



СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
SIBERIAN FEDERAL UNIVERSITY

В. И. Аникина, А. А. Ковалева

ФРАКТОГРАФИЯ В МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ

Учебное
пособие

УМО

**ИНСТИТУТ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ
И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ**
МЕТАЛЛУРГИЯ



Ангелина Ковалева

**Фрактография в
материаловедении**

«Сибирский федеральный университет»

2014

УДК 620.1814
ББК 34.204.011я73

Ковалева А. А.

Фрактография в материаловедении / А. А. Ковалева —
«Сибирский федеральный университет», 2014

ISBN 978-5-7638-3114-6

В учебном пособии описаны виды разрушения металлических материалов. Даны понятия и термины, используемые при описании всех видов разрушения. Приведены классификация видов изломов металлов, анализ строения изломов, полученных при разовом и многократном нагружении, длительном нагружении, а также при повышенных и высоких температурах. В учебном пособии представлены приложения с иллюстрациями микро- и макрофрактограммы изломов, а также описаны зарождение и развитие трещины и дефекты в изломах. Предназначено для магистрантов и аспирантов по дисциплине М2.В1 «Фрактография в материаловедении» укрупненной группы 150000 – «Металлургия, машиностроение и материалобработка» по направлению 150400.68 – «Металлургия».

УДК 620.1814
ББК 34.204.011я73

ISBN 978-5-7638-3114-6

© Ковалева А. А., 2014
© Сибирский федеральный
университет, 2014

Содержание

Введение	5
1. Виды разрушения	6
1.1. Механизмы разрушения материалов	6
2. Механизмы зарождения трещины	9
2.1. Развитие трещины	14
Конец ознакомительного фрагмента.	15

В. И. Аникина, А. А. Ковалева

Фрактография в материаловедении

Введение

Изучение излома – самый простой и доступный способ оценки внутреннего строения металлов. Метод оценки изломов, несмотря на кажущуюся грубость оценки качества материала, применяется довольно широко в различных отраслях производства и научных исследованиях. Оценка излома во многих случаях может характеризовать качество материала.

Излом может быть кристаллическим или аморфным. Аморфный излом характерен для материалов, не имеющих кристаллического строения (стекло, канифоль, стекловидные шлаки).

Металлические сплавы, в том числе сталь, чугун, алюминиевые, магниевые сплавы, цинк и его сплавы, дают зернистый, кристаллический излом.

Каждая грань кристаллического излома является плоскостью скалывания отдельного зерна, поэтому излом показывает нам размеры зерна металла. Изучая излом стали, можно видеть, что размер зерна может колебаться в очень широких пределах: от нескольких сантиметров в литой, медленно остывшей стали до тысячных долей миллиметра в правильно откованной и закаленной стали. В зависимости от размера зерна излом может быть крупнокристаллическим и мелкокристаллическим. Обычно мелкокристаллический излом соответствует более высокому качеству металлического сплава.

Если разрушение исследуемого образца проходит с предшествующей пластической деформацией, зерна в плоскости излома деформируются и излом уже не отражает внутреннего кристаллического строения металла; в этом случае излом называется волокнистым. В одном образце, в зависимости от уровня его пластичности, в изломе могут быть волокнистые и кристаллические участки. По соотношению площади излома, занятого волокнистыми и кристаллическими участками при данных условиях испытания, можно оценивать качество металла.

Хрупкий кристаллический излом может получаться при разрушении по границам зерен или по плоскостям скольжения, пересекающим зерна. В первом случае излом называется межкристаллитным, во втором – транскристаллитным. Иногда, особенно при очень мелком зерне, трудно определить природу излома. В этом случае излом изучают с помощью лупы или бинокулярного микроскопа.

В последнее время развивается отрасль материаловедения по фрактографическому изучению изломов на металлографических и электронных микроскопах. При этом находят новые достоинства старого метода исследований излома, применяя к нему понятия фрактальных размерностей.

Под разрушением понимают разделение тела на части либо появление макроскопической трещины или поры.

Момент разрушения часто связывают с достижением напряжений, деформаций или работы деформаций критических значений. Под разрушением принято понимать процесс необратимого нарушения сплошности тела и разделение его на отдельные части.

