

THE FRACTURE OF MATERIALS UNDER INTENSIVE SHOCK LOADS

S. A. NOVIKOV

A specific kind of solids' fracture on intensive shock load – the spall phenomenon, is described. The basic criteria of spall fracture are noted. The results of experimental studies, characterizing the dependence of spall strength from the basic parameters of a load process are presented.

Рассмотрено явление откола – специфического вида разрушения материалов при интенсивном ударном нагружении. Отмечены основные критерии откольного разрушения. Представлены результаты экспериментальных исследований, характеризующие зависимость величины откольной прочности от основных параметров процесса нагружения.

РАЗРУШЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИНТЕНСИВНЫХ УДАРНЫХ НАГРУЗОК

С. А. НОВИКОВ

Филиал № 4 Московского инженерно-физического института, Саров (Арзамас-16) Нижегородской обл.

ОТКОЛ – ХАРАКТЕРНЫЙ ВИД РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ДЕЙСТВИИ УДАРНЫХ НАГРУЗОК

Давно известно, что характер разрушения материалов и конструкций существенно различный в зависимости от того, как осуществляется нагружение – медленно или быстро. Особенно отчетливо это проявляется, когда нагружение носит ударно-волновой характер и разрушение происходит при взаимодействии ударных волн (УВ), а точнее, при взаимодействии волн разрежения (ВР), следующих за фронтом УВ.

В качестве примера рассмотрим прямоугольный брусок с внутренней полостью (рис. 1). Если внутри полости будет повышаться давление (даже с достаточно большой скоростью), то всем ясно, что разрушение должно произойти по наиболее тонким сечениям бруска (рис. 1, а) в соответствии с известной истиной сопромата “где тонко, там и рвется”. Если же осуществить одновременное нагружение внутренней поверхности с помощью УВ, например детонацией расположенного на ней слоя взрывчатого вещества (ВВ), то разрушение бруска произойдет по четырем самым толстым его сечениям (рис. 1, б). Почему? Да потому, что именно в этих сечениях бруска и происходит взаимодействие волн разрежения, возникающих при отражении цилиндрической расходящейся ударной волны от плоских граней.

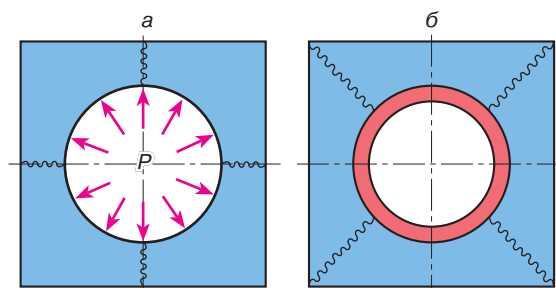


Рис. 1. Характер разрушения бруска с внутренней полостью при медленном и ударно-волновом нагружении: а – относительно медленное повышение давления в полости; б – ударно-волновое нагружение внутренней поверхности

В области взаимодействия ВР возникают большие кратковременные растягивающие напряжения, приводящие к разрушению материала. Такой специфический вид динамического разрушения, вызываемый взаимодействием волн разрежения, называется отколом. Простейшим примером образования откола является отражение плоской УВ от свободной плоской поверхности образца. Такая ударная волна может быть создана подрывом заряда ВВ с плоской детонационной волной на поверхности образца, ударом высокоскоростной пластинки, электровзрывом металлической фольги, действием импульсных излучений, приводящих к испарению поверхностного слоя образца или созданию нестационарных температурных полей.

