

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Оренбургский государственный университет»

О.А. Фролова

# **ОСОБЕННОСТИ РАЗРУШЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ НАГРУЖЕНИЯ**

Учебное пособие

Рекомендовано ученым советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки, входящим в образовательную область «Инженерное дело, технологии и технические науки»

Оренбург  
2019

УДК 669.15  
ББК 34.5  
Ф 22

Рецензент – доктор технических наук, профессор Ю.А. Чирков

**Фролова, О.А.**

Ф 22 Особенности разрушения конструкционных материалов при различных условиях нагружения [Электронный ресурс] : учебное пособие / О.А. Фролова; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2019. – 91 с. ISBN 978-5-7410-2210-8

В учебном пособии рассмотрены различные виды классификаций изломов, особенности макро- и микростроения изломов, виды и механизмы разрушения конструкционных материалов при однократных и многократных видах нагружения.

Учебное пособие рекомендовано обучающимся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки, входящим в образовательную область «Инженерное дело, технологии и технические науки», по дисциплинам «Повреждения материалов и конструкций ЛА», «Прочность конструкций», «Механика разрушения» для практических занятий и организации самостоятельной работы.

**Учебное пособие подготовлено в рамках реализации проектов по совершенствованию содержания и технологий целевого обучения студентов в интересах организаций оборонно-промышленного комплекса («Новые кадры ОПК–2017»).**

УДК 669.15  
ББК 34.5

ISBN 978-5-7410-2210-8

© Фролова О.А., 2019  
© ОГУ, 2019

## Содержание

Введение .....	4
1 Фрактодиагностики разрушения .....	6
1.1 Понятие фрактодиагностики разрушения .....	6
1.2 Классификация изломов.....	15
1.3 Макростроение изломов.....	18
1.4 Микростроение изломов .....	27
1.5 Вопросы для самопроверки .....	37
2 Механизмы и характер разрушения конструкционных материалов при однократных видах нагружения .....	39
2.1 Виды и механизмы разрушения .....	39
2.2 Вязкое разрушение.....	40
2.3 Хрупкое разрушение.....	43
2.4 Смешанное разрушение.....	45
2.5 Вопросы для самопроверки .....	46
3 Механизмы и характер разрушения конструкционных материалов при многократных видах нагружения .....	48
3.1 Характеристики условий нагружения и усталостной прочности .....	48
3.2 Механизм усталостного разрушения .....	56
3.3 Вопросы для самопроверки .....	59
4 Элементы механики разрушения.....	60
4.1 Однократные виды нагружения .....	60
4.2 Усталостное нагружение.....	68
4.3 Вопросы для самопроверки .....	79
5 Определение свойств материала и параметров разрушения .....	80
5.1 Определение критической температуры хрупкости материала.....	80
5.2 Оценка длительности роста усталостной трещины по ширине усталостных бороздок.....	86
5.3 Определение величины номинального напряжения по параметрам микрорельефа излома .....	87
5.4 Вопросы для самопроверки .....	88
Список использованных источников .....	89

## Введение

Важнейшая роль в установлении причины разрушения конструкций и деталей машин принадлежит анализу эксплуатационных изломов. Причинами эксплуатационных разрушений могут быть, например, малое сечение детали, наличие концентраторов напряжения, неправильный монтаж (слабый крепеж), неправильная эксплуатация (превышение допустимых нагрузок, низкие температуры эксплуатации, активная вредная среда), низкое качество или не соответствие материала, наличие в материале опасных для эксплуатации дефектов (микротрещин, волосовины).

Визуальный осмотр при малом увеличении (макрофрактография) важен для идентификации областей, нуждающихся в дальнейшем исследовании при более высоком увеличении (микрофрактография).

Анализ изломов материалов позволяет получить важную информацию о нагружении образца или элемента конструкции. Это дает возможность устанавливать обратную связь между действительными и расчетными характеристиками материала, необходимую при диагностике аварийных случаев разрушения конструкций и выяснении причин, вызвавших поломку.

Повышение эксплуатационной надежности и долговечности конструкций и деталей машин связано с технической диагностикой причин разрушения.

Для диагностики разрушения конструкций и деталей машин необходимо знать структуру и свойства металлических материалов, строение изломов, механизмы разрушения, методы изучения изломов, методы механических испытаний, методы количественной оценки параметров разрушения, методики расчетов конструкций с трещиной на прочность. Изучение механизмов разрушений металлических материалов позволяет использовать полученные результаты для прогнозирования поведения материала в конкретных условиях эксплуатации и расчета конструкции на прочность.

Связь физических и металловедческих аспектов разрушения с критериями механики разрушения представляет особую актуальность и дает представление о природе процессов зарождения и распространения трещин при различных условиях нагружения, позволяет более корректно описывать поведение материала на различных стадиях разрушения.

Более 80 % всех поломок и аварийных разрушений деталей машин и конструкций происходит от действия переменных напряжений. Циклические нагрузки испытывают, например, элементы мостовых сооружений, гребные и воздушные винты, поршневые пальцы, коленчатые валы, молот наковальни, пружины, рессоры, оси железнодорожных вагонов.

Усталостное разрушение происходит при напряжениях, меньших предела прочности при статическом нагружении и характеризуется внезапностью. Рост усталостной трещины контролируется коэффициентами интенсивности напряжения у её вершины. По мере возрастания коэффициентов интенсивности напряжения, изменяется локальное напряженное состояние материала у вершины трещины, а, следовательно, и механизм усталостного разрушения. Долговечность образцов, деталей или элементов конструкций, работающих в условиях циклического нагружения, определяется в значительной степени периодом роста усталостной трещины.

# 1 Фрактодиагностики разрушения

## 1.1 Понятие фрактодиагностики разрушения

Развитие фрактодиагностики разномасштабных объектов должно позволить понять общие закономерности процесса разрушения и установить взаимосвязь между расчетными, прогнозируемыми и действительными характеристиками материалов в различных условиях нагружения.

Целью анализа любых эксплуатационных повреждений является определение причины или причин, вызвавших повреждение узла или детали. Это необходимо для того, чтобы можно было провести соответствующую корректировку обработки или условий эксплуатации других узлов и деталей во избежание подобного рода повреждений.

Важнейшая роль в установлении причины разрушения конструкций и деталей машин принадлежит анализу эксплуатационных изломов. Причинами эксплуатационных разрушений могут быть, например, неправильная конструкция (малое сечение детали, наличие концентраторов напряжения) или не правильный ее монтаж (слабый крепеж), неправильная эксплуатация (превышение допустимых нагрузок, низкие температуры эксплуатации, активная вредная среда), низкое качество или не соответствие материала; наличие в нем опасных для эксплуатации дефектов (микротрещин, волосовины).

Изучение разрушения начинается с визуального обследования, при котором устанавливают следующее:

- наличие механических повреждений;
- признаки чрезмерной коррозии;
- деформацию детали;
- наличие признаков вторичного разрушения;
- возможность определения очага разрушения;
- возможность определения направления распространения трещины.

Определение очага разрушения является весьма важным для анализа повреждений, а расположение этого очага может оказаться решающим при разработке мероприятий для предотвращения повторных разрушений. Так, если очаг разрушения находится на поверхности, то требуется упрочнить поверхность, к примеру, путем дробеструйной обработки. Если очаг разрушения находится в приповерхностном слое, то требуется повышение общей прочности, увеличение сечения или уменьшения числа внутренних несплошностей (включений, раковин и т.п.).

Детальными рельефа, облегчающими идентификацию очага разрушения, являются:

- концентрические волокнистые линии;
- радиальные линии;
- следы останковки трещины.

Детальными, показывающими направление распространения трещины, являются:

- шевронные узоры;
- ветвление трещины;
- ручьиистые узоры.

При изучении этих деталей можно проследить путь трещины в обратном направлении, т.е. к источнику ее зарождения, и таким образом определить возникла ли эта трещина на:

- включения;
- на участке пористости;
- на частицах выделившейся фазы;
- у коррозионной ямки;
- у механического надреза;
- на закате послековки;
- на внутренней трещине или царапине;
- образовалась в результате перегрузки.

При разработке конструкции детали заранее предвидят конкретный тип нагружения в процессе ее эксплуатации. Из данных фактографического

обследования можно получить сведения о характере и величине приложенного напряжения. В вязких материалах особенности разрушения при растяжении, кручении и сдвиге легко различимы и образующиеся ямки нельзя перепутать. В хрупких же материалах соответствующие признаки не так очевидны. При разрушении по механизму чистого скола или в случае полностью межзеренного механизма часто трудно определить, в результате какого конкретного воздействия произошло разрушение.

Усталостное разрушение (наиболее часто встречающееся в деталях машин) реализуется при постепенном подрастании одной или нескольких усталостных трещин, образованных в процессе повторяющегося циклического нагружения. Рост трещин может начаться от одной или нескольких поверхностных или подповерхностных несплошностей. В результате повторяющихся циклов нагружения усталостная трещина подрастает ступенчато, образуя параллельные микроскопические полосы, известные как усталостные бороздки, а их наличие служит прямым доказательством цикличности нагружения.

Отсутствие усталостных бороздок еще не может служить доказательством того, что деталь не подвергалась циклическому нагружению, поскольку в некоторых случаях бороздки могут быть скрыты (завуалированы) или полностью уничтожены в результате коррозии, а в некоторых материалах (например, в высокопрочных сталях) практически не образуются.

При изучении поверхности разрушения не всегда удастся сделать точный вывод о направлении главного приложенного напряжения, но возможно определенное приближение. Например, при наличии равноосных ямок можно предположить, что разрушение произошло в результате простого растяжения, а ось напряжения была приблизительно нормальна к поверхности разрушения; если ямки вытянутые, то разрушение произошло по механизму либо сдвига, либо отрыва; в случае разрушения отрывом для того, чтобы определить, произошло ли оно в результате растяжения образца с боковым надрезом или под действием изгиба, требуется дополнительная информация; если ямки отсутствуют, а разрушение произошло по механизму внутризеренного скола, то ручьистые узоры служат



индикатором локальных напряжений движения трещины, однако эти направления зависят главным образом от кристаллографической ориентации, а не от направлений действующих напряжений [1].

На основании фрактографического изучения поверхности разрушения можно качественно судить о величине действующего напряжения, но количественные оценки невозможны. В общем случае эта оценка зависит от признаков значительного пластического течения в разрушенной детали. Остаточная деформация свидетельствует о том, что приложенное напряжение существенно выше предела текучести материала. Другим источником информации может служить сравнительная количественная оценка различных составляющих поверхности излома. Так, например, если при усталостном разрушении расстояние между усталостными бороздками большое, протяженность усталостной зоны мала, а зоны долома велика, то это значит, что разрушение произошло в результате высокой нагрузки. О невысоком циклическом напряжении можно говорить в том случае, если протяженность усталостной зоны велика, усталостные бороздки расположены очень близко друг к другу, а зона долома мала. К другим факторам, принимаемым во внимание, относятся: наличие или отсутствие надреза (в том числе и других концентраторов напряжений) в детали, а также характер разрушения — межзеренный или внутризеренный. Однако отсутствие значительной деформации еще не является исчерпывающим доказательством того, что приложенное напряжение было невелико [1].

Многие вопросы оценки сопротивления материала разрушению могут быть решены с помощью фрактографии; для решения других требуются иные методы исследования, а именно: механические испытания, металлография, химический анализ, микрорентгеноспектральный анализ, микродифракционный рентгеновский анализ, катодолюминесценция, оже-спектроскопия. Если такие исследования выполнены на вспомогательных приставках либо к растровому, либо к просвечивающему электронному микроскопу, то их также с известным приближением можно считать фрактографическими.

Как правило, разрушение вязкого сплава происходит в результате слияния микропор, а хрупкого – по механизму внутризеренного скола или межзеренного разделения.

Изучение металлографических шлифов, вырезанных перпендикулярно поверхности разрушения, позволяет судить о характере микроструктуры и о качестве проведенной термической обработки. Если имел место перегрев, то по микроструктуре можно выявить этот дефект. Если по границам зерен имеются охрупчивающие фазы или пленки, способствующие межзеренному разрушению, то их также можно увидеть на микрофотографиях.

По фрактограммам, выполненным при большом увеличении, можно судить о чистоте металла, т.е. много или мало включений встречается в изломе. По таким фрактограммам можно также судить о форме включений, так как в процессе разрушения происходит отделение включений от матрицы, что позволяет получить трехмерное представление об их форме.

Если в сплаве образовалась сегрегация каких-либо элементов, то фрактографически иногда можно выделить эту область сегрегации по резким отличиям рельефа участка поверхности разрушения от характерного для данного сплава. Степень успеха при распознавании сегрегации отчасти зависит от того, насколько объемна ее «структура». Если «структура» сегрегации (вернее, создаваемое ею отличие рельефа) слишком тонкая, то для ее распознавания требуется применение методов металлографии, а главное микрорентгеноспектрального анализа.

Изучение поверхностей разрушения позволяет судить о том, явились ли дефекты, образовавшиеся в процессе обработки, причиной разрушения:

- складки при ковке и волосовины легко выявляются, поскольку на поверхностях этих дефектов нет никаких характерных, признаков разрушения;
- для усадочной пористости характерна дендритная структура (особенно внутри усадочной раковины), которую невозможно спутать с рельефом разрушения.
- поверхности трещин, образовавшихся до или во время термической обработки, легко отличить от трещин, образовавшихся в процессе дальнейшего

разрушения, так как на поверхности этих термических трещин присутствуют окисные пленки или продукты коррозии (точный состав таких пленок зависит от того, как нагревали деталь в процессе термической обработки или горячей деформации после образования трещины, а также от того, была ли трещина заполнена жидким или газообразным корродирующим веществом перед началом ее распространения в процессе эксплуатации) [1].

Потенциальным источником трещин является сварка. Трещины могут возникать как внутри, так и на поверхности сварного шва либо образоваться в зоне термического влияния сварки (в основном металле):

- если эти трещины образовались при температуре окружающей среды, то они, по-видимому, имеют сходство с поверхностью разрушения в зоне долома;
- если они образовались до полного охлаждения детали после сварки, то на поверхности открытых трещин видны окисные пленки.

На поверхностях внутренних трещин, как правило, не происходит окисления. При фрактографическом исследовании будут фиксироваться все открытые окисленные трещины, однако наиболее полезную информацию о сварочных трещинах можно получить в процессе металлографического исследования поперечного сечения зоны сварки и зоны ее термического влияния при изучении структуры сварного шва и металла в районе трещин.

Перегрузка может вызвать значительное искажение формы детали. Первоначальный осмотр детали невооруженным глазом, а также в стереомикроскоп с малым увеличением должен включать выявление признаков искривления детали. Однако они свидетельствуют о перегрузке только для деталей из материала, обладающего высокой пластичностью (вязкостью) и относительно низким пределом текучести. Если деталь изготовлена из высокопрочной стали, то доказать, что перегрузка была выше нормы, труднее.

Чтобы определить, имела ли место концентрация опасных напряжений, способная инициировать разрушение, необходимо тщательно изучить наружную поверхность детали вблизи зоны разрушения. Источником разрушения могут быть простая риска, выемка или глубокая царапина, образующиеся, как правило, в

результате неаккуратной обработки или сборки при монтаже. Если отсутствуют острые канавки, то другими неровностями поверхности можно пренебречь и не связывать их с разрушением. В то же время если какой-либо рельеф характеризуется острыми углами, то соответствующие риски создают возможность концентрации напряжения, что часто служит причиной образования трещин. В данном случае очевидным средством устранения подобных ситуаций будут тщательная обработка и лучший контроль

Другой источник концентрации напряжений – следы от инструмента. Так, галтель, отличающаяся очень маленьким радиусом, даже если ее поверхность исключительно хорошо обработана, является местом зарождения усталостных трещин, что достаточно широко известно. Острые следы инструмента могут инициировать усталостное разрушение, даже если общий контур соответствующей области имеет большой радиус. Следы от напильника или от шлифовки на поверхности галтели надлежащего радиуса также могут оказаться источниками усталостных трещин.

Различия поверхностных слоев по составу, твердости и микроструктуре могут быть следствием:

- обезуглероживания, поверхностного упрочнения при науглероживании;
- пламенной или индукционной поверхностной закалки;
- поверхностной пластической деформации (например, упрочняющей дробеструйной обработки или накатки поверхности).

Эти различия выявляются фрактографически по изменению особенностей разрушения поверхностного и внутреннего участков. Определение характера поведения каждого участка требует также химического и металлографического анализов.

Эксплуатационное разрушение детали часто обусловлено типом среды, в которой она работала. К активным химическим средам относят воду, насыщенный солью воздух, соленую воду, растворы кислот, щелочей, некоторые жидкие, а также твердые металлы. Термическое влияние, определяющее изменение свойств металла

и его склонность к разрушению, проявляется в случае эксплуатации при низких (например, криогенных) или, наоборот, при высоких температурах.

Если разрушение вызвано коррозией, то продукты коррозии будут присутствовать на поверхности детали и непосредственно на поверхности разрушения. Если произошло коррозионное растрескивание под напряжением, то разрушение часто оказывается межзеренным, а количество продуктов коррозии по границам зерен больше у устья трещины и меньше на ее последнем участке. Отсутствие видимых продуктов коррозии на поверхности разрушения не служит доказательством отсутствия коррозионного растрескивания. При металлографическом исследовании могут быть получены дополнительные данные, характеризующие коррозию по границам зерен и глубину вторичных зернограницных трещин.

Пребывание детали в среде водорода может привести к охрупчиванию. Подобно коррозионному, водородное растрескивание вызывает межзеренное разрушение с очень чистыми фасетками раздела зерен. В реальных условиях не удается выявить четкого различия между коррозией под напряжением и водородным охрупчиванием.

Как правило, для криогенных температур характерно хрупкое разрушение. Наличие плоских фасеток с язычками скола на поверхности разрушения сплава с высокой вязкостью служит признаком того, что разрушение произошло при очень низкой температуре. Если после охлаждения до температуры жидкого азота материал отогреть до комнатной температуры, то предыдущее глубокое охлаждение не должно повлиять на характер разрушения, присущий этому металлу при комнатной температуре, при условии, что до обработки холодом в материале не было большого количества остаточного аустенита.

Нагрев детали до слишком высокой температуры также вызывает определенные изменения:

- окисление поверхностей детали и излома; коробление;
- снижение твердости термически обработанных сталей;
- частичное оплавление локальных химических сепрегаций.

Разрушение в результате удара, возникшего в особых условиях эксплуатации высокоинерционных изделий (например, при транспортной аварии), относят к несколько необычному «влиянию окружающей среды». Фрактографическое исследование позволяет выяснить, давно ли произошло разрушение, имеет ли оно следы кратковременных перенапряжений, а также связаны ли очаг и путь развития трещины с общей деформацией, возникшей в результате удара.

Размер, форма и поперечное сечение образца, детали или конструкции могут оказывать большое влияние как на микро-, так и макрокартину поверхности разрушения, особенно если приложенное напряжение было значительным по величине. Отверстия, углы, надрезы, механические царапины, а более всего уже существующие трещины очень сильно влияют на вид поверхности разрушения. Значительные локальные повышения напряжений – образование так называемых пиковых напряжений – более вероятны в крупных деталях, чем в мелких, так как крупная деталь имеет большее количество различного рода дефектов и высокий запас упругой энергии.

Чем толще используемая деталь, тем в большей мере проявляется трехосность и концентрация напряжений в зоне впереди вершины трещины и тем ближе условия распространения трещины к условиям плоской деформации.

