

Раздел 10 Разрушение материалов

Тема 1 Разрушение материалов (2 часа)

План лекции

1. Виды разрушения.
2. Схемы разрушения.
3. Отрыв.
4. Срез.
5. Стадии хрупкого и вязкого разрушения.
6. Механика разрушения.
7. Теория Гриффитса.

Классификация видов разрушения

Всякий процесс деформации по достижении достаточно высоких напряжений заканчивается разрушением. Процесс разрушения начинается с образования трещин субмикроскопических размеров и заканчивается макроскопическим разделением образца на отдельные части. Ряд важнейших механических свойств металлов и сплавов характеризует их сопротивление разрушению, величину или работу деформации до разрушения.

Мы уже отмечали три вида напряжений: сжимающие (отрицательные нормальные), растягивающие (положительные нормальные) и касательные. Сжимающие напряжения сами по себе не могут вызвать разрушения. Оно происходит под действием растягивающих или касательных напряжений. В макроспических теориях прочности различают два вида разрушения: 1) отрыв в результате действия растягивающих напряжений и 2) срез под действием касательных напряжений.

В таблице 4 представлены соответствующие схемы для ряда испытаний. Пользуясь этой таблицей, можно по внешнему виду разрушенных образцов определять вид разрушения. Однако эти схемы могут быть точно реализованы в том случае, когда заданная при нагружении схема напряженного состояния остается неизменной от начала испытания и до окончательного разрушения образца. На самом деле эта схема может меняться как в процессе пластической деформации (например, при образовании шейки), так и в процессе разрушения – в результате развития трещин. Поэтому вид разрушенных образцов часто отличается от приведенных в таблице 4. В таких случаях необходимо изучать направление развития трещин на начальных стадиях разрушения. Если схема напряженного состояния при деформации не меняется до разрушения, то по этим направлениям можно оценить, начинается ли разрушение под действием нормальных или касательных напряжений.

Таблица 4 – Схемы разрушения путем отрыва и среза при различных механических испытаниях (по Я. Б. Фридману)

Вид испытания	Схема нагружения	Направление действия напряжения		Вид разрушения	
		нормальное	касательное	отрыв	срез
Растяжение					

Сжатие				
Кручение				
Изгиб				

Считается, что отрыв может произойти без предварительной макропластической деформации, в то время как разрушению путем среза такая деформация всегда предшествует. Поэтому отрыв часто соответствует хрупкому, а срез – вязкому (пластичному) разрушению.

Внешне хрупкое и вязкое разрушение отличается в первую очередь величиной пластической деформации. Точно установлено, что любому, в том числе и хрупкому разрушению металлов и сплавов, предшествует какая-то пластическая деформация. Перед хрупким разрушением она обычно намного меньше, чем перед вязким, но четкой количественной границы здесь провести нельзя.

Оба типа разрушения – вязкое и хрупкое – включают в себя две стадии: 1) зарождение зародышевой трещины и 2) ее распространение. По механизму зарождения трещин хрупкое и вязкое разрушение принципиально не различаются. Качественное различие между ними связано со скоростью распространения трещины. При хрупком разрушении эта скорость очень велика – она достигает 0,4...0,5 скорости звука в материале образца. В случае же вязкого разрушения трещина распространяется с относительно малой скоростью, соизмеримой со скоростью деформации образца.

В поликристаллах трещина при разрушении может распространяться по телу зерна или вдоль границ. Соответственно различают внутризеренное (транскристаллитное) и межзеренное (интеркристаллитное) разрушение. При низких температурах межзеренное разрушение обычно наблюдается в хрупких материалах и обусловлено наличием на поверхности границ зерен частиц хрупких избыточных фаз или сегрегации примесей. Такое разрушение может происходить также при повышенных температурах, в условиях интенсивного развития межзеренной деформации.

