

## О КИНЕТИКЕ РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ОТКОЛЕ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ИЗМЕНЕНИЯ АМПЛИТУДЫ И ДЛИТЕЛЬНОСТИ УДАРНО-ВОЛНОВЫХ НАГРУЗОК

В. А. Огородников

РФЯЦ, ВНИИЭФ, Институт экспериментальной газодинамики и физики взрыва, 607190 Саров  
root@gdd.vniief.ru

Представлены результаты металлографических исследований состояния образцов из стали Ст. 3 и меди М1 после нагружения ударными волнами различной интенсивности ( $p \cong 2 \div 30$  ГПа) и длительности ( $\tau \cong 10^{-6} \div 10^{-7}$  с). Обсуждается кинетика откольного разрушения материалов в этих условиях нагружения.

Ключевые слова: металлы, ударные волны, разрушение, кинетика, моделирование.

В настоящее время процесс откольного разрушения принято расчленять на несколько стадий: зарождение микродефектов, их рост под действием растягивающих напряжений, слияние соседних развитых дефектов с образованием макротрещины и расслоение материала с образованием свободных поверхностей [1]. При построении физико-математической модели разрушения, учитывающей отмеченные стадии процесса, важно иметь информацию о функции распределения дефектов по параметрам, характеризующим размер, форму и ориентацию дефектов [2–4]. Такую информацию можно получить при исследовании состояния сохранных после опытов образцов, которые перед разгрузкой и откольным разрушением нагружались ударной волной (УВ) различной амплитуды и длительности. Из результатов металлографических и фрактологических исследований [5–9] следует, что характер разрушения ряда металлов и их сплавов при отколе в широком диапазоне температур ( $-196 \div 800$  °С) в принципе не отличается от характера разрушения в статических условиях одноосного растяжения. Это послужило основанием для использования кинетической модели при описании откола в работе [3].

Однако исследование зарождения откольного разрушения в ряде металлов и сплавов, проведенное с использованием геометрически подобных систем ударник — мишень или при различной длительности нагрузки ( $\tau \cong 10^{-6} \div 10^{-7}$  с), свидетельствует о влиянии длительности нагрузки на кинетику процесса [10, 11]. Так, при характерной длительности

$\tau = (1 \div 5) \cdot 10^{-6}$  с дефекты разрушения, например в меди [10], представляют собой эллипсоидальные поры с характерными размерами от несколько десятков до несколько сотен микрометров, ориентированные в направлении действия нагрузки, а при  $\tau \leq 7 \cdot 10^{-7}$  с — сферические микропоры, характерный размер которых уменьшался до нескольких микрометров по мере уменьшения длительности нагрузки (рис. 1). Аналогичную картину, обусловленную уменьшением характерных размеров дефектов при уменьшении длительности нагрузки, наблюдали на образцах из стали 12Х18Н10Т и титанового сплава ПТ-3В [11]. Причем характерные скорости ударников, при которых обнаружено зарождение дефектов, заметно возрастали с уменьшением их толщины. Это является экспериментальным обоснованием утверждения об увеличении напряжений инициирования более мелких очагов зарождения разрушения [12] и, по-видимому, наиболее вероятной причиной резкого возрастания прочности материала с уменьшением характерного времени действия нагрузки при отколе по сравнению с квазистатическими условиями нагружения [13].

Можно отметить, что кинетику разрушения при отколе исследовали, как правило, при амплитудах давления на фронте УВ в материалах образцов перед разгрузкой, близких к величинам их динамического предела текучести, которые, например для металлов, не превышали нескольких гигапаскалей. При решении ряда практических задач требуется расчетное описание откольных явлений в условиях, когда разгрузке материала предшествует

