

В. А. Огородников, А. Г. Иванов, Е. С. Тюнькин,
В. А. Григорьев, А. А. Холлов

ЗАВИСИМОСТЬ ОТКОЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ МЕТАЛЛОВ ОТ АМПЛИТУДЫ УДАРНО-ВОЛНОВОЙ НАГРУЗКИ

Представлены результаты исследования динамического разрушения ряда металлов в условиях взрывного нагружения образцов при варьировании интенсивностью ударной нагрузки. Показано, что откольная прочность металлов существенно зависит от предшествующего отколу сжатия.

Прочность конструкционных материалов при характерных временах импульсных нагрузок $\leq 10^{-5}$ с определяется, как правило, в экспериментах по отколу. Но такого вида процессу разрушения в волне растяжения предшествует ударное сжатие материала. Однозначного ответа о влиянии интенсивности ударного сжатия на прочность при отколе на сегодня нет [1—3]. Цель настоящей работы — выяснение этого вопроса путем определения откольной прочности ряда металлов в широком диапазоне интенсивностей ударной нагрузки, охватывающем для некоторых из них область плавления.

Экспериментально исследовалось откольное разрушение образцов из стали Ст. 3 и меди М1, изготовленных из прутка, и литого свинца С1 в состоянии поставки. На поверхности образцов размером 90×5 мм устанавливался заряд взрывчатого вещества (ВВ) различной толщины. Начальная плотность ВВ $\rho_0 = 1,51$ г/см³, скорость детонации $D = 7,8$ км/с. Детонация в заряде ВВ возбуждалась ударником из меди толщиной 0,4 мм, разогнанным до скорости 900 м/с. В отдельных случаях для получения низких давлений на фронте ударной волны (УВ) в образце заряд ВВ заменялся прокладкой из плексигласа. Нагружаемые образцы сохранялись путем мягкого торможения в малоплотной среде и разрезались для определения степени откольного разрушения, микротвердости, а при макроскопическом отколе — толщины откола.

В опытах установлено существование двух границ откольного разрушения: нижняя реализуется в области низких давлений при нагружении образцов ударником через прокладку из плексигласа. При толщине прокладки $h > h_0$ короткая УВ интенсивно затухает и при ее отражении от свободной поверхности образца запаса упругой энергии в волне растяжения оказывается недостаточно для совершения работы по отрыву материала (откола). При использовании прокладок с $h < h_0$ или зарядов ВВ определенной толщины реализуется макроскопический откол толщиной δ . По мере увеличения h треугольная форма импульса давления $p(t)$ в образце трансформируется в близкую к прямоугольной. Отражение УВ с таким профилем давления от свободной поверхности образца приводит к снижению величины растягивающих напряжений, а при некоторой толщине заряда ВВ $h > h_*$ запаса упругой энергии в волне растяжения также оказывается недостаточно для совершения работы по отрыву материала, что соответствует верхней границе откольного разрушения.

На рис. 1 приведены фотографии микрошлифов образцов из свинца, меди и стали в исходном состоянии (а) и после их нагружения вблизи нижней (б) и верхней (в) границ откольного разрушения¹. Существование двух границ имеет принципиальное значение для интерпретации зависимости откольной прочности от интенсивности ударно-волнового нагружения, так как позволяет однозначно выявить критические условия нагружения при существенно разных величинах давления на фронте УВ, измерить микротвердость образцов после их нагружения в этих условиях [4].

¹ Образцы из свинца вблизи верхней границы разрушения сохранить в компактном виде не удалось из-за его плавления на УВ.