Разрушение рассматривают как процесс, состоящий из ряда последовательных стадий, которые включают зарождение трещин субмикроскопических размеров, их последующее развитие и заключительное формирование макроскопической магистральной трещины, заканчивающийся разделением материала на части.

1. Виды разрушения

1.1. Механизмы разрушения материалов

Существуют различные классификации видов разрушения. В случае однократного воздействия монотонно нарастающей нагрузки возможно разрушение двух основных видов: хрупкое и вязкое.

На практике чаще имеет место смешанное разрушение, одновременно обладающее чертами и хрупкого, и вязкого разрушения. Иногда признаки указанных типов разрушения могут проявляться в определенной последовательности (например, разрушение начинается как вязкое, а заканчивается как хрупкое).

Разрушение называют вязким, если ему предшествовала значительная пластическая деформация, и хрупким, если пластическая деформация незаметна или же не превышает 1–2 %. Первоначально считали, что хрупкое разрушение происходит после упругой деформации, но затем было экспериментально доказано, что в металлах любому разрушению предшествует пластическая деформация, хотя бы и очень маленькая.

При хрупком разрушении, когда микропластическая деформация не выявляется, в микрообъемах всегда можно найти следы пластической деформации в виде линий скольжения. Считают, что при хрупком разрушении металлов развитию трещины сопутствует локальная пластическая деформация в тонком приповерхностном слое трещины. Такое разрушение называют квазихрупким.

Деление разрушения на хрупкое и вязкое весьма условно, так как при такой классификации трудно охватить все стороны явления на макро- и микроуровне.

С позиций макроскопической картины хрупкое разрушение вызывается действием относительно небольших растягивающих напряжений (обычно не превышающих предел текучести). В этом случае для протекания и завершения хрупкого разрушения не требуется подвода энергии извне (т. е. повышения действующей нагрузки), а достаточно запасенной упругой энергии разрушающейся конструкции.

Принципиально иная ситуация возникает в условиях протекания вязкого разрушения. Оно развивается под действием напряжений, которые не только превышают предел текучести, но и непрерывно растут по величине (хотя действующее усилие может при этом даже снижаться вследствие уменьшения «живого» сечения нагруженного материала).

Таблица 1

Классификация основных видов механического разрушения

Признак, по которому проводится классификация	Вид разрушения
По характеру силового воздействия: <ul style="list-style-type: none"> • нагрузка в основном монотонно изменяется, периода постоянной нагрузки нет или он мал относительно периода разрушения; • период неменяющейся нагрузки соизмерим с периодом разрушения; • нагрузка периодически и многократно изменяется в процессе разрушения 	Кратковременное однократное статическое Длительное однократное статическое и замедленное Усталостное
По ориентировке макроскопической поверхности разрушения при разных способах нагружения (растяжение, изгиб, сжатие, кручение, вдавливание и т. п.): <ul style="list-style-type: none"> • макроскопическая поверхность разрушения перпендикулярна направлению $+\sigma_{\max}$ или $+\varepsilon_{\max}$ при крайне малом пластически деформированном объеме в зоне разрушения; • поверхность наклонена под углом примерно 45° к направлению $+\sigma_{\max}$ 	Отрыв Срез
По локальности разрушения, оцениваемой по соотношению размеров разрушаемой зоны и структурных элементов	Субмикроскопическое – III рода; макроскопическое – II рода; макроскопическое – I рода
По пластической деформации, предшествующей разрушению	Хрупкое; макрохрупкое, но микропластическое; пластическое
По структурному расположению поверхности разрушения	Внутрикристаллитное; межкристаллитное; смешанное
По степени развития разрушения	Начальное – поверхность трещины значительно меньше площади сечения тела; развитое, в том числе полное
По влиянию внешней среды	Вызванное понижением поверхностной энергии (наличие легкоплавких покрытий); вызванное коррозией; связанное с облучением

Хрупкое разрушение сопровождается незначительной пластической деформацией, предшествующей разрушению. Вязкому же разрушению предшествует значительная макроскопическая деформация, так как оно развивается при напряжениях, превышающих предел текучести, и суммарная энергоёмкость процесса оказывается большой.

Я.Б. Фридман классифицирует разрушение по разным признакам (табл. 1).

