

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

М.А. Штремель

РАЗРУШЕНИЕ

Книга 2. Разрушение структур

Монография



Москва 2015

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. Калин*

Штремель М.А.

Ш93 Разрушение. В 2 кн. Кн. 2. Разрушение структур : моногр. /
М.А. Штремель. – М. : Изд. Дом МИСиС, 2015. – 976 с.

ISBN 978-5-87623-763-7

Междисциплинарная монография «Разрушение» рассматривает разрушение сплавов, композитов, керамики, наноматериалов, покрытий как единую область физики прочности. Цель ее – свертка информации о разрушении для материалововеда: практически необходимой, непротиворечивой и «состыкованной» со смежными областями знания.

Монография издается в двух книгах. Книга 2 «Разрушение структур» описывает хрупкое и вязкое разрушение микроструктур, явления усталости и деградации во взаимодействиях со средой. Макроскопические явления, методы испытания материалов и наблюдения процессов разрушения рассмотрены в книге 1 «Разрушение материала» (ее краткое оглавление также приведено здесь).

Модульное построение, подробная рубрикация, предметный указатель и система внутренних ссылок позволяют читать отдельные параграфы книг 1 и 2 независимо – для решения практических задач разработки, оптимизации и применения сплавов и композитов. Приведена библиография критически отобранных работ, использованных автором.

Книга создана на базе курсов, прочитанных в разное время автором в Московском институте стали и сплавов – для подготовки инженеров, магистров и аспирантов по специальностям «Физика металлов», «Металловедение и термическая обработка», направлениям «Материаловедение», «Физика», «Наноматериалы». 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. Поэтому книга может использоваться и для первоначальной подготовки специалистов (для чего приводятся также задачи).

УДК 539.4:620.1

Издано при участии:

**Трубной металлургической
компании**



**АО «Трубные инновационные
технологии»**



Концерн ТВЭЛ



ISBN 978-5-87623-763-7

© М.А. Штремель, 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

Глава 5. Макрокомпозиции	13
§5.1. Вязкость при сочетании хрупких компонентов	13
Критерии хрупкости в масштабах конструкции. Показатель вязкости материала. Различие структурных механизмов. Эффекты сочетания. Равноосные включения. Отслой включений. Обход включений. Ветвление трещины. Множественное растрескивание. Статистика очагов. Зона предразрушения. Трещина сжатия. Размерность композитов. Многомасштабность разрушения. Структурные резервы вязкости	
§5.2. Хрупкие кристаллы	28
Керамика. Камень. Лед. Кристаллический углерод. Поликристаллический графит. Двумерный углерод – фуллерены, нанотрубки, графен. Углеродные волокна	
§5.3. Некристаллические материалы	43
Скол аморфных материалов. Стекло. Ситаллы. Аморфные металлические сплавы. Аморфно-кристаллические структуры. Аморфный углерод. Полимеры. Макромолекула полимера. Сетки связей. Течение полимеров. Хрупкость аморфных полимеров. Крейзы. Кристаллические полимеры. Модули упругости. Одноосное растяжение полимера. Предел вытяжки. Энтропийная упругость. Вязкоупругость. Ползучесть и релаксация напряжений. Диаграмма растяжения. Шейка. Порообразование. Упругое сжатие. Масштабная иерархия. Белковые волокна. Разрыв пленки. Эластомеры	
§5.4. Композиции из волокон	83
Крученая нитка. Канат. Ткань. Войлок. Вата. Сочетания волокно – матрица. Удельная прочность. Непрерывные волокна. Сцепление и отслой волокон. Технологическая неоднородность. Деградация. Критическое звено. Диаграммы разрушения. Короткие волокна. Неподвижная зона. Выбор композиции. Композиции углерод – углерод. Нановолокно. Композиты <i>in situ</i>	
§5.5. Слоистые композиции	108
Анизотропные включения. Слоистые материалы. Ламинаты. Склейки. Сопrotивление разрыву с расслоем. Самоорганизация расслоев в изломе. Расслой при изгибе. Жесткость при расслоях. Межслоевое трение. Краевой расслой. Расщепление. Расслой при осевом сжатии. Сложность архитектуры. Многоуровневая анизотропия древесины. Теплозащитные покрытия. Функционально градиентные материалы	