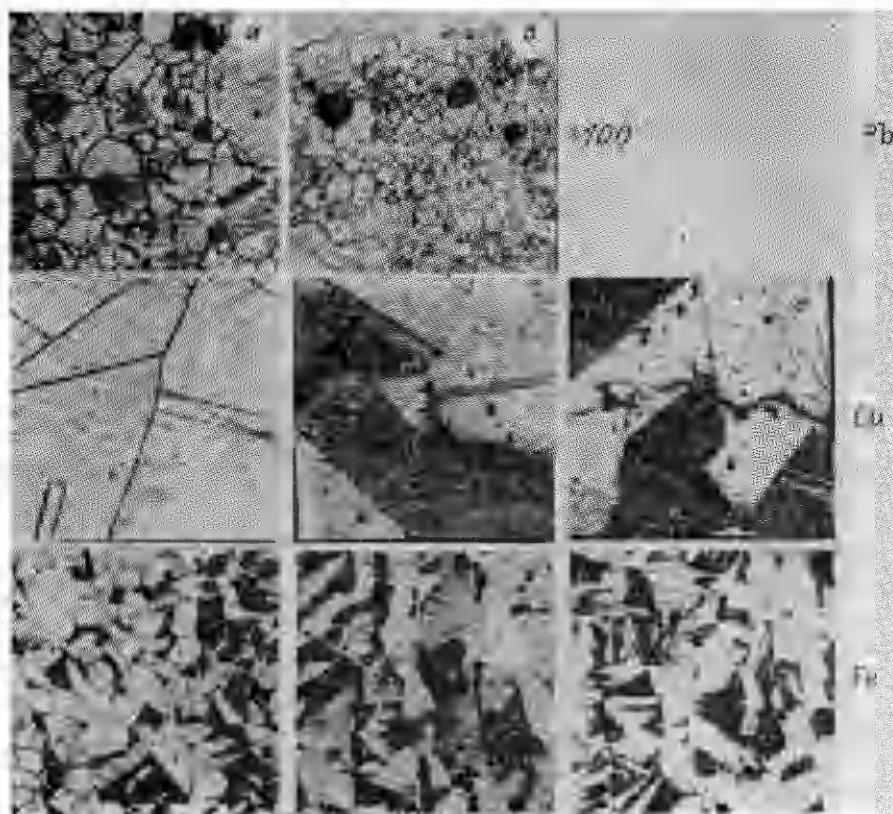


Рис. 1.

Известные методы определения максимальных растягивающих напряжений при отколе σ_p являются косвенными. Подробный анализ этих методов дан в [5], где для определения разрушающих напряжений особо отмечены методы, основанные на непрерывной регистрации скорости свободной поверхности образца. При нагружении образцов УВ с профилем давления, близким к треугольной форме, в случае, если известны ударно-волновые свойства исследуемых металлов, оценку их откольной прочности можно провести экспериментально-расчетным методом. Однако для его использования необходимо знать фактический профиль давления в УВ, выходящей на свободную поверхность образца, и толщину откольной пластины. Для увеличения объема информации можно использовать метод «искусственного» откола, позволяющего определить дефект скорости откольной пластины.

В данной работе величины σ_p оценивались, главным образом, с использованием второго метода. Для этого в независимых опытах с одинаковыми условиями нагружения образцов измерялись толщины откольных пластин и с помощью манганиновых датчиков давления — профили УВ на координате расположения свободной поверхности образца ($x = 5$ мм). Величина σ_p оценивалась в рамках схемы мгновенного откола с использованием принципа суперпозиции для падающего $\sigma_+ = \sigma_0 f(t + \delta/D)$ и отраженного $\sigma_- = -\sigma_0 f(t - \delta/\epsilon c)$ импульсов напряжений.

В случае импульса напряжения треугольной формы, как показано в [6, 7], наиболее ослабленное сечение, где и происходит откол, это плоскость, совпадающая с положением головы волны растяжения, при котором запаса упругой энергии в волне оказывается достаточно для совершения работы по разделению образца на части. Поэтому при расчете величин σ_p в исследованном диапазоне давления, в отличие от акустического приближения, для падающего импульса напряжений учитывалась

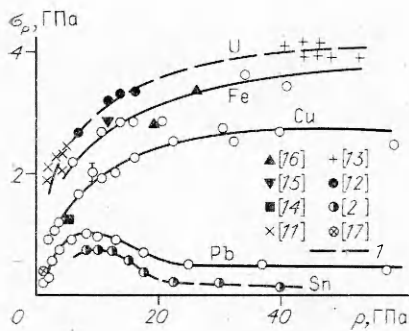


Рис. 2.

