Shockey D. A. Computational models for ductile and brittle fracture. — J. Appl. Phys., 1976, vol. 47, N 11.
5. Smith J. H. Three low-pressure spall thresholds in copper. — In: Sympos. Dynam. Behavior Mater., Albuquerque, N. M., 1962. Philadelphia, Pa: Amer. Soc. Test. and Mater., 1963.
6. Seaman L. Effects of fracture on stress-strain relations for wave propagation. — В кн.: Материалы II симпозиума «Нелинейные волны деформации». Таллин: изд. Ин-та кибернетики АН ЭССР, 1978.
7. Новиков С. А., Дивнов И. И., Иванов А. Г. Исследование разрушения стали, алюминия и меди при взрывном нагружении. — ФММ, 1966, т. 21, вып. 4.
8. Степанов Г. В. Упругопластическое деформирование материалов под действием импульсных нагрузок. Киев: Наукова думка, 1979.
9. Cochran S., Banner D. Spall studies in uranium. — J. Appl. Phys., 1977, vol. 48, N 7.

УДК 399.374.1

ПРЕДЕЛЬНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ ДИНАМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК

В. В. Селиванов

(Москва)

Рассматривается реализация критериев разрушения [1, 2] применительно к жестко-пластическим цилиндрическим оболочкам, расширяющимся под действием продуктов детонации. Обсуждаются экспериментальные результаты по определению предельных деформаций оболочек. Вопрос о предельных деформациях цилиндрических оболочек под действием равномерно расширяющихся продуктов детонации обсуждался в [2—4]. Численные и аналитические решения, описывающие процесс деформации цилиндрической жестко-пластической оболочки, получены в [4, 5].

Рассмотрим некоторые критерии и условия разрушения жестко-пластических оболочек. В цилиндрической оболочке, находящейся под действием интенсивной внутренней нагрузки, возникают внешняя зона со смешанным напряженным состоянием ($\sigma_r < 0$, $\sigma_\theta > 0$) и внутренняя зона, в которой реализуется состояние всестороннего сжатия ($\sigma_r < 0$, $\sigma_\theta < 0$) [4]. Здесь σ_r и σ_θ — радиальная и тангенциальная компоненты тензора напряжений. Условие, выполняющееся на границе двух зон, имеет вид $\sigma_\theta = 0$. Его использование совместно с условием пластичности ($\sigma_\theta - \sigma_r = \kappa Y$) и выражением для радиального напряжения [5] в начальном положении ($a = a_0$, $b = b_0$) даст координату границы $\sigma_\theta = 0$:

$$(1) \quad r = b_0 (b_0/a_0)^{-\kappa Y/\nu_0^2}$$

Здесь b_0 и a_0 — начальные внешний и внутренний радиусы оболочки;