Если деталь изготовлена из материала, который не разрушается по механизму скола или по межзеренному механизму, то увеличение толщины выразится в изменении вида поверхности разрушения от ямок сдвига (для тонкого листа) до ямок отрыва (для толстого листа). Вид макроизлома изменится от полностью косоугольного (тонкая деталь) до полностью плоского (толстая деталь) излома, перпендикулярного оси напряжения.

Иным оказывается влияние толщины образца на механизм разрушения детали в коррозионной среде. С повышением толщины детали, работающей в соленой воде, происходит изменение характера разрушения – от слияния микропор до межзеренного разрушения, даже при более низком коэффициенте интенсивности приложенных напряжений.

Важное значение имеет анизотропия материала. Признаки разрушения по границам зерен сплава, в других случаях разрушающегося по вязкому механизму, означают, что нагрузка была приложена перпендикулярно направлению прокатки. В частности, это происходит в нержавеющей сталях, в которых прошло дисперсионное твердение, и в некоторых алюминиевых сплавах, которые после прокатки иликовки обладают полосчатой структурой. Границы самых крупных зерен в случае сильной анизотропии будут параллельны направлению прокатки, при этом сегрегации элементов и преимущественно формирование частиц будут повышать вероятность образования микропустот вдоль этих границ. Чтобы предотвратить подобное разрушение, конструкцию детали надо изменить таким образом, чтобы изменить направления приложенного напряжения [1].

## **1.2 Классификация изломов**

Фрактография – наука, изучающая строение изломов. Излом представляет собой поверхность, образованную в результате разрушения детали или конструкции, и является одним источником информации о причинах и характере разрушения, о качестве металла и его способности сопротивляться приложенным нагрузкам [2– 6].

Излом в ряде случаев остается единственным информативным свидетелем разрушения, и от того, насколько правильно будет проведена экспертиза, зависят меры, которые следует принять для предупреждения возможных разрушений в будущем.

Классификация изломов по природе силовых воздействий представлена на рисунке 1.1 [7–11].



Рисунок 1.1 – Схема классификации изломов по природе силовых воздействий

Классификация по характеру силовых воздействий представлена на рисунке 1.2.



Рисунок 1.2 – Схема классификации изломов по характеру силовых воздействий



Классификация по ориентации излома относительно оси нагружения представлена на рисунке 1.3.



Рисунок 1.3 – Схема классификации изломов по ориентации излома относительно оси нагружения

Классификация по макрогеометрии поверхности излома представлена на рисунке 1.4.

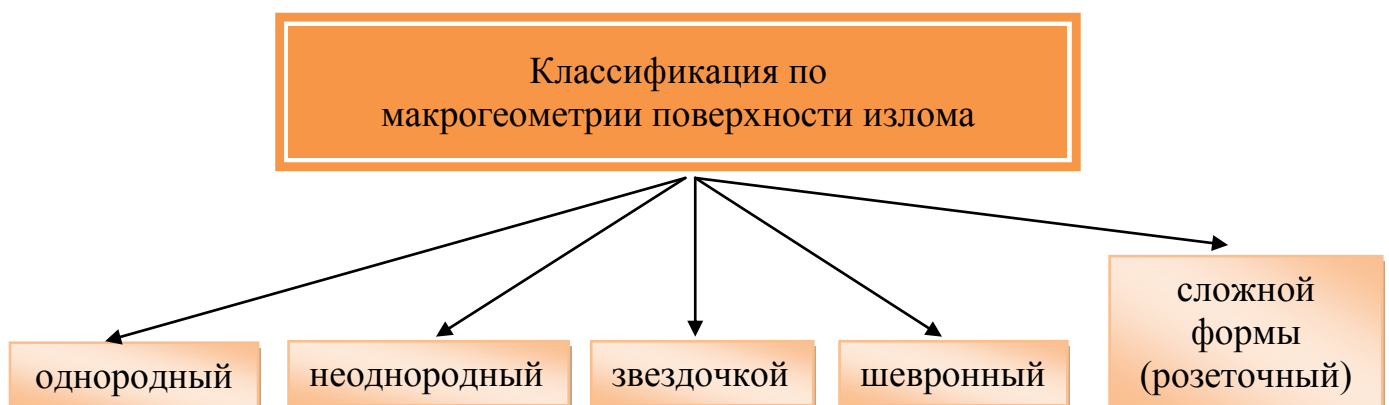


Рисунок 1.4 – Схема классификации изломов по макрогеометрии поверхности

Классификация по шероховатости, блеску и цвету излома представлена на рисунке 1.5.

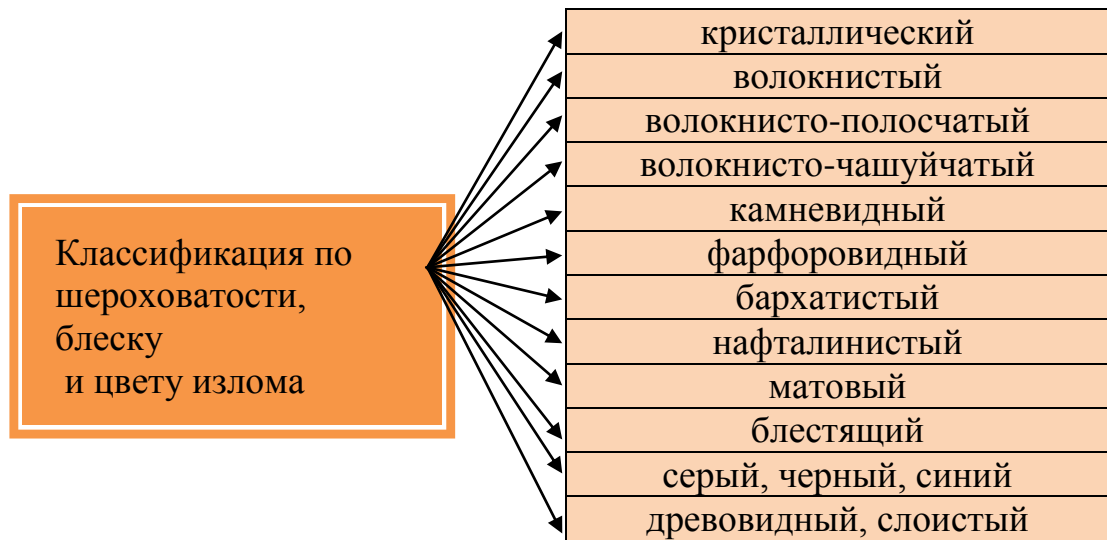


Рисунок 1.5 – Схема классификации изломов по шероховатости, блеску и цвету

### 1.3 Макростроение изломов

Изучение макростроения изломов позволяет выявлять различные зоны и области:

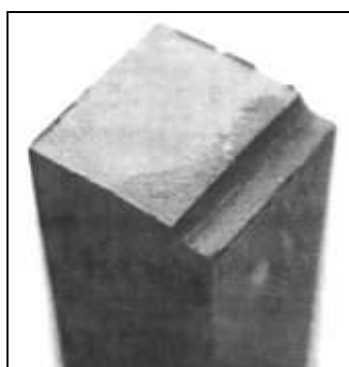
- область очага или зону зарождения трещины;
- зону устойчивого развития трещины;
- зону неустойчивого развития трещины.

По изменениям макрорельефа поверхности изломов можно проанализировать стадийность процесса разрушения, механическое поведение материала, а также влияние условий нагружения, например, ориентация излома по отношению к направлению нагружения свидетельствует о виде нагружения.

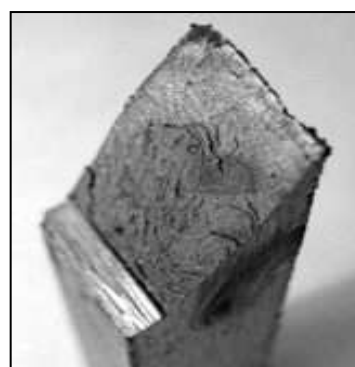
Рассмотрим макростроение различных видов изломов [1].

Поверхность разрушения прямого излома расположена перпендикулярно к оси детали или образца, что характерно для хрупкого разрушения (рисунок 1.6 а). Поверхность косоугольного излома расположена под углом к оси детали или образца, что характерно для вязкого разрушения или разрушения в условиях сдвиговых деформаций.

Поверхность прямого со скосами содержит участки прямого (в центре) и косоугольного (вблизи боковой поверхности) разрушения (рисунок 1.6 б). Такой излом образуется при вязком разрушении с образованием губ среза при растяжении.



а)



б)

Рисунок 1.6 – Прямой (а) и прямой со скосами (б) изломы

При растяжении гладкого образца образуется чашечный излом или излом типа «чашка-конус» (рисунок 1.7), которые относятся к разновидности прямого со скосами излома.

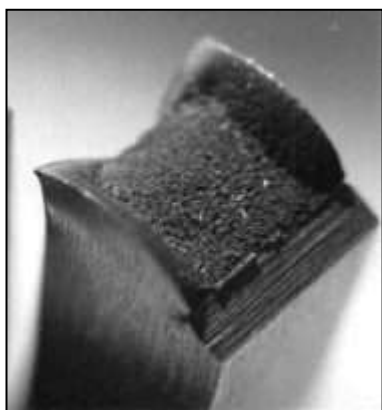


х3 (аустенитная сталь) [2]

Рисунок 1.7 – Изломы типа «чашка-конус»

Однородный излом характеризуется поверхностью разрушения без различимых зон и участков на его поверхности (рисунок 1.8 а).

Неоднородный излом имеет различные зоны и участки, отличающиеся по макрорельефу, цвету и по макроориентации. Граница между зонами выявляется по изменению цвета, блеска или шероховатости излома (рисунок 1.8 б).



а) x5 (аустенитная сталь) [2]



б) x5 (катаная сталь 40ХНМ) [5]

Рисунок 1.8 – Однородный (а) и неоднородный (б) изломы

Излом звездочкой характеризуется формированием радиальных рубцов, которые исходят из очага разрушения, располагающегося в центре образца (рисунок 1.9). Радиальные рубцы, покрывающие всю поверхность излома, являются свидетельством хрупкого разрушения. В гладких цилиндрических образцах зона с радиальными рубцами имеет вид концентрических окружностей; в прямоугольных образцах зона имеет эллиптическую форму.

Грубые рубцы связаны со сдвигом. Вдоль таких рубцов располагаются продольные расщепления, которые являются следствием больших растягивающих напряжений. Тонкие радиальные рубцы связаны с квазисколом или межзеренным растрескиванием.



х5 (сталь 09Г2С) [6]

Рисунок 1.9 – Излом звездочкой

Шевронные изломы образуются при нестабильном, быстром развитии трещины (рисунок 1.10). В центре образца присутствуют прямолинейные рубцы, развивающиеся в направлении роста трещины, которые вблизи боковой поверхности искривляются, и следуют перпендикулярно направлению роста трещины.



Рисунок 1.10 – Шевронный излом [7]

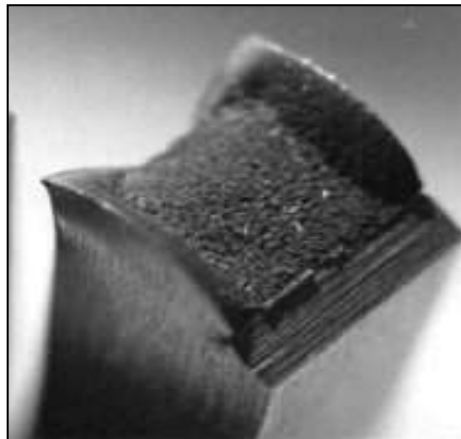
Кристаллический излом представляет собой однородную поверхность хрупкого разрушения с блестящим кристаллическим строением без признаков макропластической деформации (рисунок 1.11).



х5 (аустенитная сталь) [2]

Рисунок 1.11 – Кристаллический излом

Волокнистый излом характеризуется наличием однородной поверхности вязкого внутризеренного разрушения с выраженными признаками пластической деформации по всей поверхности разрушения. Характерен для вязкого разрушения (рисунок 1.12).



х5 (аустенитная сталь) [2]

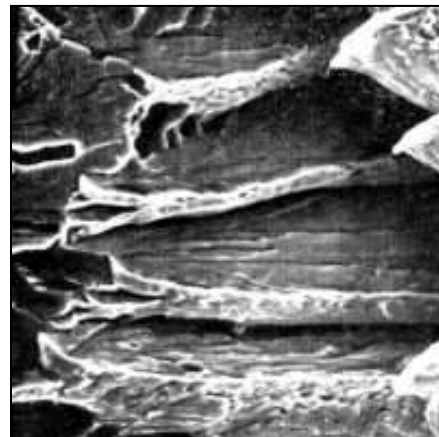
Рисунок 1.12 – Волокнистый излом

Волокнисто-полосчатый (рисунок 1.13 а) и волокнисто-чашуйчатый (рисунок 1.13 б) изломы являются разновидностями волокнистого излома.

Появление неоднородного волокнистого излома сопровождается повышением анизотропии механических свойств, причем заметно снижаются ударная вязкость и относительное удлинение по толщине [5].



а) x15 (катаная сталь) [5]



б) x2000 (катаная сталь) [5]

Рисунок 1.13 – Волокнисто-полосчатый (а) и волокнисто-чашуйчатый (б) изломы

Волокнисто-полосчатый излом образуется при растяжении в плоскости, параллельной направлению деформации и перпендикулярной поверхности деформации. На изломе наблюдаются длинные выступы и впадины, которые расположены рядами, параллельно направлению деформации. Это связано с особенностями технологического процесса и начальной структурой материала, что обуславливает скопление различного рода включений или легирующих элементов, которые располагаются в виде прожилок, полосок, строчек, вытянутых вдоль направления прокатки.

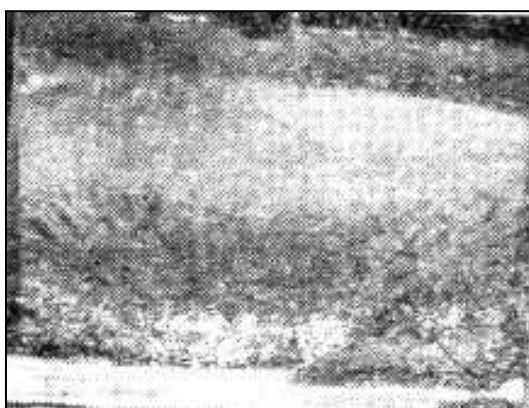
Камневидный излом (рисунок 1.14) имеет однородную поверхность разрушения с бугорчатым, грубозернистым строением; металлический блеск отсутствует. Камневидный излом происходит по межзеренном механизму. Наблюдается в литой и деформированной стали после пережога.



x10 (сталь 30X2H2M) [7]

Рисунок 1.14 – Камневидный излом

Фарфоровидный излом (рисунок 1.15) имеет мелкокристаллическое строение, сглаженную поверхность светло-серого цвета, похожую на поверхность разрушенного фарфора. Образуется при разрушении стали с пониженной пластичностью и высоким уровнем прочности.



x2 (сталь 45XHMFA) [5]

Рисунок 1.15 – Фарфоровидный излом

Бархатистый излом встречается при разрушении аустенитных сталей при низких температурах, цветных сплавов и закаленных инструментальных сталей (рисунок 1.16). Излом внешне напоминает фарфоровидный излом; имеет



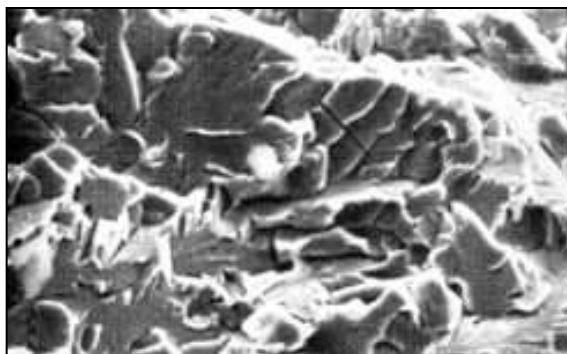
мелкозернистое строение и гладкую поверхность серого цвета с тусклым металлическим отливом, напоминающим бархат.



x5 (катаная сталь 45XNMFA) [5]

Рисунок 1.16 – Бархатистый излом

Нафталинистый (нафталиновый) излом представляет собой однородную поверхность разрушения, не имеющую явных признаков макропластической деформации (рисунок 1.17).



x2000 (катаная сталь 30XNMFA) [5]

Рисунок 1.17 – Нафталинистый излом

Крупные плоские участки в изломе имеют характерный оттенок и селективный блеск, изменяющийся при изменении угла падения света и напоминающий блеск нафталина. Наблюдается в основном в литых конструкциях

сталей; в деформированных сталях встречается реже. При больших увеличениях нафталинистый излом имеет структуру скола или квазискола.

На поверхности усталостных изломов образуются усталостные зоны, являющиеся характеристикой стадийности усталостного разрушения (рисунок 1.18). В зависимости от количества циклов нагружения, которое выдержал образец или деталь до разрушения, происходит формирование усталостных зон, а их количество и размеры зависят от параметров нагружения.

В области малоциклового усталости на поверхности изломов образуется две зоны: зона усталостного развития трещины и зона долома (рисунок 1.18 а).

В области многоциклового усталости на поверхности изломов образуется три зоны: зона стабильного роста трещины, зона ускоренного развития трещины и зона долома (рисунок 1.18 б).



х5 (аустенитная сталь) [2]

а) малоцикловая усталость



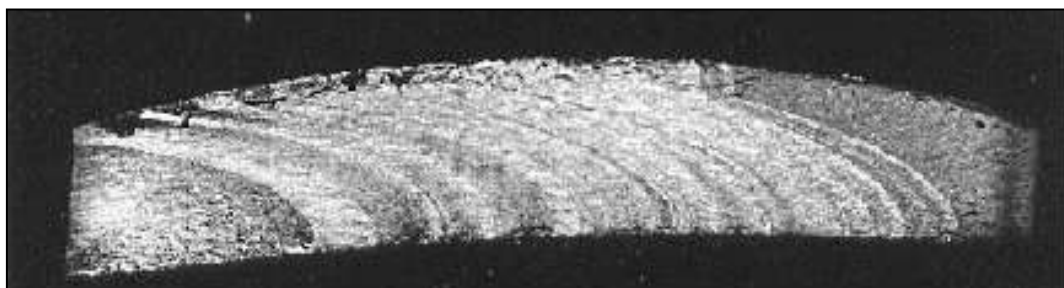
х5 (аустенитная сталь) [2]

б) многоцикловая усталость

Рисунок 1.18 – Усталостные изломы

В результате смены величины циклической нагрузки, механизма разрушения, избирательного окисления или коррозии отдельных зон поверхности излома, небольшой местной пластической деформации в областях высокой концентрации напряжений у вершины трещины на усталостных изломах могут появляться

макролинии остановки фронта трещины. Эти линии называются полосами Форсайта (рисунок 1.19).



х3 (титановый сплав ВТ3) [5]

Рисунок 1.19 – Полосы Форсайта на изломе турбинной лопатки

Расположение и форму линий усталости, величину промежутков между ними используют для качественной оценки скорости роста трещины:

- макролинии усталости, которые расположены с одинаковыми интервалами, характерны для низкой скорости роста трещины при минимальных отклонениях от постоянства условий нагружения;
- макролинии усталости, которые пересекают основную часть излома, характерны для низких циклических нагрузок.