Для обоих видов разрушения характерным является возникновение зародышевых трещин и их последующее распространение. По механизму образования трещины хрупкое и вязкое разрушения принципиально между собой не различаются. Вместе с тем склонность к тому или иному виду разрушения материала определяется тем, с какой скоростью возникшая тре-

щина будет затем развиваться. При хрупком разрушении трещина растет с очень высокой скоростью, достигающей 0,4–0,5 скорости распространения звука в разрушаемом материале. В то же время скорость роста «вязкой» трещины очень мала.

2. Механизмы зарождения трещины

Механизмы зарождения трещин и пор на атомном уровне основаны на представлении о том, что для разрушения необходима пластическая деформация, вызванная движением дислокаций.

Известно несколько моделей соединения дислокаций и образования субмикротрещин. Так, торможение дислокаций и их скопление около препятствий (границы зерен, двойников либо включения избыточных фаз) способствует сближению нескольких дислокаций, экстраплоскости которых сливаются, а под ними образуется зародышевая микротрещина. Модель образования микротрещины путем слияния дислокаций называется моделью Зинера – Стро.

Микротрещина может преобразовываться в микропору путем вхождения дислокации обратного знака в дислокационную микротрещину и ее затупления (рис. 1), что приводит к существенному уменьшению концентрации напряжений в ядре клиновидной дислокационной трещины, или сверхдислокации.

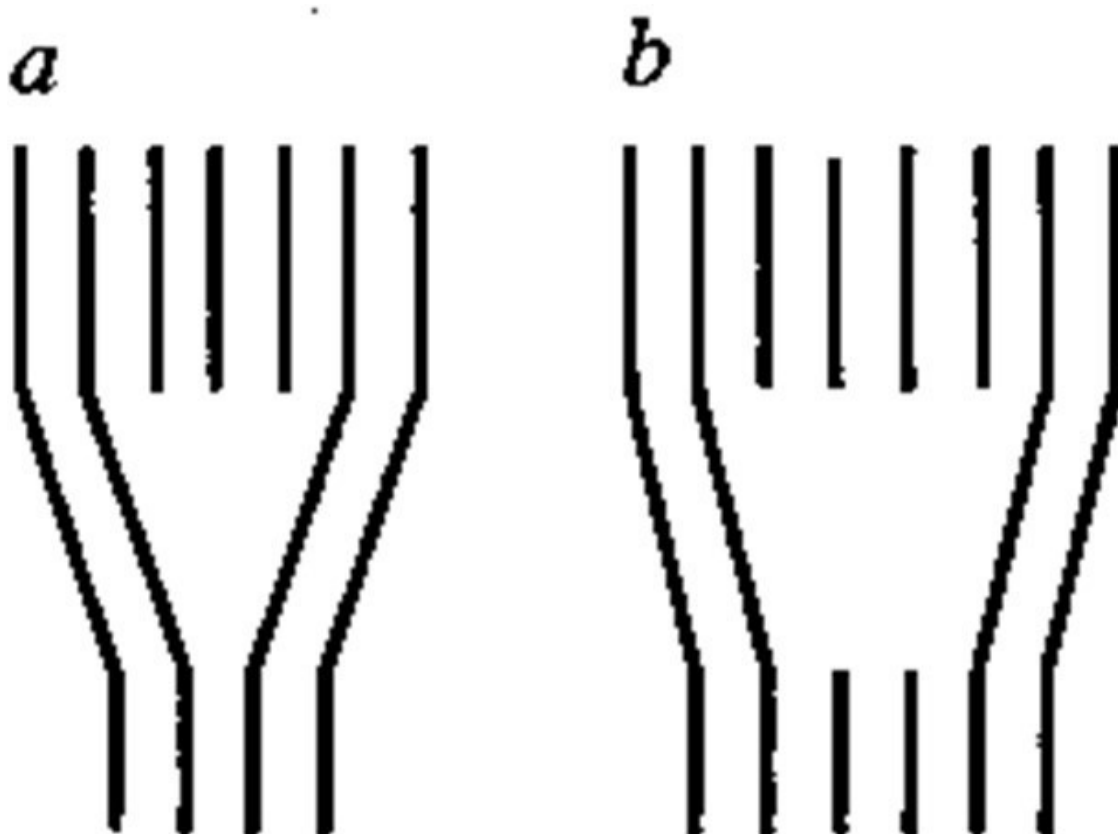


Рис. 1. Образование дислокационной трещины (а) и ее затупление с превращением в пору (б) [3]

Микропоры могут образоваться путем формирования локальных скоплений вакансий с последующей конденсацией их в поры. Вакансионному пересыщению кристаллической решетки способствуют большая пластическая деформация, радиационное облучение, закалка и т. п.