Механика разрушения

Разрушение является процессом, развивающимся во времени в локальных объемах металла, приводящим к глобальному нестабильному разрушению при достижении предельного состояния. Основной задачей механики разрушения является разработка метода расчета деталей на прочность при наличии развивающейся трещины. Кроме того, необходимо уметь определять:

- 1) какой материал и в каком структурном состоянии является оптимальным для заданных условий нагружения;
- 2) какие наиболее информативные методы и критерии следует выбрать для выявления сопротивления материала зарождению и распространению трещины;
- 3) требования к технологии изготовления изделия, при которой повреждаемость материала минимальна;
- 4) как проектировать изделие с точки зрения наиболее благоприятного распределения напряжений у предполагаемых дефектов и концентратов напряжений;
- 5) историю разрушения по фрактографическим параметрам.

Таким образом, механика разрушения занимает основные позиции не только в материаловедении, технологии и конструировании деталей машин и агрегатов, но и в диагностике и инспекции разрушения. Знание основных закономерностей разрушения материала необходимо и достаточно для решения перечисленных выше задач механики трещин.

В динамике трещин важным параметром является текущая скорость движения трещины, по которой контролируют распределение напряжений и перемещений у края трещины, а следовательно, и поток энергии к краю трещины. Из теории Гриффитса следует, что при росте трещины в упругом теле высвобождающаяся упругая энергия полностью поглощается у края трещины, то есть расходуется на образование свежих поверхностей раздела. Однако при движении трещины в упругопластическом теле высвобождающаяся энергия не может полностью поглощаться в результате необратимых пластических деформаций у края трещины. Переход от условий притока энергии к краю трещины к условиям оттока ее от края трещины при субкритическом росте трещины носит скачкообразный характер и сопровождается изменением микромеханизма разрушения, определяющим скорость процесса, что влечет за собой и изменение морфологии поверхности трещины.

Атомный механизм зарождения качественно одинаков при хрупком и вязком разрушении. Зарождению трещины всегда предшествует какая-то пластическая деформация, то есть движение дислокаций.

Наиболее часто трещины возникают у вершин скоплений дислокаций вблизи каких либо барьеров: включений избыточных фаз, границ зерен, двойников, сидящих дислокаций и другие. Из схемы на рисунке 31 видно, что в непосредственной близости от барьера краевые дислокации в плоском скоплении могут под действием напряжений оказаться настолько тесно

прижатыми друг к другу, что их экстраплоскости сливаются, а под ними образуется зародышевая микротрещина.

Эта схема прямо предполагает необходимость некоторой пластической деформации, достаточной для образования дислокационных скоплений. Трещина образуется в плоскости, перпендикулярной плоскости скольжения дислокаций, под действием растягивающих напряжений, в результате концентрации касательных напряжений в головной части скопления. Расчеты показывают, что при действии такой модели трещина возникает, когда величина локальных касательных напряжений у вершины скопления достигает значения $\sim 0,7$ модуля сдвига.

Для металлов с о.ц.к.-решеткой одной из модификаций этой схемы является модель, предложенная Коттреллом (рисунок 26). Допустим, что в растягивающем образце дислокации с векторами Бюргерса $a/2 [11\bar{1}]$ и $a/2 [\bar{1}11]$ скользят в пересекающихся плоскостях (101) и $(10\bar{1})$. При встрече этих дислокаций возникает новая, расположенная в плоскости (100) :

$$a/2 [11\bar{1}] + a/2 [\bar{1}11] \rightarrow a[001]$$

Многократное повторение этого взаимодействия приводит к слиянию новых дислокаций $a[001]$, что в конце-концов вызывает образование зародышевой трещины. Схема Коттрелла не требует наличия барьеров для дислокаций в исходном состоянии. Барьеры, а затем дислокационные скопления и трещины образуются в результате пластической деформации.