По форме усталостных макролиний можно приблизительно оценить нагрузку, вызвавшую разрушение [4].

#### **1.4 Микростроение изломов**

Исследование поверхности разрушения в электронных микроскопах позволяет выявить микрорельеф поверхности излома и механизмы развития трещины. Механизмы разрушения классифицируют в зависимости от пути распространения трещины и деталей микрорельефа излома.

Различают внутримерное и межзеренное распространение трещины [3, 6].

Механизмы разрушения при внутризеренном (транскристаллитном) развитии трещины представлены на рисунке 1.20.

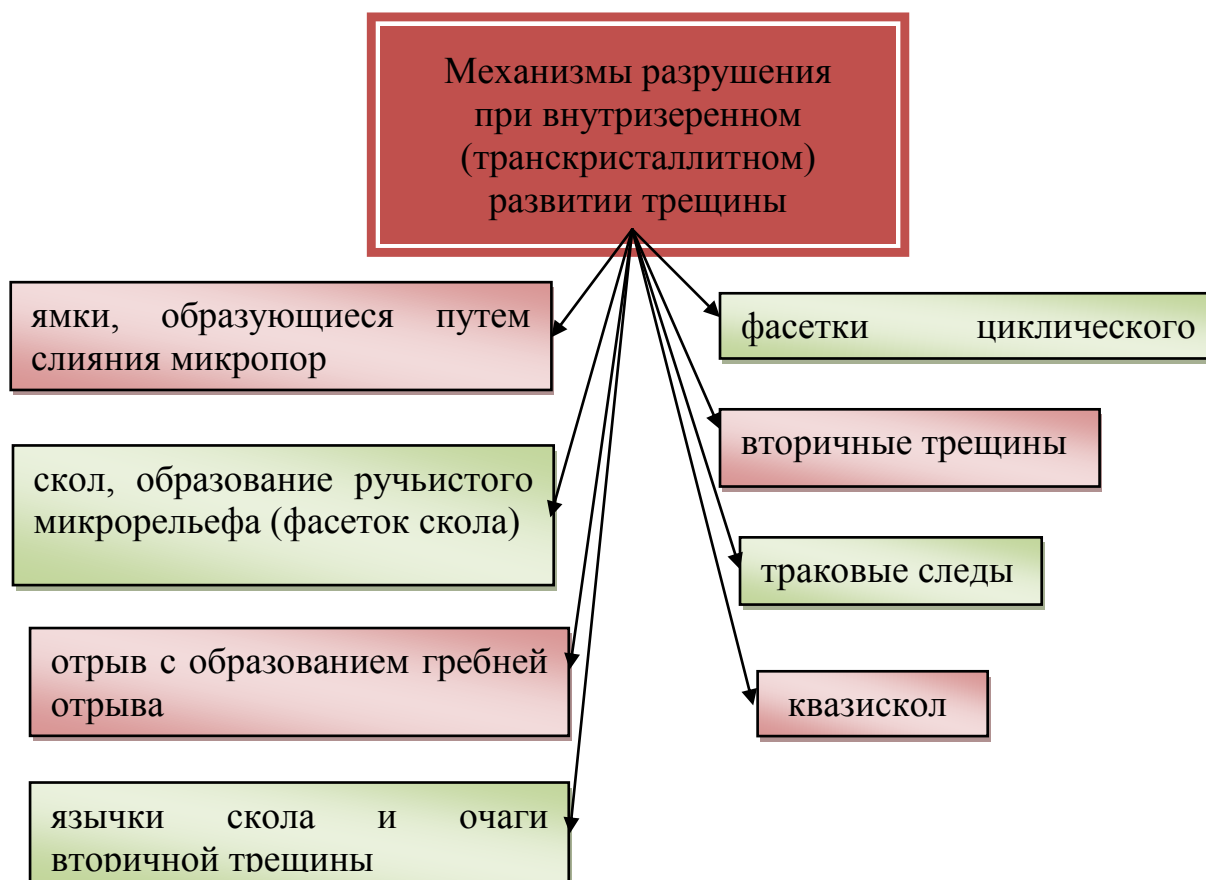


Рисунок 1.20 – Механизмы разрушения при внутризеренном (транскристаллитном) развитии трещины

При смешанном механизме разрушение металлических материалов осуществляется одновременно под действием двух или более механизмов разрушения.

Ямки на поверхности разрушения образуются путем слияние микропор. Ямочный микрорельеф поверхности разрушения наиболее часто встречается при однократном виде нагружения или в тех участках, где имеет место разрушение отрывом (например, в зоне ускоренного развития трещины при усталостном нагружении).

Механизмы разрушения при межзеренном (интеркристаллитном) развитии трещины представлены на рисунке 1.21.

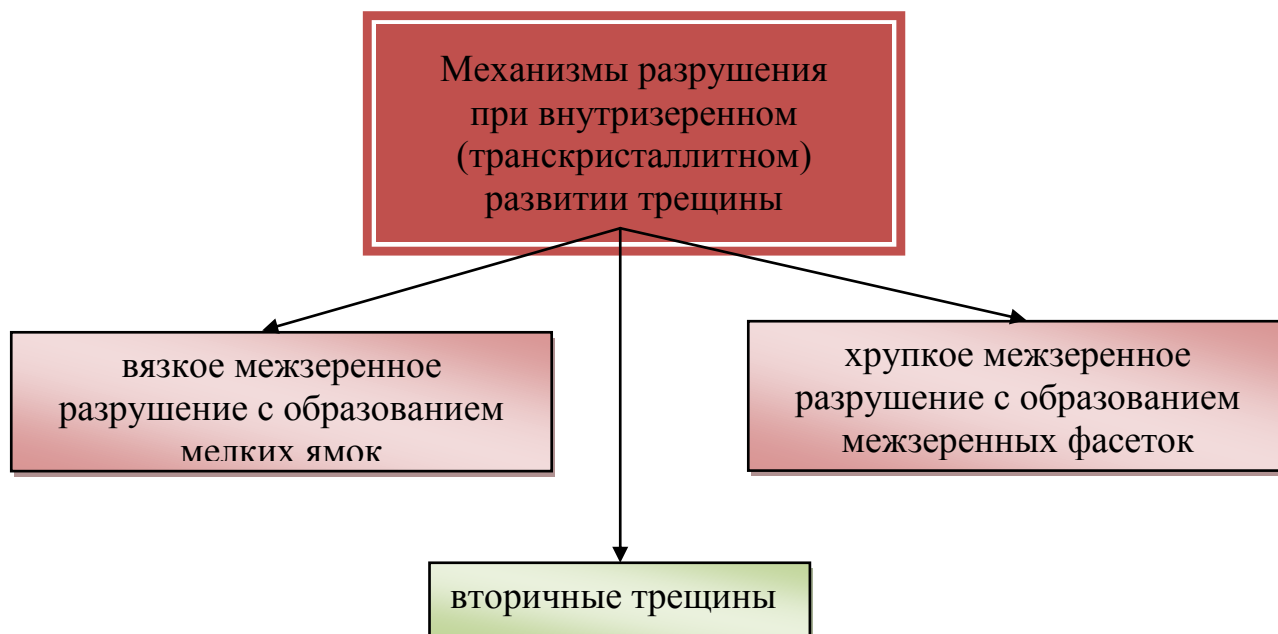


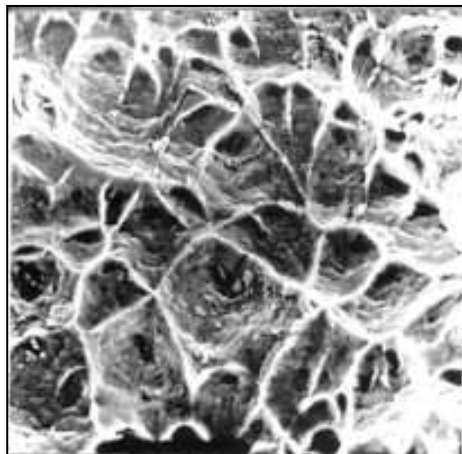
Рисунок 1.21 – Механизмы разрушения при межзеренном (интеркристаллитном) развитии трещины

Как правило, ямки образуются при внутризеренном вязком разрушении (рисунок 1.22 а). При вязком межзеренном (интеркристаллитном) разрушении трещина проходит по границам зерен, в результате чего на изломе наблюдаются отдельные зерна (рисунок 1.22 б). Поверхность зерен покрыта мелкими ямками, образованными путем слияния пор в слое, прилегающем к границам зерен, хотя можно наблюдать и участки хрупкого разрушения. Такое разрушение часто сопровождается образованием вторичных трещин.

Отрыв – это локальное разрушение, которое возникает в результате нарушения распространения трещины по какому-либо другому механизму разрушения.

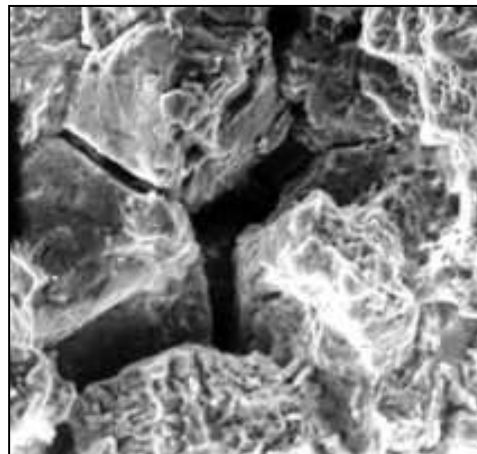
При отрыве небольшие участки сечения разрушаются путем пластического течения материала. Наиболее часто отрыв наблюдается, когда позади главного

фронта трещины остались небольшие неразрушенные области. Отрыв сопровождается образованием гребней отрыва, имеющих острый край [2]. Иногда отрыв приводит к образованию плоских бесструктурных участков микрорельефа.



x1000 (аустенитная сталь 40Г18Ф) [11]

а) внутризеренное вязкое разрушение



x1000 (аустенитная сталь 40Г18Ф) [11]

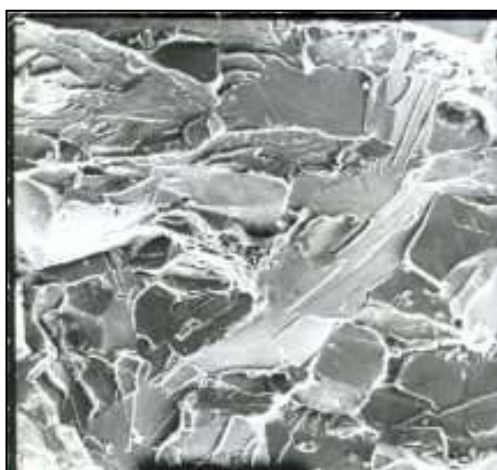
б) межзеренное вязкое разрушение

Рисунок 1.22 – Микрорельеф образца

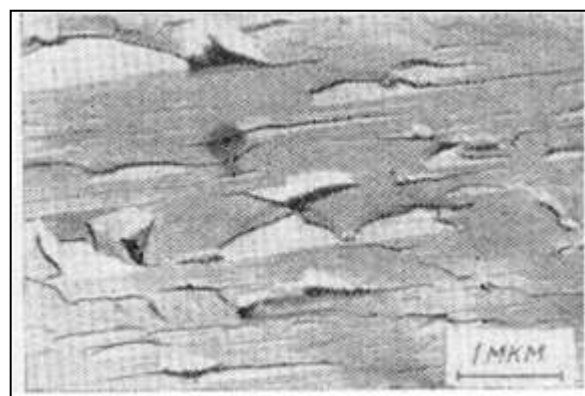
Внутризеренное (транскристаллитное) хрупкое разрушение происходит по механизму скола с образованием фасеток скола и ручьистого микрорельефа (рисунок 1.23 а, б). Скол представляет собой локальное расщепление по определенным кристаллографическим плоскостям. Разрушение сколом происходит обычно при низких температурах или больших скоростях нагружения, когда у вершины трещины реализуется условие плоской деформации. Такой вид разрушения характерен для металлов с объемноцентрированной кристаллической решеткой (ОЦК) или гранецентрированной плотноупакованной кристаллической решеткой (ГПУ).

Трещины скола могут зарождаться на границах зерен, на пересечениях двойников, плоскостей скольжения, на включениях и частицах второй фазы. Внутри зерен наблюдаются фасетки с ручьистым узором в виде ступенек между участками трещины на параллельных плоскостях скола зерна. По мере распространения через

зерно участки трещины растут в ширину и приближаются друг к другу. Ступеньки между плоскостями скола представляют собой места разрушения тонких перемычек, соединяющих сблизившиеся участки трещины скола. Эти ступеньки сходятся в одну точку, от которой начинается локальное развитие трещины, поэтому по их ориентации можно судить о направлении распространения трещины на данном локальном участке.



а) x300 (сталь 45) [12]

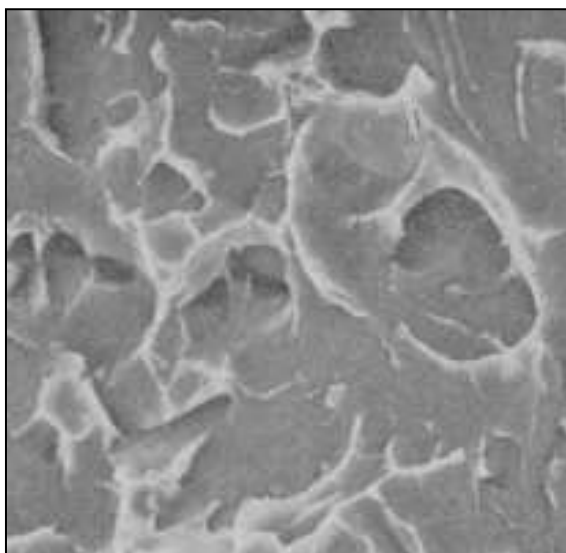


б) сталь Ст3 [12]

Рисунок 1.23 – Микрорельеф хрупкого разрушения

Язычки скола образуются в результате локального отклонения трещины от плоскости скола при пересечении границы между двойником деформации и матрицей. Эти отщепления обычно имеют четко выраженные кристаллографические направления и обусловлены сколом вдоль микродвойников, образованных пластической деформацией у вершины распространяющейся макротрещины.

По механизму квазискола (рисунок 1.24) разрушаются, например, закаленные и отпущенные стали, в структуре которых имеются дисперсные карбидные включения, а также некоторые высокопрочные металлические материалы.



x1500 (Cu-Mo-V сталь) [7]

Рисунок 1.24 – Квазискол

Разрушение происходит при сочетании механизма слияния микропор и скола. Присутствуют слабо различаемые фасетки скола, которые инициированы карбидными или иными включениями. При квазисколе нет выраженной границы между фасеткой скола и участками с ямками, обрамляющими эту фасетку. В отличие от скола, зарождающегося на границе зерна, разрушение при квазисколе зарождается внутри фасеток. Ступеньки скола непосредственно переходят в гребни отрыва соседних ямочных участков.

При межзеренном (интеркристаллитном) хрупком разрушении трещина проходит по границам зерен. На изломе наблюдаются отдельные зерна в виде межзеренных фасеток, имеющих форму многогранников (рисунок 1.25). При межзеренном разрушении по границам зерен образуются вторичные трещины. Причины возникновения межзеренного хрупкого разрушения различны, это наличие хрупких выделений по границам зерен, трехосное напряженное состояние, воздействие активной среды, наличие водорода.

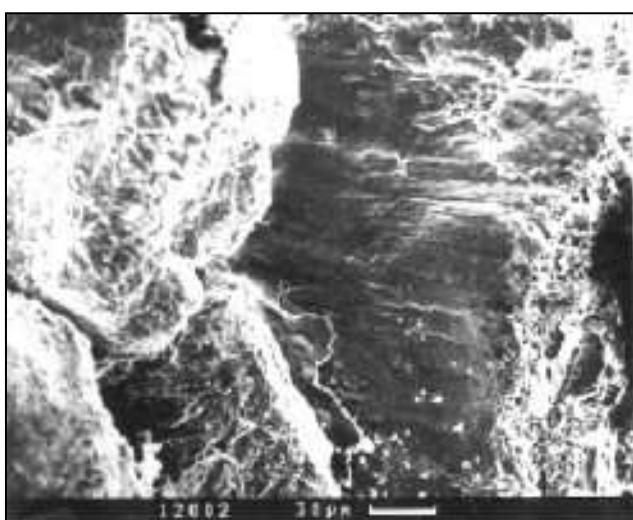




x100 (сталь Н32Т3) [11]

Рисунок 1.25 – Микрорельеф межзеренного хрупкого разрушения

Усталостное разрушение происходит при циклическом действии нагрузок. Для усталостных изломов характерно наличие на поверхности усталостных бороздок (рисунок 1.26). Бороздки обычно распространяются по многим террасам (или плато), которые соединяются между собой ступеньками сдвига.

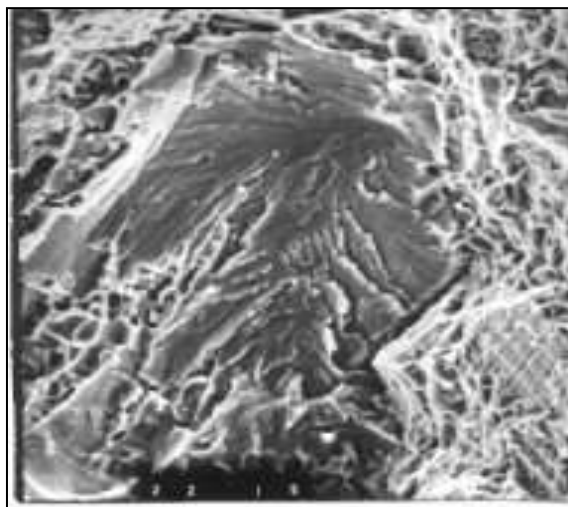


x2500 (никелевый сплав) [7]

Рисунок 1.26 – Микрорельеф усталостного излома (усталостные бороздки)

Бороздки бывают вязкими и хрупкими. Вязкие бороздки образуются путем чередования сдвигового и отрывного локального разрушения. Хрупкие бороздки встречаются реже и сочетают в себе особенности скола (ступеньки) и усталостного разрушения. Расстояние между усталостными бороздками (шаг бороздок) увеличивается с длиной трещины или размахом коэффициента интенсивности напряжений. В ряде случаев по нему можно приблизительно оценить скорость распространения усталостной трещины [12].