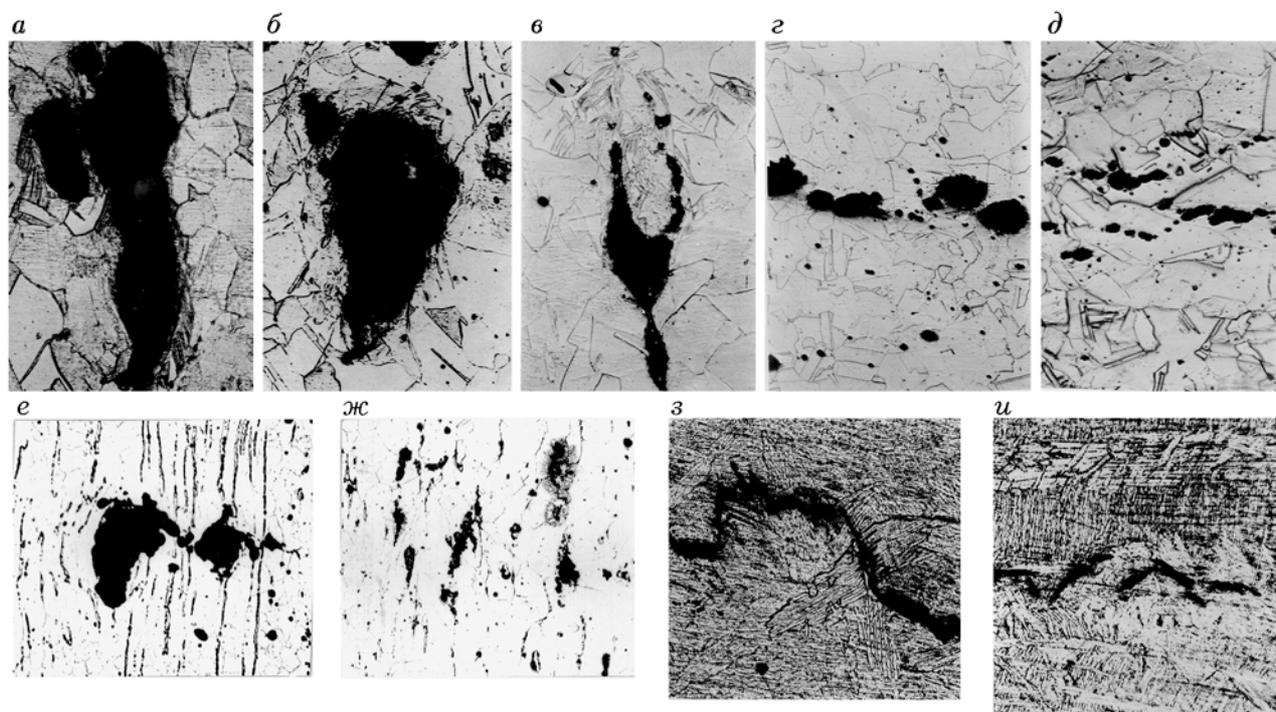


Рис. 1. Фотографии микрошлифов продольного сечения образцов ( $\times 50$ ):

*a-d* — медь, толщина образцов 15, 10, 5, 2,5 и 1,5 мм соответственно; *e, ж* — сталь 12X18H10T, толщина 10 и 2 мм; *з, и* — титановый сплав ПТ-3В, толщина 10 и 2 мм

его нагружение ударной волной с амплитудой в несколько десятков и даже сотен гигапаскалей. Поэтому для обоснования применимости тех или иных кинетических моделей при отколе необходима информация о кинетике процесса разрушения именно в таких условиях нагружения. В этой связи представляют интерес экспериментальные исследования [14, 15], в которых были установлены две границы откольного разрушения образцов фиксированной толщины  $\Delta_{обр}$ , соответствующие существенно различающимся амплитудам давления на фронте УВ перед разгрузкой.

Рассмотрим схематически два режима нагружения образца ударной волной с треугольным профилем давления (рис. 2). Первый режим реализовывали при нагружении образца скользящей детонационной волной тонкого заряда взрывчатого вещества (ВВ) толщиной  $\Delta_{ВВ}$  или при нормальном ударе тонкой пластины толщиной  $\Delta_{уд}$  через смягчающую прокладку толщиной  $\Delta_{пр}$  (или тонкий слой ВВ). В обоих случаях при определенном соотношении  $\Delta_{ВВ}/\Delta_{обр}$  или  $\Delta_{уд}/(\Delta_{пр} + \Delta_{обр})$  УВ в образце сильно затухала и при ее отражении от свободной поверхности создавались условия