Рассмотрим процесс образования растягивающих напряжений в одной из указанных типичных схем постановки эксперимента — удар свободно летящей пластинки (ударника) по неподвижной толстолистовой пластине (мишени) (рис. 2). Траектории УВ и ВР, возникающих при ударе, а также траектории контактных границ и одного из произвольных сечений мишени изображены на рис. 2, а в координатах $x-t$ (путь—время). В точках А и С — точках выхода УВ на свободные поверхности ударника и мишени — образуются волны разрежения $ГAE$ и DCB^1 , распространяющиеся навстречу друг другу. В области их взаимодействия напряжения становятся растягивающими. В любой фиксированный момент времени наибольшее растягивающее напряжение достигается на слабом разрыве $СКВ$, а максимальное растягивающее напряжение — в точке К пересечения слабых разрывов BC и AE (крайних характеристик веера). Характерная зависимость напряжения от времени в некотором произвольном сечении мишени x_a представлена на рис. 2, б. Разрушение мишени (откол) происходит в сечении, где раньше всего начинают выполняться критерии разрушения. Для грубых оценок часто используется так называемое акустическое приближение. В этом приближении, если материалы ударника и мишени одинаковы, импульс растяжения имеет прямоугольную форму с амплитудой $\sigma = 0,5\rho_0 C_0 W_{уд}$ и длительностью $t_0 = 2\Delta/C_0$ (ρ_0 — плотность материала мишени и ударника, C_0 — скорость звука в них, $W_{уд}$ — скорость ударника, Δ — толщина ударника). Схематично картина откола выглядит так, будто пластинка-ударник проходит через мишень и продолжает лететь с той же скоростью (рис. 3). Если амплитуда УВ достаточно велика, то по описанной схеме может произойти второй откол и т.д., то есть мишень может расслаиваться на отдельные пластинки-отколы.

¹ Эти ВР называются центрированными и описываются веером характеристик (на рисунке указаны крайние из них), каждая из которых представляет так называемый слабый разрыв — небольшое изменение параметров течения.

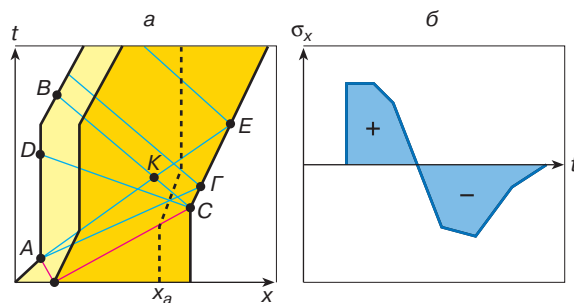


Рис. 2. Схема образования растягивающих напряжений при ударе пластиной по мишени: а — $x-t$ диаграмма, б — профиль напряжений в сечении x_a

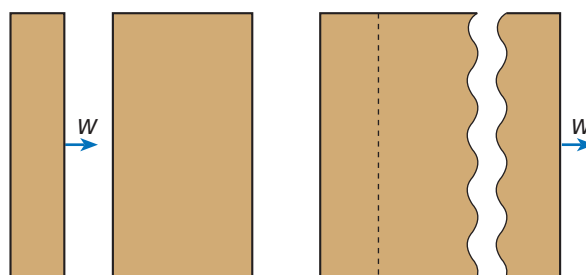


Рис. 3. Схема, иллюстрирующая прохождение пластинки-ударника через мишень

КРИТЕРИИ ОТКОЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ

Исследования процессов разрушения материалов при действии интенсивных импульсных нагрузок представляют большой интерес для прикладных задач. Помимо традиционных направлений, связанных с военной техникой и вооружением, эти исследования имеют значение для разработки и эксплуатации многих современных конструкций. Развитие новых технологий с применением взрыва, импульсных лазеров, корпускулярных пучков и других импульсных источников энергии также тесно связано с результатами экспериментов с ударно-волновым нагружением материалов. Наконец, такие эксперименты значительно расширяют возможности фундаментальных исследований в области физики прочности.

Специфика ударно-волновых воздействий заключается в том, что из-за малой длительности времени нагружения практически отсутствуют взаимное влияние отдельных участков нагружаемого тела, содержащих какие-либо крупные дефекты, и соответственно их вклад в процесс откольного разрушения. Кроме того, при этом развиваются экстремально высокие скорости деформирования, происходит разогрев вещества, изменяется сам механизм пластической деформации (например, в металлах происходит активирование дополнительных плоскостей скольжения, увеличивается вклад двойникования в

деформацию даже для тех материалов, где в обычных условиях нагружения деформационные двойники не образуются). Долгое время считалось, что при ударно-волновом нагружении разрушение (откол) происходит мгновенно, при достижении критической величины растягивающих напряжений σ_p , называемой обычно откольной прочностью материала, а сама величина σ_p является некоторой постоянной характеристикой прочности материала, не зависящей от фактора времени.

