

1.4 Ресурс изделий и сопротивление усталости. Физические основы

Для рассмотрения физической природы усталостного разрушения вспомним некоторые положения физики твердого тела, связанные с кристаллическим строением металлов и процессами их деформирования.

1.4 Ресурс изделий и сопротивление усталости. Физические основы

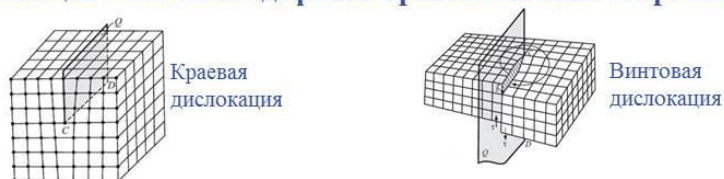
Деформация кристаллического тела



Плоскости скольжения в кристаллических решетках



Дислокации – линейные дефекты кристаллического строения



Как известно, механизм деформации кристаллических тел основан на действии напряжений сдвига. При упругой деформации, когда смещение атомов из исходных положений незначительно, после снятия нагрузки происходит полное восстановление формы кристалла.

При увеличении касательного напряжения наблюдаются необратимые смещения в виде проскальзывания плоскостей, занятых атомами. В зависимости от типа кристаллической решетки возможны различные системы такого скольжения.

Для того чтобы деформация произошла в плоскости скольжения, напряжение сдвига должно превысить некоторое критическое значение.

В 1924 году профессор Яков Ильич Френкель рассчитал это значение, рассматривая сдвиг как одновременное смещение одной части кристалла по другой. Однако результаты экспериментов показали, что реальная нагрузка, вызывающая пластическую деформацию, на 2-3 порядка ниже. Это позволило заключить, что сдвиг происходит не путем одновременного смещения атомных плоскостей, а зарождается в определенных местах, распространяется постепенно и в этом процессе принимает участие относительно небольшое количество атомов.

Для объяснения механизма этого явления в 1934 г. была предположена дислокационная теория деформации, согласно которой пластическая деформация есть результат скольжения дислокаций – линейных дефектов кристаллической структуры.

Так, у кристалла с краевой дислокацией в верхней части имеется лишняя атомная полуплоскость, которую называют экстраплоскостью. Краевая дислокация представляет собой область несовершенства вблизи края этой плоскости, являющегося границей зоны сдвига внутри кристалла.

У решетки кристалла с винтовой дислокацией атомы в одной из полуплоскостей смещены на одно межплоскостное расстояние. Кристалл, содержащий такую дислокацию, можно представить состоящим не из параллельных горизонтальных атомных плоскостей, а из одной атомной плоскости, закрученной вокруг дислокации, как винтовая лестница.

1.4 Ресурс изделий и сопротивление усталости. Физические основы

Схема перемещения краевой дислокации через кристалл

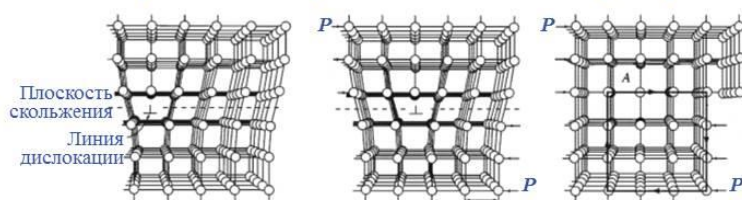
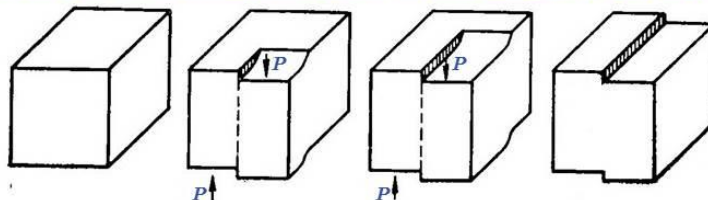


Схема перемещения винтовой дислокации через кристалл



Механизм перемещения дислокаций через решетку заключается в периодическом ослаблении и восстановлении связей между атомами вблизи неё. При выходе дислокации на противоположную поверхность кристалла образуется ступенька, а дислокация исчезает.