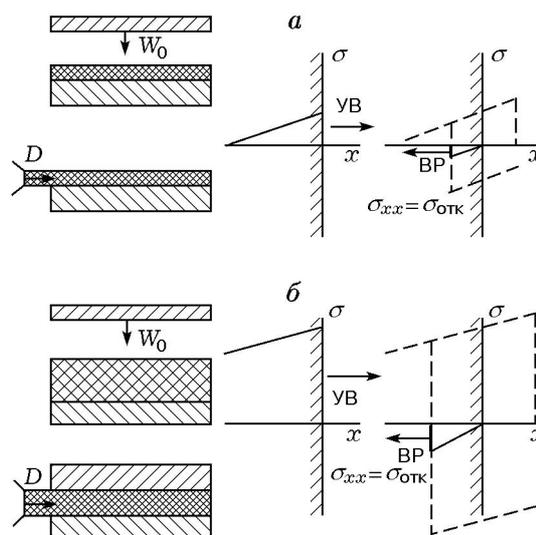


Рис. 2. Схемы нагружения образцов:

*a* — вблизи нижней границы откольного разрушения ( $p \leq p_n$ ); *б* — вблизи верхней границы откольного разрушения ( $p \geq p_v$ ); БР — волна разрежения

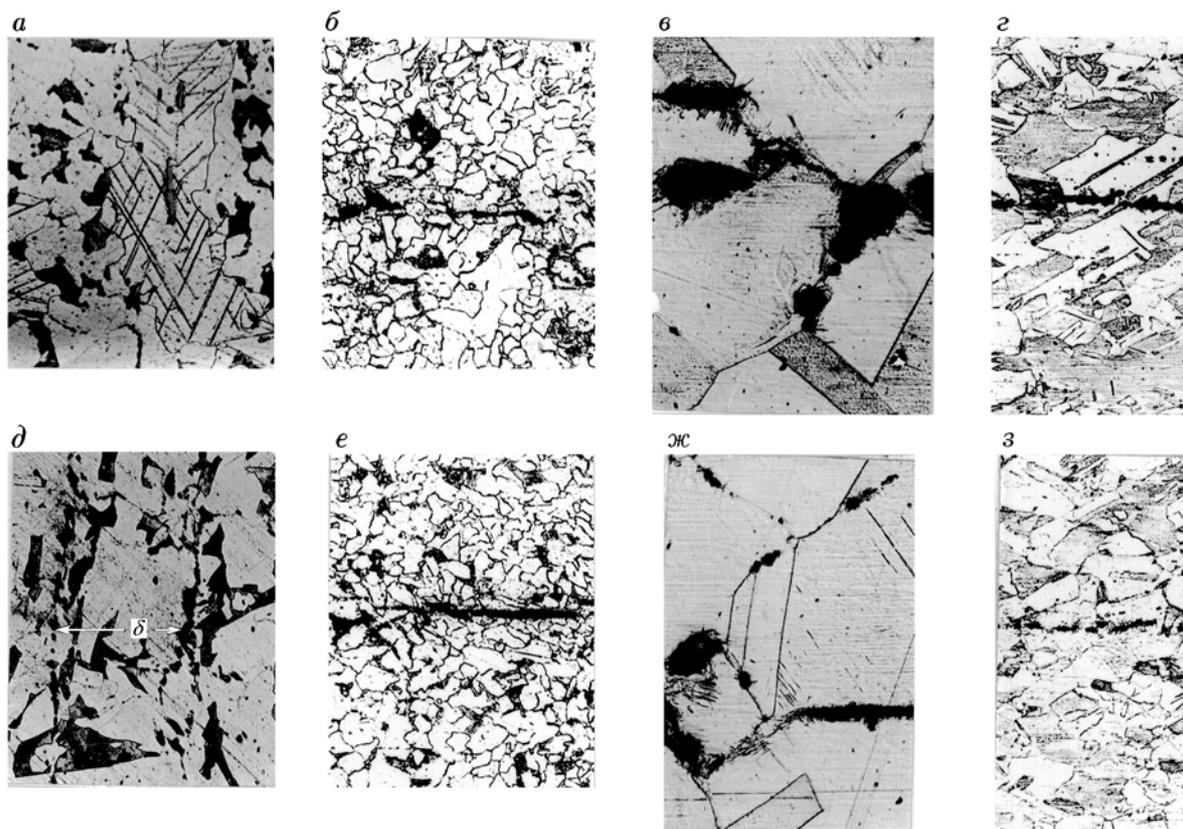


Рис. 3. Фотографии продольного сечения образцов: сверху — нагружение вблизи нижней границы откольного разрушения, внизу — вблизи верхней границы; *a, б, д, е* — сталь,  $\times 50$ ; *в, г, ж, з* — медь,  $\times 100$ ; *a, д, в, ж* — пруток; *б, е, г, з* — листопрокат