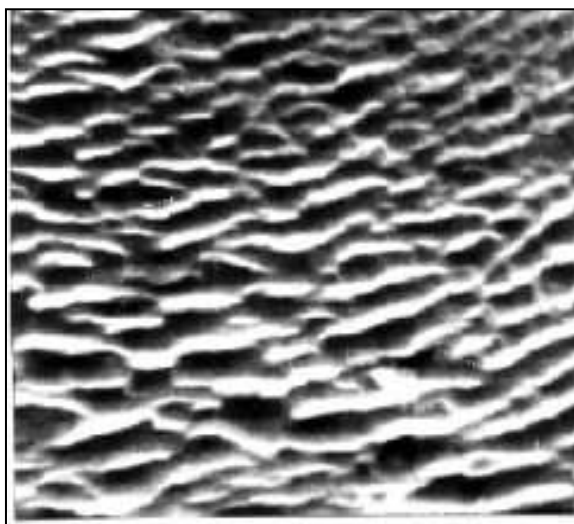
Вблизи очага усталостной трещины при низких амплитудах циклического напряжения различают иногда (при больших увеличениях) квазитороздки (рисунок 1.27), отличающиеся от обычных усталостных бороздок тем, что их ширина почти постоянна по длине трещины, а сами бороздки нерегулярные. Предполагают, что они образуются в результате выхода многочисленных линий скольжения на поверхность излома.



x1400 (алюминиевый сплав) [6]

Рисунок 1.27 – Микрорельеф усталостного излома (квазитороздки)

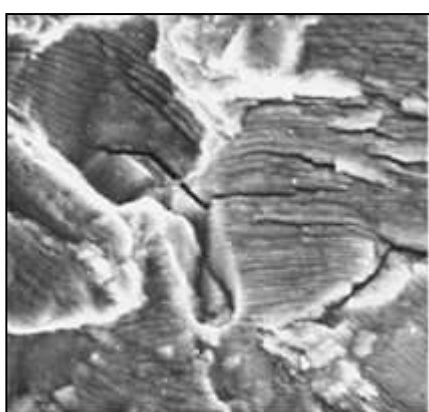
В начальной зоне усталостных изломов, полученных при низких амплитудах напряжения, могут обнаруживаться фасетки циклического скола (рисунок 1.28), образование которых связано с развитием усталостной трещины вдоль определенных кристаллографических плоскостей.



x500 (аустенитная сталь) [6]

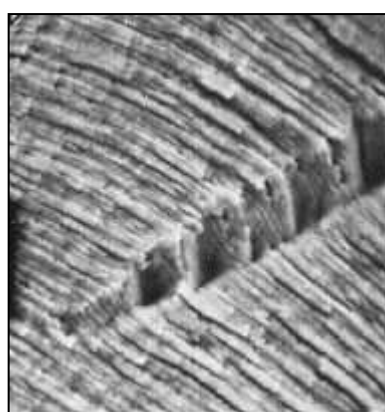
Рисунок 1.28 – Микрорельеф усталостного излома  
(фасетки циклического скола)

Перпендикулярно направлению роста магистральной усталостной трещины встречаются вторичные трещины (рисунок 1.29 а, б), которые появляются в материале в результате локальной релаксации напряжения при её движении. С увеличением степени охрупчивания материала склонность к образованию вторичных трещин увеличивается.



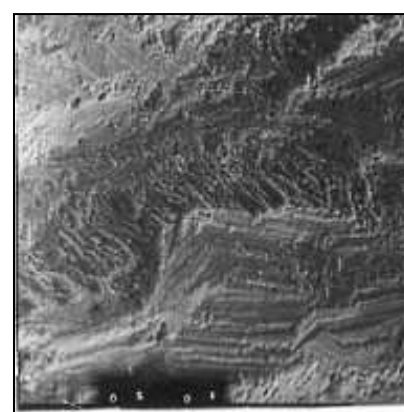
x1200

а) вторичные трещины



x3000

б) вторичные трещины



x3000

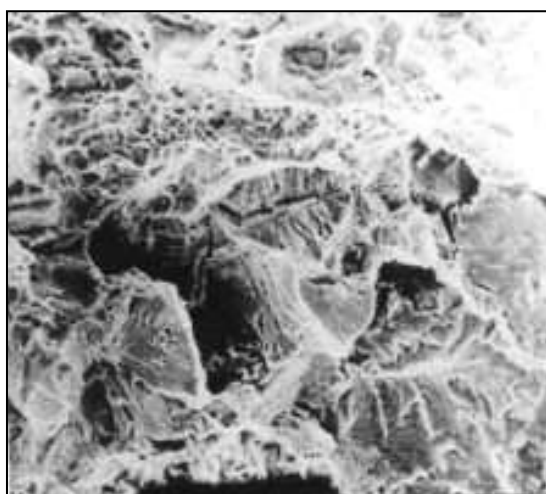
в) траковые следы

Рисунок 1.29 – Микрорельеф усталостного излома [5]

Кроме того, на усталостных изломах иногда наблюдаются траковые следы (рисунок 1.29 в), свидетельствующие о механическом повреждении материала в результате многократного соударения и относительного перемещения двух взаимно соприкасающихся поверхностей. Часто их появление связано с выкрошившимися частицами материала на поверхности излома.

При смешанном механизме разрушения осуществляется при сочетании двух или более механизмов. Такой механизм разрушения, чаще всего, имеет место при однократных видах нагружения материалов с гранецентрированной кристаллической решеткой (ГЦК) в переходной области от плоской деформации к плоскому напряженному состоянию.

Смешанный механизм разрушения следует отличать от последовательной смены различных механизмов разрушения, которые можно рассматривать каждый в отдельности (рисунок 1.30). Разрушение по смешанному механизму обычно означает, что взаимодействующее влияние различных факторов (локального напряженного состояния материала, микроструктуры, окружающей среды) заставили разрушение отклониться от одного какого-то определенного механизма [3]. Возможно сочетание одновременно нескольких микромеханизмов разрушения.



x1000 (сталь 40XГ18Ф) [5]

Рисунок 1.30 – Смешанный механизм разрушения

Сочетания механизмов разрушения при смешанном разрушении [3]:

- скол и слияние микропор;
- скол и отрыв;
- скол и образование усталостных бороздок;
- скол и межзеренное разрушение;
- слияние микропор и отрыв;
- слияние микропор и усталостные бороздки;
- слияние микропор и межзеренное разрушение;
- отрыв и образование усталостных бороздок;
- отрыв и межзеренное разрушение;
- усталостные бороздки и межзеренное разрушение.

### **1.5 Вопросы для самопроверки**

- 1 Что понимают под макро- и микрофрактографией?
- 2 Как классифицируют изломы по природе силовых воздействий?
- 3 Как классифицируют изломы по характеру силовых воздействий?
- 4 Как классифицируют изломы по строению и механизму разрушения?
- 5 Какие признаки используют для классификации изломов по макростроению?
- 6 Каковы признаки прямого и прямого со скосами изломов?
- 7 Каковы признаки однородного и неоднородного изломов?
- 8 Каковы признаки кристаллических изломов?
- 9 Каковы признаки волокнистого излома?
- 10 Каковы признаки волокнисто-полосчатого и волокнисто-чашуйчатого изломов?
- 11 Каковы признаки камневидного излома?
- 12 Каковы признаки фарфоровидного излома?
- 13 Каковы признаки бархатистого излома?

- 14 Каковы признаки нафталинистого излома?
- 15 В чем проявляется стадийность усталостного разрушения?
- 16 Что такое полосы Форсайта?
- 17 Что можно оценить по форме усталостных макролиний?
- 18 Какие признаки используют для классификации изломов по микростроению?
- 19 Каковы основные механизмы разрушения металлических материалов при однократных видах нагружения и при циклическом нагружении?
- 20 Что такое транскристаллитное и интеркристаллитное разрушения?
- 21 По какому механизму происходит вязкое разрушение?
- 22 Какие существуют фрактографические признаки вязких изломов?
- 23 Для каких материалов характерно вязкое разрушение?
- 24 По какому механизму происходит хрупкое разрушение?
- 25 Почему охрупчиваются металлические материалы?
- 26 Какими признаками характеризуется вязко-хрупкий переход?
- 27 Что такое хладноломкость металлов?
- 28 Какие виды материалов склонны к хладноломкости?
- 29 Какие факторы влияют на положение порога хладноломкости?
- 30 Меняются ли свойства материалов и вид изломов в интервале вязко-хрупкого перехода?
- 31 Каковы причины усталостного разрушения?
- 32 Какой механизм зарождения и роста усталостной трещины?
- 33 Какое строение имеют усталостные изломы?
- 34 О чем свидетельствует наличие вязкого, хрупкого и усталостного изломов разрушенной детали?
- 35 По каким критериям можно определить вид и примерный уровень приложенной нагрузки?

## 2 Механизмы и характер разрушения конструкционных материалов при однократных видах нагружения

### 2.1 Виды и механизмы разрушения

На рисунке 2.1 представлены основные виды разрушения при однократных нагружениях, особенности макро- и микростроения изломов, а также механизмы разрушения.

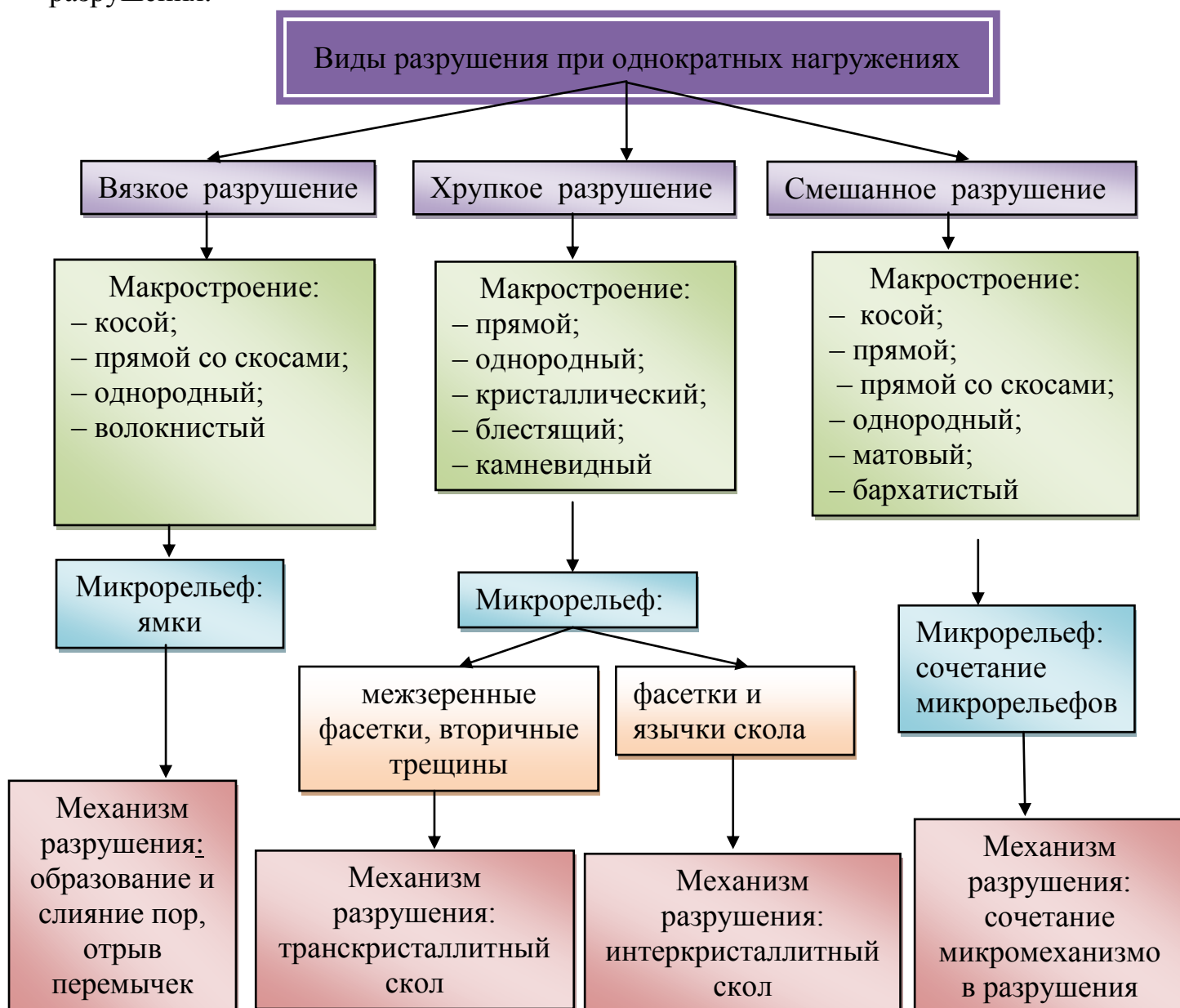
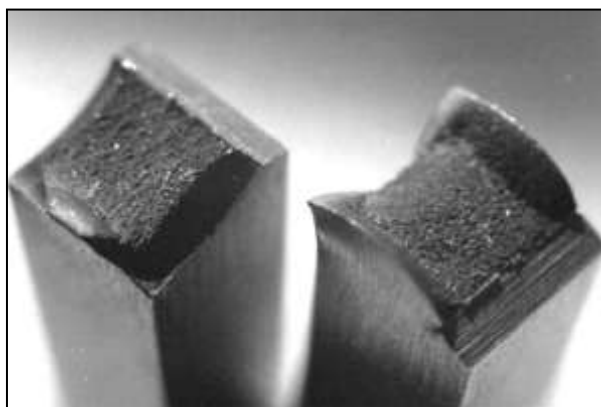


Рисунок 2.1 – Виды разрушения металлических материалов при однократных видах нагружения

## 2.2 Вязкое разрушение

При вязком разрушении происходит медленное развитие трещины. Характерна высокая энергоемкость процесса на стадиях зарождения и распространения трещины. Это связано с затратами значительной работы пластической деформации у вершины вязкой трещины. Вязкое разрушение преимущественно внутризеренное.

Вязкий излом (рисунок 2.2) имеет волокнистое строение и большую шероховатость, металлический блеск отсутствует. Излом состоит из относительно плоской центральной части излома. В периферийной части образуются губы среза. Вблизи поверхности излома имеет место утяжка, что свидетельствует о макропластической деформации при вязком разрушении.



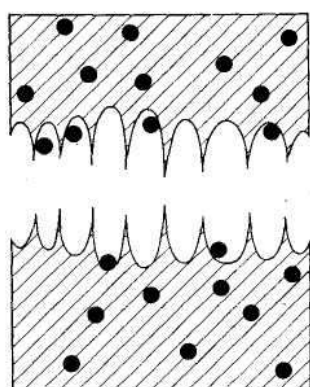
х5 (аустенитная сталь) [1]

Рисунок 2.2 – Вязкие изломы

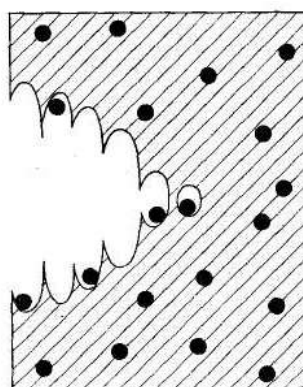
Вязко разрушаются материалы с гранцентрированной кристаллической решеткой (ГЦК) (за исключением случая межзеренного хрупкого разрушения), а также материалы с объемноцентрированной кристаллической решеткой (ОЦК) при температурах выше верхней критической температуры хрупкости. Причинами возникновения вязкого излома могут быть высокие разрушающие напряжения.



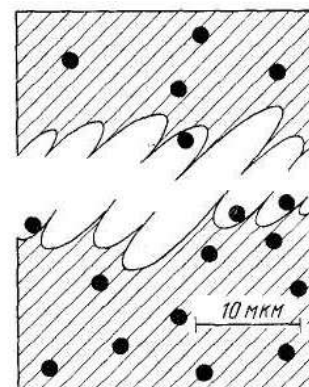
Вязкое разрушение в металлических материалах связано с образованием в области локализованной пластической деформации (утяжки) пористости материала [12, 13]. В процессе пластического течения на включениях, нерастворенных частицах вторых фаз, (например, карбидах), границах зерен, в полосах деформации или в любых других местах, где наличие несплошности приводит к концентрации пластического течения, зарождаются микропоры. С увеличением пластической деформации происходит рост микропор и зарождение новых; расстояния между крупными микропорами уменьшается и тонкие гребни, которые разделяют микропоры, разрываются, что приводит к разрушению (рисунок 2.3).



а) одноосное растяжение



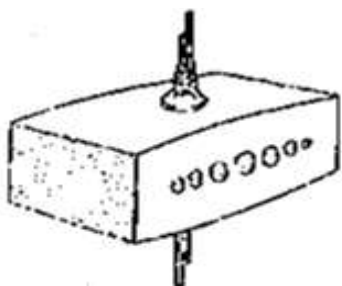
б) внецентренное растяжение



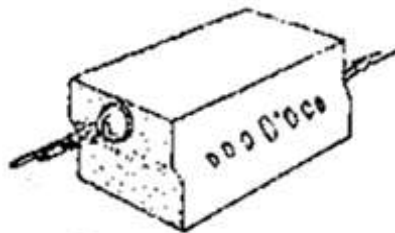
в) ямки, возникшие при срезе

Рисунок 2.3 – Схема вязкого разрушения с образованием ямочного микрорельефа [14]

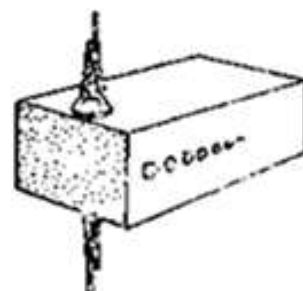
Поверхность вязкого излома содержит многочисленные чашеподобные углубления (ямки). Размеры и форма ямок вязких изломов неоднородны [15]. На форму ямок влияет относительное направление максимального напряжения, вызвавшего разрушение. Различают (рисунок 2.4): равноосные ямки (растяжения), ямки сдвига, ямки отрыва [2, 15].



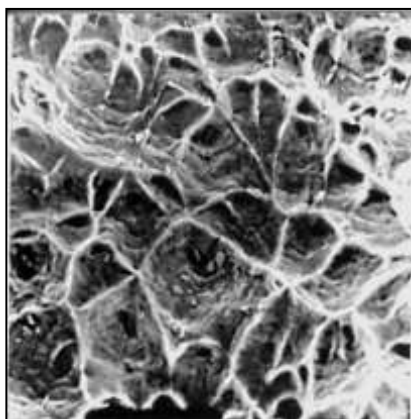
а) одноосное растяжение



б) сдвиг

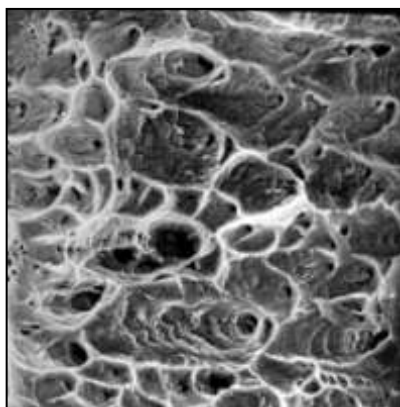


в) отрыв



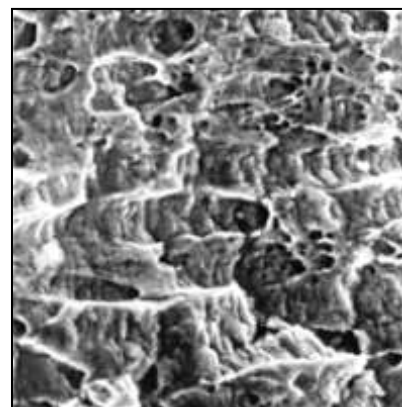
х100 (H26T3)

г) равноосные ямки



х100 (H32T3)

д) вытянутые ямки



х100 (40X4Г18Н8Ф)

е) удлиненные ямки

Рисунок 2.4 – Схемы нагружения (а, б, в) и формы ямок (г, д, е) в зависимости от вида нагружения [16, 8]

Равноосные ямки образуются, например, в центральной части излома образца, испытанного в условиях одноосного растяжения (рисунок 2.4 а, г).

Ямки сдвига образуются на поверхности губ среза; они вытянуты в одном направлении, а на сопряженной поверхности разрушения – в противоположном направлении (рисунок 2.4 б, д).

Ямки отрыва (рисунок 2.4 в, е) образуются в результате внецентренного напряженного состояния. Сильно вытянутые микропоры, которые превращаются в ямки отрыва, формируются в очаге разрушения.