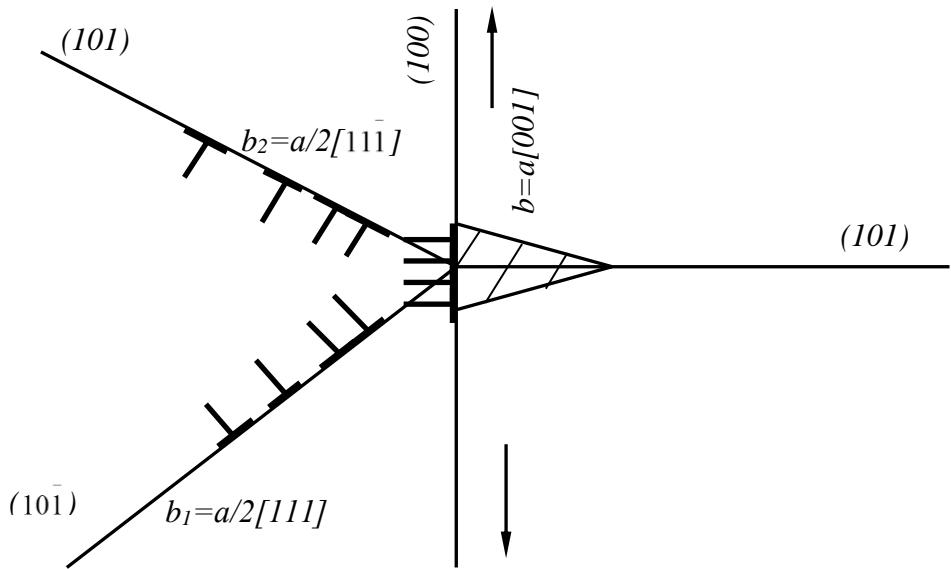


Рисунок 26 – Схема зарождения трещин в о.ц.к. – металлах (по Коттреллу)

Иногда трещина образуется не у вершины скопления, а внутри него. Отрыв по плоскости скольжения происходит под действием нормальных напряжений. Они возникают в результате искривления плоскостей скольжения дислокациями, располагающимися в других плоскостях.

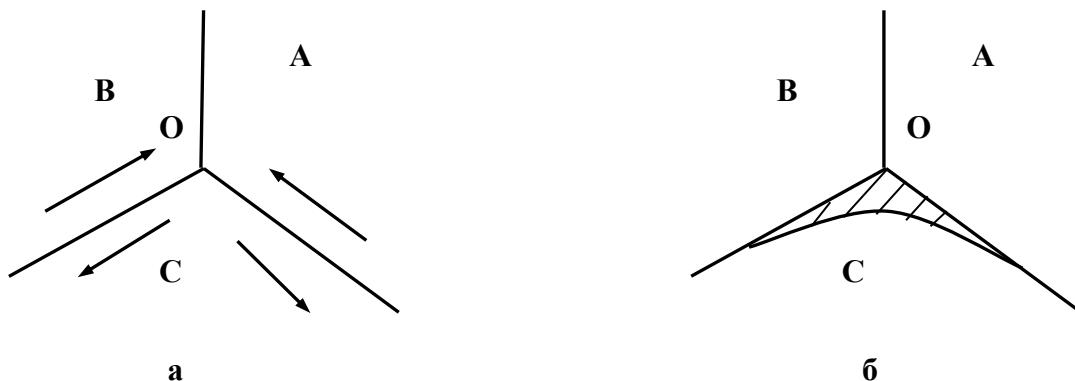
Искривление поверхности скольжения при сдвиге вдоль нее вызывает появление нормальных напряжений.

Зарождение трещин может происходить и без дислокационных скоплений. Так, в металлах с г.п.у.-решеткой наблюдается возникновение трещин в результате перерезания малоугловой границы при пластической деформации.

Часто зарождение трещин наблюдается в месте встречи двойника деформации с каким-либо прочным барьером, например, границей зерна или другим двойником. Как известно, двойники распространяются с высокой скоростью и возникающие при столкновении с препятствием напряжения не успевают релаксировать. Особенно благоприятные условия для зарождения трещин создаются при встрече растущего двойника деформации с ранее образовавшимся, для которого было характерно другое направление двойникования. В этом случае концентрация напряжений в месте встречи особенно велика.

