

**О.Ю. Вшивков, А.П. Рыбаков**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

## **ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ДЕФОРМАЦИИ НА ХАРАКТЕР ОТКОЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ**

Представлены зависимости откольной прочности от скорости деформации материала в условиях воздействия на преграду импульсной нагрузки. Исследованы ударно-волновые процессы в акустическом приближении, дано описание напряженно-деформированного состояния и характера разрушения материала с учетом его микроструктуры.

**Ключевые слова:** Откол, скорость деформации, откольная прочность.

Непосредственное определение состояния материала в области откола в настоящее время затруднительно. Поэтому для исследования параметров откола проводят измерения, дающие косвенную информацию о процессе. Основной характеристикой откола является максимальное разрушающее напряжение  $\sigma^*$  в материале перед разрывом, принимаемое за откольную прочность материала. В качестве временного параметра, характеризующего процесс нагружения, используют скорость деформации  $\dot{\epsilon} = \left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_t$ , ( $u$  – массовая скорость;  $x$  – координата

расстояния) в плоскости разрыва, которая является объективной характеристикой истории нагружения материала и учитывает интегральное воздействие нагрузки либо связанное с ней время действия растягивающих напряжений.

Такой подход обеспечивает экспериментальную оценку  $\dot{\epsilon}$  для данного материала. Скорость деформации в плоскости динамического разрыва определяется скоростью изменения нагрузки во встречных волнах при прохождении их через область разрыва.

Величина  $\dot{\epsilon}$  в случае столкновения однородных пластин из одного материала с толщинами  $\delta_1$  и  $\delta_2$  определяется выражением

$$\frac{C_0}{2\beta - 1} \left( \frac{1}{\delta_1} + \frac{1}{\delta_2} \right), \quad (1)$$

где  $C_0$  и  $\beta$  – коэффициенты в линейном соотношении между волновой  $D$  и массовой  $u$  скоростями ударной волны. Выражение (1) получено в

гидродинамическом приближении из формулы И. Скидмора [1] для скорости изменения разрывающего напряжения в плоскости откола непосредственно перед разрывом с учётом связи между скоростью деформации  $\dot{\epsilon}$  и скоростью изменения напряжения  $(\partial\sigma/\partial t)$ :

$$\dot{\epsilon} = \frac{1}{\rho_0 C_0^2} \left( \frac{\partial\sigma}{\partial t} \right).$$

Получить величину  $\dot{\epsilon}$  можно по разности скоростей,

по разности начальной и средней скоростей движения свободной поверхности  $\Delta W$  и толщине  $\delta$  откола в момент разрыва:

$$\dot{\epsilon} = (W_0 + \Delta W) / \delta. \quad (2)$$

$W_0$  – скорость свободной поверхности при отсутствии прочности, равная максимальному значению скорости свободной поверхности от времени  $W(t)$ ;  $\bar{W}$  – средняя скорость движения свободной поверхности.

Зависимость разрушающего напряжения от скорости деформации при динамическом разрыве, прослеженная для стали, алюминия, меди, магния и свинца, аппроксимирована степенной функцией

$$\sigma^* = b_0 (\dot{\epsilon})^{b_1} \quad (3)$$

и в логарифмических координатах имеет линейный характер вплоть до достижения значения  $\sigma_{\max}^*$ , близкого к теоретической прочности  $0,1\rho C_0^2$  этих материалов [2–6].

Значения коэффициентов  $b_0$  и  $b_1$  в формуле (3) для стали, алюминия, меди, магния и свинца приведены в табл. 1. Поведение этих металлов соответствует дислокационной модели [1] явления динамического разрыва. Однако показатель степени в зависимости (3) не соответствует теоретическому  $1/2$ , а определяется свойствами конкретного материала.