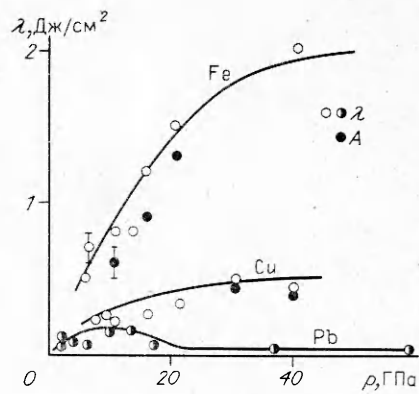


Рис. 3.

скорость УВ D , а для отраженного — степень сжатия материала в УВ ϵ , и использовалась скорость звука в ударно сжатом материале c . Неучет этого обстоятельства в [3] привел к завышению величин σ_p .

На рис. 2 полученные результаты представлены в координатах $\sigma_p - p$. С целью проверки достоверности некоторых результатов дополнительно проведены опыты по непрерывной регистрации скорости свободной поверхности методом емкостного датчика у образцов из свинца при давлении на фронте УВ $p = 0,7$ ГПа и из меди при $p = 1,5 \div 3,0$ ГПа (см. рис. 2, 1).

Удельная работа отрыва оценивалась по соотношению из [8]: $\lambda = \sigma_p^2 \delta (1 + \nu)(1 - 2\nu) / 6E(1 - \nu)$, где E , ν — модуль Юнга и коэффициент Пуассона (рис. 3). Проведена также серия опытов по измерению электроконтактными датчиками средних скоростей свободной поверхности у образцов из меди и стали в случае естественного \bar{W}_1 и организованного «искусственного» откола \bar{W}_2 . Удельная работа отрыва материала при отколе в этом случае (см. рис. 3) оценивалась по дефекту скорости откольной пластины в форме [9]

$$A = \frac{\rho_0 \delta}{2} (\bar{W}_2 - \bar{W}_1)^2.$$

Скорость деформации материала определяется с использованием соотношений [10]

$$\dot{\epsilon} = \frac{du}{dx} = \frac{1}{\rho_0 c} \frac{dp}{dx} = \frac{1}{\rho_0 c^2} \frac{dp}{dt}.$$

В плоскости откола для импульса напряжения треугольной формы

$$\dot{\epsilon} = \frac{1}{\rho_0 c} \frac{\sigma_p}{\delta}.$$

Как отмечено выше, УВ различной интенсивности создавались в исследуемых образцах зарядами ВВ различной толщины (от 0,3 до 30 мм), что приводило к увеличению амплитуды и длительности импульсов давления. При этом величина $\dot{\epsilon}$ в плоскости откола оставалась примерно постоянной, и по результатам обработки экспериментальных данных $\dot{\epsilon} \approx 10^5 \text{ с}^{-1}$.

Последнее обстоятельство позволило в явном виде исследовать зависимости $\sigma_p = \sigma_p(p)$ и $\lambda = \lambda(p)$, представленные на рис. 2, 3, где приведены аналогичные зависимости для олова и урана, найденные по результатам измерения скорости свободной поверхности образца $W(t)$, а также нанесены известные из литературы [14—17] экспериментальные точки для меди, стали и свинца, полученные по результатам измерения $W(t)$ при близких значениях p и $\dot{\epsilon}$. Из рис. 2, 3 следует, что впол-

не удовлетворительно совпадают прочностные характеристики материалов, оцененных независимыми методами.

На рис. 4 приведены зависимости микротвердости материала исследованных образцов H_v от давления на фронте УВ. Микротвердость измеряли на образцах в исходном состоянии и после их нагружения вблизи нижней и верхней границ откольного разрушения.

