

В. А. Огородников
В. А. Пушков
О. А. Тюпанова

ОСНОВЫ ФИЗИКИ ПРОЧНОСТИ И МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ



ФГУП «Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский научно-исследовательский институт
экспериментальной физики»

В. А. Огородников В. А. Пушков О. А. Тюпанова

**ОСНОВЫ ФИЗИКИ ПРОЧНОСТИ
И МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ**

Учебное издание

Саров
2007

ББК 34.41
О39
УДК 539.4

Огородников В. А., Пушков В. А., Тюпанова О. А.

О39 Основы физики прочности и механики разрушения:
Учебное издание. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2007.
– 339 с.: ил.

ISBN 978-5-9515-0093-9

В книге изложены физические основы классических теорий прочности, линейной механики разрушения и современные представления о процессах деформирования и разрушения сплошной среды в условиях статического, динамического и ударно-волнового нагружения. Особое внимание уделено вопросам деформирования и разрушения конструкционных материалов при воздействии ударных волн и волн разрежения. Учебное издание рассчитано на научных сотрудников и студентов, занимающихся проблемами разрушения и деформирования сплошной среды в условиях интенсивных ударно-волновых воздействий.

СОДЕРЖАНИЕ

Основные обозначения и сокращения	8
Предисловие	10
Введение	13
Глава 1. Атомно-кристаллическое строение материалов	18
1.1. Материаловедение	18
1.2. Кристаллическая решетка, типы решеток, анизотропия	19
1.3. Типы связей в кристаллах	22
1.4. Дефекты кристаллической решетки	27
1.5. Теоретическая прочность идеально периодической структуры	35
Список литературы к главе 1	52
Глава 2. Механизмы пластической деформации	53
2.1. Дислокации в теории пластического деформирования	53
2.2. Скольжение как процесс движения дислокаций	64
2.3. Основы мезомеханики	68
2.4. Дислинация как один из основных видов мезодефектов	76
2.5. Примеры описания деформирования материалов на микро-, мезо- и макроуровнях	79
2.6. Механизмы гетерогенного пластического деформирования в металлах	82
2.7. Влияние условий нагружения на развитие процессов гетерогенного деформирования	91
2.7.1. Одномерное напряженное состояние	93
2.7.2. Двумерное напряженное состояние	96
2.7.3. Трехмерное напряженное состояние	103
Список литературы к главе 2	107

Глава 3. Физические особенности процессов деформирования и их связь с разрушением	110
3.1. Простейшие реологические модели деформируемого тела	110
3.2. Факторы, влияющие на реологию деформирования и разрушения	119
3.3. Особенности получения σ - ε диаграмм в статических и динамических условиях испытаний	132
Список литературы к главе 3	141
Глава 4. Критерии прочности и пластичности изотропных материалов	142
4.1. Принципы построения критериев прочности и пластичности	142
4.2. Классические теории прочности	147
4.2.1. Первая классическая теория прочности (критерий наибольших нормальных (главных) напряжений)	147
4.2.2. Вторая классическая теория прочности (критерий наибольших нормальных (линейных) деформаций)	150
4.2.3. Третья классическая теория прочности (критерий наибольших касательных напряжений)	152
4.2.4. Четвертая (энергетическая) теория прочности (критерий максимальной удельной энергии формоизменения)	156
4.3. Критерии прочности для материалов, неодинаково сопротивляющихся растяжению и сжатию	160
4.4. Критерии сопротивления усталости	165
4.5. Критерии сопротивления ползучести	175
4.6. Критерии макроскопического разрушения, учитывающие зависимость механических свойств среды от времени	181
Список литературы к главе 4	187