В условиях сильно развитой межзеренной деформации увеличивается вероятность зарождения трещин на границе перемещающихся друг относительно друга кристаллитов.

Рассмотрим стык трех зерен (рисунок 27) в растягиваемом образце. Межзеренные смещения будут происходить в основном вдоль границ между зернами $A-C$ и $B-C$, где действуют большие касательные напряжения (рисунок 27, а).



а – действие касательных напряжений; б – зарождение трещины

Рисунок 27 – Схема зарождения трещины в стыке трех зерен за счет межзеренной деформации

В результате трещина зарождается вблизи места стыка O и распространяется вдоль границ $A-C$ и $B-C$ (рисунок 27, б). На практике с такой схемой зарождения трещин в результате межзеренных смещений встречаются обычно при высокотемпературных длительных испытаниях. В этих условиях возможно зарождение пор (трещин) путем слияния вакансий.

Рассмотренные основные схемы зарождения трещин показывают, что разрушение металлов с разной решеткой и микроструктурой может начинаться по-разному.

В конечном итоге сопротивляемость металла или сплава разрушению и характер разрушения определяются условиями, в которых оказывается возникшая по тому или иному механизму микротрецнина. Вторая стадия разрушения – распространение трещины – является решающей.

Рекомендуемая литература

1. Золотаревский В.С. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1998. – 306 с.
2. Бернштейн М.Л., Займовский В.А. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1979. – 496 с.
3. Иванова В.С., Шанявский А.А. Количественная фрактография. – Челябинск: Металлургия, 1988. – 400 с.
4. Костин П.П. Физико-механические испытания металлов, сплавов и неметаллических материалов. – М.: Машиностроение, 1990. – 296 с.
5. Шарай О.А., Куликов В.Ю., Шарый В.И. Учебное пособие по курсу «Механические свойства материалов», КарГТУ, 2004.

Тема 2 Хрупкое и вязкое разрушение (2 часа)

План лекции

1. Вязкое разрушение.
2. Условия зарождения и развития вязких трещин.
3. Образование центральной трещины.
4. Формы изломов при вязком разрушении.
5. Хрупкая трещина.
6. Формы изломов при хрупком разрушении.
7. Критерий Гриффита.

Вязкое и хрупкое разрушение

Вязкое разрушение происходит после значительной пластической деформации (десятки процентов). Это наименее опасный вид разрушения, и ему уделяют не так много внимания, как хрупкому. Тем не менее анализ вязкого разрушения очень важен. Он позволяет, в частности, лучше понять механизм хрупкого разрушения и наметить меры его предотвращения. Вязкое разрушение важно при анализе поведения металлов в условиях обработки давлением, где создаются значительные пластические деформации, и разрушение, в том числе вязкое, недопустимо.

Наиболее характерным примером вязкого разрушения является образование “чашечного” излома в шейке растягиваемого образца. Шейка образуется после некоторого равномерного удлинения образца и является результатом локализации деформации в ограниченном объеме. Внутри шейки схема напряженного состояния усложняется по сравнению с исходным одноосным растяжением. В этих условиях и происходит зарождение и развитие вязких трещин.

Чаще всего в технических металлах и сплавах реализуется первая схема зарождения трещин – у скоплений дислокаций вблизи барьера: различного

рода включений, которые всегда содержатся в технических металлах. Возможно также появление первых трещин внутри хрупких включений, которые разрушаются раньше, чем образуются достаточно мощные дислокационные скопления в матрице. Возникшие зародышевые трещины под действием напряжений начинают постепенно расти и по достижении микронных размеров уже легко выявляются при металлографическом анализе. На начальной стадии вязкого разрушения типичным является наличие множества мелких трещин (пор), концентрирующихся в основном в центральной части сечения шейки. По мере дальнейшего растяжения эти мелкие поры сливаются с образованием более крупных и в конце концов в центре шейки образуется сплошная трещина, плоскость которой в макромасштабе располагается нормально внешнему растягивающему усилию. Следовательно, образование этой центральной трещины – результат разрушения путем отрыва. Дальнейший ее рост происходит за счет присоединения новых пор путем разрыва перемычек между ними и основной трещиной.