§5.6. Архитектура композиций	128
Топологическая вязкость. Трещина при слабой пористости.	
Открытая пористость. Соты. Хрупкие соты. Вязкие соты. Пена.	
Технологическая неоднородность. Сэндвич. Полые сферы.	
Эффективность микросфер. Искусство комбинирования.	
Имитация биокompозитов. Микроканальные структуры.	
Проницаемые мембраны. Двупроточные структуры. Жидкость и газ в каналах	
Глава 6. Возникновение трещины	148
§6.1. Трещина в атомных масштабах	148
Структурная механика разрушения. Минимальная работа разрушения. «Абсолютно хрупкий излом». «Теоретическая прочность». Минимальный размер и раскрытие трещины. Зона событий. Пластическая зона. Радиус разгрузки. Необратимость скола. Процесс среза. Суперпозиция среза и отрыва	
§6.2. Масштабы деформации	161
Неоднородность деформаций. Условия образования линии скольжения. «Решеточное трение». Сила Пайерлса. Силы изображения. Источник под свободной поверхностью. «Мягкий подповерхностный слой». Концентрация напряжений от линии скольжения. Полосы скольжения. Макроскопическая полоса деформации. Обострение концентратора под надрезом. Течение у кромки трещины. Приемлемость макроскопической диаграммы деформации	
§6.3. Зарождение трещин	173
«Беззародышевая» трещина. Наименьшая трещина. Зарождение трещины вследствие пластической деформации. Конкуренция скольжения и скола. Барьеры в дислокационной структуре. Двойники. Столкновение двойников. Субграницы. «Непластические» концентраторы. Термические напряжения в поликристалле. «Наведенная сингулярность». Острота концентраторов. Условие сингулярности концентратора. Пластическая релаксация микротрещины. Испускание дислокации трещиной. Уступы на поверхности. Трещина в малом включении. Трещина в матрице от включения. Трещина в пограничной пленке. Соприкосновение трещин «в точке»	
Глава 7. Процессы хрупкого разрушения	198
§7.1. Скол	198
Цепи событий. Скол кристаллов. Кристаллография скола. Интерметаллиды. Скол в ГЦК сплавах. Зарождение скола. Достижение напряжения скола. Масштабы и работа скола. Остановка трещин. Пластическая зона трещины. Испускание дислокаций. Аккомодация двойникованием. Речной узор. Диссипативная структура скола	

§7.2. Скол в структурах	216
Переход скола через границу зерна. Геометрия поверхности скола поликристалла. Размеры зерна и фасетки скола. Среднеквадратичный наклон траектории. Дальность взаимовлияния фасеток. Дерево фасеток. Зернограничный клин. Текстура. Мезотекстура. «Возвратный скол». Вязкие мосты. «Вязкий скол». Скол в пластической зоне макротрещины. Критическая величина зерна. Зарождение скола из второй фазы. Скол равноосного включения. Скол в среде с включениями. Трещиноватые структуры. Скол в двухфазных структурах. Пластинчатые структуры	
§7.3. Квазискол	237
«Неявный скол». Скол после пластической деформации. Прочные структуры низкоуглеродистой стали. Системы границ пакетов и границ рек. Квазискол углеродистого мартенсита. Вязкость мартенсита после отпуска. Многомерная оптимизация мартенситной стали. Остаточный аустенит. Ревертированный аустенит. Деформационное старение мартенсита. Морфология бейнита в сравнении с мартенситом. Низкоуглеродистый бейнит и игольчатый феррит. Верхний и нижний бейнит. Бейнитная хрупкость. Бейнит на фоне мартенсита	
§7.4. Зернограничное разрушение	258
Сингулярные концентраторы в двухфазной структуре. Сингулярность от теплового расширения поликристалла. Сингулярность под нагрузкой. «Слабые» границы. Зарождение разрушения. Рост фасетки. Распространение при неравнопрочных границах. Избирательность распространения. Острова и мосты. «Стартовые условия». Структурное охрупчивание. Прогноз риска. Смешанные изломы. Величина зерна. Нанокристаллы. Измерения зернограничного излома. Сопряжение фасеток. Топология зернограничного излома. Способы упаковки зерен. Выступы и впадины излома. Размеры фасеток. Наклоны траектории	
§7.5. Хрупкость границ	278
Прочность границ в соединениях. Сегрегация примеси на границах. Измерение сегрегаций. Кинетика сегрегации. Сверхравновесная сегрегация. «Горофильные примеси». Охрупчивающие примеси. Фосфор в стали. Взаимодействия примесей. Бор в границах. Кислородная хрупкость границ. Зернограничная пористость	
§7.6. Отпускная хрупкость	295
Хрупкость «исходного» мартенсита. Квазискол и зернограничный излом. Необратимая отпускная хрупкость. Состояние границ при необратимой хрупкости. Обратимая отпускная хрупкость. Противодействие зернограничной сегрегации	