В зависимости от числа мест зарождения микропор и относительной пластичности матрицы формируется размер ямок. На поверхности ямок видны

признаки пластической деформации: скольжение, волнистость, зоны вытяжки. Волнистая поверхность ямок образуется по мере развития деформации, при которой плоскости скольжения сглаживаются. Дальнейшая деформация иногда «стирает» детали рельефа и возникает безрельефная поверхность боковой стенки ямки.

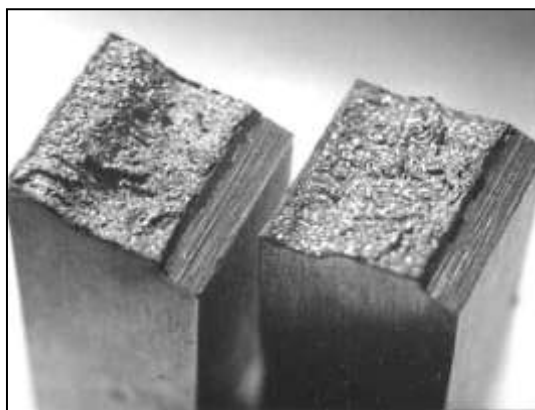
### 2.3 Хрупкое разрушение

Хрупкое разрушение представляет собой быстро протекающий, неуправляемый процесс, который часто является причиной аварийного разрушения деталей и элементов конструкций.

Понижение температуры эксплуатации изделия, увеличение скорости нагружения, большая толщина детали, наличие в изделии трещины или трещиноподобных дефектов, присутствие в структуре материала вредных примесей могут быть причинами зарождения и развития хрупкой трещины [13, 17].

В результате этих факторов происходит стесненность пластической деформации и снижение пластических характеристик материала. Особое место занимают водородное охрупчивание, коррозия под напряжением, жидкометаллическое охрупчивание. В этом случае, независимо от структуры материала, разрушение происходит по межзеренному хрупкому механизму [13].

Хрупкие изломы имеют кристаллическое строение. Поверхность хрупких изломов блестящая или имеет цвет фаз, расположенных по границам зерен. Изломы прямые, без видимых признаков пластической деформации (отсутствие сколов и зон среза, связанных с пластической деформацией). Утяжка материала вблизи излома отсутствует (рисунок 2.5).



х5 (аустенитная сталь) [1]

Рисунок 2.5 – Хрупкие изломы

Зарождение микропор происходит в процессе пластического течения материала на включениях, нерастворенных частицах вторых фаз (карбидах), границах зерен, в полосах деформации, или в любых других местах, где наличие несплошности приводит к концентрации пластического течения. С увеличением пластической деформации микропоры растут, зарождаются новые; расстояние между крупными микропорами уменьшается, тонкие гребни, разделяющие микропоры разрываются, что приводит к разрушению (рисунок 2.6) [12].

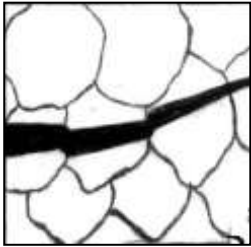
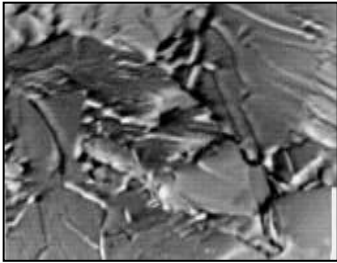
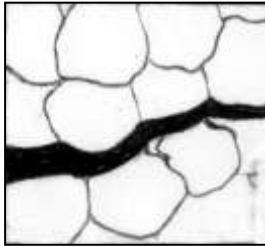

Внутризеренное разрушение (транскристаллитное)		Межзеренное разрушение (интеркристаллитное)	
Схема излома	Микрорельеф излома	Схема излома	Микрорельеф излома
			

Рисунок 2.6 – Внутризеренное (транскристаллитное) и межзеренное (интеркристаллитное) хрупкое разрушение

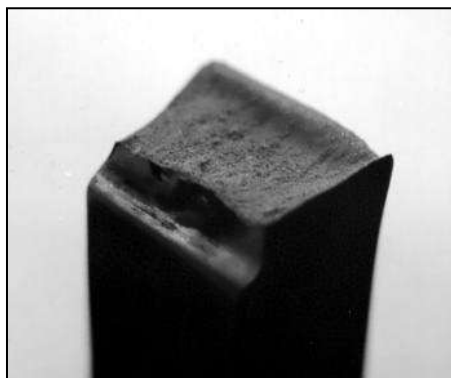
При внутризеренном (транскристаллитном) хрупком разрушении (по механизму скола) трещина обычно распространяется вдоль кристаллографической плоскости с малыми индексами. На изломах наблюдаются фасетки скола со ступеньками в виде ручьистых узоров. Это характерно для разрушения материалов с ОЦК и ГПУ кристаллическими решетками.

В однофазных материалах при межзеренном (интеркристаллитном) хрупком разрушении трещина распространяется по поверхности граней зерен. В многофазных – вдоль межфазной поверхности или вдоль поверхности скола внутри данной фазы. Межзеренное хрупкое разрушение характерно для материалов с ОЦК, ГЦК и ГПУ кристаллическими решетками.

## 2.4 Смешанное разрушение

Смешанное разрушение происходит в условиях плоской деформации при низких температурах, высоких скоростях нагружения. Такой вид разрушения характерен для материалов с ГЦК решеткой (аустенитные стали и некоторые цветные сплавы и закаленные инструментальные стали).

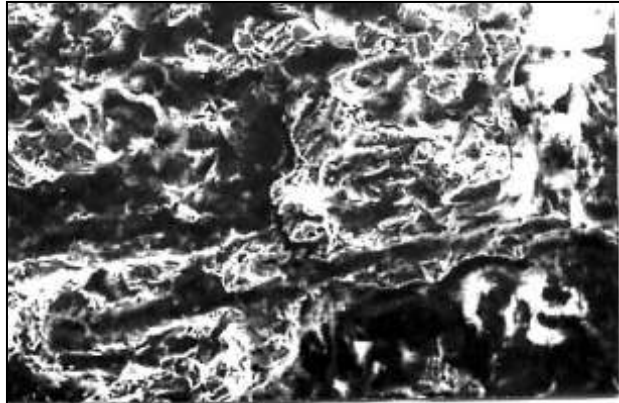
Полученные изломы имеют матовую и «бархатистую» поверхность; они ровные, без губ среза или имеют небольшие губы среза (рисунок 2.7) и небольшую шероховатость; металлический блеск отсутствует.



х5 (аустенитная сталь) [1]

Рисунок 2.7 – Смешанное разрушение

При микрофрактографическом исследовании таких изломов можно обнаружить практически все виды микрорельефа: ямочный, квазискол, межзеренное хрупкое разрушение (рисунок 2.8).



х300 (аустенитная сталь) [1]

Рисунок 2.8 – Микрорельеф смешанного разрушения

## 2.5 Вопросы для самопроверки

- 1 Каковы основные виды разрушения?
- 2 Каковы характеристики вязкого разрушения?
- 3 Каковы признаки вязких изломов?
- 4 Какие бывают механизмы хрупкого разрушения?
- 5 Каковы признаки хрупкого разрушения?
- 6 В каком случае возможна реализация данных механизмов?
- 7 Что представляет собой транс- и интеркристаллитное хрупкое разрушение?
- 8 Как влияет напряженное состояние на переход материалов в хрупкое состояние?
- 9 Что понимают под смешанным разрушением?
- 10 Каков микрорельеф при вязком разрушении?

- 11 Каков микрорельеф при хрупком разрушении?
- 12 Каков микрорельеф при смешанном разрушении?
- 13 Какие материалы разрушаются вязко?
- 14 Какие материалы разрушаются хрупко?
- 15 С чем связано вязкое разрушение материала?
- 16 Где зарождаются микропоры?
- 17 Что представляют собой ямки и вследствие чего образуются?
- 18 Что представляют собой равноосные ямки?
- 19 Что представляют собой ямки сдвига?
- 20 Что представляют собой ямки отрыва?
- 21 В зависимости от чего формируется размер ямок?
- 22 От чего возникает волнистая поверхность ямок?
- 23 Что может являться причиной хрупкого разрушения?
- 24 Какое строение имеют хрупкие изломы?
- 25 Где зарождаются микропор при хрупком разрушении?
- 26 Как распространяется трещина при транскристаллитном хрупком разрушении?
- 27 Как распространяется трещина при интеркристаллитном хрупком разрушении?
- 28 Для каких материалов характерно транскристаллитное разрушение?
- 29 Для каких материалов характерно интеркристаллитное разрушение?
- 30 При каких условиях происходит смешанное разрушение?
- 31 Для каких материалов характерно смешанное разрушение?
- 32 Какое строение имеют смешанные изломы?
- 33 Какие виды рельефа можно обнаружить при смешанном разрушении?
- 34 Какие виды рельефа можно обнаружить при вязком разрушении?
- 35 Какие виды рельефа можно обнаружить при хрупком разрушении?

### 3 Механизмы и характер разрушения конструкционных материалов при многократных видах нагружения

#### 3.1 Характеристики условий нагружения и усталостной прочности

Цикл нагружения – это совокупность последовательных значений переменных напряжений за один период их изменения.

Параметры цикла нагружения (рисунок 3.1):

– максимальное  $\sigma_{\max}$  и минимальное  $\sigma_{\min}$  значения напряжения цикла нагружения;

– размах напряжения цикла нагружения  $\Delta\sigma$ :

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}; \quad (3.1)$$

– амплитуда напряжения цикла нагружения  $\sigma_a$ :

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}; \quad (3.2)$$

– среднее напряжение цикла нагружения  $\sigma_m$ :

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}; \quad (3.3)$$

– коэффициент асимметрии цикла нагружения:

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}; \quad (3.4)$$

– частота  $f$  и период цикла нагружения  $T$ :



$$f = \frac{1}{T}. \quad (3.5)$$

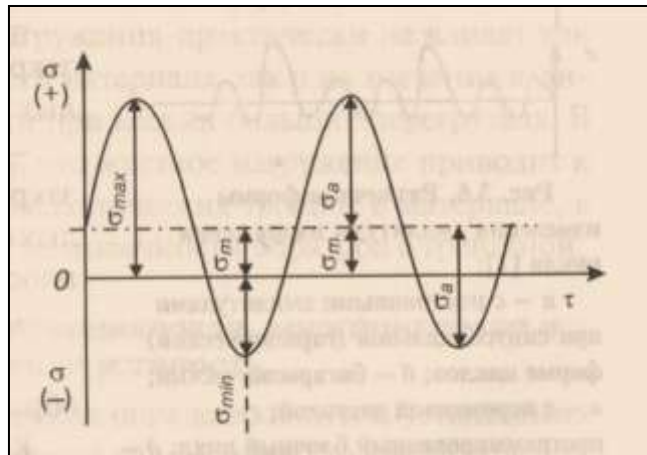
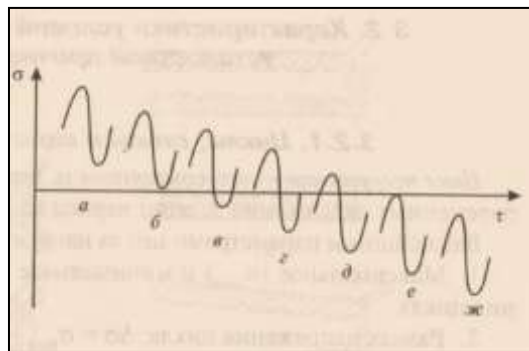


Рисунок 3.1 – Параметры цикла нагружения

В зависимости от значения коэффициента асимметрии цикла нагружения  $R$  различают следующие виды циклов нагружения (рисунок 3.2):

- знакопостоянные циклы: растягивающие и сжимающие;
- знакопеременные циклы: симметричный, преимущественно растягивающие и преимущественно сжимающие;
- отнулевой и отнулевой сжимающие циклы.

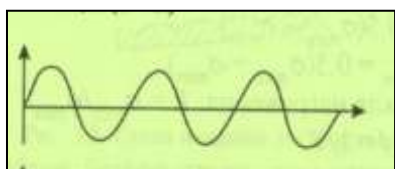


- а – растягивающие ( $0 < R < 1$ ); б – отнулевой ( $R = 0$ );
- в – преимущественно растягивающие ( $1 < R < 0$ ); г – симметричный ( $R = -1$ );
- д – преимущественно сжимающие ( $-\infty < R < -1$ ); е – отнулевой сжимающий ( $R = -\infty$ );
- ж – сжимающие ( $R > 1$ ).

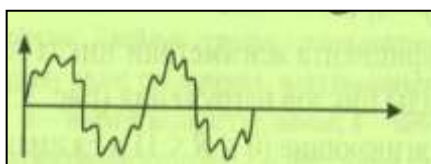
Рисунок 3.2 – Виды знакопостоянных (а, ж), знакопеременных (в, г, д) и отнулевых (б, е) циклов нагружения [1]

Коэффициент асимметрии цикла нагружения влияет на кинетику развития усталостной трещины и формирование пластических зон у ее вершины.

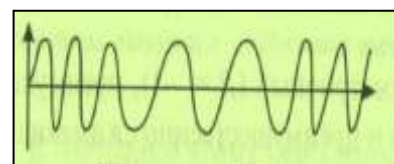
Длительность выдержки при заданном уровне напряжения влияет на форму цикла нагружения. На рисунке 3.3 представлены различные формы изменения амплитуды напряжений циклов нагружения [18].



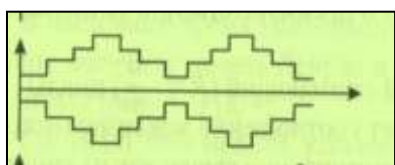
а) с постоянными амплитудами при синусоидальной (гармонической) форме циклов



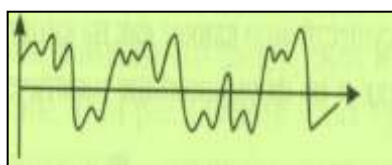
б) бигармонический



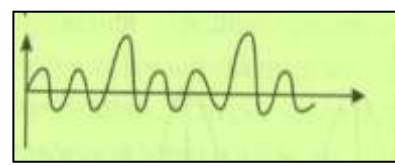
в) с переменной частотой



г) программированный блочный цикл



д) произвольный цикл



е) с перегрузкой в гармоническом цикле

Рисунок 3.3 – Формы изменения амплитуды напряжений циклов нагружения

Основные схемы нагружения [18]:

- чистый изгиб с вращением;
- чистый изгиб в одной плоскости;
- поперечный изгиб при вращении консольно закрепленных круглых образцов;
- поперечный изгиб консольно закрепленных круглых и некруглых образцов в одной плоскости;

- поперечный изгиб при вращении консольно закрепленных круглых и некруглых образцов при вращении силовой плоскости;
- растяжение и сжатие;
- переменное кручение круглых образцов;
- нагружение сосудов внутренним давлением;
- наложение гидростатического давления.

При усталостном разрушении на напряженное состояние материала значительное влияние оказывает схема нагружения.

Используют два вида нагружения:

- мягкое нагружение (с заданным размахом нагрузки (напряжения));
- жесткое нагружение (с заданным размахом деформации).

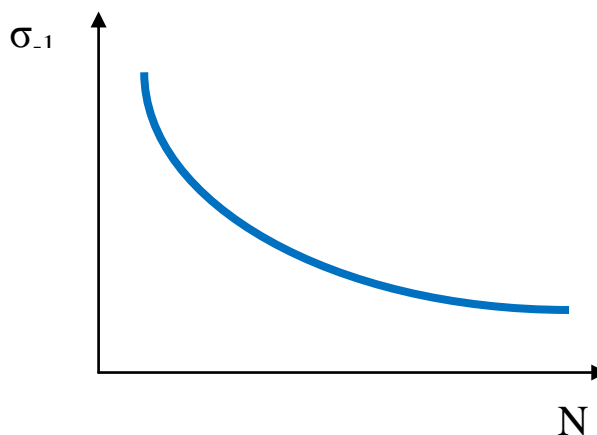
При мягком нагружении задается величина нагрузки, которая остается постоянной на всем протяжении испытания. Перемещение изменяется в зависимости от изменения жесткости нагружаемой системы в период постепенного роста усталостной трещины. Мягкое нагружение более распространенный вид нагружения в промышленных конструкциях и деталях машин, чем жесткое.

При жестком нагружении задается величина кинематически ограниченного перемещения, которое постоянно на всем протяжении испытания, включая период уменьшения жесткости образца или детали при развитии усталостной трещины. Усилие изменяется в зависимости от изменения жесткости нагружаемой системы (например, в шатунно-кривошипных механизмах, в подкладках рельсовых сцеплений).

При жестком нагружении микроскопические трещины в материале появляются раньше, чем при мягком нагружении. При мягком нагружении образцы с трещиной имеют большую долговечность [18].

Для определения усталостной прочности материалов проводят усталостные испытания определенного количества образцов при различных значениях напряжения цикла нагружения. Чаще всего используют симметричный цикл нагружения ( $R=-1$ ), а напряжения цикла обозначают как  $\sigma_{-1}$ , МПа. При испытаниях

фиксируется количество циклов нагружения до разрушения образцов  $N$ , цикл. Затем строится кривая усталости (кривая Вёлера) (рисунок 3.4).



$\sigma_{-1}$  – напряжение цикла нагружения;  $N$  – количество циклов нагружения.

Рисунок 3.4 – Кривая усталости

Для черных металлов и сплавов титана на кривых усталости характерно наличие четко выраженного горизонтального участка, положение которого определяет уровень напряжений, не приводящий к разрушению образцов при сколь угодно больших циклах нагружения, – физический предел усталости (выносливости).

Для сплавов цветных металлов, а также для черных металлов в случае влияния коррозионной среды правая ветвь кривых усталости асимптотически приближается к горизонтали [11, 18]. В этом случае для определения предела усталости (выносливости) устанавливают базу испытания  $N_6$ , цикл.

Предел усталости (выносливости)  $\sigma_w$  – это величина максимального напряжения цикла, при котором не происходит разрушения образца на базе испытаний  $N_6$ .

База испытания  $N_6$  – это предварительно заданное число циклов нагружения, до которого образцы испытывают на усталость.

Для металлов и сплавов, имеющих практически горизонтальный участок на кривой усталости, значение базы принимают равной  $N_6 = 10^7$ .

Для металлов и сплавов с асимптотическим приближением правой ветви к горизонтали принимают значение базы испытания  $N_6=10^8$  циклов. Считается, что при дальнейшем увеличении циклов нагружения разрушение образцов не произойдет при сколь угодно длительном испытании.

Коэффициент асимметрии цикла нагружения  $R$  оказывает существенное влияние на усталостную прочность материала, скорость распространения усталостной трещины и пороговые значения коэффициентов интенсивности напряжения  $K$ .

Влияние коэффициента асимметрии цикла нагружения  $R$  на общую долговечность образцов представлено на рисунке 3.5 в виде обобщенной схемы [19].