Таблица 1

Значения коэффициентов  $b_0$  и  $b_1$  в зависимости (3)

Материал	$\rho \cdot 10^3, \text{ кг/м}^3$	$b_0$	$b_1$
Мягкая сталь	7,8	0,0407	0,308
Алюминий	2,7	0,00254	0,4064
Медь	8,9	0,0105	0,364
Свинец	11,3	0,0437	0,256
Магний	1,74	0,0004	0,4696

На рис. 1, 2 в координатах  $(\sigma^*, \dot{\epsilon})$  приведены результаты по откольного разрушения оргстекла и капролона. Зависимость разрушающего напряжения от скорости деформации при отколе для оргстекла и капролона аппроксимирована линейной функцией

$$\sigma^* = a_0 + a_1 \dot{\epsilon}. \quad (4)$$

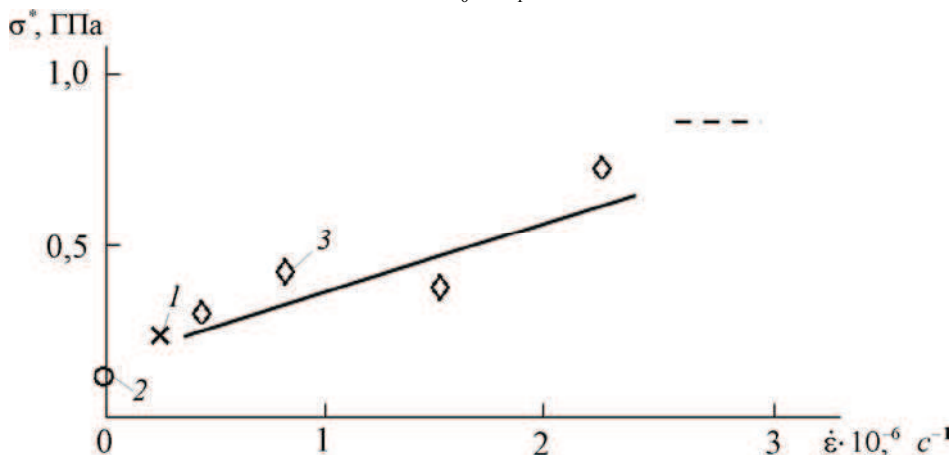


Рис. 1. Откольная прочность оргстекла: 1 – [7]; 2 – [8]; 3 – [9]

Значения коэффициентов  $a_0$  и  $a_1$  приведены в табл. 2.

Исследователями отмечается слабая зависимость откольной прочности металлов от начальных параметров состояния и состава материала. В частности, Н.А. Златин с соавт. [10] на основе экспериментальных исследований установили слабое влияние начальной температуры и исходной прочности алюминия на параметры откольного разрушения. И.О. Брайен [11] пришёл к выводу, что сопротивление откольному разрушению алюминиевых сплавов не зависит от их состава. Ф.Ф. Витман с соавт. [12] установили, что сопротивление разрушению у стали марки 45 мало отличается от найденного для технически чистого железа, хотя в условиях статических измерений их характеристики различаются заметно.

Таблица 2

Значения коэффициентов  $a_0$  и  $a_1$  в зависимости (4)

Материал	$a_0$	$a_1$
Оргстекло	0,165	195
Полистирол	0,035	173
Капролон	0,085	107
Парафин	0	130

В акустическом приближении ударно-волновая картина в условиях динамического разрыва материала качественно представлена на рис. 3. Состояние поверхности разрыва и ширина зоны разрушения взаимосвязаны с некоторой кривой полного разрушения, которая имеет минимум. Его положение определяет расстояние от свободной поверхности, на котором в кратчайшее время наступит полное разрушение.

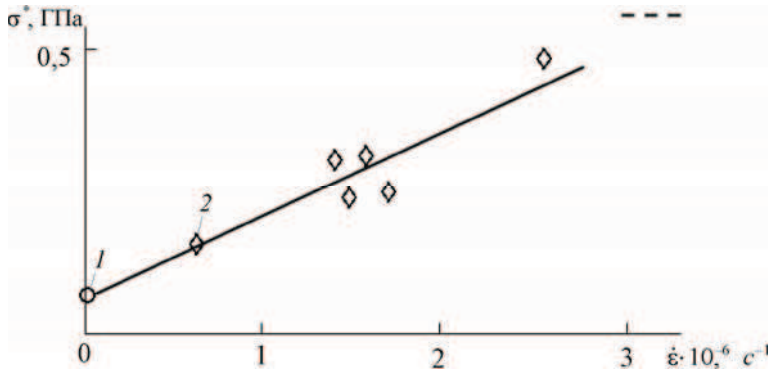


Рис. 2. Откольная прочность капролона: 1 – [8]; 2 – [9]