Глава 8. Вязкое разрушение	308
§8.1. Процессы вязкого разрушения	308
Зарождение отрыва и среза. Множественное зарождение. Скол включения. Обстоятельства скола. Отслой включений. Рост пор. Слияние пор. Присоединение пор к макротрещине. Кинематика слияния двух пор. Глубина ямки. Цепь слияний. Вторичные ямки. «Слой пустот». Статистика ямок. Моды вязкого излома. Слой среза. Масштабные эффекты. Тепловые эффекты	
§8.2. Рост вязкой трещины	327
Стационарный рост. Вязкая трещина. Раскрытие трещины в материале с упрочнением. Распространение трещины в пористой среде. Рост трещины по мере разрушения включений. Условие разрушения частицы. Размеры разрушаемых частиц. «Рабочий слой» пор. Включения, определяющие вязкость разрушения. Две популяции включений. Сильно разноразмерные включения. События старта. Пределы полезности очистки. Вязкоупругая трещина	
§8.3. Очаги в микроструктуре	338
Неметаллические включения. Происхождение включений. Размерные классы равноосных включений. Включения, критические при разрушении. Четвертичные включения. Превращения включений. Измерения включений. Отбор факторов. Включения в изломе. Балльные шкалы включений. Распределение размеров включений. Размеры включений в пространстве. Мультифрактальные представления. Деформируемость включений. Ветвистые включения. Глобуляризация включений. Измерения формы включений. Индексы. Строчечность включений	
§8.4. Вязкость двухфазных структур	360
Равноосные частицы в вязкой матрице. Крупные хрупкие включения. Хрупкие зерна в вязкой связке. Сплошность связки. Зернистый перлит и сорбит отпуска. Мода нагружения. Отслой пластинок в эвтектиках. Пластичность чугунов. Сферические включения. «Черный излом». Работа «черного излома». Пакет пластин. Колонии перлита. Разрушение от границы зерен двух вязких фаз. Смешанный излом. Вязкие зерна в хрупкой матрице. Мягкие пятна. Морфология зерен. Дуаль-структуры. Превращение при деформации. Превращения в поле трещины. Большие деформации одноосных структур. Идентификация контролирующих факторов	

§8.5. Приграничное разрушение	389
Избирательное приграничное разрушение. Хрупкие зернограничные сетки. Зернограничные частицы. Двумерные дендриты. Вязкий зернограничный излом. Мягкая приграничная каемка. Зернограничные частицы и сегрегации. Примеси и включения на подвижных границах. Перегрев и пережог. Сварочные и шлифовочные трещины. Камневидный излом. Краснеломкость. Горячеломкость металлов	
§8.6. Неоднородность структур	406
Зональная ликвация. Кристаллизационные трещины. Хрупкость слитка. Дендритная ликвация. Дендриты и включения. Дендриты после деформации. Структурная полосчатость. Карбидная строчность. Макронеоднородность полей включений. Нормирование макроструктуры. Меры мезонеоднородности. Меры макронеоднородности	
§8.7. Анизотропия пластичности и вязкости	418
Сложнонаправленные нагрузки. Анизотропия пластического течения. Анизотропия пластичности. Осевой расстрой. Измерения анизотропии пластичности. Трещина поперек слоев. Продольный расстрой при растяжении. Радиальный расстрой. Наведенная анизотропия. Шиферность. Террасный излом. Анизотропия вязкости разрушения. Анизотропия ударной вязкости. Полезная анизотропия и симуляция вязкости. Анизотропия как последствие упрочнения. Усиление анизотропии гидростатическими напряжениями. Включения как фактор анизотропной вязкости. Структурная полосчатость. Кристаллографическая текстура. Полосы зернограничной хрупкости. Технологические факторы анизотропной вязкости. Слоистые сварочные трещины. Расстрой биметалла	
Глава 9. Хрупкость в эксплуатации	449
§9.1. Хладноломкость	449
«Энергия активации разрушения». Область низкотемпературной деформации. Спад пластичности с охлаждением. Работа деформации. Переход от вязкого разрушения к хрупкому. Стадии перехода. «Пороги хладноломкости». «Серийные кривые» ударной вязкости. «Серийные кривые» вязкости разрушения. Интервал перехода. Меры хладноломкости. Достоверность информации. Уравнение серийной кривой. Значимость различий. Критические температуры. Фрактографические критерии. «Натурные испытания». Испытание хрупких материалов. Обоснование критериев	