Глава 5. Линейная механика разрушения	188
5.1. Теория Гриффитса	188
5.2. Коэффициент интенсивности напряжений, трещиностойкость, ударная вязкость	203
5.3. Интегральный подход к линейной механике разрушения (теория А. Г. Иванова)	217
5.4. Методы определения сопротивления хрупкому и вязкому разрушению	235
5.4.1. Определение локальных критериев разрушения (K_{Ic} , K_{Id})	235
5.4.1.1. Статические методы определения коэффициента интенсивности напряжений (K_{Ic}) ...	235
5.4.1.2. Динамические методы определения вязкости разрушения (K_{Id})	244
5.4.2. Методы определения интегральных критериев разрушения	248
5.4.2.1. Ударная вязкость	249
5.4.2.2. Динамическая твердость	253
Список литературы к главе 5	259
Глава 6. Прочность конструкционных материалов при ударно-волновом нагружении	260
6.1. Ударные волны в твердых телах. Динамический предел текучести	260
6.2. Откольное разрушение конструкционных материалов	270
6.3. Экспериментальные методы создания импульсных растягивающих напряжений при исследовании откола ...	275
6.3.1. Нагружение образца контактным взрывом или ударником	275
6.3.2. Объемный разогрев образца импульсным излучением	280

6.4. Методы исследования откольной прочности	284
6.4.1. Экспериментально-расчетный метод оценки откольной прочности по толщине откольной пластины	285
6.4.2. Оценка откольной прочности по критической скорости соударения и образованию различной степени поврежденности материала	286
6.4.3. Непрерывная регистрация профиля скорости свободной поверхности исследуемого образца	287
6.4.4. Регистрация профиля давления на границе раздела исследуемого материала со средой, имеющей меньший динамический импеданс	292
6.4.5. Исследование откольной прочности в экспериментах с «тепловым ударом»	293
6.5. Результаты экспериментальных исследований откольной прочности конструкционных материалов	295
6.5.1. О кинетике разрушения при отколе	295
6.5.2. Технологические факторы, определяющие откольную прочность	299
6.5.3. Влияние истории нагружения на откольную прочность	307
6.5.3.1. Время нагружения	307
6.5.3.2. Начальная температура образца	313
6.5.3.3. Амплитуда ударной волны	314
6.6. Модели описания откольного разрушения	316
6.6.1. Эмпирические критерии	317
6.6.2. Энергетическая концепция	318
6.6.3. Кинетическая концепция	321
6.6.3.1. Простые кинетические модели	322
6.6.3.2. Сложные кинетические модели	325
6.6.3.3. Микромеханическая (микростатистическая) кинетическая модель	326

6.6.3.4. Подходы к описанию поврежденной среды	331
6.6.3.5. Применение микростатистической кинетической модели к описанию результатов исследований откольного разрушения	332
Список литературы к главе 6	337

Пример адекватного описания экспериментально регистрируемой зависимости скорости свободной поверхности от времени с помощью микростатистической кинетической модели в сравнении с другими моделями приведен на рис. 6.22.

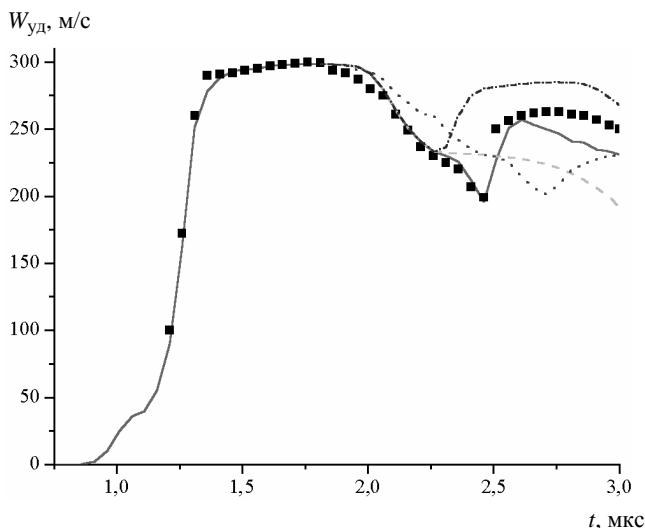


Рис. 6.22. Зависимость скорости свободной поверхности образца из арможелеза: ■ – эксперимент ($\Delta_{\text{уд}} = 0,3$ см, $\Delta_{\text{м}} = 0,6$ см, $W_{\text{уд}} = 304$ м/с). Расчет по моделям: — – микромеханической кинетической; ---- – Тулера-Бучера; – Ахмадеева; -.-.- – Канеля [15]

В описываемом эксперименте скорость свободной поверхности плоскости-мишени при торможении на ней ударника из одноименного материала регистрировалась с помощью лазерного интерферометра. Из рис. 6.22 следует, что расчет с представленной выше кинетической моделью адекватно воспроизводит амплитудно-временные характеристики экспериментальной зависимости $W(t)$, такие как время выхода откольного импульса, наклон кривой между первым минимумом и вторым максимумом, амплитуда второго максимума и т. д.