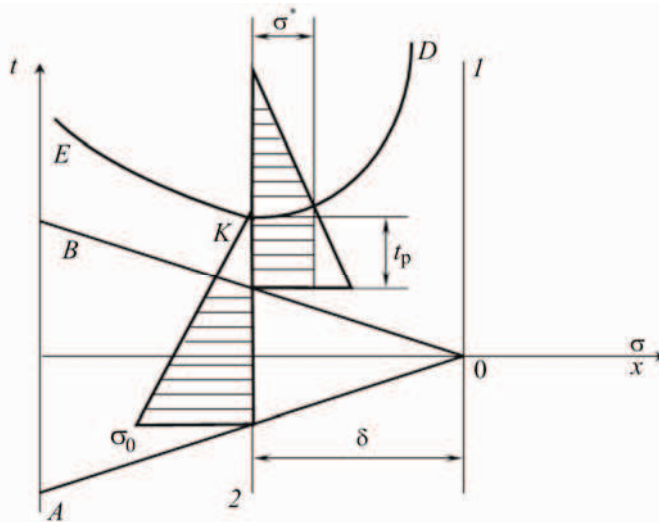


Рис. 3. Интерференция падающей и отражённой волн треугольного профиля и изменение напряжения во времени в одном из сечений образца, параллельном свободной поверхности:  $AO$  – траектория фронта импульса сжатия;  $OB$  – траектория фронта импульса разгрузки;  $1$  – свободная поверхность,  $2$  – плоскость разрыва

Разрушение происходит в окрестности минимума из-за статистического распределения микротрещин. Здесь существует узкая область завершенных или частично завершенных разрушений. По обеим сторонам этой области образуется ряд увеличенных микротрещин. При плавном минимуме кривой разрушения ширина зоны разрушения велика, поэтому зона будет рыхлой. При остром минимуме кривой ширина зоны разрыва уменьшается, поверхности разрыва менее шероховаты. В свою очередь, вид кривой полного разрушения определяется интенсивностью изменения напряжения по глубине образца от свободной поверхности, т.е. скоростью деформации. Чем больше скорость деформации, тем острее минимум кривой полного разрушения, тем более организованный откол.

Большая ширина зоны разрушения при малых скоростях деформации при отколе побуждает говорить о вязком откольном разрушении в материале. Такой характер разрушения наблюдался при исследовании откольной прочности стали и алюминия [9, 13–15] для больших толщин 40...50 мм образцов этих материалов. При толщинах отколов 4...6 мм ширина зоны разрушения составляла более 1 мм.

По мере увеличения скорости деформации разрушение изменяет свой характер: происходит хрупкое разрушение. Предельным случаем организованного откола при чрезвычайно высоких скоростях деформации является гладкий откол с зеркальной поверхностью. В частности, для стали такой откол обнаружили и объясняли его природу А.Г. Иванов с соавт. [16, 17], а также Дж. Эркман [18].

Вид зависимостей  $\sigma^*(\dot{\epsilon})$  позволяет объяснить влияние масштабного фактора на прочность материала при динамическом откольном разрушении. При увеличении масштаба опыта по откольной прочности соответственно возрастают все геометрические размеры в  $K$  раз. При одинаковых начальных амплитудах ударной волны это приводит к уменьшению скорости деформации при отколе в  $K$  раз (в случае пренебрежения диссипацией энергии ударной волны). Соответственно изменяются и разрушающие напряжения, т.е. большие образцы разрушаются при меньших напряжениях. Чтобы при изменении масштаба опыта сохранить постоянным и значение разрушающего напряжения, необходимо соответственно изменить начальную амплитуду ударной волны.

