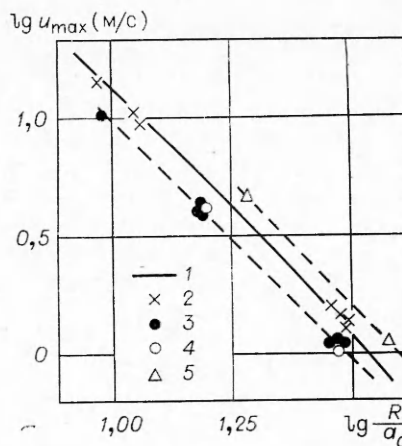


Рис. 4. Зависимость максимальной массовой скорости от расстояния до центра взрыва в песке.

1 — заряд тэна в песке; 2 — 60% песка + 40% графита, $R_{об} = (5 + 10) a_0$; 3 — графит, $R_{об} = 4a_0$; 4 — медные опилки, $R_{об} = 4a_0$; 5 — гель, $R_{об} = 5 a_0$.



полостях. Стенки сферических оболочек толщиной 0,5 мм готовились из гипса и меди. В первом случае скорости мало отличались от взрыва заряда просто в песке, во втором — существенно превышали их.

Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о существенной роли проникновения газообразных продуктов детонации в открытые поры среды в общей картине развития взрыва и о связанном с этим прямом теплообмене продуктов со средой.

Поступила в редакцию
16/V 1978

ЛИТЕРАТУРА

1. В. М. Кузнецов, А. Ф. Шацкевич. ФГВ, 1977, 13, 5.
2. В. М. Кузнецов, А. Ф. Шацкевич. ФГВ, 1978, 14, 2.
3. К. Е. Губкин, В. М. Кузнецов, А. Ф. Шацкевич. ПМТФ, 1978, 6.
4. В. М. Кузнецов, К. К. Шведов. ФГВ, 1967, 3, 2.
5. И. Л. Зельманов, О. С. Колков и др. ФГВ, 1968, 4, 1.
6. А. Ф. Шацкевич. — В сб.: Взрывное дело, № 76/33. М., «Недра», 1976.
7. Л. В. Альтшулер и др. ФГВ, 1970, 6, 3.

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ УДЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОТРЫВА ПРИ ОТКОЛЕ ДЛЯ СТ. 3 И МЕДИ

М. А. Иванов

(Москва)

Эксперименты по импульсному разрушению сосудов и их анализ в [1, 2] позволили количественно подтвердить энергетическую гипотезу масштабных эффектов, предложенную в [3], а также количественно описать явление откола в металлах [4—6] и динамическую пластичность труб [7]. Эти исследования дали возможность сформулировать двухстадийный подход к общей проблеме разрушения [5]. Первая стадия — накопление дефектов — описывается уравнением долговечности кинетической теории прочности¹ [8, 9]. Природа дефектов, а также конкретный механизм их возникновения не рассматривается, а используется только феноменология явления.

Вторая стадия — разрушение объекта испытания на части, прохождение магистральной трещины — требует в качестве необходимого усло-

¹ В [10, 11] отмечается, что появление и накопление дефектов в материале происходит не за счет термофлуктуационного распада атомных связей, как это следует из кинетической теории прочности, а за счет термофлуктуационного процесса движения дислокаций, определяющих деформацию ползучести.

вия достаточного запаса упругой энергии растяжения во всем объекте для совершения работы разрушения.

В двухстадийном подходе определяющим параметром является удельная работа разрыва материала λ , в общем случае зависящая от температуры, величины и скорости пластической деформации. Величины напряжения разрушения, предельная пластическая деформация — производные от λ . Они определяются размером объекта и уравнением состояния материала. В работах [1, 2, 4—7, 12, 13] полагалось, что λ одинакова для хрупкого и вязкого разрушения. Ниже будет найдена зависимость λ от температуры из экспериментальных данных [14, 15] по отколу, а также получены формулы для критерия откола при энергетическом подходе.