Для того чтобы понять, почему разрушение на начальных стадиях локализуется в центральной части шейки, необходимо проанализировать распределение напряжений по сечению шейки. Вблизи центра образца все напряжения максимальны. Особенно велико здесь продольное растягивающее напряжение σ_1 , в то время как касательные напряжения распределены гораздо более равномерно. В результате трещины возникают и развиваются в средней части сечения шейки, и здесь же происходит разрушение путем отрыва с образованием центральной трещины.

По достижении центральной трещиной периферийных слоев шейки все напряжения локализуются в этих неразрушенных периферийных участках. Скорость распространения трещины резко возрастает, меняется и направление ее развития. В стенках шейки действуют в основном продольные напряжения и соответственно касательные в плоскостях, наклоненных под углом $\approx 45^\circ$ к оси образца. Из-за локализации пластической деформации в плоскостях действия максимальных касательных напряжений дальнейшее разрушение идет путем среза. В результате центральная часть трещины образует “дно”, а периферийные – конусные “стенки” чаши излома. Как видно, незначительная пластическая деформация не только предшествует вязкому разрушению, но и продолжается в процессе его развития.

Кроме рассмотренного случая вязкого разрушения, возможно образование изломов другой формы. Последняя определяется геометрией образца, характером его деформации и степенью пластичности. Например, монокристаллы, а также поликристаллы высокоуглеродистой стали и некоторых металлов с низкой пластичностью могут при низких температурах вязко разрушаться без образования шейки, давая “плоскую” поверхность разрушения после сдвиговой деформации вдоль сечения образца под углом $\approx 45^\circ$ к оси растяжения. Наоборот, при растяжении цилиндрических образцов с высокой пластичностью, в частности сверхпластичных, относительное сужение близко к 100 % и шейка превращается в точку. У аналогичных

плоских образцов шейка вырождается в линию, располагающуюся под углом $\approx 45^0$ к оси растяжения. Вообще при вязком разрушении растягиваемых плоских образцов из-за локализации пластической деформации в плоскостях действия максимальных касательных напряжений часто получается излом, характерный для разрушения путем среза. Естественно, что при изменении схемы нагружения образца геометрия излома меняется.

Вне зависимости от макрографии вязкий излом в шейке характеризуется рядом общих особенностей своей структуры. При визуальном осмотре невооруженным глазом он обычно матовый, неровный, часто со следами пластической деформации в виде грубых полос скольжения. Вязкое разрушение, как правило, бывает внутризеренным. Тонкую структуру излома выявляют с помощью фрактографического анализа – исследования структуры поверхности разрушения в световом и электронном (с помощью реплик) микроскопах. Фрактографический анализ, получивший широкое развитие в последние годы, дает важную информацию о механизме разрушения. Показан типичный пример микроструктуры вязкого излома. У него характерный рельеф, образуемый совокупностью отдельных фасеток, каждая из которых соответствует либо бывшей микропоре (трещине), либо перемычке между порами, которая разрушилась при их слиянии. На поверхности этих перемычек, а также на дне некоторых ямок (следов пор) часто видны линии скольжения, образовавшиеся при пластической деформации перед разрушением. На дне многих ямок выявляются частицы избыточных фаз (включений сульфидов), что как раз и служит доказательством возникновения большинства зародышевых трещин у этих включений.

На “стенках” чашечного излома наблюдаются сильно вытянутые лунки, а также области, не имеющие характерных особенностей структуры. Эти области имеются также на поверхности “плоского” излома. Они являются результатом разрушения металла вдоль поверхности локализованного интенсивного сдвига.

Общего количественного критерия вязкого разрушения не существует. Для ограниченного интервала условий таким критерием может служить величина либо деформации, либо минимального нормального или касательного напряжения, достаточного для развития вязкого разрушения. С практической точки зрения хрупкое разрушение гораздо важнее вязкого. Это наиболее опасный вид разрушения, идущий быстро и под действием сравнительно низких напряжений. Металлы и сплавы идеально хрупко, то есть без предварительной пластической деформации не разрушаются.