Результаты многочисленных экспериментов, в которых проводился металлофизический анализ сохраненных образцов, показывают, что обычно поврежденность локализуется в достаточно узкой зоне внутри образца. При этом поврежденность малого уровня наблюдается также по всей толщине образца. В качестве иллюстрации этого эффекта на рис. 6.23 приведено сравнение экспериментального и расчетного распределений поврежденности ω по толщине медного образца (нагружение – слева). Расчетное распределение ω получено путем прямого моделирования условий эксперимента – соударение двух медных пластин – и определения объемной доли пор $\omega = V_T / V$. Из рисунка следует хорошее согласие расчета с экспериментом.

Микростатистическая кинетическая модель также хорошо описывает экспериментально зарегистрированную закономерность процесса откольного разрушения – масштабный эффект. Если на

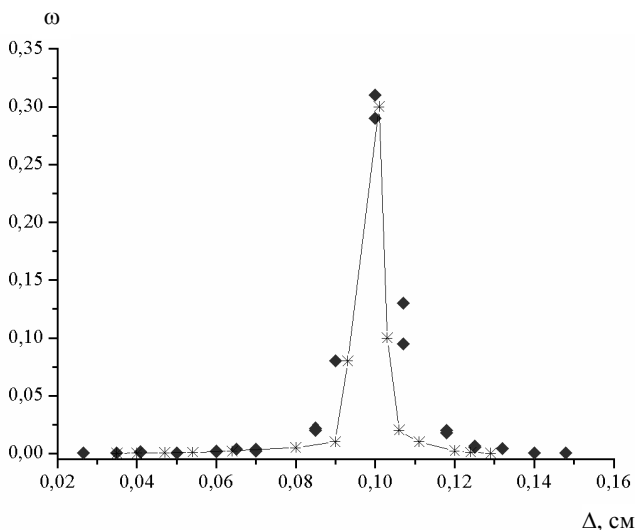


Рис. 6.23. Распределение поврежденности ω по толщине образца: + – расчет; ♦ – эксперимент (ударник и мишень – медь); $\Delta_{\text{уд}} = 0,06$ см, $\Delta_{\text{м}} = 0,16$ см, $W_{\text{уд}} = 160$ м/с [15]

рис. 6.24 провести прямую $\omega^* = \text{const}$, то можно заметить, что для получения одного и того же уровня поврежденности ω^* при уменьшении масштаба системы (в данном случае – толщины ударника и мишени) необходима бóльшая скорость движения ударника, т. е. бóльшая амплитуда вводимой ударной волны σ_H .

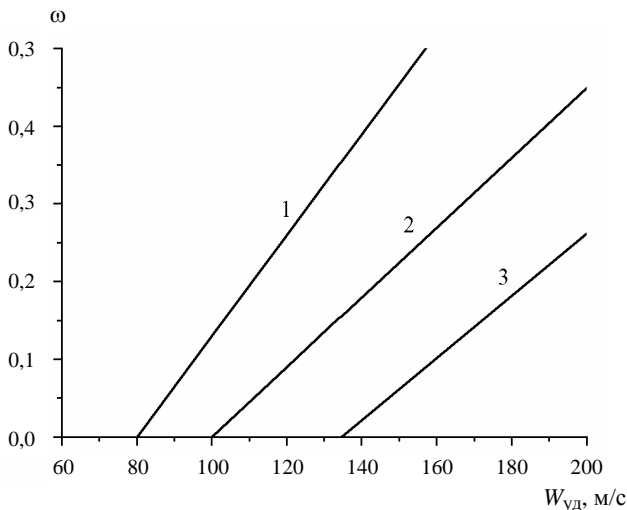


Рис. 6.24. Масштабный эффект в уране (расчет): 1 – $\Delta_{\text{уд}} = 3$ мм, $\Delta_{\text{м}} = 6$ мм; 2 – $\Delta_{\text{уд}} = 1,5$ мм, $\Delta_{\text{м}} = 3$ мм; 3 – $\Delta_{\text{уд}} = 0,75$ мм, $\Delta_{\text{м}} = 1,5$ мм (ударник и мишень – уран) [15]