§9.2. Хладноломкость структур	478
<p>Очаги скола. Величина зерна. Зернограничные включения. Предшествующая деформация. Примеси внедрения. Деформационное и закалочное старение. Синеломкость. Устранение примесей внедрения. «Внутренние геттеры». Легирование ОЦК раствора. ГЦК металлы. Аустенитные стали. Гексагональные металлы. Поликристалл из зерен двух структурных составляющих. Острова. Структуры из частиц в матрице. Мартенсит. Мартенсит-аустенитные структуры. Бейнит. Бейнит-аустенитные структуры. Анизотропия хладноломкости. Зернограничная хладноломкость. Пути воздействия на хладноломкость</p>	
§9.3. Водородная хрупкость	509
<p>Растворимость водорода. Атомарный водород. Электролиз воды. Технологический водород. Сток в поры. Рост пор. Раствор в металле под напряжением. Подвижность. Местная интенсификация скольжения. Проницаемость поверхности. «Свободный» и «связанный» водород. Виды водородной хрупкости. Зарождение пор. Блистеры. Вскрытие границ. Флокены. «Внутренний» водород в вязком разрушении. Границы «обратимой водородной хрупкости». Вязкость разрушения. Замедленное разрушение. Трещины травления и гальваники. Холодные сварочные трещины. Гидридная хрупкость. Замедленное гидридное растрескивание. Саморастрескивание гидридов</p>	
§9.4. Разрушение при ползучести	550
<p>Температура и ресурс. Ускорение ползучести. Деградация. Порообразование. Миграция границ. Сегрегация примеси. Клиновая трещина ползучести. Карта механизмов разрушения. Монокристаллы. Многомасштабность. Структурные превращения. Тепловая хрупкость. Местное деформационное старение. Электропластичность. Электродеградация. Разрушение при сверхпластичности. Быстрая сверхпластичность</p>	
§9.5. Радиационное охрупчивание	578
<p>Энергонапряженность ядерного топлива. Растрескивание при тепловыделении. Радиационное повреждение. Повреждения поверхности. Распухание. Радиационная ползучесть. Обратимое радиационное охрупчивание. Кластеры. Старение. Критерии охрупчивания. Реставрация. Необратимое радиационное охрупчивание</p>	

Глава 10. Участие среды в разрушении	591
§10.1. Поверхностные силы. Адсорбция	591
Связи на поверхности. Реконструкция. Уступы. Тепловые колебания. Энергия поверхности. Энтропия поверхности. Шероховатость. Движения на поверхности. Адсорбция на ювенильной поверхности. Многослойная адсорбция. Прочность адсорбции. Наблюдения адсорбции. Кинетика адсорбции. Адсорбция воды и воздуха. Адсорбционное зарождение трещины. Давление стеснения адсорбции. Адсорбционный рост трещины. «Адсорбционное смягчение». Адсорбционное охрупчивание. Фрактоэмиссия	
§10.2. Взаимодействия с газом	609
Оксидная пленка. Наблюдаемость пленок. Скол и отслоя пленок. Окалина. Очаги разрушения. Жаростойкость окислыны. Избирательное окисление. Компоненты окислыны. Взаимодействия со средой при ползучести. Защитные покрытия. Рост чугуна. Газ от твердотельной реакции. Давление твердого заполнителя. Шаг трещины. Непрерывный рост. «Окислительный рост трещины». Течения в трещине. Массоперенос в трещине. Деформация в водороде. Водородная коррозия. Зернограничное водородное растрескивание. Горение металла. Абляция. Теплозащита. Лучевое резание. Абляция в электрическом разряде. Электрическая эрозия	
§10.3. Взаимодействия с жидкостью	641
Капиллярные силы. Смачивание. Капиллярная конденсация. Статическая усталость. Потоки в капиллярах. Расклинивающее давление жидкости. Жидкометаллическая хрупкость. Температуры охрупчивания. Проникновение расплава. Сопутствующая деформация. Хрупкость при деформации в расплаве. Повреждение металлыческим расплавом. Твердометаллыческая хрупкость. Коррозия в расплавах. Поверхностно активные вещества. Давление под контактом. Кавитация. Удар капли. Кавитационная эрозия	
§10.4. Деградация в электролитах	666
Разрушение при реакциях металла с жидкостью. Окисление водой. Атмосферная коррозия. Ржавчина. Мера концентрации раствора. Электродные потенциалы. Электроперенос ионов. Электрохимическая коррозия. Поляризация. Двойной электрический слой. Электрохимическая поляризация. Концентрационная поляризация. Пассивация. Деполяризация. Депассиваторы. Измерения поляризации. Химическая конденсация. Баланс вещества. Потоки вещества. Питтинг. Разномасштабность электродов. Межкристаллытная коррозия. Расслаивающая коррозия. Травление поверхности. Большие перенапряжения. Перенос в проточной среде. Щелевая и застойная коррозия. Контактная коррозия. Коррозия в расплавах солей	