Хрупкая трещина при внутризеренном разрушении обычно распространяется вдоль кристаллографической плоскости с малыми индексами. При межзеренном разрушении хрупкая трещина в однофазных материалах распространяется по поверхности границ зерен, а при наличии границ второй фазы – вдоль межфазной поверхности или вдоль поверхности скола внутри включений. В зависимости от характера распространения трещины структура поверхности разрушения получается различной. В целом структура поверхности скола резко отличается от вязкого излома. При

простом осмотре хрупкий излом обычно блестящий или имеет цвет фаз, расположенных по границам зерен. Под микроскопом видно, что внутрикристаллитный хрупкий излом не идеально гладок. На поверхности скола обычно имеются ступеньки, придающие структуре волнистый вид, так называемых “речных узоров”. В поликристаллических образцах вид этих узоров при переходе от зерна к зерну меняется. Каждая линия “речного узора” соответствует разнице в уровнях, то есть ступеньке на поверхности излома. В большинстве случаев хрупкое разрушение происходит путем распространения одной трещины. В этом случае причиной образования уступов может быть, например, пересечение трещиной винтовых дислокаций, которые располагаются на пути распространения фронта трещины. Если она развивается вдоль кристалла и встречает на своем пути, например, две винтовые дислокации, то после разделения кристалла на две половины поверхность каждой из них будет содержать две ступеньки переменной высоты.

В процессе развития трещины такие ступеньки могут укрупняться. В результате пересечения множества дислокаций возникают ступеньки, высота которых достаточна для их выявления при микроскопическом анализе. Краевые дислокации не могут быть причиной образования ступенек; на малоугловых наклонных границах хрупкая трещина только меняет свое направление.

Хрупкое разрушение легче поддается количественному анализу. Для идеально хрупкого разрушения упругого тела, когда пластическая деформация совсем не идет, используется критерий Гриффитса;

$$\sigma = \sqrt{\frac{2 \cdot E \cdot \gamma}{\pi \cdot c}},$$

где σ – наименьшее растягивающее напряжение, необходимое для распространения трещины как хрупкой;

E – модуль Юнга;

γ – поверхностная энергия стенок трещины, отнесенная к единице ее площади;

c – половина длины трещины.

Критерий Гриффитса исходит из положения о том, что трещина распространяется, если увеличение γ меньше энергии деформации, высвобождающейся в результате роста трещины.

При хрупком разрушении металлов и сплавов до начала образования трещины и в процессе ее распространения идет пластическая деформация. В этих условиях γ в уравнении Гриффитса характеризует общую энергию, необходимую для увеличения единичной площади трещины. Сюда входит истинная поверхностная энергия и работа пластической деформации, которую необходимо затратить для развития трещины.

Основным условием для превращения трещины в “гриффитовскую” (которая распространяется как трещина скола) является ее достаточная длина

и малая величина работы пластической деформации.

Рекомендуемая литература

1. Золотаревский В.С. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1998. – 306 с.
2. Бернштейн М.Л., Займовский В.А. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1979. – 496 с.
3. Иванова В.С., Шанявский А.А. Количественная фрактография. – Челябинск: Металлургия, 1988. – 400 с.
4. Костин П.П. Физико-механические испытания металлов, сплавов и неметаллических материалов. – М.: Машиностроение, 1990. – 296 с.
5. Шарай О.А., Куликов В.Ю., Шарый В.И. Учебное пособие по курсу «Механические свойства материалов», КарГТУ, 2004.

Контрольные задания для СРС (темы 1, 2) [1], [2], [7], [10], [12]

1. Типы разрушения металлов.
2. Вязкое разрушение.
3. Хрупкое разрушение.
4. Критерий Гриффитса для хрупкого разрушения.
5. Переход из хрупкого состояния в пластическое.
6. Способы борьбы с хладноломкостью.