Модель формирования поры в результате сдвиговой деформации, протекающей за счет дислокационных перемещений в пересекающихся плоскостях скольжения, показана рис. 2.

Условия такого скольжения реализуются в макроскопическом масштабе, например, при поперечной или винтовой прокатке, при которой в осевой зоне заготовки вскрывается полость.

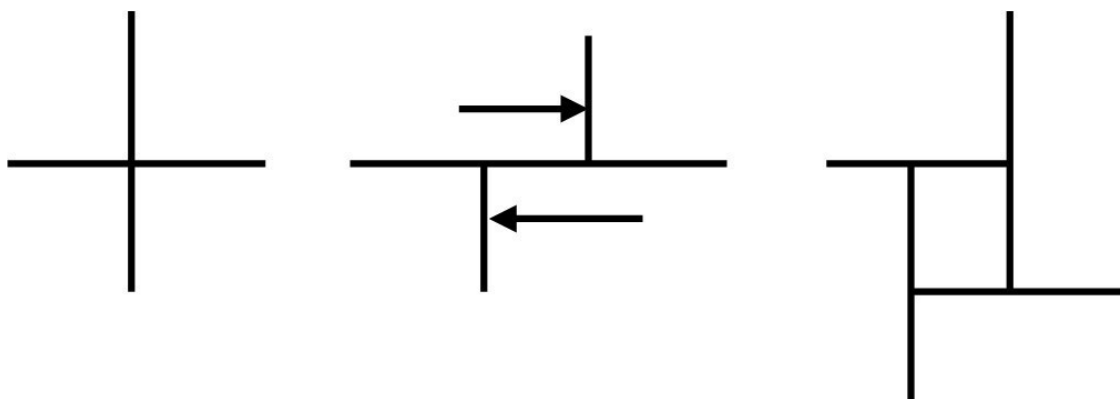


Рис. 2. Образование поры на пересечении попеременно активируемых плоскостей скольжения

Особенности производства и эксплуатации металлических материалов способствуют возникновению газовых пор (пузырьков), причем давление газа может быть существенным.

Модель заторможенного сдвига. Эта модель, подобно предыдущей, предполагает блокировку дислокаций барьером. Отличие ее заключается в том, что в голове дислокационного скопления возникают не только касательные напряжения интенсивностью $\mu\tau$, но и значительные нормальные растягивающие напряжения в области под плоскостью скольжения. Эти растягивающие напряжения максимальны на плоскости, составляющей угол 70° с плоскостью скольжения (рис. 3).

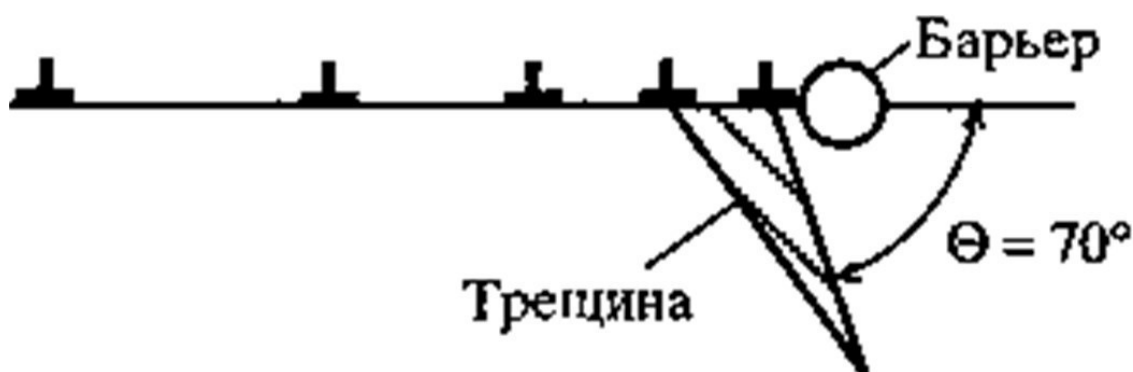


Рис. 3. Схема зарождения трещины у вершины дислокационного скопления [3]

После достижения количества дислокаций в скоплении до нескольких сотен нормальные напряжения превышают прочность материала на отрыв (теоретическая прочность), и появляется трещина.