В [14, 15] приводятся критические значения разрушающих напряжений откола σ_p при взрывном нагружении предварительно нагретых образцов. Значения σ_p для Ст. 3 получены в [14] путем измерения скорости свободной поверхности v_0 в момент выхода на нее импульса сжатия, а также скорости отколовшегося слоя v_1 . Для меди значения σ_p в откольном сечении рассчитывались в гидродинамическом приближении на ЭВМ [15]. Используя энергетический подход [5], выведем формулы, связывающие λ с величинами v_0 , v_1 , σ_p , а также значением толщины отколовшегося слоя δ .

Рассмотрим явление откола в акустическом приближении [16]. В некоторый момент времени $0 < t < l_0/2C$ после выхода треугольного импульса сжатия с амплитудой σ_0 и длиной l_0 на свободную поверхность ($x=0$, $t=0$, C — скорость звука в материале) в образце в области $0 < x < Ct$ существуют растягивающие напряжения. Величина этих напряжений не зависит от времени и линейно растет с координатой

$$\sigma = 2\sigma_0 x/l_0. \quad (1)$$

Согласно [4, 5], необходимое энергетическое условие разрушения при отколе находится из выражения

$$\int_0^{\delta} \frac{\sigma^2 dx}{2E'} = \lambda, \quad (2)$$

где E' — модуль упругости для бесконечной среды; δ — толщина отколовшегося слоя. Считается, что после выполнения (2) разрушение в материале происходит по наиболее ослабленному сечению, которое, как показано в [4], практически совпадает с $x=Ct$. Интегрируя (2), с учетом (1) получим

$$\lambda = \sigma_p^2 \delta / 6E', \quad (3)$$

где $\sigma_p = 2\sigma_0 \delta / l_0$ — растягивающее напряжение в сечении, где происходит откол. Выразим λ через скорости v_0 и v_1 . Из выражения (3), принимая во внимание, что для рассматриваемого треугольного импульса справедливо

$$\delta = (v_0 - v_1) l_0 / v_0, \quad (4)$$

используя $C = \sqrt{E'/\rho}$ и закон сохранения импульса $\sigma_0 = \rho C v_0 / 2$, получим

$$\lambda = (v_0 - v_1)^2 \delta \rho / 6, \quad (5)$$

$$\lambda = (v_0 - v_1)^3 l_0 \rho / 6v_0. \quad (6)$$

Формулы (3), (5) и (6) дают критерий откола в акустическом приближении при энергетическом подходе. Исходные экспериментальные данные, необходимые для определения $\lambda(T)$ для Ст. 3 [14] и меди [15], сведены в табл. 1 и 2 соответственно. Формула (6) и данные табл. 1 позволили определить значения $\lambda(T)$ для Ст. 3, при этом $l_0 =$

Таблица 1

Скорость, м/с	Температура образца, С°				
	210	290	330	350	480
v_0	962	1020	1150	930	1000
v_1	872	920	1070	865	940

≈ 33 мм в формуле (6) найдена, как средняя величина из (4) по данным опытов 10 и 11 из [14]. Полученные значения λ для Ст. 3 приведены на рис. 1, 1. Там же даны значения λ для Ст. 45 (отжиг) (4), Ст. 40Х (отжиг) (2), Ст. 40Х (закалка) (3), рассчитанные в [13], по данным [14], и для мягкой стали [4] (5), по данным [17]. На рис. 2, 1 приведены значения λ для меди, вычисленные согласно (5) и табл. 2, а на рис. 2, 2— λ из работы [4], найденное по экспериментальным данным [18]. Значения температур даны гомологические (температуры плавления стали и меди равны соответственно 1350 и 1083°С). В рассмотренных областях величины λ для Ст. 3 и меди падает примерно линейно с ростом температуры. Обработка экспериментов для меди методом наименьших квадратов приводит к зависимости: $\lambda = (0,40 - 0,55 T / T_{пл} K) \cdot 10^5$ Дж/м².