Только в 60-х годах нашего столетия появились первые работы, неоспоримо указывающие на необходимость учета этого фактора при откольном разрушении, то есть при ничтожно малых временных интервалах, меньших 10^{-6} с.

Законченной теории откольного разрушения материалов при действии кратковременных растягивающих напряжений пока не существует. Результаты проведенных исследований демонстрируют сложный характер откольного разрушения. К настоящему времени выяснены многие детали этого физического явления, в том числе на микроуровне, получены важные сведения для предсказания возможности образования откольных разрушений, разработаны численные многостадийные модели описания этих явлений. Показано, что величина разрушающего напряжения материалов при отколе σ_p зависит от формы и длительности импульса растягивающих напряжений, от напряженно-деформированного состояния среды и физических факторов (температуры, исходной микроструктуры и т.д.). Таким образом, откольная прочность представляет собой функцию многих переменных. Для численного прогнозирования возможности образования откольных разрушений в разное время предложены критериальные соотношения аналитического вида. Отметим некоторые из них.

Простейший из них по аналогии со статическим нагружением $\sigma_p = \text{const}$. Последующее изучение процесса откольного разрушения показало, что этот критерий может привести к завышению величины разрушающих напряжений, тем не менее ввиду его простоты он часто применяется в инженерной практике. Более полное и детальное описание процесса достигается, если процесс откольного разрушения рассматривать как событие, протекающее во времени. В плоскости $\sigma-t$ (напряжение–время) совокупность реализуемых при ударном растяжении состояний может быть описана некоторой кривой, разделяющей их на две области: область состояний, в которой происходит откольное разрушение (выше кривой), и находящуюся под кривой область состояний, в которой не происходит разрушение. Соответствующие кривой значения времени могут быть названы временами откольного разрушения. Физический смысл этой зависимости очевиден: если мгновенно приложить некоторое растягивающее напряжение σ_1 , то полное откольное разрушение

произойдет, если время действия этого напряжения будет равным или превысит соответствующее ему значение t_1 на этой зависимости. Одним из первых критериев, учитывающих время действия напряжения t , является интеграл повреждений Тулера–Бучера

$$K = \int_{t_0}^t [\sigma_p(t) - \sigma_0]^\eta dt,$$

где η и σ_0 – постоянные параметры, полученные экспериментально.

Интегрирование по времени начинается в момент t_0 , когда $\sigma = \sigma_0$. При выполнении в некотором сечении условия $K = K_c$, где K_c – постоянная материала, происходит разрушение. Так, например, для меди $\eta = 2$, $\sigma_0 = 0,75$ ГПа, $K_c = 0,19$ (ГПа)²/мкс.

Энергетический критерий откольного разрушения основывается на представлении о том, что работа по отрыву материала в области взаимодействия волн разрежения совершается за счет упругой энергии в импульсе растяжения. Откол будет иметь место, если количество упругой энергии оказывается достаточным для протекания этого процесса.

Эти пороговые критерии разрушения не раскрывают физической природы механизма откольного разрушения. Тем не менее для многих практических задач их применение оправданно.

В отличие от пороговых критериев, предполагающих процесс разрушения мгновенным при выполнении некоторых критических условий, успешно разрабатываемые в настоящее время кинетические критерии постулируют развитие процесса разрушения во времени. Они построены на определенных предположениях о механизме разрушения. Одним из наиболее известных подходов к общей проблеме прочности твердых тел является использование кинетического уравнения долговечности (уравнение С.Н. Журкова)

$$t = t_0 \exp\left(\frac{V_0 - \gamma \sigma_p}{kT}\right),$$

где k – постоянная Больцмана, t_0 , V_0 и γ – определяемые экспериментально постоянные параметры для каждого материала. Установлено совпадение величины V_0 с энергией сублимации, то есть с энергией межатомной связи, а t_0 – с периодом колебаний атомов в твердом теле, примерно равным 10^{-13} – 10^{-12} с. Коэффициент γ введен в уравнение как подгоночный параметр для количественного согласования теоретической и реальной прочности.

Многочисленными исследованиями показано, что это соотношение может успешно применяться для описания разрушения материалов различного класса (металлы, полимеры) в широком диапазоне значений долговечности t от 10^7 до 10^{-3} с.