Модель Коттрелла. Этот механизм можно использовать для описания процесса образования трещин в металлах с ОЦК (объемно центрированной кубической) решеткой. Возникновение трещин, как и в предыдущих случаях, связывается с необходимостью формирования дислокационных скоплений. Однако в модели Коттрелла не требуется наличия в исходном состоянии готовых барьеров для дислокаций. Препятствия, а затем дислокационные скопления и трещины образуются в результате протекающей пластической деформации.

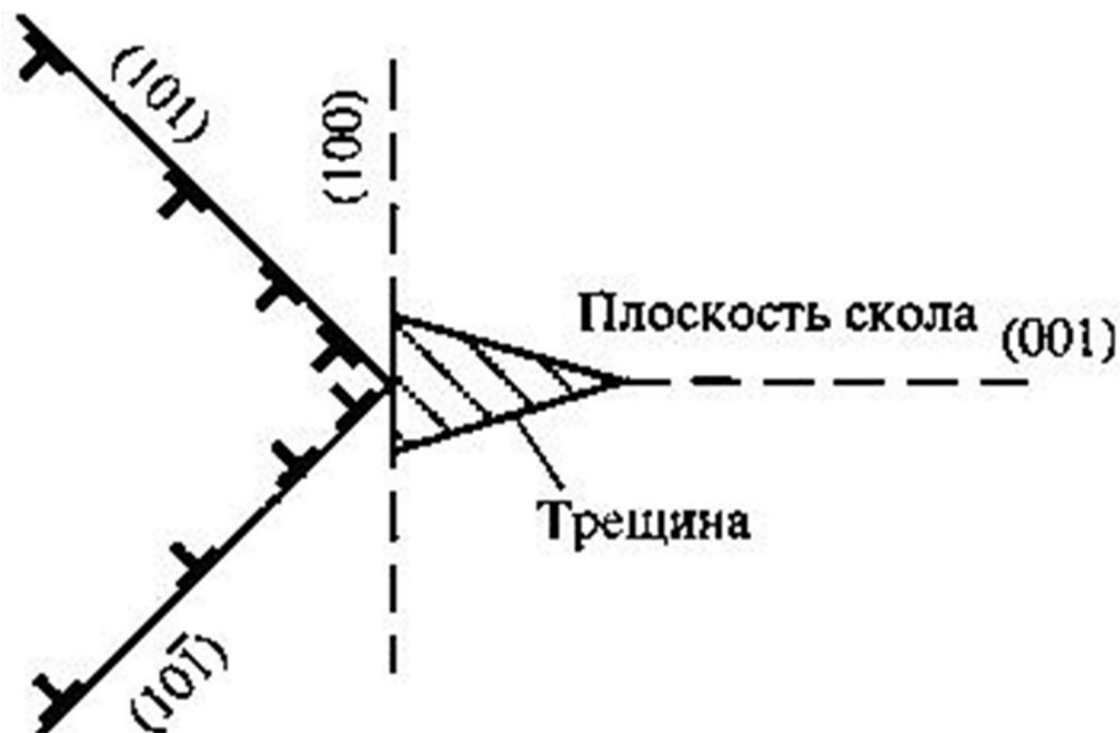


Рис. 4. Схема зарождения трещины в ОЦК металлах [3]

На рис. 4 показана схема образования трещины по этой модели. В растягиваемом образце происходит перемещение скользящей дислокации по пересекающимся плоскостям (101) и (101) (это плоскости наиболее плотной упаковки в ОЦК кристалле, и именно они являются плоскостями легкого скольжения). При встрече этих дислокаций возникает новая дислокация, расположенная в плоскости (100), не являющейся плоскостью скольжения. Дислокация встречи блокирует обе плоскости скольжения, что приводит к скоплению дислокаций и образованию зародышевой трещины в плоскости скола (001).