Таблица 2

Параметр	Температура образца, °С									
	-196	-4	20	155	170	300	305	410	480	490
σ_p , кг/мм ²	417	380	378	335	335	325	325	300	280	255
δ , мм	1,55	1,40	1,38	1,2	1,2	1,15	1,14	1,05	1,0	0,90

В заключение отметим, что в энергетическом подходе, развитом в [4, 5], не рассматривается кинетика разрушения при отколе. Поскольку запасенная в некоторой области материала упругая энергия растяжения не может мгновенно в строго определенном сечении вся реализоваться в работу разрушения, то потребуются определенное время, в течение которого будут происходить изменения положения слабого сечения области снятия энергии. Поэтому плоскость откола получится с неровной, шероховатой поверхностью [14, 16, 19], и отколовшийся слой окажется не полностью, а только частично разгружен. Неиспользованный импульс давления будет циркулировать в нем, приводя к колебаниям его свободных границ с амплитудой, меньшей ($v_0 - v_1$).

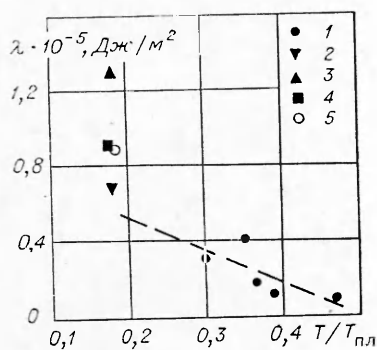


Рис. 1.

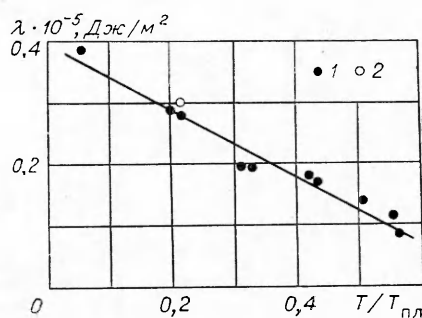


Рис. 2.

Этот факт экспериментально зарегистрирован в [14]. Рассчитанные значения λ будут завышенными на величину оставшейся упругой энергии в отколовшемся слое. При «искусственном» отколе материал в области отрыва не обладает прочностью, и весь запас упругой энергии в «готовом» отколе остается неиспользованным, что будет приводить к колебаниям его свободных границ с начальной амплитудой ($v_0 - v_1$).

Поступила в редакцию
19/VI 1978

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Г. Иванов, В. А. Сеницын, С. А. Новиков. Докл. АН СССР, 1970, **194**, 2.
2. А. Г. Иванов, В. А. Сеницын, С. А. Новиков. ФГВ, 1972, **8**, 1.
3. Л. С. Мороз, С. С. Шураков. Проблемы прочности цементированной стали. Л., 1947.
4. А. Г. Иванов. ФГВ, 1975, **11**, 3.
5. А. Г. Иванов, В. Н. Минеев. Докл. АН СССР, 1975, **220**, 3.
6. О. А. Клещевников, В. И. Сафронов и др. ЖТФ, 1977, **77**, 8.
7. А. Г. Иванов. Проблемы прочности, 1976, 11.
8. В. И. Бетехтин, С. Н. Журков. Проблемы прочности, 1971, 2.
9. В. Р. Регель, А. И. Слуцкер, Э. И. Томашевский. УФН, 1972, **106**, 2.
10. Л. С. Мороз. Проблемы прочности, 1972, 12.
11. Л. С. Мороз, В. А. Лихачев, А. Е. Глотин. Проблемы прочности, 1977, 8.
12. В. И. Цыпкин, А. Г. Иванов и др. Атомная энергия, 1976, **41**, 5.
13. М. А. Иванов.— В сб.: Динамика сплошной среды. Вып. 29. Новосибирск, изд. Ин-та гидродинамики, 1977.
14. С. А. Новиков, И. И. Дивнов, А. Г. Иванов. ФММ, 1966, **21**, 4.
15. С. А. Новиков, Ю. С. Соболев и др. Проблемы прочности, 1977, 3.
16. Физика быстротекающих процессов. Т. 2. М., «Мир», 1971.
17. В. М. Бучер, А. М. Баркер и др. РТК, 1964, 6.
18. В. Р. Вreed, С. L. Mader, D. Venable. J. Appl. Phys., 1967, **38**, 8.
19. В. С. Никифоровский. ПМТФ, 1976, 5.