Однако попытки распространить его на область долговечности (от 10^{-5} до 10^{-10} с), свойственную образованию отколов, показали, что откольные экспериментальные данные не описываются этим уравнением: для их описания необходимо значительно изменить параметры t_0 , V_0 и γ . Таким образом, существуют статическая и динамическая ветви долговечности. Различие между ними объясняется различными механизмами необратимой деформации, приводящей к разрушению: на динамической (откольной) ветви разрушение носит атермический характер.

Кинетический характер процесса откольного разрушения предполагает, что в сечении будущего откола растягивающие напряжения действуют в течение конечного интервала времени. Откольное разрушение трактуется как процесс развития и накопления микрповреждений, протекающий в материале во времени. В основе разработанных кинетических моделей лежит понятие меры поврежденности ω — числовой характеристики степени разрушенности материала.

Значительный прогресс в развитии кинетических моделей откольного разрушения связан с использованием для описания процессов зарождения и развития дефектов в нагруженном материале статистических методов, для чего вводится функция распределения дефектов (трещин, пор) по их параметрам, характеризующим размер, форму и ориентацию дефектов.

КИНЕТИКА ОТКОЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ

В настоящее время нет экспериментальных методов, с помощью которых можно было бы проводить прямые измерения параметров состояния материала непосредственно в зоне протекания процесса откольного разрушения. По этой причине для его описания в настоящее время широко используется совместный анализ результатов физического и численного эксперимента. Очевидно, что максимальную информацию для такого анализа представляют результаты экспериментов, в которых осуществляется запись во времени каких-либо кинематических параметров, связанных с процессом откольного разрушения. Одним из основных методов исследования такого рода является непрерывное измерение скорости движения свободной поверхности образца при отражении от нее плоской УВ. Обратимся вновь к рис. 2, на котором приведена схема нагружения образца пластинкой-ударником со скоростью W_1 . При отражении УВ от свободной поверхности последняя скачком приобретает такую же скорость W_1 и начинает тормозиться за счет влияния прочности материала (ведь откольного разрушения еще не произошло и материал сопротивляется растяжению). В точке K при разрыве материала вновь образуется волна сжатия, в которой давление скачком повышается от отрицательной величины

($-\sigma_p$) до нуля. В момент выхода этой волны на свободную поверхность (точка B) вновь происходит ее скачкообразное увеличение. По отколовшемуся слою продолжают циркулировать УВ и ВР с амплитудой σ_p , в результате чего картина изменения скорости свободной поверхности имеет такой вид, как на рис. 4.

Наиболее информативным инструментом для такого рода измерений является метод емкостного датчика скорости, в котором свободная поверхность играет роль движущейся обкладки конденсатора. Измеренный период циркуляции волн по отколовшемуся слою позволяет вычислить толщину откола. Теоретически после первой циркуляции скорость поверхности должна быть равна снова первоначальной (W_1). В эксперименте она оказывается заметно меньше. Основную роль в этом уменьшении играет время от начала зарождения микрповреждений до полного разрушения τ (долговечность). Используя закон сохранения импульса можно легко оценить τ . Характерное значение τ при взрыве заряда ВВ на поверхности образца составляет величину несколько десятых микросекунды. Легко показать, что откольная прочность

$$\sigma_p = 0,5\rho_0 C_0(W_1 - W_2)$$

(W_1, W_2 показаны на рис. 4).

Отметим, что разница ($W_1 - W_2$) прямо связана с отмеченной выше величиной меры поврежденности ω . Наиболее простым методом определения величины откольной прочности является расчетно-экспериментальный метод, основанный на вычислении величины напряжения в сечении образования откола, толщина которого определяется экспериментально (например, простым улавливанием отколовшегося слоя). Исследование методами металлографического анализа области откольного разрушения дает информацию о структурных изменениях в материалах, вызванных процессами ударного сжатия и последующего растяжения. Регистрация степени поврежденности материала в зоне разрушения в разных опытах в зависимости от