Модель образования трещины у субграницы. В некоторых случаях для зарождения трещины необязательным является наличие дислокационного скопления. Например, в металлах с гексагональной решеткой (Zn) при низких температурах возможно возникновение трещины в результате перерезания малоугловой границы в процессе сдвига. На рис. 5 показано образование микротрещины в результате сдвига, разделяющего малоугловую границу (с углом разориентировки приблизительно 5°) на две части. Такое разделение возможно, если малоугловая граница расположена вертикально по отношению к базисным кристаллографическим плоскостям ГПУ кристалла, по которым происходит сдвиг при нагружении.

Модель зарождения трещины при торможении двойника. Двойники деформации распространяются с большой скоростью, поэтому при встрече растущего двойника деформации с препятствием, например границей зерна или ранее образовавшимся двойником, для которого характерно другое направление двойникования, создаются благоприятные условия для зарождения трещины (рис. 6).



Рис. 5. Возникновение трещины при перерезании малоугловой границы: *а* – до деформации; *б* – зарождение трещины [3]

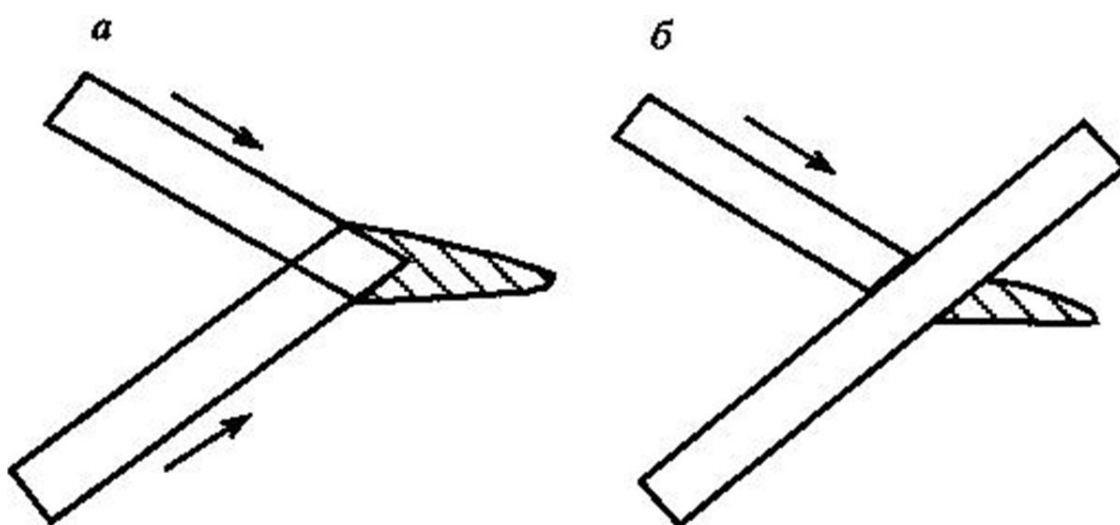


Рис. 6. Схема возникновения трещины при встрече развивающихся двойников (*а*) и торможения одного двойника другим (*б*) [3]

В условиях развитой межзеренной деформации микропоры могут возникать вблизи стыка кристаллитов А, В и С (рис. 7).

Вакансионная модель образования пор. Деформация ползучести, особенно при высоких температурах и низких напряжениях, связана не с движущимися дислокациями, а происходит вакансионным путем и является результатом направленного массопереноса. Диффузионные потоки вакансий вдоль границ зерен больше транскристаллитных потоков. Это стимулирует зернограничную деформацию и образование трещин и микропор на стыке кристаллитов. Межзеренное проскальзывание вдоль границы со ступенькой способствует образованию микропор.

Микропоры могут образовываться около частиц избыточных фаз, которые чаще всего располагаются на границах зерен. С увеличением поверхностной энергии границы матрица – фаза и уменьшением размера частиц избыточной фазы вероятность образования микропор возрастает. Образование микропор по механизму стока вакансий наблюдается при радиационном облучении.

