

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИСиС»

М.А. Штремель

РАЗРУШЕНИЕ

Книга 1. Разрушение материала

Монография



Москва 2014

УДК 539.4:620.1

Ш93

Рецензент

зав. кафедрой физических проблем материаловедения Национального исследовательского ядерного университета МИФИ, заслуженный деятель науки и техники России,
д-р физ.-мат наук, проф. *Б.А. Кашин*

Штремель М.А.

Ш93 Разрушение. В 2 кн. Кн. 1. Разрушение материала : моногр. /
М.А. Штремель. – М. : Изд. Дом МИСиС, 2014. – 670 с.
ISBN 978-5-87623-763-7

Междисциплинарная монография «Разрушение» рассматривает разрушение сплавов, композитов, керамики, наноматериалов, покрытий как единую область физики прочности.

Монография издается в двух книгах. В книге 1 «Разрушение материала» рассмотрены макроскопические явления (с кратким изложением принципов механики разрушения и структурной мезомеханики), возможности методов испытаний материалов и наблюдения процессов разрушения в разнообразных условиях работы.

В книге 2 «Разрушение структур» дан систематический анализ явлений хрупкого и вязкого разрушения микроструктур, усталости и деградации во взаимодействиях со средой как основа для многокритериальной оптимизации материалов разных классов.

Как и в предыдущих книгах курса физики прочности («Дефекты решетки», МИСиС, 1999 и «Деформация», МИСиС, 1997) изложение идет «от начала», на базе только стандартных курсов технического вуза. Для первоначального изучения даны задачи, для практической деятельности приведена критически отобранная библиография.

Книга предназначена для специалистов по разработке и применению сплавов и композитов и по физике твердого тела, а также для подготовки в магистратуре по специальностям «Маталловедение и термическая обработка», «Физика металлов», направлениям «Материаловедение», «Физика», «Наноматериалы».

УДК 539.4:620.1

Издано при участии:

**Трубной металлургической
компании**



Трубная
Металлургическая
Компания

**АО «Трубные инновационные
технологии»**



Концерна ТВЭЛ



ТВЭЛ

СОЗДАЕМ БУДУЩЕЕ СЕГОДНЯ

ISBN 978-5-87623-763-7

© М.А. Штремель, 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	11
Введение.....	14
Глава 1. Макромеханика разрушения.....	20
§1.1. Концентраторы напряжений.....	20
Напряжения в однородной сплошной среде.	
Плосконапряженное и плоскодеформированное состояние.	
Главные напряжения. Концентрация напряжений. Сферическая полость под гидростатическим давлением. Сферическая полость при одноосном растяжении. Цилиндрическое отверстие. Эллиптическая прорезь. Произвольная прорезь.	
Глубокие вырезы. Сингулярные концентраторы. Коэффициент интенсивности напряжений. Порядок особенности.	
Конформное отображение полей. Уступ поверхности	
§1.2. Повреждения при больших деформациях.....	40
Модели среды. Инварианты в законах течения. Октаэдрическое напряжение. Поле скоростей течения. Принцип максимума.	
Инварианты деформации. Течение жесткопластической среды.	
Поверхности скольжения. Геометрические линии скольжения.	
Поля линий скольжения. «Глубина проработки». Пластический шарнир. «Ротационная мода». «Турбулентность пластического течения». Разрыхление материала. Разрыхление и уплотнение сдвигом. Деформация пористой среды до разрушения.	
Показатель напряженного состояния. Повреждаемость при больших деформациях. Неаддитивность повреждений.	
Дробление пор сдвигом. Управление повреждаемостью.	
Простой сдвиг. Разрушение при РКУ. Процессы с большим сдвигом. Залечивание пор. Компактирование	
§1.3. Разрушение от локализации пластического течения.....	66
Локализация пластической деформации. Стандартные характеристики прочности. Характеристики пластичности при растяжении. Равномерная деформация. Истинная диаграмма. Аппроксимации диаграммы деформации.	
Неустойчивость при одноосном растяжении. Показатель упрочнения. Оценка показателя упрочнения. Разупрочнение в шейке. Рубка. Вырубка. Стрижка. Срез при растяжении.	
Растяжение по нормали к плоскости среза. Траектории среза	
§1.4. Трещина в упругой среде.....	80
Описание форм трещины. Типовые представления.	
Отрыв и срез. Моды разрушения. Поле трещины отрыва.	
Гидростатическое давление. Фактор интенсивности напряжений. Смена моды. Выбор направления роста трещины.	
Наложение отрыва и сдвига. Наклонная трещина. Трещина сжатия. Трещины при изгибе. Трещины при кручении	