для отсутствия или зарождения откола в образце:  $\sigma_p \leq \sigma_{отк}$  (рис. 2, *a*). В этих условиях нагружения при малых толщинах ВВ ( $\Delta_{ВВ} = \Delta_{ВВ}^н$ ) и низких амплитудах давления на фронте УВ ( $p \cong p_n$ ) исследовали нижнюю границу откольного разрушения.

При увеличении толщины ВВ росла амплитуда давления на фронте УВ, выходящей на свободную поверхность образца, и в некотором его сечении надежно фиксировали макроскопический откол. При дальнейшем увеличении  $\Delta_{ВВ}$  профиль давления в УВ трансформировался в близкий по форме к прямоугольному (рис. 2, *б*). При этом снова создавались условия для отсутствия или зарождения откола в образце ( $\sigma_p \leq \sigma_{отк}$ ), но уже при больших толщинах ВВ ( $\Delta_{ВВ} = \Delta_{ВВ}^в$ ) и более высоких амплитудах давления на фронте УВ ( $p \cong p_v$ ), т. е. в этих условиях исследовали верхнюю границу откольного разрушения.

Обычно в литературе рассматривали кинетику откола вблизи нижней границы (в ука-

занном выше смысле). Из приведенных выше рассуждений следует, что если принять определенные меры по сохранению образцов, то появляется возможность исследовать кинетику откола вблизи верхней границы. В данной работе приведены результаты исследования кинетики откольного разрушения образцов из стали Ст. 3 и меди М1 толщиной  $\Delta_{обр} = 5$  мм, изготовленных из прутка и листопроката, которые нагружали слоем пластического ВВ (плотность  $1,51$  г/см<sup>3</sup>, скорость детонации  $7,8$  км/с) различной толщины в режиме скользящей и нормально падающей детонационных волн. Подбором толщины заряда ВВ и принятием специальных мер, например постановкой экрана на наружную поверхность заряда ВВ при скользящей детонации или возбуждением нормальной детонационной волны с помощью ударника, создавали условия нагружения вблизи нижней или верхней границы откольного разрушения. В опытах манганиновыми датчиками измеряли профили давления в УВ, выхо-

дующей на свободную поверхность образцов, и контролировали обеспечение постоянства скорости деформации материала в плоскости откола ( $\dot{\epsilon} \cong 10^5 \text{ с}^{-1}$ ). Образцы после нагружения сохраняли путем плавного торможения в древесных опилках, разрезали и проводили металлографический анализ. На рис. 3 приведены фотографии микрошлифов образцов из стали и меди, изготовленных из прутка и листопроката, после их нагружения вблизи нижней и верхней границ откольного разрушения.

В образцах из стали, изготовленных из прутка и нагружаемых вблизи нижней границы ( $p_n \cong 2 \div 3 \text{ ГПа}$ ), дефекты (очаги) разрушения в виде эллипсоидальных пор размером в несколько десятков микрометров располагаются в направлении действия растягивающих напряжений или в направлении распространения УВ (рис. 3, а). С увеличением нагрузки эти поры объединяются между собой микротрещинами, направленными перпендикулярно действию нагрузки. При нагружении этих же образцов вблизи верхней границы ( $p_v \cong 20 \div 30 \text{ ГПа}$ ) дефекты разрушения стремятся принять форму приблизительно круглых пор диаметром в несколько микрометров и располагаются в виде микропотоков, идущих в направлении действия растягивающих напряжений, с расстоянием между ними  $\delta \cong 100 \text{ мкм}$  (рис. 3, д). При дальнейшем увеличении нагрузки эти микропотоки дефектов объединяются микротрещинами, распространяющимися перпендикулярно направлению действия нагрузки.

Для стальных образцов из листопроката, нагружаемых вблизи нижней и верхней границ откольного разрушения, форма и размеры дефектов практически такие же, как и у образцов из прутка, но изменяется характер их ориентации. Дефекты располагаются перпендикулярно направлению действия нагрузки и локализуются в более узкой зоне (рис. 3, б, е). Отмеченные особенности связаны с технологическим фактором.