Обращает на себя внимание одинаковый характер хода зависимостей $\sigma_p = \sigma_p(p)$ и $\lambda = \lambda(p)$ для двух групп металлов: медь, сталь, уран — первая группа, свинец, олово — вторая группа. Для первой группы (в диапазоне давлений на фронте УВ, расположенном ниже их давления плавления) монотонно возрастают величины σ_p до $p \approx 20 \div 30$ ГПа, а при $p = 30 \div 60$ ГПа $\sigma_p \approx \text{const}$.

Для второй группы металлов, которые исследовались при давлениях, охватывающих диапазон давлений плавления на УВ, наблюдаются зависимости с максимумом. Рост откольной прочности металлов в области сравнительно низких давлений обусловлен их упрочнением в УВ, что подтверждают данные о поведении микротвердости (см. рис. 4). Влияние упрочнения на последующее разрушение при отколе проявляется, по-видимому, в том, что в связи с образованием дефектов в материале существует спектр потенциальных очагов разрушения, и пороговые напряжения инициирования таких очагов увеличиваются с уменьшением их размеров, последние же должны зависеть от амплитуды УВ [18]. Поскольку упрочнение металлов в УВ связано с увеличением объемной плотности дефектов, то специфика ударно-волнового нагружения должна накладываться и ограничение на процесс упрочнения: вместе с давлением возрастает температура материала в волне растяжения. Когда она достигнет температуры рекристаллизации T_p , то в материале начнется процесс полигонизации (динамического возврата), связанный с отжигом дефектов и аннигиляцией подвижных дислокаций, образованных УВ, что будет приводить к снижению прочностных свойств металлов — разупрочнению [19]. Этот процесс должен происходить в диапазоне температур $0,5T_p \leq T \leq T_{пл}$ ($T_{пл}$ — температура плавления). Если обратиться к первой группе металлов, то при $p = 30 \div 60$ ГПа они находятся в условиях нагружения, приближающихся к давлениям рекристаллизации, и в результате проявления двух конкурирующих процессов (упрочнения и разупрочнения) становятся постоянными прочностные свойства ($\sigma_p \approx \text{const}$).

Для второй группы металлов эффект упрочнения является определяющим при $p < 10$ ГПа. В диапазоне давлений 10—30 ГПа они находятся в условиях нагружения при $p_p \leq p \leq p_{пл}$, и превалирует здесь процесс разупрочнения. В [20] отмечалось, что нельзя ожидать большого снижения величины удельной работы отрыва при отколе при переходе металлов в расплавленное состояние. Поэтому неудивительно незначительное понижение прочности для олова и свинца при $p = 30 \div 60$ ГПа.

Выявленные закономерности позволяют сделать однозначный вывод: прочность металлов существенно зависит от интенсивности предшествующего отколу сжатия. Аналогичная зависимость с ростом давления на фронте УВ наблюдается и для критических напряжений сдвига [21].

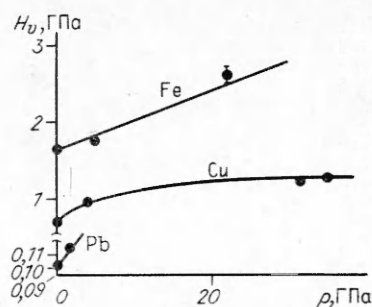


Рис. 4.

ЛИТЕРАТУРА

1. Канель Г. И., Разоренов С. В., Фортов В. Е. Откольная прочность металлов в широком диапазоне амплитуд ударной нагрузки // Докл. АН СССР.— 1987.— 294, № 2.— С. 350.
2. Grady D. E. The spall strength of condensed matter // J. Mech. Phys. Solids.— 1988.— 36, N 4.— P. 353.