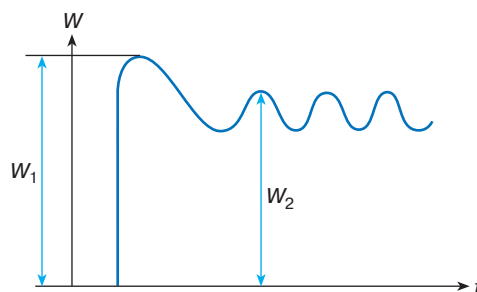


Рис. 4. Изменение скорости свободной поверхности откола во времени (результаты обработки осциллограммы, полученной методом емкостного датчика скорости)

интенсивности напряжений дает информацию о кинетике и характере развития процесса разрушения и позволяет определить уровни нагружения, соответствующие зарождению повреждений на микроскопическом уровне. Чем быстрее происходит рост растягивающих напряжений в области взаимодействия ВР, а он определяется градиентом давления за фронтом УВ, тем тоньше величина отколовшегося слоя и тем меньше шероховатость поверхности разрушения. Идеально гладкой эта поверхность может быть только в одном случае — при взаимодействии так называемых ударных волн разрежения (УВР), то есть ВР, в которых спад давления происходит не постепенно, а скачком, как в ударной волне. Такое на первый взгляд anomальное явление образования УВР было предсказано академиком Я.Б. Зельдовичем в 1946 году. В качестве примера среды, в которой существуют условия образования УВР, он предложил состояние вблизи критической точки фазового перехода в жидкости, где стираются различия между паром и жидкостью. Впервые же экспериментально УВР были обнаружены в металле (железе). Причиной их образования является фазовый переход 1-го рода при ударном сжатии, сопровождающийся перестройкой кристаллической решетки с уменьшением объема. При взаимодействии УВР громадные растягивающие напряжения возникают практически мгновенно в очень узкой зоне, что и приводит к образованию гладкого откола (его даже называют зеркальным). Фотография такого откола приведена на рис. 5.

УВР представляют уникальную возможность исследования прочности материалов при экстремально малых временах действия нагрузки. Эта же цель достигается экспериментально при воздействии на материал кратковременных импульсов излучений, следствием которого являются импульсный разогрев материала, образование ВР, откольное разрушение. Явление носит название теплового удара. Применение электронных пучков позволило детально исследовать разрушение широкого класса матери-

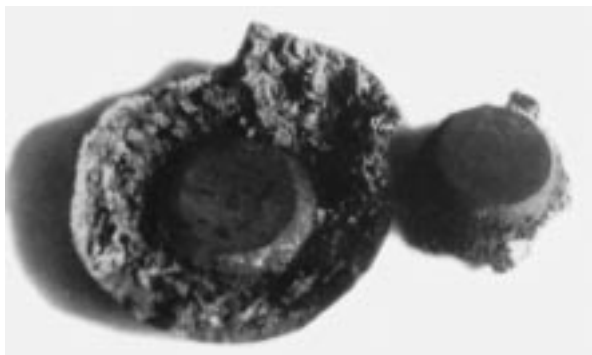


Рис. 5. Фотография гладкого откола в образце из железа

лов в интервале долговечности от 10^{-7} до 10^{-10} с. Кратковременность импульсного разогрева материала при действии электронных пучков позволяет получать множественные отколы в очень тонкой фольге: так, вольфрамовая фольга толщиной 0,2 мм оказывается расслоенной на десять откольных слоев.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ОБ ОТКОЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ

Начало интенсивных исследований явления откольного разрушения относится к 50-м годам. Усилиями ученых многих стран (в первую очередь США и России) получен обширный экспериментальный и теоретический материал, описывающий процессы образования отколов при всех указанных выше способах ударно-волнового нагружения. Получены зависимости величины откольной прочности различных материалов (металлы, сплавы, керамики, композиты) от основных начальных параметров:

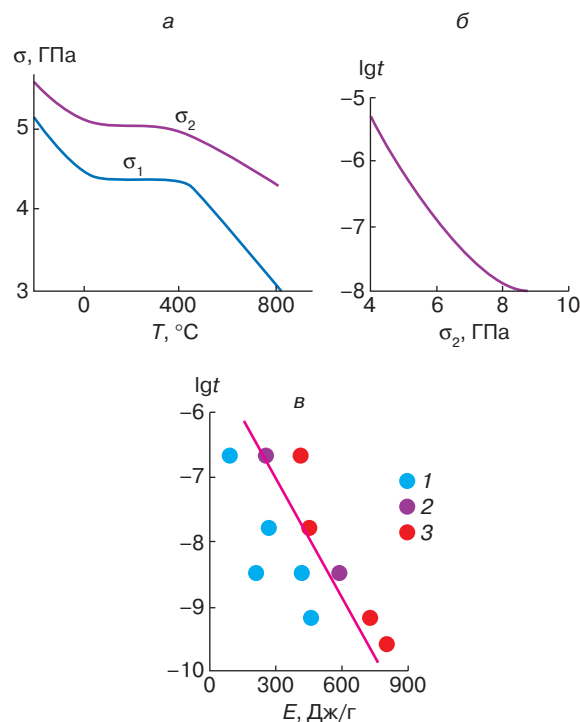


Рис. 6. Характерные экспериментальные зависимости величины откольной прочности: а – зависимость критических напряжений титанового сплава ВТ14 от начальной температуры образца, σ_1 – критическое напряжение начала зарождения микроразрушений, σ_2 – критические напряжения полного разрушения; б – зависимость критического напряжения σ_2 в сплаве ВТ14 от времени действия нагрузки; в – временная зависимость процесса откольного разрушения при воздействии релятивистских сильнофокусированных электронных пучков. t – долговечность, E – поглощенная энергия, 1 – отсутствие разрушения, 2 – начало разрушения, 3 – откол

давления на фронте УВ, времени действия нагрузки, температуры материала, его структуры. Некоторые характерные экспериментальные зависимости приведены на рис. 6. Отметим, что из полученных в опытах с электронными пучками экспериментальных зависимостей — долговечности от поглощенной энергии (рис. 6, *в*) следует, что плотность поглощенной энергии, приводящей к разрушению в этом временном диапазоне, меньше энергетических параметров кристаллической решетки.

Особое внимание уделяется исследованиям так называемых энергетических материалов (взрывчатые составы, ядерно-активные материалы и их сплавы). При ударном нагружении ВВ, как правило, процесс разрушения предшествует процессу возбуждения детонации. Поэтому исследования динамической прочности ВВ обязательно сопрягаются с исследованиями возбуждения взрывчатого превращения.

Исследования откольной прочности урана, плутония и их сплавов потребовали разработки специальных методик и установок, обеспечивающих радиационную безопасность при проведении испытаний, особенно при взрывном нагружении.

Литература, посвященная исследованиям явления откола, обширна. В качестве появившихся в последнее время источников, где приведены обзоры, систематизация и обобщение полученных результатов, можно рекомендовать [1–3].

Откольные разрушения могут иметь место в ответственных установках и конструкциях, работающих в экстремальных условиях. Поэтому интерес к исследованиям поведения материалов и конструкций по-прежнему большой. Дальнейшее развитие

этого направления кроме совершенствования техники эксперимента должно включать в себя расширение исследований по разработке моделей поведения конструкционных материалов в условиях интенсивных ударных нагрузок, что позволит повысить роль численного эксперимента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глушак Б.Л., Куропатенко В.Ф., Новиков С.А. Исследование прочности материалов при динамических нагрузках. Новосибирск: Наука, 1992. 294 с.
2. Глушак Б.Л., Новиков С.А., Рузанов А.И., Садырин А.И. Разрушение деформируемых сред при импульсных нагрузках. Нижний Новгород: Нижегородский ун-т, 1992. 192 с.
3. Учаев А.Я., Бонюшкин Е.К., Новиков С.А., Завада Н.И. Откольное разрушение металлов в режиме быстрого объемного разогрева: Обзор. М.: ЦНИИАтоминформ, 1991. 84 с.

* * *

Станислав Александрович Новиков, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой “Теоретическая и экспериментальная механика” филиала № 4 МИФИ, начальник отдела Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики. Действительный член Российской академии естественных наук, член-корреспондент Российской академии ракетных и артиллерийских наук. Область научных интересов – исследование поведения материалов и конструкций при интенсивных импульсных нагрузках, создаваемых взрывом, высокоскоростным ударом, импульсным разогревом. Автор и соавтор более 250 статей, четырех монографий, одного открытия.