§1.5. Геометрия трещин	100
Трещина в структуре. Масштабы для сравнения. База сравнений. Плоская трещина в неоднородном поле. Факторы интенсивности напряжений. Разложение внешнего поля. Дальнейшее действие трещины в неоднородном поле. Трещина в убывающем поле. Криволинейные траектории. Случайно извилистые траектории. Поворот трещины на «слабую» поверхность. Зигзаг трещины. Тупик для трещины. Трехмерные задачи. Эллиптическая трещина. Плоский выпуклый контур трещины. «В среднем прямая» кромка плоской трещины. Неплоская трещина. Ветвление трещины	
§1.6. Критерий роста трещины	119
Энергетический критерий разрушения. Вязкость разрушения. Обнаружимость докритической трещины в конструкции. Двупараметрические критерии надежности конструкции. Критерии среза. Трещина сдвига в хрупком материале	
§1.7. Трещина в упругопластической среде	129
Квазихрупкое разрушение. Контур пластической зоны. Пластическая зона при плоской деформации. Пластическая зона при плоском напряженном состоянии. Трещина в среде с упрочнением. Упругое и пластическое раскрытие трещины. Раскрытие у кромки и перемещение берегов. Локализованный сдвиг. Полоса сдвига как вторичный концентратор напряжений. Смена моды. «Косой срез». Откосы среза	
§1.8. Разрушение под контактом	144
Контактные напряжения. Конфигурация контактов. Точечная сила на поверхности. Пятно упругого контакта. Вдавливание шара. Контакт шаров. Работа упругого вдавливания. Поле в полупространстве. Контакт цилиндров. Сингулярный контакт. Пластическое течение под контактом. Валик выдавливания. Измерение твердости. Удельная работа вытеснения. Корреляции с диаграммой растяжения. Трещины под упругим контактом. Множественное растрескивание под контактом. Трещина от пластической зоны. «Трещины разгрузки»	
§1.9. Внутренние напряжения	166
Макроскопические внутренние напряжения. Стесненная деформация. Конфигурации включения. Концентрация напряжений от неоднородности среды. Послойная неоднородность. Пластическая аккомодация. Напряжения от текстурных компонент. Поля температур. Импульсный нагрев. Теплообмен со средой. Неоднородное поле температур. Стационарное поле температур. Термические напряжения. Термический удар. Пластическое течение от термических	

напряжений. Термопрочность. Остаточные напряжения.
 Напряжения после правки. Внутренние напряжения после
 обработки давлением. Технологические термические напряжения.
 Нетепловые источники напряжения. Закалочные напряжения.
 Закалочные трещины. Снятие остаточных напряжений.
 Замедленное разрушение. Измерение внутренних напряжений.
 Микронапряжения

Глава 2. Наблюдение и измерение разрушения	197
§2.1. Средства измерения	197
Объекты измерения. Фотография. Разрешение. Наблюдение и измерение трещины. Каустики. Измерения трещины в объеме. Карта глубин. Конфокальная съемка. Стереоскопия. Томография. Контактная микроскопия высокого разрешения. Сканирующая электронная микроскопия. Трансмиссионная электронная микроскопия. Наложение химической карты. Рентгеновская микроскопия. Ультразвуковое изображение. Акустическая микроскопия. Фотоакустическая и фототепловая микроскопия. Эллипсометрия	
§2.2. Наблюдение процесса	217
Измерение полей деформаций и напряжений. Сетка меток. Муар. Интерферометрия. Голография. Спеклы. Измерения в динамике. Стробоскопия. Термография. Тепловидение. Динамическая тепловая томография. Микроскопия трещины <i>in situ</i> . Магнитные поля. Электромагнитные шумы. Акустическая эмиссия. Задачи анализа эмиссии. Первичный сигнал. Реверберация. Измеримые процессы. Спектр эмиссии. Спектр низких частот. Триангуляция. Цепи сигналов. Агрегированный сигнал. Идентификация событий. Распределение амплитуд. Калибровки	
§2.3. Разрушение при растяжении	242
Стандартные испытания. Анализ диаграммы растяжения. Шейка в круглом образце. Напряжения в шейке. Эволюция кривизны профиля. Аппроксимации профиля шейки. Динамика шейки. Поры в шейке. Чашка. Конус. Плоский срез шейки. «Внутренняя шейка». Два пути эволюции шейки. Хрупкий излом в шейке. Шейка в монокристалле. Форма сечения образца. Растяжение листа. Неустойчивость течения ленты. Ориентировка шейки. Сужение листа. Диффузная и резкая шейка в полосе. Срез листа. Зоны в изломе листа. Изгиб при срезе	
§2.4. Схемы разрушающих испытаний	268
Назначение испытаний. Диаграмма сжатия. Неустойчивость сжатия. Трение в опорах. Хрупкость при сжатии. Дробление. Большое сжатие. Упругий изгиб. Пластический изгиб.	