3. Иванов А. Г., Огородников В. А., Тюнькин Е. С. и др. О зависимости удельной работы отрыва при отколе от интенсивности ударно-волнового нагружения // Докл. IV Всесоюз. совещ. по детонации, Телави, 22—24 ноября 1988.— Черно-головка, 1988.— Т. 1.— С. 175.
4. 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.
5. Канель Г. И. Сопротивление металлов откольному разрушению // ФГВ.— 1982.— 18, № 3.— С. 77.
6. Иванов А. Г. Откол в квазизакустическом приближении // Там же.— 1975.— 11, № 3.— С. 475.
7. Журков С. Н., Томашевский Э. Е. // Некоторые проблемы прочности твердого тела.— М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1959.— С. 68.
8. Иванов А. Г., Минеев В. Н. О масштабных эффектах при разрушении // ФГВ.— 1979.— 15, № 5.— С. 70.
9. Иванов М. А. Температурная зависимость удельной работы отрыва при отколе для Ст.3 и меди // Там же.— № 4.— С. 131.
10. Златин П. А., Иоффе Б. С. О временной зависимости сопротивления отрыву при отколе // ЖТФ.— 1972.— 42, № 8.— С. 1740.
11. Cochran S., Banner D. Spall studies in uranium // J. Appl. Phys.— 1977.— 48, N 7.— P. 2729.
12. Grady D. E. The Intern. Conf. on Metallurgical Applications of Shock-Wave and High-Strain-Rate Phenomena (Explomet'85). Portland, July 28, 1985.— N. Y.
13. David F., Vacellier J., Prouteau F. et al. Contribution a l'etude de la fracturation d'un echantillon metallique soumis a un choc palan. Etaielage du cuivre et de l'uranium: Rapport CEA.— R-4414. Commissariat a l'Energie Atomique France, 1973.
14. Канель Г. И., Разоренов С. В., Фортов В. Е. Откольная прочность металлов в широком диапазоне длительностей нагрузки // Докл. АН СССР.— 1984.— 275, № 2.— С. 369.
15. Дремин А. Н., Молодец А. М. Кинетические характеристики откольного разрушения // ПМТФ.— 1980.— № 6.— С. 85.
16. Новиков С. А., Дивнов И. И., Иванов А. Г. Исследование разрушения стали, алюминия и меди при взрывном нагружении // ФММ.— 1966.— 21, № 4.— С. 608.
17. Голубев В. К., Новиков С. А., Соболев Ю. С. и др. Разрушение и вязкость свинца при отколе // ПМТФ.— 1982.— № 6.— С. 108.
18. Журков С. И. Дилатонный механизм прочности твердых тел // ФТТ.— 1983.— 25, № 10.— С. 3119.
19. Дерibas А. А., Нестеренко В. Ф., Тесленко Т. С. Универсальная зависимость параметров упрочнения металлов от интенсивности ударно-волнового воздействия // ФГВ.— 1982.— 18, № 6.— С. 68.
20. Иванов А. Г. Феноменология разрушения и откол // Там же.— 1985.— 21, № 2.— С. 97.
21. Батюков Ю. В., Глушак Б. С., Новиков С. А. Прочность алюминия, меди и стали за фронтом УВ // Там же.— 1989.— 25, № 5.— С. 126.

г. Арзамас

Поступила в редакцию 18/VI 1990,
после доработки — 21/XII 1990

УДК 539.375

И. А. Волков

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОТКОЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ МЕДИ ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ

Для описания динамического откольного разрушения развита модель повреждаемой среды, описывающая процессы образования микродефектов, способных с течением времени развиться в макротрещины. Методом численного моделирования на ЭВМ исследованы процессы откольного разрушения меди в широком диапазоне изменения начальных данных. Результаты расчетов сравниваются с данными натурных экспериментов.

Широкое применение ударных волн (УВ) в технике делает актуальной проблему прочности материалов в условиях действия интенсивных динамических нагрузок ударного и взрывного характера. Экспериментальное изучение динамического разрушения осложняется вследствие того, что почти все опытные данные дают лишь косвенную информацию о кинетике процесса и действующих при этом напряжениях (о процессе