§10.5. Коррозионные трещины.....701

Отличия коррозии под напряжением. Циклы продвижения трещины. Окислительный рост трещины в электролите. Электрохимия трещины. Охрупчивание водородом из водных растворов. Коррозионное растрескивание под напряжением. Водородное зернограничное растрескивание. Образование гидридов. Гидридное растрескивание. Водородный квазискол. Транскристаллитные трещины коррозии. Измерения коррозионного разрушения. Порог коррозионного растрескивания. Среда испытания. Необходимые условия коррозионного растрескивания. Внешние факторы. Растрескивание от внутренних напряжений. Структурные факторы. Скорость роста трещины. Ветвление трещин. Иодидное растрескивание. Растрав. Диагностика коррозионного разрушения. Стресс-коррозия. Сероводородное растрескивание. Система реакций. Защита конструкции

§10.6. Взаимодействия твердых тел.....737

Многообразии взаимодействий. Резание. Стружка. Разогрев. Резание абразивом. Процессы износа. Темп износа. Стационарный рельеф. Износ в паре трения. Полезность упрочнения поверхности. Абразивный износ. Эрозия. Термоэрозия. Коррозионная эрозия. Окислительный износ. Полировка. Адгезионный износ. Факторы адгезии. Схватывание при трении. Схватывание при макродеформации. Тепловой износ. Износ режущего инструмента. Стойкость инструмента. Обрабатываемость резанием. Фрикционные материалы. «Белые пятна». Карта процессов износа. Пары граничного трения. Пара жидкостного трения. Приработка. «Безыносное трение». Водородный износ. Инженерия поверхности

Глава 11. Усталость.....782

§11.1. Разрушение при циклической деформации782

Циклическое нагружение конструкций. Многофакторность задачи. Асимметрия цикла. Малоцикловая усталость. Циклическое упрочнение-разупрочнение. «Накопление повреждения». Единство процесса. Темп роста трещины. Самоподобие. Границы скейлинга. Смена моды. Влияние асимметрии цикла на темп роста. «Циклическая вязкость разрушения». «Порог усталости». Долговечность. Живучесть. Диаграмма усталости. «Предел усталости». Достоверность прогнозов. Профиль цикла. Жесткость нагружения. Измерения усталости. Измерения роста трещины. Контур трещины. Очаг и фокус. Закрытие трещины. Разогрев при усталости

§11.2. Структурные процессы усталости	815
<p>Циклы деформации у поверхности. Поднятия и провалы. Слияния до появления трещины. Переход к стационарному росту. Микрорельеф излома усталости. Стадия III – ускорение. Зернограничный излом. Скачки распространения. Структурные факторы усталости. «Стареющие сплавы». Отпуск мартенсита. Деформационное старение. Зерна двух фаз. Форма зерен. Размер включений. Одноосные структуры. Усталость композитов. Фазовые превращения в процессе усталости. Внутреннее зарождение. Гигацикловая усталость</p>	
§11.3. Контактная усталость	841
<p>Поле контакта. Контактная усталость. Стадии контактной усталости. Очаги контактной усталости. Фазовые превращения в гигациклах. Измерения контактной усталости. Шероховатость поверхности. Усталость под микрорельефом. Структура под поверхностью резания. Шлифованная поверхность. Электрохимическая обработка. Поверхностное упрочнение. Поверхностная деформация. Управление остаточными напряжениями. Эффективность «модифицирования поверхности». Ударноциклическая усталость. Усталость режущей кромки. Фреттинг</p>	
§11.4. Факторы усталости конструкции	867
<p>Циклы нагружения. Двухчастотный режим. «Нерасчетные вибрации». Термическая усталость. Разгар. Коррозионная усталость. Усталость во влажных газах. Структурные факторы коррозионной усталости. Влияние частоты. Остаточные напряжения. Конструктивные концентраторы. Технологические концентраторы. Неразвивающиеся трещины. Суммирование повреждений. Достоверность констант. Цель испытаний. Принципы проектирования. Показатели надежности. Обеспечение надежности. Нарращивание ресурса. Синтез решений</p>	
Задачи	899
Библиографический список	908
Предметный указатель.....	960