Остаточные напряжения после изгиба. Остаточная кривизна. Угол загиба под нагрузкой. Угол при трехточечном изгибе. Остаточный угол загиба. Предел прочности при изгибе. Уширение при изгибе. Трещина из-под надреза. «Пластический шарнир». Меры пластичности при изгибе. Двухосное растяжение. Анизотропная пластичность. Измерения среза. Кручение. Вязкий и хрупкий излом кручения. Осевая сила. Пластичность при кручении. Локализация кручения

§2.5. Трещиностойкость296

Исходные концентраторы напряжений. Эволюция концентратора. Мера опасности концентратора. Масштабный эффект. «Сопротивление отрыву». Вязкость разрушения. Условия измеримости. Острота исходной трещины. Растяжение листа с трещиной. Толщина и напряженное состояние. Смена моды. «Косой срез». Откосы среза. Вязкость разрушения тонких листов. R-кривые устойчивого роста. Переходные процессы старта. Полноценный образец. Полноценное испытание. Критическое раскрытие. Измерения вязкости разрушения хрупких материалов. Разрушение при вдавливании. Измерение вязкости разрушения при изгибе. Стабилизация роста трещины. Трещина при общем пластическом течении. Метод податливости. J-интеграл. Моды среза. Пределы трещиностойкости. Критерии высокопрочности

§ 2.6. Ударная вязкость.....323

Устройство и метод. «Инструментированный» изгиб. Стадии разрушения ударного образца. Варианты событий. Геометрия разрушенного образца. Взаимосвязи параметров геометрии. «Доля вязкой составляющей». Составляющие работы разрушения. Острота надреза. «Разделение работ». Масштабный фактор. Локальность. ИПГ – DWTT. Корреляции с вязкостью разрушения. Обоснование выбора метода испытания

§2.7. Приемы фрактографии.....341

Задачи фрактографии. Средства наблюдения. Микроскопия рельефов. Структура под изломом. Ориентировки под изломом. Разрез через кромку. «Фрактография под поверхностью». «Вид излома» Семантический анализ. Анализ текстуры изображения. Сегментация. Измерения структур. Значимость разницы в параметре. Препарирование изображений. Нечеткие структуры. Геометрические признаки. Статистика элементов. Различение распределений. Функция распределения. Обратные задачи фрактографии. Вид решения. Достаточность информации. Поиск зависимости. Достоверность решения. Сокращение размерности задачи. Выбор модели

§2.8. Статистическая геометрия излома	368
Измерения изломов. Площадки наблюдения. Разделение зон. Достоверность отделения. «Привязка» двух рельефов. Однозначность функции. Разность микрорельефов. Инварианты траектории. Дискретное представление. Инварианты рельефа. Авгорегрессия. Распределение высот рельефа. Масштабная инвариантность. Признаки дальнего действия. Самоподобие. Фракталы. Геометрические ограничения для фрактала. Измерения фрактальной размерности. Кусочный скейлинг. Фрактальность или нестационарность? Мультифракталы. Информативность. Фрактальность изломов. Вейвлеты. Сохранение информации. Многомасштабный анализ. Размерность процесса	
Глава 3. Динамика разрушения.	397
§3.1. Система образец-машина	397
Спектр релаксации решетки. Скорости деформации. Жесткость образца и машины. Приведенная масса. Колебания системы. Автоколебания. Демонстратор автоколебаний. Автоколебательное разрушение. Устойчивость системы образец-машина. Предел устойчивости образца. Самоподдерживающееся разрушение. Скоростное плато диаграммы. Устойчивость образца с трещиной. Жесткость конструкции. Источники динамических сил. Нагружение жидкостью и газом. Нагружение взрывом. Кумулятивный эффект. Импллозия	
§3.2. Динамика трещин	424
Скорость трещины. Работа, поглощаемая трещиной. Трещина в упругой системе. Реверберация и автоколебания трещины. Кинетическая энергия трещины. Траектория трещины. Ветвление. Динамическое микроветвление. Дробление. Распределение осколков. Сплющивание. Безразмерные критерии течения. Трещины в гелях и жидкостях. Адиабатный разогрев. Время адиабатности. Неизотермическая вытяжка. Адиабатная локализация. Режим с обострением. Взрыв от нагрева изнутри. Взрыв от реакции на поверхности. Полосы адиабатного среза. Кинематика среза. Разогрев у кромки трещины. Степень адиабатности	
§3.3. Соударение	455
Упругое столкновение материальных точек. Столкновение плит. Отражение упругой волны. Пластическая волна. Ударная волна. Откол. Конкуренция структурных процессов откола. Повреждение импульсом излучения. Противодействие отколу. Косой удар. «Ротационная мода». «Точечный» удар. Кратер. Выброс. Пластическое проникание. Упругопластическое	