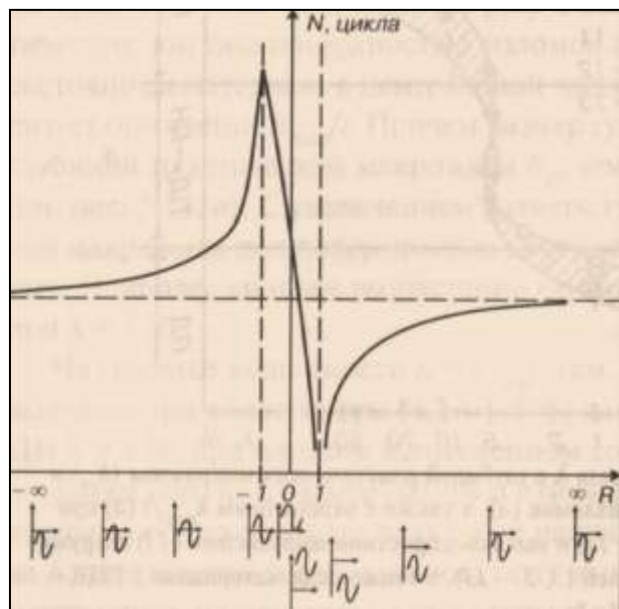


Рисунок 3.5 – Обобщенная схема влияния на долговечность образцов  $N$  коэффициента асимметрии цикла нагружения  $R$  для случая постоянного значения размаха напряжений (или деформаций) цикла ( $\Delta \sigma = \text{const}$ )

С увеличением значения коэффициента асимметрии цикла нагружения  $R$  от  $-\infty$  до  $-1$  общая долговечность образцов увеличивается. Наиболее интенсивное увеличение долговечности образцов наблюдается при изменении коэффициента асимметрии цикла нагружения  $R$  от  $-3$  до  $-1$ . В интервале значений  $R$  от  $-1$  до  $0,5$

наблюдается резкое снижение долговечности образцов. В области значений  $R$  от 1 до  $\infty$  наблюдается увеличение долговечности образцов.

Максимальная долговечность образцов наблюдается при симметричном цикле нагружения ( $R=-1$ ), что соответствует схеме нагружения, при которой максимальное и минимальное напряжения цикла нагружения в образцах имеют минимальные отклонения от нулевого значения.

Минимальная долговечность образцов наблюдается при  $R>1$ , когда в образцах максимальное напряжение цикла при полностью растягивающих или при полностью сжимающих циклах нагружения достигает максимального отклонения от нулевого значения.

Таким образом, увеличение растягивающих и сжимающих напряжений снижает общую долговечность образцов [1,11, 19].

**Сплав АК 6.** При жесткой схеме нагружения характер изменения длины зон стабильного ( $l_s$ ) и усталостного ( $l_f$ ) развития трещины на поверхности усталостных изломов образцов из сплава АК6 в зависимости от коэффициента асимметрии цикла нагружения  $R$  аналогичен характеру изменения общей долговечности образцов  $N$ . Поскольку общая долговечность образцов до разрушения  $N$  включает в себя: количество циклов нагружения до образования усталостной трещины и количество циклов нагружения, затраченное на распространение трещины, то можно предположить, что коэффициент асимметрии цикла нагружения  $R$ , в данном случае, оказал существенное влияние на стадию распространения усталостной трещины. Однако это не значит, что коэффициент  $R$  не оказывает влияния и на стадию зарождения усталостной трещины [1, 11, 19].

При изменении коэффициента асимметрии цикла нагружения  $R$  образцов из сплава АК6 от -19 до 0,5, то есть при увеличении максимальных растягивающих напряжений у вершины трещины, в микрорельефе зоны стабильного роста трещины ( $l_s$ ) и в зоне ускоренного развития трещины  $l_f$  начинает преобладать вязкая составляющая [1,11, 19]. Микрорельеф зоны долома практически не зависит от асимметрии цикла нагружения образцов.

Максимальная долговечность образцов имеет место при коэффициенте асимметрии цикла нагружения  $R = -1$ , когда максимальное и минимальное напряжение цикла в образцах имеют минимальные отклонения от нулевого значения. Минимальная долговечность образцов имеет место при  $R \rightarrow 1$ , когда напряжение цикла в образцах достигает максимального отклонения от нулевого значения. Увеличение сжимающих напряжений оказывает на долговечность образцов такое же влияние, как и увеличение растягивающих напряжений, т. е. снижает общую долговечность образцов.

**Сплав ВАЛ15.** Аналогичные результаты получены и в работе [11] при изучении влияния коэффициента асимметрии цикла нагружения  $R$  на механизм усталостного разрушения высокопрочного литейного алюминиевого сплава ВАЛ15. Микрорельеф в большей степени связан с максимальным значением коэффициента интенсивности напряжения  $K_{max}$ , чем с его размахом  $\Delta K$ . С увеличением коэффициента  $K_{max}$  на поверхности усталостных изломах начинает доминировать вязкая составляющая, а при увеличении  $\Delta K$  вышеуказанная закономерность не наблюдается.

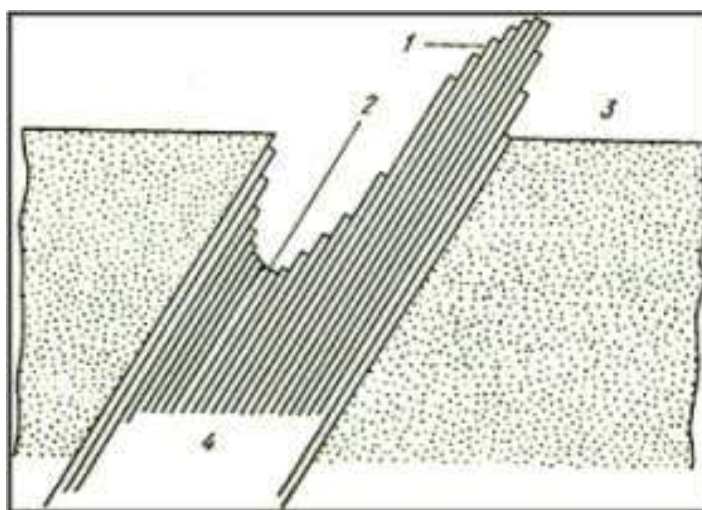
**Сплав Д16.** Анализ кинетических диаграмм усталостного разрушения образцов одинаковой толщины из сплава Д16 показал, что независимо от схемы нагружения, увеличения коэффициента асимметрии цикла нагружения  $R$  приводит к уменьшению скорости распространения трещины при одном и том же значении  $K_{max}$  и к её увеличению при одном и том же значении  $\Delta K$ . При этом коэффициент  $n$  в уравнении Пэриса возрастает, что свидетельствует, в частности, о повышенной чувствительности сплава Д16 к кратковременным перегрузкам при высоких значениях  $R$ . Изменение длины зон  $l_s$  и  $l_f$  на поверхности изломов образцов из сплава Д16 от коэффициента асимметрии цикла нагружения  $R$  зависит от схемы нагружения образцов. Увеличение коэффициента  $R$  приводит к уменьшению длины зоны  $l_s$  при  $\Delta P = \text{const}$  и к её возрастанию при  $P_{max} = \text{const}$ . Длина трещины  $l_f$ , с увеличением  $R$ , при  $P_{max} = \text{const}$  остается постоянной, а при  $\Delta P = \text{const}$  – уменьшается. По-видимому, длина трещины  $l_f$  связана с максимальным значением напряжения цикла и уменьшается при его увеличении (при  $\Delta P = \text{const}$ ) [1, 11, 19].

### 3.2 Механизм усталостного разрушения

Усталостная трещина зарождается чаще всего на поверхности или вблизи поверхности образцов или деталей, где напряжения от внешней нагрузки достигают максимальных значений. Зарождение трещин облегчается наличием различного рода концентраторов напряжения, которыми являются неровности от механической обработки, включения, точечная коррозия и локальный износ.

При действии циклических нагрузок, на поверхности образцов образуются полосы локального скольжения, которые образуют рельефные участки. Формирование полос локального скольжения происходит примерно под углом  $45^\circ$  к направлению растягивающего напряжения.

Образование рельефных участков связано с неоднородностью структуры металлов и сплавов. На поверхности образца или детали образуются выступы (экструзии) и впадины (интрузии) [14, 20] (рисунок 3.6).



1 – экструзии; 2 – интрузии; 3 – поверхность; 4 – полосы скольжения.

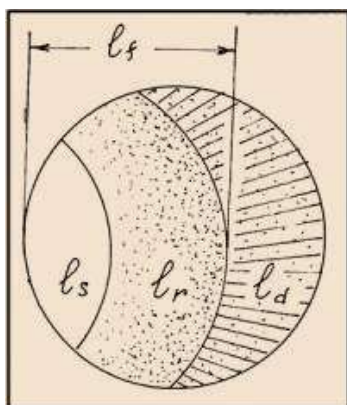
Рисунок 3.6 – Схема образования выпуклостей (экструзий) и впадин (интрузий) [15]



После образования и распространения усталостных микротрещин начинается стадия распространения усталостной макротрещины. На этой стадии трещина распространяется перпендикулярно к направлению приложенного напряжения.

Усталостные изломы характеризуются наличием на их поверхности усталостных зон, которые отражают стадийность усталостного разрушения (рисунок 3.7).

При развитии усталостной макротрещины наблюдаются стадии медленного стабильного роста трещины (зона  $l_s$ ), ускоренного нестабильного развития трещины (зона  $l_r$ ) и стадия долома (зона  $l_d$ ), разрушение в которой происходит по механизмам статического разрушения. Зона долома наступает при достижении длины усталостной трещиной критического значения.



а) схема строения усталостного излома

х5 (аустенитная сталь) [19]

б) усталостный излом

$l_s$  – зона медленного стабильного роста трещины;  $l_r$  – зона ускоренного нестабильного развития трещины;  $l_f$  – зона усталостного развития трещины;  $l_d$  – зона долома.

Рисунок 3.7 – Усталостный излом

Количество усталостных зон и их размеры зависят от количества циклов нагружения, которое выдержал образец или деталь до разрушения. Схемы приложенной нагрузки и конфигурация образца или детали оказывают влияние на форму усталостных зон.

Вид усталостного излома прямой с малой степенью шероховатости и почти без признаков макропластической деформации, которая сопутствует разрушению.

При распространении усталостной трещины образуется последовательный ряд усталостных бороздок, которые образуются за каждый цикл нагружения при продвижении трещины на определенное расстояние. Усталостные бороздки отражают положение фронта трещины за каждый цикл нагружения (рисунок 3.8). Профиль отдельных усталостных бороздок зависит от природы материала, величины и характера нагрузки.



x2500 (никелевый сплав) [14]

Рисунок 3.8 – Усталостные бороздки на поверхности излома

Расстояние между бороздками, количество бороздок при диагностике усталостного разрушения используют для определения номинального напряжения цикла нагружения, скорости распространения трещины и других параметров разрушения.

### 3.3 Вопросы для самопроверки

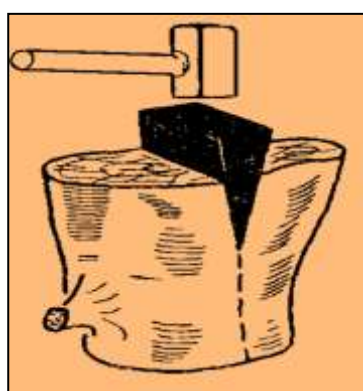
- 1 Какими параметрами характеризуется цикл нагружения?
- 2 Какие различают виды циклов нагружения в зависимости от значения коэффициента асимметрии цикла нагружения  $R$ ?
- 3 На что влияет коэффициент асимметрии цикла нагружения?
- 4 Какими бывают формы изменения амплитуды напряжений циклов нагружения?
- 5 Каковы основные схемы нагружения?
- 6 Какое влияние оказывает схема нагружения при усталостном разрушении на напряженное состояние материала?
- 7 Как определяется усталостная прочность материала?
- 8 Каковы механизмы зарождения усталостной трещины?
- 9 Какое строение имеют усталостные изломы?
- 10 Какие зоны образуются на поверхности усталостных изломов?
- 11 Какие механизмы разрушения реализуются в пределах данных зон?
- 12 Что такое усталостные бороздки на поверхности изломов?
- 13 Что представляет собой кривая Вёлера?
- 14 Что понимают под пределом усталости (выносливости) материала?
- 15 Что понимают под базой испытаний?
- 16 Что представляют собой полосы локального скольжения?
- 17 С чем связано образование рельефных участков?
- 18 Что представляют собой экструзии и впадины интрузии?
- 19 От чего зависит количество усталостных зон и их размеры?
- 20 Что используется при диагностике усталостного разрушения для определения номинального напряжения?

## 4 Элементы механики разрушения

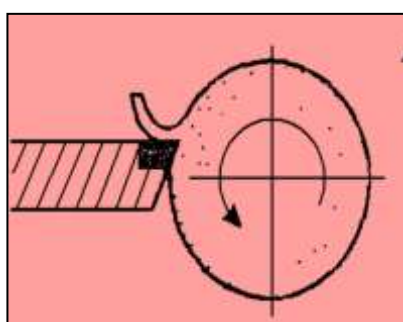
### 4.1 Однократные виды нагружения

В зависимости от схемы нагружения различают три основных типа разрушения (рисунок 4.1): тип I, тип II и тип III.

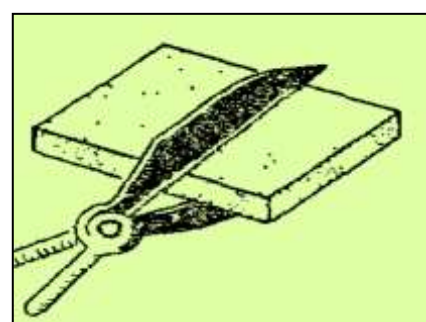
У вершины трещины при нагружении реализуется определенный вид или их комбинация с преобладанием какого-либо одного типа трещины [21].



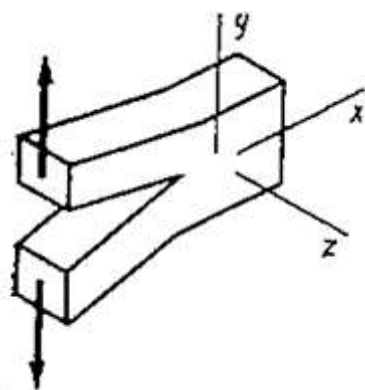
а) отрыв



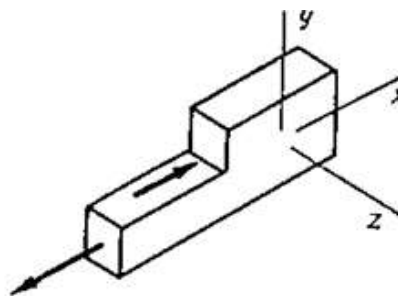
б) поперечный сдвиг



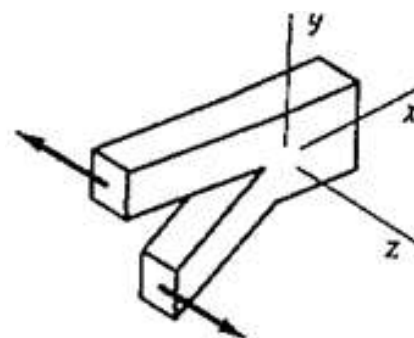
в) продольный сдвиг



г) тип I



д) тип II



е) тип III

Рисунок 4.1 – Схемы нагружения (а, б, в) и основные типы разрушений (г, д, е)

Разрушение по типу I (рисунок 4.1 а, г) связано с реализацией только нормальных растягивающих напряжений. Макропластическая деформация не протекает. Разрушение по типу I характерно при распространении хрупкой трещины по механизму скола.

При разрушении по типу II (рисунок 4.1 б, д) и типу III (рисунок 4.1 в, е) преобладают касательные напряжения. Разрушение сопровождается макропластической деформацией и характерно для вязкого разрушения.

Из всех видов разрушения самым неблагоприятным по энергоемкости является разрушение по типу I.

При превышении напряжения предельного значения у вершины трещины происходит ее срагивание. Это напряжение будет зависеть от нагрузки (напряжения), длины трещины (дефекта) и конфигурации образца или детали. Поле напряжения у вершины трещины характеризуется силовым параметром  $K$ , который называется коэффициентом интенсивности напряжения [17, 21].

Коэффициент интенсивности напряжения  $K$ ,  $\text{МПа}\sqrt{\text{м}}$  определяется по формуле:

$$K = \sigma \sqrt{\pi \cdot l} \cdot Y, \quad (4.1)$$

где  $\sigma$  – приложенное напряжение, МПа;

$l$  – длина трещины или дефекта, м;

$Y$  – функция (полином), которая зависит от конфигурации образца или детали.

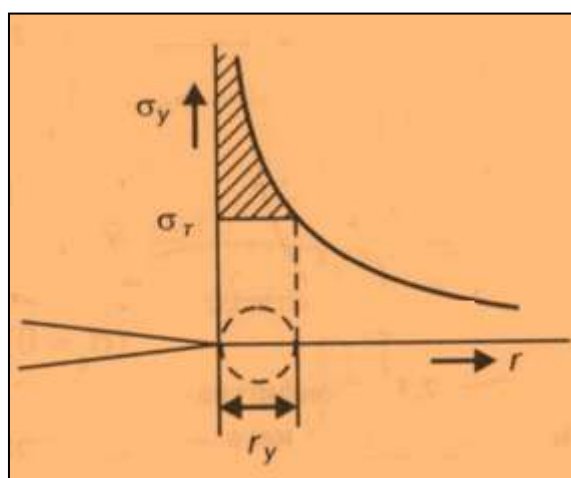
В зависимости от типа трещины коэффициент интенсивности напряжения  $K$ , характеризующий поле напряжения у вершины трещины, обозначается  $K_I$ ,  $K_{II}$  и  $K_{III}$ .

При достижении минимального (предельного) значения коэффициента интенсивности напряжения  $K$  материал не сдерживает трещину; трещина срагивается и происходит разрушение образца или детали. Это значение коэффициента интенсивности напряжения обозначается  $K_C$  и называется

критическим значением коэффициента интенсивности напряжения или трещиностойкостью (вязкостью разрушения) материала.

Характеристика трещиностойкости (вязкость разрушения) материала используется для оценки сопротивления материала развитию трещины при однократных видах нагружения.

При достижении напряжения предела текучести материала  $\sigma_T$ , вблизи вершины трещины, металл переходит в пластическое состояние и формируется пластическая зона (или пластические зоны) (рисунок 4.2).



$r_y$  – размер пластической зоны;  $\sigma_T$  – предел текучести материала.

Рисунок 4.2 – Распределение напряжений перед трещиной и формирование пластической зоны

При формировании пластической зоны пластическое течение материала происходит в основном путем накопления сдвиговых деформаций под углом  $45^\circ$ . Форма пластической зоны вытянута в направлении течения металла. Количество, форма и размеры пластических зон зависят от вида приложенной нагрузки и локального напряженного состояния материала у вершины трещины.

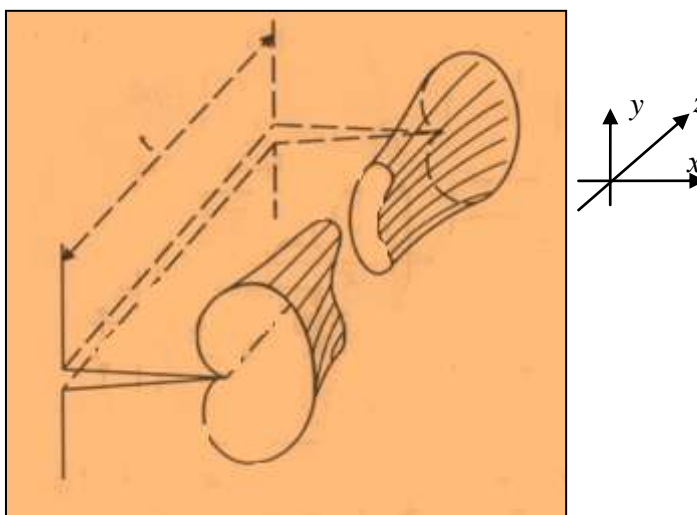
У вершины распространяющейся трещины реализуется различное локальное напряженное состояние. Это зависит от толщины образца или детали, температуры

испытания, скорости нагружения, а также других внешних или внутренних факторов.