Перемещение краевой дислокации похоже на движение гусеницы или складки на ковре, т.е. сдвиг происходит в плоскости скольжения, перпендикулярной линии дислокации.

В отличие от краевой винтовая дислокация может скользить в той плоскости, в которой лежит линия дислокации. В области ядра этой дислокации атомы смещаются в направлении действующих на них сил, а сама дислокация перемещается перпендикулярно этому направлению. В отличие от краевых винтовые дислокации могут переходить из одной атомной плоскости в другую при обходе препятствий или изменении направления нагрузки.

Механизм перемещения дислокаций через кристаллическую решетку заключается в периодическом ослаблении и восстановлении связей между ближайшими атомами. При выходе дислокации на противоположную поверхность кристалла образуется ступенька, а дислокация исчезает.

1.4 Ресурс изделий и сопротивление усталости. Физические основы

Плотность дислокаций равна их суммарной длине в единице объема и зависит от способа получения и обработки металла.

В см³ особо чистых монокристаллов длина дислокационных линий не превышает 10 м, а в холодно деформированных металлах достигает миллионами метров.

Формирование дислокаций происходит в процессе кристаллизации, из-за неоднородности химического состава. При деформировании образуются новые дислокации, источниками которых могут быть дефекты структуры, границы зерен, и т.д.

С развитием деформации движение дислокаций затрудняется, что требует увеличения прилагаемой нагрузки для продолжения деформирования, т.е. происходит **упрочнение материала**, основными механизмами которого являются взаимодействие дислокаций

- между собой
- с атомами примесей
- с частицами второй фазы

Важной количественной характеристикой структуры металла является плотность дислокаций, равная их суммарной длине в единице объема и зависящая от способа обработки.

Так в кубическом сантиметре монокристаллов особой чистоты длина дислокационных линий не превышает 10 метров, а в холодно деформированных металлах она измеряется миллионами метров.

Дислокации формируются в ходе кристаллизации, в основном, из-за неоднородности химического состава. В процессе деформирования металла в нем образуется большое число новых дислокаций, источниками которых могут быть дефекты структуры, границы зерен, и т.д.

Итак, пластическая деформация металла образуется в результате перемещения дислокаций.

С развитием деформации движение дислокаций становится все более затрудненным, что требует увеличения прилагаемой нагрузки для продолжения деформирования, т.е. происходит упрочнение материала.

Основными механизмами упрочнения являются.

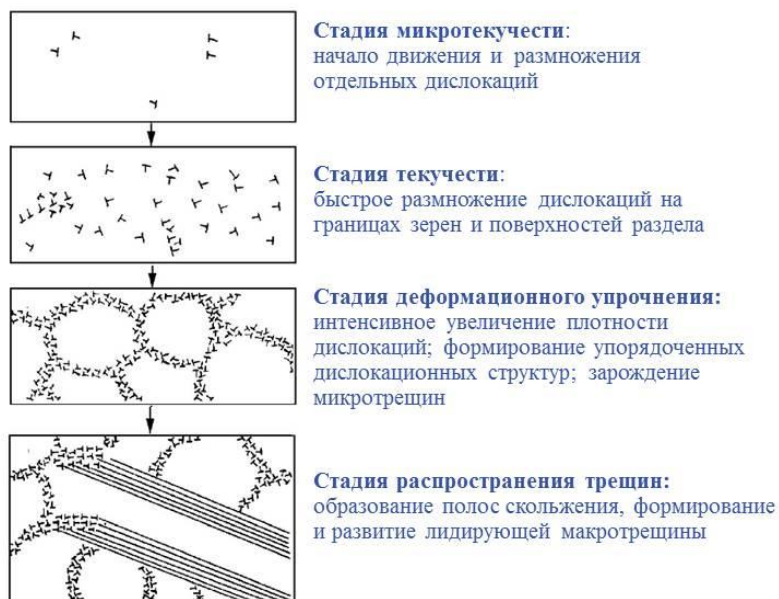
- взаимодействие дислокаций между собой
- с атомами примесей,
- с частицами второй фазы (например, с нитридами, карбидами и т.д. в сталях).

На практике упрочнение создается легированием, наклепом, термической или термомеханической обработкой.