На рис. 4 и 5 в логарифмических координатах сопоставлены динамическая и статическая ветви зависимости разрушающего напряжения от скорости деформации для металлов, на рис. 6 – для оргстекла. Результаты статических испытаний представлены в этих координатах путём замены  $\dot{\epsilon} = \frac{1}{\tau}$ , где  $\tau$  – долговечность образца под действием разрушающего напряжения  $\sigma^*$ .

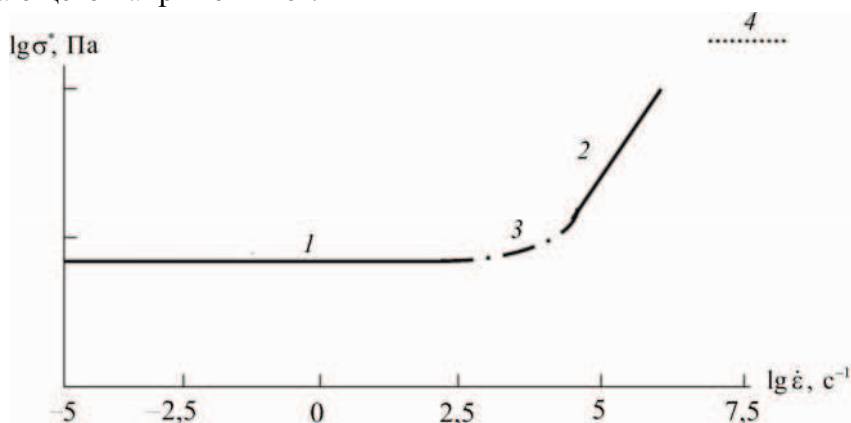


Рис. 4. Прочность стали при разрыве: 1 – статический участок; 2 – динамический участок [9]; 3 – квазистатический участок; 4 – теоретическое значение прочности

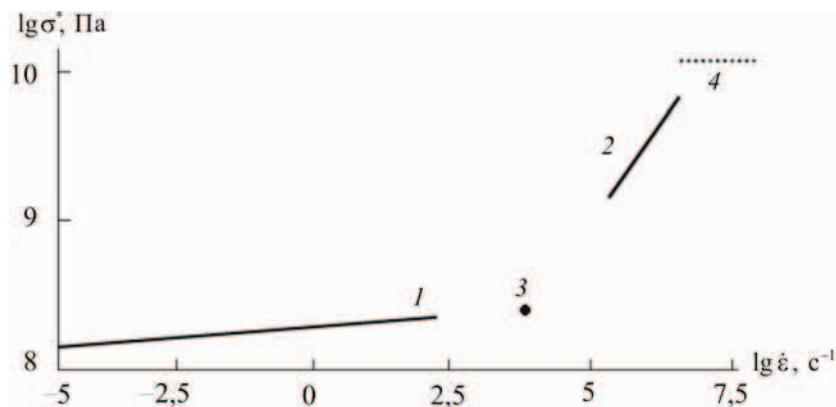


Рис. 5. Прочность алюминия при разрыве: 1 – статический диапазон [19]; 2 – динамический диапазон [9]; 3 – значение на квазистатическом участке [20]; 4 – теоретическое значение прочности

Динамический эффект проявляется, начиная со скорости деформации  $10^3 \text{ с}^{-1}$ . Динамический эффект является следствием волнового характера разрушения, заключающимся в соотношении между дли-

тельностью импульса напряжения, временем задержки старта трещин и временем, необходимым для смыкания растущих трещин и полного перекрытия ими поперечного сечения тела.

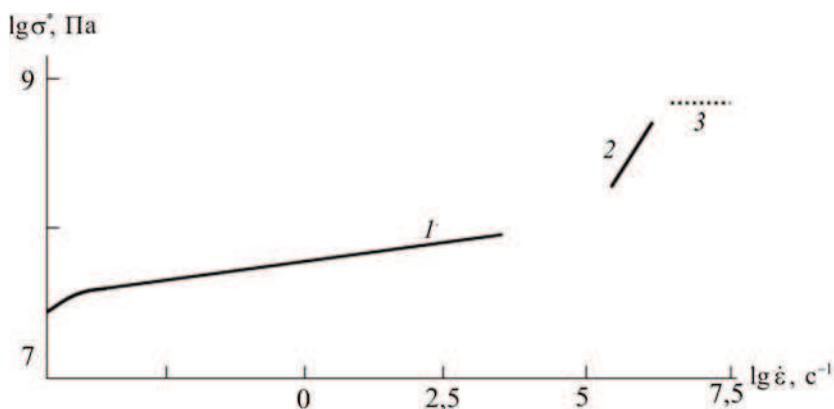


Рис. 6. Прочность оргстекла при разрыве: 1 – статический диапазон [19]; 2 – динамический диапазон [9]; 3 – теоретическое значение прочности