В механике разрушения различают два вида предельного локального напряженного состояния материала [21]:

- плоское деформированное состояние (ПД);
- плоское напряженное состояние (ПН).

При достаточно большой толщине образца или детали  $t$  у вершины трещины можно выделить подобласть зоны разрушения (рисунок 4.3), в которой реализуется состояние плоской деформации. Течение металла по оси  $Z$  затруднено и будет сдерживаться окружающим упругим материалом. Деформация будет развиваться только в плоскости  $X - Y$ . У вершины трещины реализуется плоская деформация.



$t$  – толщина образца или детали.

Рисунок 4.3 – Пластическая зона при плоском деформированном состоянии

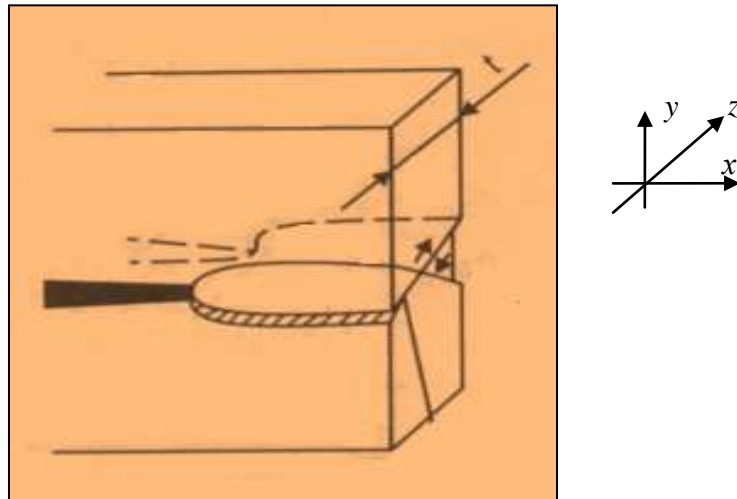
Размер пластической зоны  $r_y$ , м, образовавшейся в условиях плоской деформации, определяется по формуле:

$$r_y = 1/6\pi(K/\sigma_T)^2, \quad (4.2)$$

где  $K$  – коэффициент интенсивности напряжения, МПа $\sqrt{м}$ ;

$\sigma_T$  – предел текучести материала, МПа.

При маленькой толщине образца или детали  $t$ , из-за близости свободных поверхностей, ограничений в развитии пластической деформации, в том числе и по оси  $Z$  (рисунок 4.4), не будет. В этом случае у вершины трещины реализуется условие плоского напряженного состояния.



$t$  – толщина образца или детали.

Рисунок 4.4 – Пластическая зона при плоском напряженном состоянии

Размер пластической зоны  $r_y$ , м, образовавшейся в условиях плоского напряженного состояния, определяется по формуле:

$$r_y = 1/6\pi(K/\sigma_T)^2. \quad (4.3)$$

Пластическая зона в условиях плоской деформации будет не больших размеров, а конфигурация данной зоны, как показывает анализ поля упругих напряжений у вершины трещины [21], будет иметь вид «бабочки» (рисунок 4.5).

При плоском напряженном состоянии пластическая зона вытянута в направлении распространения трещины [21].

Пластические зоны, которые образуются у вершины трещины в условиях плоской деформации и плоского напряженного состояния, отличаются по форме и размерам, что повлияет на механизм разрушения материала и его сопротивление развитию трещины.



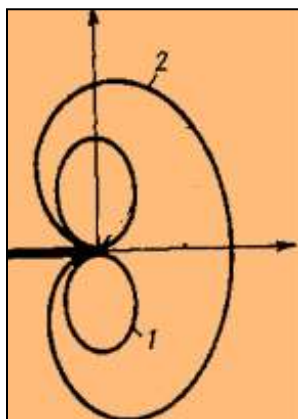
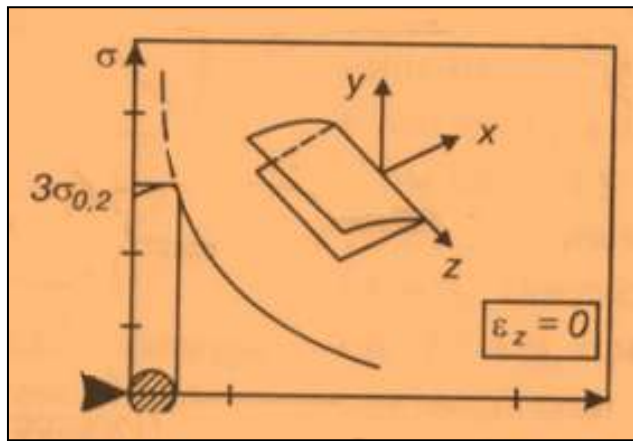


Рисунок 4.5 – Конфигурация пластических зон в условиях плоской деформации (1) и плоского напряженного состояния (2)

При смешанном разрушении материалов с ГЦК решеткой у вершины трещины может реализовываться переходное состояние от ПД к ПН.

При разрушении материалов в условиях плоского напряженного состояния, а, в некоторых случаях, и в переходной области от плоской деформации к плоскому напряженному состоянию, у вершины трещины формируются две пластические зоны: слабodeформированная макрозона  $\gamma_y$  и сильноdeформированная микрозона  $\gamma_{yh}$ , которые отличаются размерами и степенью искаженности кристаллической структуры материала в данных зонах [1, 12, 21].

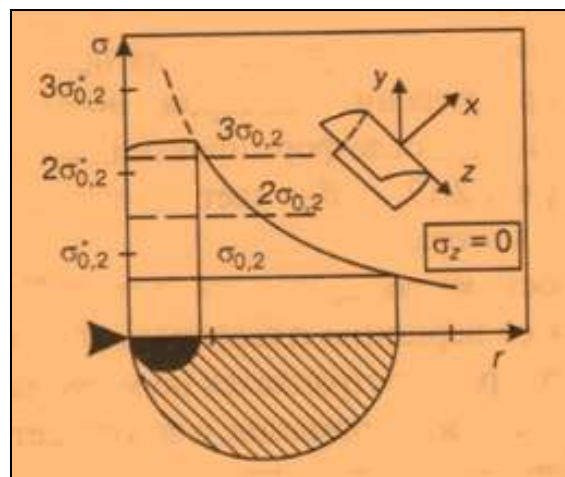
Напряжения, которые возникают в процессе нагружения образца или детали непосредственно в вершине трещины, при разрушении металлических материалов в условиях плоской деформации будут равны пределу текучести материала  $\sigma_{0,2}$ , что связано с эффектом затупления трещины. Затем напряжения резко возрастают до напряжения текучести  $3\sigma_{0,2}$  [1, 6, 19] (рисунок 4.6). У вершины трещины формируется одна пластическая зона  $\gamma_y$ .



$\sigma_{0,2}$  – предел текучести материала.

Рисунок 4.6 – Схема формирования пластической зоны у вершины трещины при плоской деформации

При разрушении материала в условиях плоского напряженного состояния под действием возникающих напряжений образуется слабдеформированная макрizona  $\gamma_y$ , размеры и форма которой определяются расстоянием от вершины трещины до точек, где напряжения достигнут предела текучести исходного материала  $\sigma_{0,2}$  (рисунок 4.7).

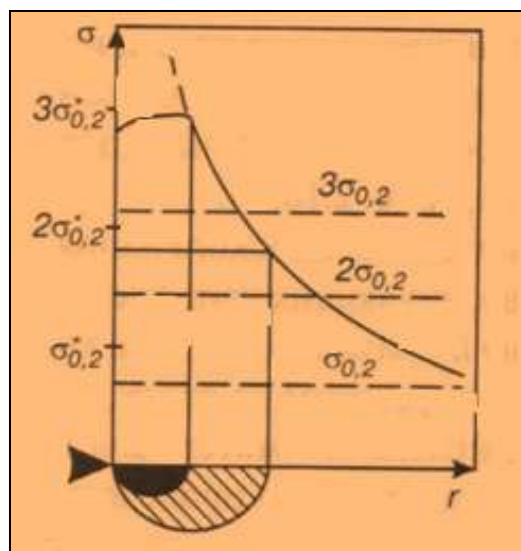


$\sigma_{0,2}$  – предел текучести материала;  $\sigma_{0,2}^*$  – предел текучести деформационно-упрочненного материала.

Рисунок 4.7 – Схема формирования пластической зоны у вершины трещины при плоском напряженном состоянии

В результате пластического течения металла происходит его деформационное упрочнение и повышение предела текучести до значения  $\sigma_{0,2}^*$ , что приводит к изменению локального напряженного состояния материала у вершины трещины от плоского напряженного состояния, к состоянию, близкому к плоской деформации или к переходной области от ПД к ПН. Дальнейшее увеличение нагрузки приводит к формированию у вершины трещины второй пластической зоны (сильнодеформированной микрзоны  $r_{yh}$ ), размеры которой зависят от предела текучести деформационно-упрочненного материала  $\sigma_{0,2}^*$  [1, 19].

Если разрушение материала происходит в переходной области от плоской деформации к плоскому напряженному состоянию, то возникающие напряжения в вершине трещины будут, как и в предыдущих случаях, равны пределу текучести  $\sigma_{0,2}$ , а затем будет наблюдаться резкое повышение напряжения до напряжения текучести, которое в отличие от случая плоской деформации не достигнет величины  $3\sigma_{0,2}$  (рисунок 4.8). В этих условиях размеры слабодеформированной макрзоны  $r_y$  будут меньше, чем при плоском напряженном состоянии [1, 19].



$\sigma_{0,2}$  – предел текучести материала;  $\sigma_{0,2}^*$  – предел текучести деформационно-упрочненного материала.

Рисунок 4.8 – Схема формирования пластической зоны у вершины трещины в переходной области от плоской деформации к плоскому напряженному состоянию

Формирование сильнодеформированной микрзоны  $r_{yh}$  будет происходить по той же схеме, что и приведет к изменению локального напряженного состояния материала у вершины трещины от переходного состояния к плоской деформации [1, 19].

#### 4.2 Усталостное нагружение

При усталостном нагружении образца или детали напряжения за один цикл нагружения изменяются от максимального значения  $\sigma_{max}$  до минимального значения  $\sigma_{min}$ . Соответствующим образом изменяются и коэффициенты интенсивности напряжения  $K$  у вершины трещины.

Поле напряжения у вершины усталостной трещины при постоянной длине трещины  $l$  характеризуется двумя значениями коэффициента интенсивности напряжения [21]:

– максимальный коэффициент интенсивности напряжения  $K_{max}$ ,  $МПа\sqrt{м}$

$$K_{max} = f(\sigma_{max}, l); \quad (4.4)$$

– размах коэффициента интенсивности напряжения  $\Delta K$ ,  $МПа\sqrt{м}$

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} = f(\Delta\sigma, l). \quad (4.5)$$

Максимальный коэффициент интенсивности напряжения  $K_{max}$  и размах коэффициента интенсивности напряжения  $\Delta K$  связаны между собой через коэффициент асимметрии цикла нагружения  $R$  уравнением:

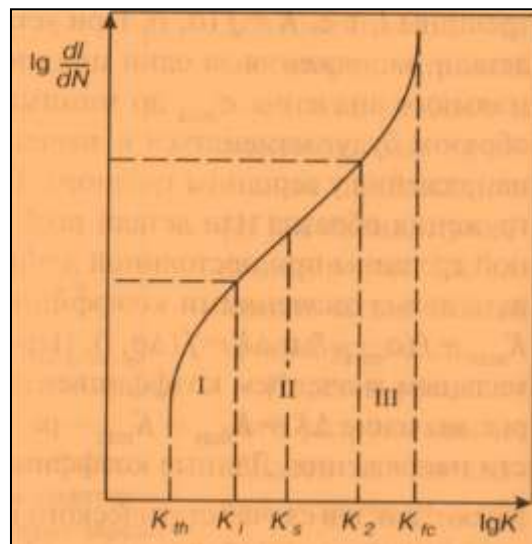
$$\Delta K = (1-R)K_{max}. \quad (4.6)$$

В процессе распространения усталостной трещины ее длина  $l$  непрерывно возрастает. Значения коэффициентов интенсивности напряжения  $K_{max}$  и  $\Delta K$

возрастают, что приводит к увеличению скорости распространения усталостной трещины, увеличению размеров пластических зон и изменению локального напряженного состояния материала у вершины трещины в сторону плоского напряженного состояния (ПН).

Для анализа процесса усталостного разрушения на стадии распространения трещины общепринято представлять экспериментальные данные в виде кинетических диаграмм усталостного разрушения, отражающих зависимость скорости распространения трещины в материале  $dl/dN$ , м/цикл от максимального значения  $K_{max}$  или размаха  $\Delta K$  коэффициентов интенсивности напряжения.

Полная кинетическая диаграмма усталостного разрушения в двойных логарифмических координатах представляет собой S-образную кривую (рисунок 4.9).



$\frac{dl}{dN}$  – скорость распространения трещины;  $K_{th}$  – коэффициент интенсивности напряжения, ниже которого трещина не распространяется;  $K_1, K_2$  – коэффициенты интенсивности напряжения при переходе от участка к участку;  $K_s$  – коэффициенты интенсивности напряжения, соответствующий критической длине усталостной зоны;  $K_{fc}$  – циклическая трещиностойкость.

Рисунок 4.9 – Кинетическая диаграмма усталостного разрушения

Кривая ограничена критическими значениями коэффициента интенсивности напряжения  $K_{th}$ , ниже которого трещина не распространяется (или распространяется крайне медленно ( $dl/dN < 10^{-10}$  м/цикл) и  $K_{fs}$ , называемым циклической трещиностойкостью [22].

Кинетическая диаграмма усталостного разрушения состоит из трех участков, которым соответствуют различные доминирующие механизмы разрушения:

- на первом участке скорость распространения трещины контролируется механизмом сдвига;
- на втором участке скорость распространения трещины контролируется механизмом микроотрыва;
- на третьем скорость распространения трещины контролируется смешанным механизмом (микросдвиг и микроотрыв).

Переход от одного участка кинетической диаграммы разрушения к другому происходит при достижении пороговых значений коэффициентов интенсивности напряжения:

- $K_1$  (при переходе от первого ко второму участку);
- $K_2$  (при переходе от второго к третьему участку).

Пороговое значение  $K_s$  соответствует критической длине усталостной зоны  $l_s$ .

На первом, низкоамплитудном участке диаграммы размеры пластических зон у вершины усталостной трещины соизмеримы с размерами зерна в металле, что обуславливает повышенную чувствительность процессов разрушения к микроструктуре материала. При достижении циклической зоны у вершины трещины размера зерна в металле происходит переход от первого ко второму участку кинетической диаграммы.

На втором, среднеамплитудном участке диаграммы скорость трещины достигает значений от  $10^{-8}$  м/цикл до  $10^{-6}$  м/цикл. Зависимость скорости роста трещины от коэффициентов интенсивности напряжения  $\Delta K$  или  $K_{max}$  в этой области определяется уравнением Пэриса:

$$\frac{dl}{dN} = C \cdot \Delta K (K_{\max})^n, \quad (4.7)$$

где  $C$  – константа, зависящая в общем случае от условий испытания (асимметрии цикла, частоты нагружения, температуры);

$n$  – константа, зависящая от свойств материала.

На третьем, высокоамплитудном участке диаграммы значения коэффициента интенсивности напряжения приближаются к критическому значению  $K_{fc}$ . На этом участке скорость распространения усталостной трещины резко возрастает.

С увеличением толщины образцов  $a$ , следовательно, с повышением жесткости локального напряженного состояния материала у вершины трещины при неизменном значении коэффициента асимметрии цикла нагружения  $R$ , скорость распространения усталостной трещины возрастает. При этом, угол наклона прямолинейного участка кинетической диаграммы усталостного разрушения, а, следовательно, коэффициента  $n$  в уравнении Пэриса, не изменяются.

На определенных стадиях развития усталостной трещины доминируют различные механизмы разрушения. В области низких значений коэффициентов интенсивности нагружения  $\Delta K$  ( $K_{\max}$ ), отвечающих первому участку на кинетической диаграмме усталостного разрушения, скорость распространения трещины чувствительна к микроструктуре материала. На третьей стадии разрушения микроструктура материала слабо влияет на скорость распространения трещины [22]. Кратковременные перегрузки оказывают существенное влияние на скорость распространения трещины на начальной стадии разрушения и почти не влияют на конечной стадии. Коэффициент асимметрии цикла нагружения  $R$  оказывает наибольшее влияние на рост трещины, как на первом, так и на третьем участке, частота нагружения – на втором и третьем участках. Влияние некоторых агрессивных сред существенно сказывается на первом и на втором участке кинетической диаграммы разрушения и практически исчезает на третьем участке.

Каждому участку кинетической диаграммы разрушения при данной температуре испытания соответствует типичный микрорельеф, обусловленный определенным механизмом роста трещины:

– при малых скоростях роста трещины, в пределах низкоамплитудного участка кинетической диаграммы усталостного разрушения, на изломах сталей доминируют строчечная структура с небольшими участками циклического скола при низких температурах и бороздчатого рельефа при высоких температурах;

– при более высоких скоростях распространения трещины микрорельеф излома сталей, образованный выше и ниже критической температуры хрупкости, существенно отличается. На изломах стали с ярко выраженным интервалом вязко-хрупкого перехода выше критической температуры хрупкости преобладает бороздчатый механизм, ниже – скол, иногда с вязкими участками [22];

– при переходе усталостного разрушения в область высоких скоростей микрорельеф усталостных изломов становится все более схожим с микрорельефом статического нагружения. Роль критической температуры хрупкости на данной стадии разрушения доминирует. При высоких температурах на поверхности усталостных изломов преобладают бороздки и ямки, при низких – скол.

Усталостные бороздки являются наиболее информативной характеристикой микрорельефа усталостных изломов, позволяющей оценивать долговечность детали на стадии развития трещины. Принято было считать, что одна бороздка образуется за цикл нагружения, поэтому число бороздок определяет число циклов нагружения на стадии развития трещины. Однако результаты многих работ показали, что такая взаимосвязь наблюдается далеко не всегда и зависит от стадийности усталостного разрушения: при низких значениях  $\Delta K$  для продвижения фронта трещины или его части на ширину бороздки требуется не один, а несколько циклов нагружения, поэтому расчет долговечности по числу бороздок может привести к получению заниженных значений долговечности. При высоких  $\Delta K$  микроскорость роста трещины, оцененная по ширине бороздки, становится ниже макроскорости, поэтому оценка долговечности по числу бороздок приводит к получению завышенных значений долговечности.