Процесс накопления деформации и разрушения металлических материалов как при статическом, так и при циклическом деформировании можно разделить на несколько основных стадий.

1.4 Ресурс изделий и сопротивление усталости. Физические основы

Схема формирования дислокационной структуры в процессе деформации



На первой стадии, когда действующие напряжения меньше предела текучести, в некоторых благоприятно ориентированных зернах образуется микропластическая деформация, связанная с началом движения отдельных дислокаций и их размножением. Данный этап, или стадия микротекучести, начинается с поверхностного слоя.

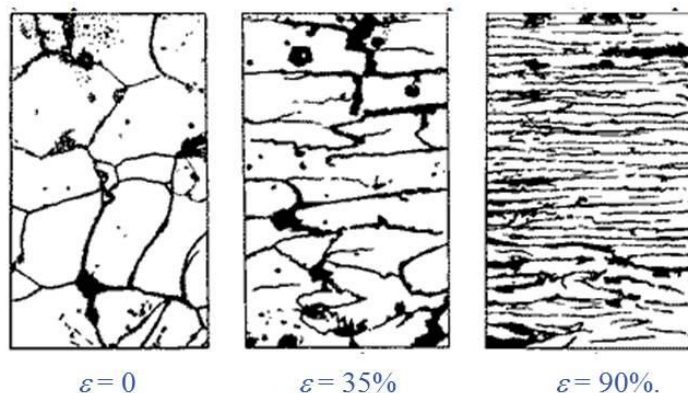
Это связано с тем, что критическое напряжение, необходимое для образования дислокаций в поверхностном слое значительно ниже, а дислокации двигаются более свободно, чем в глубине.

На второй стадии – стадии текучести наблюдается быстрое размножение дислокаций, основным источником которых являются границы зерен и другие поверхности раздела. В условиях циклического нагружения данный процесс имеет подобный характер, просто он развивается более медленно с ростом числа циклов.

Третья стадия – стадия деформационного упрочнения. На этой стадии продолжает увеличиваться плотность дислокаций, прежде всего по границам зерен и раздела фаз, и формируются упорядоченные дислокационные структуры (например, ячеистые или полосовые).

Деформация поликристаллического тела складывается из деформации отдельных зерен, плоскости скольжения которых произвольно ориентированы в пространстве.

Схема изменения поликристаллической структуры в процессе деформации



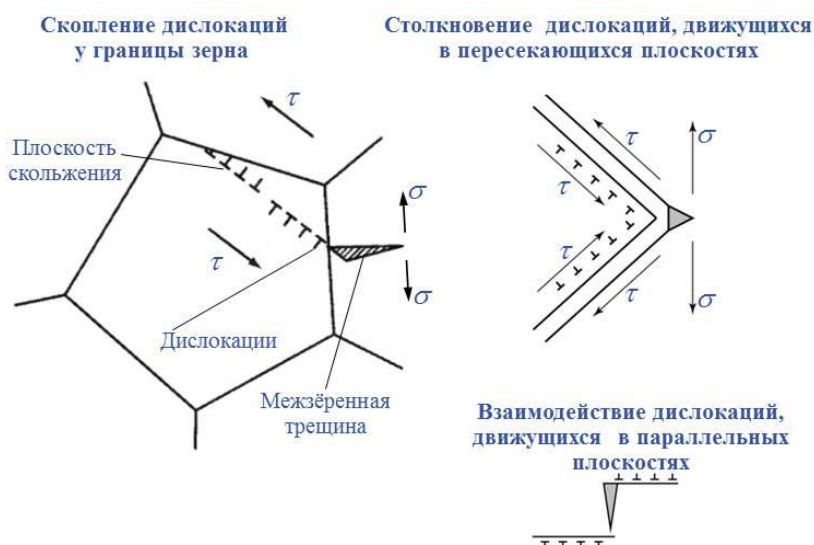
Деформация начинается в отдельных зернах, в плоскостях скольжения которых возникают максимальные касательные напряжения. Соседние зерна будут разворачиваться и постепенно вовлекаться в процесс деформации.

Деформация приводит к изменению формы зерна вытянутую в направлении течения металла, который приобретает волокнистое строение.