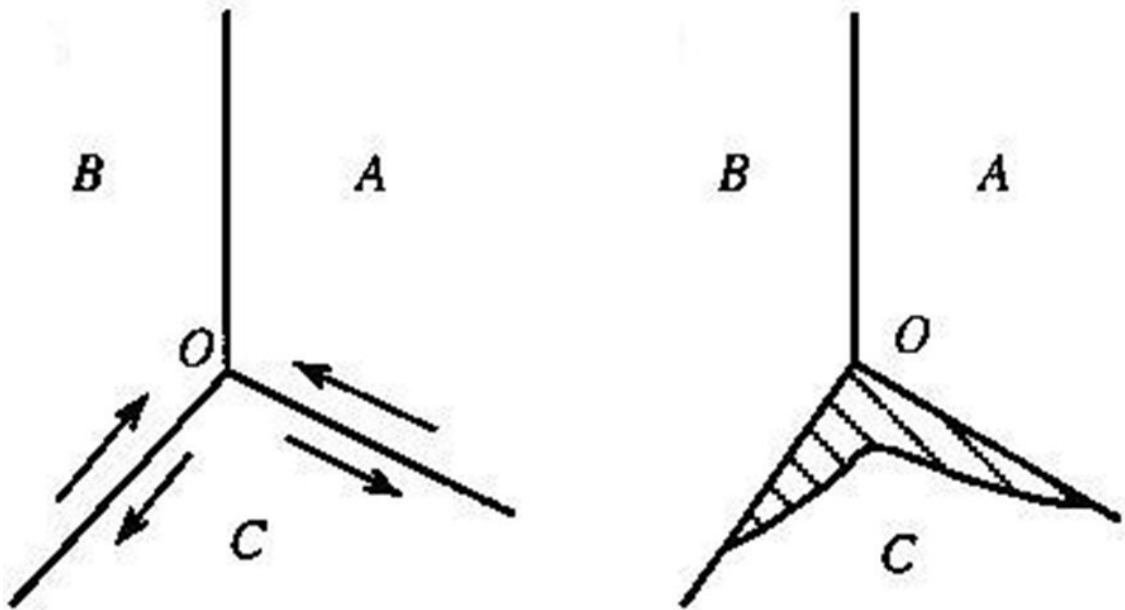


Рис. 7. Схема зарождения трещины в стыке трех зерен за счет межзеренной деформации [3]

Кроме рассмотренных, возможны и другие механизмы зарождения пор и трещин. Способ образования зародышевых дефектов зависит от типа кристаллической решетки металла и характера микроструктуры. Дальнейшее поведение пор и трещин, определяющее многие механические характеристики материала, зависит от условий нагружения, под действием которых объемные дефекты развиваются.

2.1. Развитие трещины

Вязкое и хрупкое разрушения включают в себя две стадии:

- 1) зарождение зародышевой трещины;
- 2) распространение трещины.

По механизму зарождения трещин они принципиально не различаются. Качественное различие между ними связано с энергоемкостью и скоростью распределения трещин. При хрупком разрушении скорость очень велика, она достигает 0,4–0,5 скорости распространения звука в материале образца. В случае же вязкого разрушения трещина распространяется в основном с относительно малой скоростью, соизмеримой со скоростью деформации образца.

Энергоемкость вязкого разрушения значительно больше, потому что при развитии вязкой трещины пластическая деформация идет не только вблизи ее вершины, но и по значительному объему детали или образца. В результате работа, необходимая для продвижения трещины, здесь значительно больше, чем при развитии хрупкой трещины, когда пластическая деформация локализована в узком слое у ее вершины.

Вторая стадия разрушения является наиболее важной, поскольку именно она в основном определяет сопротивление материала разрушению. По Я.Б. Фридману, процесс разрушения на стадии развития трещины включает следующие этапы:

- 1) инкубационный, на котором скорость распространения трещины постепенно возрастает;
- 2) период торможения, характеризующийся замедлением роста трещины;
- 3) стационарный, когда скорость развития трещины постоянна;
- 4) ускоренный, иногда идет лавинообразный период роста трещины, с все возрастающей скоростью вплоть до полного разрушения тела.

Первые три периода соответствуют так называемой докритической стадии развития трещины, когда процесс разрушения еще можно контролировать, а четвертый – закритической стадии распространения трещины, когда окончательное разрушение становится уже трудно управляемым и часто необратимым.

Конец ознакомительного фрагмента.

Текст предоставлен ООО «ЛитРес».

Прочитайте эту книгу целиком, [купив полную легальную версию](#) на ЛитРес.

Безопасно оплатить книгу можно банковской картой Visa, MasterCard, Maestro, со счета мобильного телефона, с платежного терминала, в салоне МТС или Связной, через PayPal, WebMoney, Яндекс.Деньги, QIWI Кошелек, бонусными картами или другим удобным Вам способом.