Таким образом, показано, что кинетическая концепция откольного разрушения, основанная на непрерывности процесса разрушения, который происходит путем накопления повреждений, имеет ряд преимуществ по сравнению с упрощенным подходом, основанным на классических теориях прочности.

Численное моделирование экспериментов с различными конструкционными металлами показало, что микростатистическая с внутренними параметрами кинетическая модель наилучшим образом описывает экспериментально выявленные особенности и закономерности откольного разрушения.

Эта модель также нуждается в дальнейшем развитии и совершенствовании. В частности, можно выделить следующие задачи:

- построение определяющего уравнения поврежденной среды;
- определение влияния температурного фактора и вязкости.

Кинетическая модель не отрицает возможности развития моделей на основе энергетической концепции.

Список литературы к главе 6

1. Рейнхарт Д., Пирсон Д. Поведение металлов при интенсивных нагрузках. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1958.
2. Баум Ф. А., Орленко Л. П., Станюкович К. П. и др. Физика взрыва. М.: Наука, 1975.
3. Разрушение разномасштабных объектов при взрыве / Под ред. А. Г. Иванова. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2001.
4. Прочность и ударные волны / Под ред. С. А. Новикова. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 1996.
5. Зукас Дж. С., Николас Т., Свифт Х. Ф. и др. Динамика удара. М.: Мир, 1985.
6. Глушак Б. Л., Новиков С. А., Рузанов А. И., Садырин А. И. Разрушение деформируемых сред при импульсных нагрузках. Нижний Новгород: Изд-во НГУ, 1992.
7. Бонюшкин Е. К., Завада Н. И., Новиков С. А., Учаев А. Я. Кинетика динамического разрушения металлов в режиме импульсного объемного разогрева. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 1998.
8. Глушак Б. Л., Куропатенко В. Ф., Новиков С. А. Исследование прочности материалов при динамических нагрузках. Новосибирск: Наука, 1992.
9. Методы исследования свойств материалов при интенсивных динамических нагрузках / Под ред. М. В. Жерноклетова. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2003.
10. Канель Г. И., Разоренов С. В., Уткин А. В., Фортов В. Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. М.: Янус-К, 1996.

11. Степанов Г. В. Упругопластическое деформирование металлов под действием импульсных нагрузок. Киев: Наукова думка, 1979.

12. Полухин П. П., Горечнин С. С., Воронцов В. К. Физические основы пластической деформации. М.: Металлургия, 1982.

13. Регель В. Р., Слуцкер А. П., Томашевский Э. И. Кинетическая теория прочности твердых тел. М.: Наука, 1974.

14. Новиков С. А. Полезные взрывы. Труды ученых ядерных центров России. № 8. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2000.

15. Глушак Б. Л., Трунин И. Р., Новиков С. А., Рузанов А. И. Численное моделирование откольного разрушения металлов // Фракталы в прикладной физике / Под ред. А. Е. Дубинова. Арзамас-16: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 1995. С. 59–122.

Учебное издание

**Огородников Владимир Александрович,
Пушков Виктор Алексеевич,
Тюпанова Ольга Александровна**

**ОСНОВЫ ФИЗИКИ ПРОЧНОСТИ
И МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ**

Редактор *Л. В. Мазан*

Компьютерная подготовка оригинала-макета *В. М. Князькова*

Подписано в печать 25.10.2007. Формат 60×84/16

Печать офсетная. Усл. печ. л. ~ 20

Уч. изд. л. 17

Тираж 150 экз. Зак. тип. 1254-2007

Отпечатано в Издательско-полиграфическом комплексе
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»
607190, г. Саров Нижегородской обл.