проникание. Нестационарное вдавливание. Глубина проникания. Сопроотивление трения. Проникание с растрескиванием. Раскол канала. Имплантация частиц. Сверхглубокое проникание частиц. Моды скоростного проникания. Гидродинамическое проникание. Разогрев, плавление, испарение. Смена процессов динамического проникания. Соударения с космической скоростью. Пробивание. Воздействие на ударник. Упругая податливость преграды. Сила и глубина динамического прогиба. Равнопрочная гомогенная преграда. Неоднородные преграды. Композитная преграда. Динамический радиус преграды

Глава 4. Мезомеханика разрушения	502
§4.1. Взаимодействие трещин	502
Трещина в среде со структурой. Макро- и микротрещины. Взаимодействие трещин в плоскости. Взаимодействия двух параллельных трещин. Сценарии роста двух равных трещин. Неравные трещины. Экранирование. Разрушение перемычки. Структуривные барьеры. Трещина в трех измерениях. Трехмерные системы трещин	
§4.2. Многовязные трещины	514
Мосты. Равномерный «пунктир мостов». Эффективность мостов. Безопасный кластер трещин. Общая задача о мостах. Равновесие трещина – мосты. Хрупкие мосты. Условие старта. Свободная длина моста. Вытаскивание волокон. Вязкие мосты. Классы эффективности. Мосты расслоя. Направления оптимизации	
§4.3. Самоорганизация	534
Масштабы процессов. Структурные уровни. Флуктуации деформации. Анизотропия флуктуаций. Неустойчивость в мезомасштабах. Самоорганизация трещин. Сложные системы. Критические явления. Разрушение как критическое явление. Имитационное моделирование. Пучок волокон. Перколяция. Сетка упругих связей. Ренормгруппы. Вырождение размерности. Самоподобие и безмасштабность. Многомасштабность и структурные уровни. Самоорганизованная критичность. Траектории трещины. Депиннинг. Интерпретации скейлинга. Интегральное описание системы трещин. Критерий слияния пары трещин. Площадь тени. Условие неподвижности трещины. Условие устойчивости системы. Предел устойчивости системы многих трещин. Модуль упругости трещиноватой среды. Взрывное саморастрескивание. Самоподдерживающееся разрушение. Выбросы. Полоса саморастрескивания. Хрупкий срез. Прочность сыпучей среды. Полосы сдвига. Трещина в текучей двухфазной среде	

§4.4. Низкоразмерные мезообъекты	574
Фактор размерности. Дискретный спектр прочности. Упругая потеря устойчивости. Гибкие стержни при закритической упругости. Упругое сжатие кольца. Неустойчивости кручения. Трубы и оболочки под давлением. Растяжение трубки. Трубка из анизотропного материала. Конкуренция растяжения – сжатия и изгиба. Изгибаемые поверхности. Сморщивание. Фокус. Складки. Оболочки двойкой кривизны. Сферическая оболочка. Устойчивость оболочек. Неустойчивость при локальной пластичности. Неустойчивости плоской трещины. Автоколебания рельефа и траектории. Раздир. Бегущая трещина в трубе. Прокол	
§4.5. Разрушение поверхности	600
Поверхностные силы. Силы растрескивания. Конфигурации поверхностных трещин. Взаимодействие поверхностных трещин. Пределы растрескивания. Сетка трещин. Иерархическое растрескивание. Контактное растрескивание. Покрытия. Сцепление. Внутренние напряжения. Моды разрушения покрытия. Скол в покрытии. Переход скола в отслой. Отслой при изгибе. Отслой от сжатия. Защита поверхности. Мягкие покрытия. Измерения прочности покрытий	
Задачи	627
Библиографический список	636