Итак, явление откола характеризуется различными параметрами. Экспериментально определяемыми величинами являются, как правило, толщина откола  $\delta$  и разность скоростей  $\Delta W$  свободной поверхности. Затем вводится понятие разрушающего напряжения  $\sigma^*$ , соответствующего  $\Delta W$ , в совокупности со скоростью деформации  $\dot{\epsilon}$ .

Откольное разрушение характеризуют также удельной энергией отрыва, затрачиваемой на отрыв участка откольной тарелочки единичной площади (см., например, [21]). Величина удельной энергии отрыва определяется через экспериментальные значения толщины откола  $\delta$  и разности скоростей  $\Delta W$ . Естественно ожидать, что работа отрыва будет изменяться в зависимости от конкретных условий.

При вязком отколе образуется не одна, а множество трещин, есть рыхлый слой и зона разрушения, толщина которой зависит от скорости деформации. Работа отрыва – интегральная характеристика, учитывающая затраты энергии на разрыв материала, т.е. на создание, развитие и слияние множества трещин в зоне разрушения, а также затраты энергии на пластическую деформацию материала в окрестностях трещин.

Во всём объёме в зоне разрушения возникает множество пор. При малой скорости деформации возникшие поры растут относительно медленно. Всё это время непрерывно возникают новые поры. Нарушение сплошности происходит за счёт слияния пор. Работа, затрачиваемая

мая на разрыв материала, расходуется в основном по-видимому, на создание и развитие пор. На это требуется сравнительно малая работа и соответственно малое разрушающее напряжение. Поверхности разрыва на отколе и оставшейся части образца рыхлые. Ширина зоны разрушения велика. В зоне разрушения много не сливающихся друг с другом поверхностей разрыва, распределённых по всей зоне. Эти поверхности расположены преимущественно параллельно свободной поверхности.

По мере увеличения скорости деформации поры вытягиваются в направлении, нормальном направлению действия разрушающего напряжения, трансформируются в суб-, микро- и макротрещины. При этом в окрестностях каждой трещины возникает область пластически деформированного материала, на что затрачивается определённая энергия. Кроме того, чтобы трещины распространялись, к каждой из них нужно подводить энергию. Работа, затрачиваемая на разрыв материала в этих условиях, резко возрастает. Повышается и разрушающее напряжение. Характер откола меняется: он становится более хрупким. По мере увеличения скорости деформации среди огромного числа конкурирующих трещин в зоне разрушения выделяется значительно меньше магистральных трещин, распространяющихся с возрастающими скоростями. Их слияние приводит к нарушению сплошности. Толщина зоны разрушения уменьшается. Поверхности разрыва менее шероховатые.

В предельном случае хрупкого откола при разрушающих напряжениях, близких к теоретической прочности на разрыв (например, при зеркальном отколе в железе [16-18], возникающем вследствие реализации течения с ударными волнами разрежения, когда растягивающее напряжение существенно больше теоретической прочности), число магистральных трещин минимально. Возможно, что это даже одна трещина. Зона разрушения имеет наименьшую толщину. Поверхность разрыва наиболее гладкая, зеркальная. В этом случае работа отрыва затрачивается в основном на деформацию материала вокруг трещины, и незначительная её часть расходуется на разрыв межатомных связей при образовании поверхностей разрыва.