Одновременно с изменением формы зерен в процессе пластической деформации происходит изменение ориентировки в пространстве их кристаллической решетки.

В результате возникает текстура деформации и создается кристаллическая анизотропия.

Дислокационные механизмы образования микротрещин



При достижении критической плотности дислокаций сначала на поверхности, затем в объеме металла начинают зарождаться субмикротрещины.

Исходным этапом зарождения этих трещин является блокирование продвижения дислокаций некоторым препятствием, например, поверхностью детали, границей зерна или включением, а также взаимодействие дислокаций, движущихся в разных плоскостях скольжения.

Для зарождения микротрещины требуется от 300 до 1000 дислокаций. Скопление дислокаций приводит к возникновению и росту растягивающих напряжений, которые в итоге могут превзойти силы межатомной связи и вызвать образование субмикротрещины длиной порядка 10-4 мм.

При дальнейшем росте деформации начинается стадия распространения трещин, связанная с трансформацией структур с критической плотностью дислокаций в линии скольжения, которые объединяются и формируют полосы скольжения.

Внутри этих полос наблюдается интенсивное разупрочнение.

При циклическом нагружении процесс необратимых повреждений материала также начинается с образования полос скольжения на поверхности.

Структура этих полос представляет совокупность экструзий (возвышений) и интрузий (впадин), в которых, как правило, и происходит зарождение субмикротрещин.

С увеличением деформации субмикротрещины превращаются в микротрещины, выходящие за пределы зерна. Помимо индивидуального роста под нагрузкой трещины увеличивают свою длину в результате поглощения ближайших дислокационных скоплений и вакансий.

В дальнейшем микротрещины преобразуются в лидирующую макротрещину протяженностью в доли миллиметра, которая меняет направление своего движения и переходит в плоскость, перпендикулярную к главным нормальным напряжениям.

У вершины этой трещины возникает концентрация напряжений, облегчающая её дальнейшее развитие, локализуется пластическая деформация и резко увеличивается плотность дислокаций.

Наконец, когда размер трещины достигает критического значения, наступает стадия разрушения. При этом скорость роста трещины резко увеличивается и может достигать более 1000 м/с.

1.4 Ресурс изделий и сопротивление усталости. Физические основы

Поверхность усталостного излома



А – след фронта усталостной трещины

Б – зона долома (хрупкого разрушения)

Усталостные трещины, возникавшие у поверхности детали, постепенно проникают вглубь, ослабляя сечение и вызывая в итоге разрушение.

После разрушения на поверхности излома можно видеть две ярко выраженные зоны.

В зоне А, представляющей след фронта трещины, микроповерхность излома является гладкой вследствие трения и наклепа от многократных нажатий поверхностей друг на друга. Другая зона Б, или зона долома, даже в случае пластичного материала имеет признаки хрупкого разрушения – крупнозернистую структуру и блестящую чистую поверхность.

Характер усталостного разрушения зависит от уровня действующих напряжений.

1.4 Ресурс изделий и сопротивление усталости. Физические основы

Виды усталостного разрушения

- **Хрупкое разрушение** имеет место при максимальных напряжениях цикла, меньших предела упругости и происходит вследствие накопления повреждений и развития магистральной трещины без заметной пластической деформации всей детали
- **Квазистатическое разрушение** происходит когда максимальные напряжения превосходят предел упругости. Пластические деформации возникают в больших объемах материала, накапливаются от цикла к циклу и достигают предельной величины, соответствующей разрушению материала при статическом нагружении.

Виды усталости в зависимости от условий деформирования

- **Многоцикловая усталость** – усталость материала, при которой усталостное повреждение или разрушение происходит при упругом деформировании.
- **Малоцикловая усталость** – усталость материала, при которой усталостное повреждение или разрушение происходит при упруго-пластическом деформировании.

Так, при максимальных напряжениях цикла, меньших предела упругости, усталостное разрушение имеет хрупкий характер и происходит вследствие накопления повреждений и развития магистральной трещины без заметной пластической деформации всей детали.

В случаях, когда максимальные напряжения превосходят предел упругости, пластические деформации возникают в больших объемах материала.