Для образцов из меди, изготовленных из прутка и листопроката, нагружаемых вблизи как нижней, так и верхней границы откольного разрушения, образующиеся дефекты имеют вид пор, форма которых близка к сферической, с характерным размером в несколько десятков микрометров (рис. 3, в, г, ж, з). Более крупный размер пор в образцах из прутка (рис. 3, в, ж) связан с большим размером зерна этого мате-

риала. Кроме того, уменьшение размера пор наблюдается при переходе к верхней границе откольного разрушения (рис. 3, ж, з).

Из приведенных результатов можно сделать вывод о том, что кинетика откольного разрушения металлов и их сплавов зависит от индивидуальных свойств материала, длительности и интенсивности ударно-волновой нагрузки. Эти обстоятельства необходимо учитывать при построении кинетических моделей откольного разрушения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Глушко А. И. Исследование откола как процесса образования микропор // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. 1978. № 5. С. 132–140.
2. Barbee T., Seaman L., Crewdson R., Curran D. Dynamic fracture criteria for ductile and brittle metals // J. Mater. 1972. V. 7, N 3. P. 393–401.
3. Seaman L., Curran D., Shockey A. Computational models for ductile and brittle fracture // J. Appl. Phys. 1976. V. 47, N 11. P. 4814–4826.
4. Глушак Б. Л., Трунин И. Р., Новиков С. А., Рузанов А. И. Численное моделирование откольного разрушения металлов // Фракталы в прикладной физике. Арзамас-16: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 1995. С. 59–123.
5. Голубев В. К., Новиков С. А., Соболев Ю. С., Юкина Н. А. О критических условиях зарождения микроповреждений в металлах при отколе // ПМТФ. 1983. № 4. С. 151–157.
6. Голубев В. К., Новиков С. А., Соболев Ю. С., Юкина Н. А. О характере разрушения алюминия и его сплавов Д16 и АМГ-6 в температурном диапазоне  $-196 \dots 600 \text{ }^\circ\text{C}$  // Пробл. прочности. 1983. № 2. С. 53–59.
7. Голубев В. К., Новиков С. А., Соболев Ю. С., Юкина Н. А. О характере разрушения меди, никеля, титана и железа в температурном диапазоне  $-196 \dots 800 \text{ }^\circ\text{C}$  // Пробл. прочности. 1983. № 3. С. 78–84.
8. Ashby M. F., Gandhi C., Taplin D. M. R. Fracture — mechanism maps and their construction for f.c.c. metals and alloys // Acta met. 1979. V. 27, N 3. P. 699–729.
9. Рыбин В. В., Лихачев В. А. Статистика микротрещин на вязких (чашечных) изломах // Физика металлов и металловедение. 1977. Т. 44, вып. 5. С. 1085–1092.
10. Огородников В. А., Иванов А. Г., Лучинин В. И. и др. О природе масштабного эффекта при высокоскоростном разрушении (отколе) // Физика горения и взрыва. 1993. Т. 29, № 6. С. 88–93.

11. **Огородников В. А., Иванов А. Г., Лучинин В. И. и др.** Влияние масштабного и технологического факторов и предварительной деформации на высокоскоростное разрушение (откол) титанового сплава ПТ-3В и стали 12Х18Н10Т // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 6. С. 130–139.
12. **Журков С. Н.** Дилатонный механизм прочности твердых тел // Физика твердого тела. 1983. Т. 25, № 10. С. 3119.
13. **Златин Н. А., Иоффе Б. С.** О временной зависимости сопротивления отрыву при отколе // Журн. техн. физики. 1972. Т. 42, № 8. С. 1740.
14. **Огородников В. А., Тюнькин Е. С., Хохлов А. А. и др.** Особенности откольного разрушения образцов из стали, меди и свинца при их нагружении скользящими детонационными волнами // Пробл. прочности. 1989. № 9. С. 70–73.
15. **Огородников В. А., Иванов А. Г., Тюнькин Е. С. и др.** Зависимость откольной прочности металлов от амплитуды ударно-волновой нагрузки // Физика горения и взрыва. 1992. Т. 28, № 1. С. 94–97.

*Поступила в редакцию 13/IX 2001 г.*

---