### **Библиографический список**

1. Skidmore I.C. An introduction to shock waves in solids // Appl. Mater. Res. – 1965. – Vol. 4, No 3. – P. 131–147.



2. Партон В.З., Борисковский В.Г. Динамическая механика разрушения. – М.: Машиностроение, 1985. – 264 с.
3. Партон В.З., Борисковский В.Г. Динамика хрупкого разрушения. – М.: Машиностроение, 1988. – 239 с.
4. Партон В.З., Морозов Б.М. Механика упругопластического разрушения. – М.: Наука, 1985. – 504 с.
5. Партон В.З., Черепанов Г.П. Механика разрушения // Механика в СССР за 50 лет. – М.: Наука, 1972. – Т. 3. – С. 356–467.
6. Дремин А.Н., Молодец А.М. Кинетические характеристики откольного разрушения // ЖПМТФ. – 1980. – № 6. – С. 85–95.
7. Дрёмин А.Н., Канель Г.И., Колдунов С.А. Исследование откола в воде, этиловом спирте и плексигласе // Горение и взрыв: материалы III Всесоюз. симпоз. по горению и взрыву. Л., 5–10 июля 1971 г. – М.: Наука, 1972. – С. 569–574.
8. Кобеко П.П. Аморфные вещества: физико-химические свойства простых и высокомолекулярных аморфных тел. – М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1952.
9. Рыбаков А.П. Ударные волны в конденсированных средах. Ч. II. – Даугавпилс: ДПИ, 1987. – С.185, 270 – Деп. в ЛатНИИТИ 20.11.87. № Ла-98.
10. Временные закономерности процесса разрушения металлов при интенсивных нагрузках / Н.А. Златин [и др.] // ФТТ. – 1974. – Т. 16, вып. 6. – С. 1752–1755.
11. O'Braien J.L., Davis R.S. Studies of metals at ballistic rates of loading // High-speed testing. – N.Y., 1960. – Vol. 1. – P. 107–112.
12. Витман Ф.Ф., Иванов М.И., Иоффе Б.С. Сопротивление разрушению пластичных металлов при импульсном нагружении // Физика металлов и металловедение. – 1964. – Т. 18, вып. 5. – С. 717–723.
13. Действие взрыва листового заряда ВВ на алюминиевую пластину / Е.В. Ментешов [и др.] // Физика горения и взрыва. – 1967. – Т. 3, № 2. – С. 286–290.
14. Рыбаков А.П. Отколы в стали при нагружении с помощью взрыва листового заряда ВВ и удара пластиной // ЖМПТФ. – 1977. – № 1. – С. 151–155.
15. Рыбаков А.П., Шавков В.П., Ментешов Е.В.. Действие взрыва листового заряда ВВ на металлические пластины // Физика горения и взрыва. – 1968. – Т. 4, № 1. – С. 126–128.

16. Иванов А.Г., Новиков С.А. Об ударных волнах разрежения в железе и стали // Докл. АН СССР. – 1961. – Т. 40, вып. 6. – С. 1879–1882.

17. Иванов А.Г., Новиков С.А., Тарасов Ю.И. Откольные явления в железе и стали, вызванные взаимодействием ударных волн разрежения // ФТТ. – 1962. – Т. 4, вып. 1. – С. 249–260.

18. Erkman J.O. Smooth spalls and polymorphism of iron // J. Appl. Phys. – 1961. – Vol. 32, No 5. – P. 939–944.

19. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.И. Кинетическая природа прочности твёрдых тел. – М.: Наука, 1974. – 560 с.

20. Механические свойства некоторых материалов при высокоскоростном растяжении / Г.С. Писаренко [и др.] // Пробл. прочности. – 1970. – № 1. – С. 3–8.

21. Иванов А.Г. Откол в квазиакустическом приближении // Физика горения и взрыва. – 1975. – Т. 11, № 3. – С. 475–480.

Получено 02.07.2011

**O.Y. Vshivkov, A.P. Rybakov**

The Perm national research polytechnic university

## **THE INFLUENCE STRAIN RATE ON THE NATURE SPALL FRACTURE**

The dependencies of spall strength on the strain rate of material under the influence on the barrier impulsive load submitted. Investigated the shock-wave processes in the acoustic approximation, describes the stress-strain state and the nature of material destruction, taking into account its microstructure.

**Keywords:** Spall, strain rate, spall strength.