От цикла к циклу они накапливаются и, наконец, достигают предельной величины, соответствующей разрушению материала при статическом нагружении. Такой тип разрушения называют квазистатическим.

Таким образом, принято различать два вида усталости – многоцикловую и малоцикловую.

Многоцикловая усталость – усталость материала, при которой повреждение или разрушение происходит в основном при упругом деформировании.

Малоцикловая усталость – соответственно при упругопластическом деформировании.

При малоцикловой усталости, окончательное разрушение происходит приметно после 1000 циклов и менее. При многоцикловой количество циклов может достигать сотен миллионов.

Характер разрушения при малоцикловой усталости зависит от способности материала к накоплению пластических деформаций при циклическом нагружении.

1.4 Ресурс изделий и сопротивление усталости. Физические основы

Виды материалов в зависимости от способности к накоплению пластических деформаций при циклическом нагружении

- **Циклически упрочняющиеся** – материалы, у которых остаточная деформация от цикла к циклу уменьшается. Суммарная пластическая деформация стремится к пределу.
- **Циклически разупрочняющиеся** – материалы, у которых остаточная деформация от цикла к циклу увеличивается. Суммарная пластическая деформация возрастает.
- **Циклически стабильные** – материалы для которых характерна одинаковая величина остаточной деформации во всех циклах.

Материалы, у которых остаточная деформация от цикла к циклу уменьшается, а суммарная пластическая деформация стремится к определенному пределу, называются циклически упрочняющимися. К таким материалам относятся пластичные металлы и сплавы, например, известный алюминиевый сплав В95.

Для циклически разупрочняющихся материалов характерно увеличение от цикла к циклу остаточных деформаций и интенсивный рост суммарной пластической деформации.

К разупрочнению склонны некоторые высокопрочные стали.

Для циклически стабильных материалов (например, среднеуглеродистых и аустенитных сталей) характерна одинаковая величина остаточной деформации во всех циклах.

Таким образом, в зависимости от типа материала и особенностей нагрузки разрушение в результате малоциклового усталости может быть обусловлено накопленным усталостным повреждением, накопленной деформацией или их совокупностью.

1.4 Ресурс изделий и сопротивление усталости. Физические основы

Виды разрушения в зависимости от типа материала и особенностей нагрузки

Циклически стабильные и разупрочняющиеся материалы имеют квазистатический вид разрушения. Долговечность деталей из таких материалов зависит от

- степени асимметрии цикла (чем она больше, тем меньше циклов потребуется для разрушения)
- скорости деформирования (долговечность уменьшается с уменьшением скорости изменения напряжений)

Циклически упрочняющиеся материалы всегда имеют усталостный характер разрушения и требуют значительно большего количества циклов, что говорит о их лучшей сопротивляемости малоцикловой усталости.

- При $\sigma_b/\sigma_{02} < 1,2$, материалы циклически разупрочняются,
- При $\sigma_b/\sigma_{02} > 1,4$ – упрочняются.
- При $1,2 < \sigma_b/\sigma_{02} < 1,4$ могут происходить оба процесса.

Циклически стабильные и разупрочняющиеся материалы имеют квазистатический вид разрушения. Долговечность деталей из таких материалов зависит от степени асимметрии цикла; чем она больше, тем больше скорость накопления пластических деформаций и тем меньше циклов потребуется для разрушения.

Интенсивность процесса накопления пластических деформаций зависит также от скорости деформирования.

Долговечность значительно уменьшается с уменьшением скорости изменения напряжений.

Разрушение циклически упрочняющихся материалов всегда имеет усталостный характер и требует значительно большего количества циклов, что говорит о лучшей сопротивляемости таких материалов малоцикловой усталости.

Склонность материалов к циклическому упрочнению или разупрочнению определяется отношением предела прочности к условному пределу текучести.

Известно, что все материалы, для которых это отношение меньше 1,2, при циклическом деформировании разупрочняются, а для которых оно больше или равно 1,4, упрочняются. Между этими значениями могут происходить оба процесса.

Следует отметить, что указанное деление материалов носит условный характер, так как их поведение при малоцикловом деформировании зависит от температуры, вида обработки и других факторов.

Например, наклеп и закалка ведут к циклическому разупрочнению, а отжиг – к упрочнению.