В большинстве случаев интервал совпадения макро- и микроскорости роста усталостной трещины ограничен скоростями  $10^{-7}$ – $10^{-6}$  м/цикл, характерными для малоциклового усталости. В редких случаях совпадение наблюдается при скоростях  $(3-9) \cdot 10^{-8}$  (нижний предел интервала совпадения по скорости) и  $(4-7) \cdot 10^{-5}$  м/цикл (верхний предел). Минимальная ширина бороздок составляет  $1,3 \cdot 10^{-8}$ , максимальная –  $8 \cdot 10^{-5}$  м. При скоростях, меньших  $10^{-7}$  м/цикл, микроскорость, оцениваемая по ширине бороздок, выше (часто на два-три порядка, а при скоростях, больших  $10^{-6}$  м/цикл, ниже (на один-два порядка) макроскорости роста усталостной трещины [22].

При большой скорости развития трещины (в области высоких значений  $\Delta K$ ) различие скоростей связано с действием механизмов статического разрушения, приводящих к появлению ямок, фасеток скола, фасеток межзеренного разрушения. Кроме этого, при указанных скоростях рост трещины может ускоряться вследствие вязкого разрушения, связанного с образованием микротрещин на частицах или в результате выпрямления фронта трещины .

При низкой скорости распространения трещины (в области низких значений  $\Delta K$ ) различие микро- и макроскорости роста трещины обычно связывают с влиянием окружающей среды, структуры материала, геометрии образца и фронта трещины, с дискретностью процесса роста трещины, с механизмом образования бороздок.

Различие ширины бороздок и продвижения трещины за каждый цикл нагружения связано с тем, что бороздки малой ширины хотя и имеются на изломе, но не всегда разрешаются.

На зависимость ширины бороздок от размаха коэффициента интенсивности напряжений оказывает влияние и тот факт, что доля бороздчатого рельефа в общем рельефе разрушения изменяется: при низких  $\Delta K$  и низкой скорости роста трещины она крайне мала — площадь, занимаемая участками с бороздчатым рельефом, составляет, в среднем, всего 15 % от общей площади поверхности излома. С увеличением  $\Delta K$  площадь, занятая бороздками, увеличивается и достигает максимального значения 55 % при скорости  $10^{-7}$  м/цикл. Именно при этой скорости и

начинается удовлетворительное соответствие микро- и макроскорости роста усталостной трещины [22]. Максимальная доля участков с бороздчатым микрорельефом наблюдается при скоростях, близких к  $10^{-6}$  м/цикл.

За несколько циклов нагружения образовавшаяся поверхность становится достаточной, чтобы при разгрузке сформировалась единичная бороздка. Затем процесс повторяется снова, пока не будет достигнута определенная величина раскрытия трещины, достаточная для образования составной бороздки. С увеличением  $\Delta K$  скорость роста трещины возрастает, продвижение за цикл нагружения становится близким к величине ее максимального раскрытия, а ширина единичной бороздки приближается к ширине составной.

При достижении длины трещины  $l_s$  ( $\Delta K_s$ ) наряду с бороздками начинают обнаруживаться ямки, являющиеся характерной особенностью вязкого статического разрушения в условиях развитой текучести. Скорости распространения усталостной трещины, соответствующие их появлению, близки к величине  $10^{-7}$  м/цикл. При низких напряжениях и длинах трещины, меньших  $l_s$ , не только микро-, но и макроскорость почти не меняется с увеличением длины трещины (макроскорость увеличивается с ростом напряжения). Поэтому при низких напряжениях нельзя ожидать соответствия между микро- и макроскоростью.

Согласно модели образования пластических зон [23], в условиях циклического деформирования у вершины усталостной трещины образуются две пластические зоны: монотонная зона (зона текучести)  $r_y$ , появляющаяся уже на первых стадиях нагружения, и циклическая зона (зона обратной пластической деформации)  $r_{yh}$ .

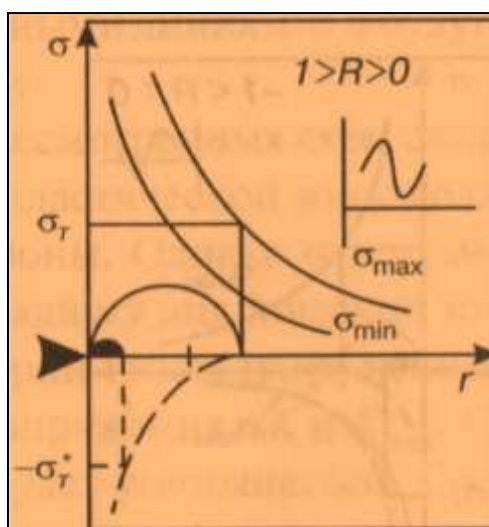
Образование монотонной зоны связано с достижением микротекучести материала. Образование циклической пластической зоны связано с тем, что в вершине распространяющейся трещины возникают значительные по величине напряжения сжатия, в то время как впереди трещины имеют место растягивающие напряжения.

На рисунке 4.10 представлены схемы образования монотонной и циклической пластических зон у вершины усталостной трещины при различных значениях коэффициента асимметрии цикла нагружения  $R$  [1, 19].

Пластические зоны, образующиеся при напряжениях растяжения, обозначены светлым полем; при напряжениях сжатия – тёмным полем.

Образование монотонной пластической зоны связано с максимальными растягивающими напряжениями, возникающими у вершины усталостной трещины. Размеры этой зоны коррелируют с максимальным коэффициентом интенсивности напряжения  $K_{\max}$ . При изменении знака нагружения, в случае одноименно растягивающих циклов нагружения ( $1 > R > 0$ ), в пределах монотонной пластической зоны возникают сжимающие напряжения (на рисунке 4.10 показаны пунктирными линиями).

При достижении предела текучести деформационно-упрочнённого материала  $\sigma_T^*$  эти сжимающие напряжения формируют циклическую пластическую зону. Поэтому циклическая пластическая зона образуется даже в случае одноименных растягивающих циклов нагружения. Размеры этой зоны лучше коррелируют с размахом коэффициента интенсивности напряжения  $\Delta K$ .

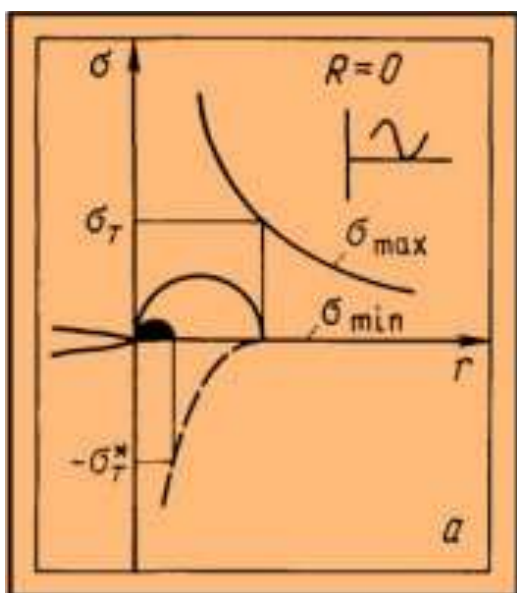


$\sigma_T$  – предел текучести материала;  
 $\sigma_T^*$  – предел текучести при сжатии деформационно-упрочненного материала.

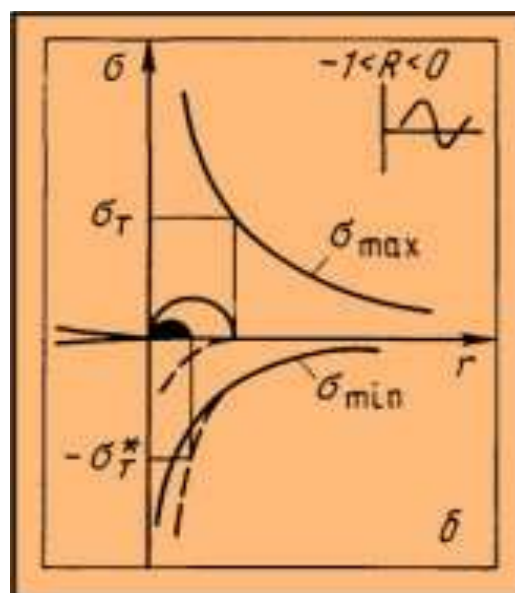
Рисунок 4.10 – Схема образования у вершины усталостной трещины монотонной  $r_y$  (светлое поле) и циклической  $r_{yh}$  (темное поле) пластических зон при растягивающих циклах нагружения

Аналогичным образом формируются монотонная и циклическая пластические зоны у вершины усталостной зоны и при отнулевом цикле нагружения ( $R=0$ ) (рисунок 4.11 а).

В случае преимущественно растягивающих ( $-1 < R < -\infty$ ) циклов нагружения (рисунок 4.11 б, в, г) напряжения сжатия, которые возникают в пределах монотонной пластической зоны (пунктирные линии), складываются со сжимающими напряжениями, возникающими от части цикла, лежащей в сжимающей области. Эти суммарные напряжения сжатия формируют циклическую пластическую зону.



а) отнулевой

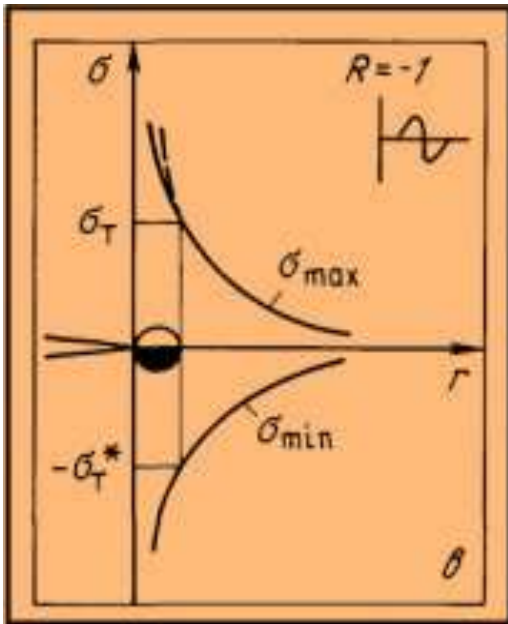


б) преимущественно растягивающий

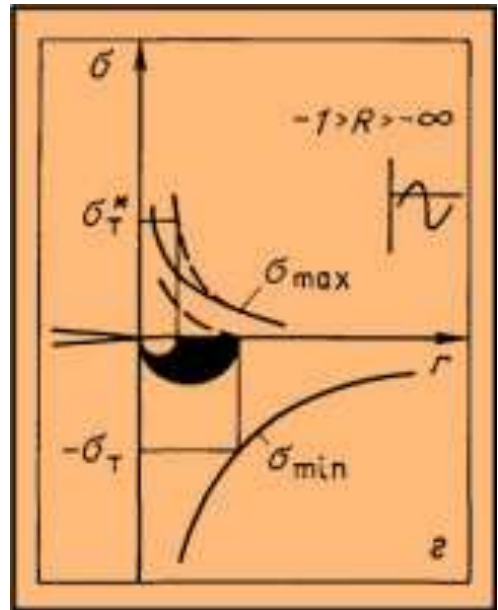
$\sigma_T$  – предел текучести материала;

$\sigma_T^*$  – предел текучести при сжатии деформационно - упрочненного материала.

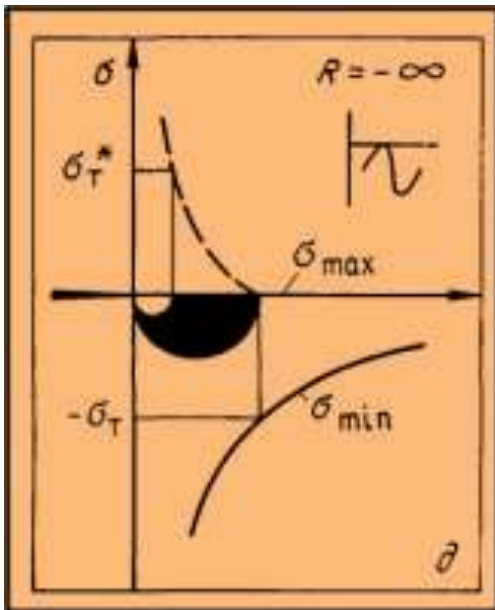
Рисунок 4.11 – Схемы образования пластических зон у вершины усталостной трещины при различных циклах нагружения



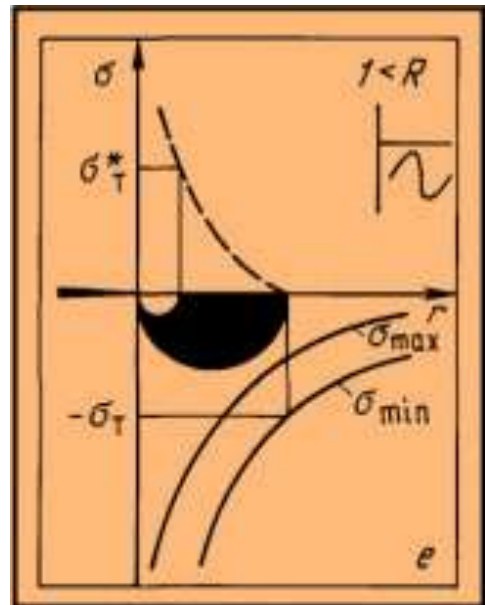
в) симметричный



г) преимущественно сжимающий



д) отнулевой сжимающий



е) полностью сжимающий

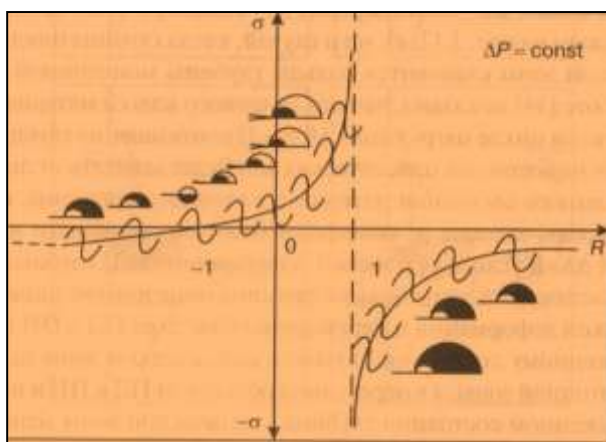
Рисунок 4.11 (продолжение)

На рисунках 4.12, 4.13 представлены обобщенные схемы образования пластических зон у вершины усталостной трещины в зависимости от коэффициента асимметрии цикла нагружения  $R$  при локальном напряженном состоянии, которое соответствует границе между плоской деформацией и переходной областью от

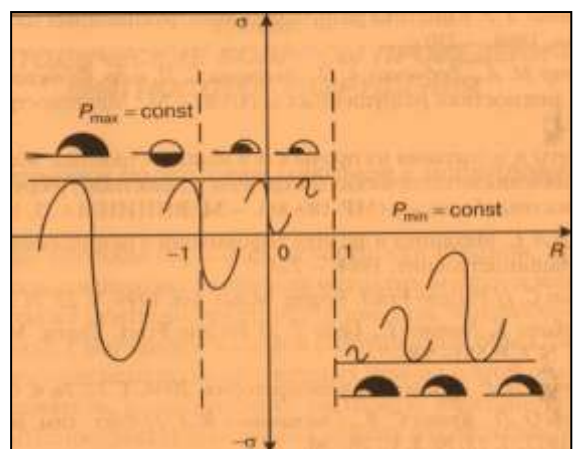
плоской деформации к плоскому напряженному состоянию для различных схем нагружения (при  $\Delta P = \text{const}$ ;  $P_{\text{max}} = \text{const}$  или  $P_{\text{min}} = \text{const}$ ) [1, 19].

Пластические зоны, вызванные растягивающими напряжениями, указаны светлым полем, зоны, вызванные напряжениями сжатия – темным полем.

При изменении локального напряженного состояния материала у вершины трещины в сторону плоской деформации или плоского напряженного состояния изменится и коэффициент асимметрии цикла нагружения  $R$ , при котором глубина циклической пластической зоны будет равна глубине монотонной зоны.



а) при  $\Delta P = \text{const}$



б) при  $P_{\text{max}} = \text{const}$  или  $P_{\text{min}} = \text{const}$

Рисунок 4.12 – Обобщенная схема образования пластических зон у вершины усталостной трещины в зависимости от коэффициента асимметрии цикла нагружения  $R$

### 4.3 Вопросы для самопроверки

- 1 Какие различают три основные типы разрушения в зависимости от схемы нагружения?
- 2 С чем связано разрушение по типу I, типу II и типу III?
- 4 Когда происходит срагивание трещины?
- 5 Как определяются коэффициенты интенсивности напряжения при однократном нагружении?
- 6 Как определяются коэффициенты интенсивности напряжения при усталостном нагружении?
- 7 Как влияет коэффициент асимметрии цикла нагружения на усталостную прочность материала и скорость распространения усталостной трещины?
- 8 Что представляет собой кинетическая диаграмма усталостного разрушения?
- 9 Сколько характерных участков имеет диаграмма усталостного разрушения?
- 10 Что представляют собой пороговые значения коэффициентов интенсивности напряжения?
- 11 Какой микрорельеф образуется на каждой стадии распространения усталостной трещины?
- 12 Какой вид имеет уравнение Пэриса?
- 13 Какие пластические зоны образуются у вершины усталостной трещины?
- 14 Каковы схемы образования пластических зон при растягивающих циклах нагружения?
- 15 Каковы схемы образования пластических зон при сжимающих циклах нагружения?
- 16 Как влияет коэффициент асимметрии цикла нагружения на образование пластических зон у вершины усталостной трещины?
- 17 Что представляет собой обобщенная схема образования пластических зон у вершины усталостной трещины?

## 5 Определение свойств материала и параметров разрушения

### 5.1 Определение критической температуры хрупкости материала

**Определение критической температуры хрупкости материала по доле вязкой составляющей.**

Фрактографический метод определения критической температуры хрупкости (КТХ) металлических материалов основан на измерении доли вязкой составляющей в изломе в серии образцов, подвергнутых испытаниям на ударный изгиб при различных температурах [24]. Кроме того, могут быть определены длина стабильной трещины и деформационные характеристики (утяжка образца).

Данный метод распространяется на металлические материалы, склонные к охрупчиванию при понижении температуры, проявляющейся в изменении механизма разрушения, причем эта изменения различимы по виду излома визуально или с помощью светового или электронного микроскопа.

За критическую температуру хрупкости принимают температуру, при которой наблюдается отчетливо выраженная смена механизма разрушения, либо смена механизма разрушения происходит на определенной, условно принятой доле площади излома металлического материала (при протяженном температурном интервале перехода от вязкого разрушения к хрупкому) [24].

Изменение характеры разрушения происходит в некотором температурном интервале, который характеризуется температурами:

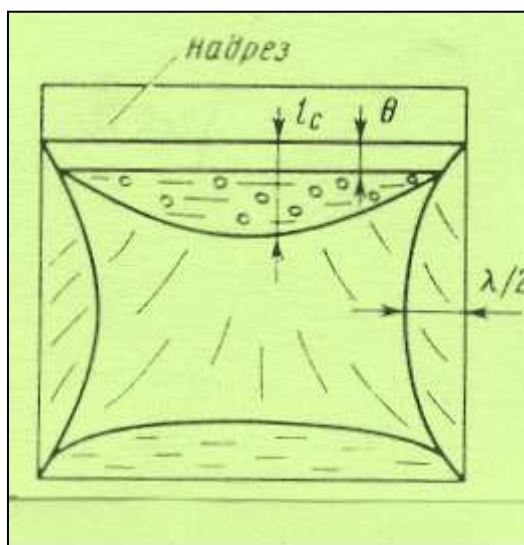
- $T_{xp}^B$  – верхняя критическая температура хрупкости, выше которой излом полностью (> 95 %) вязкий;
- $T_{xp}^H$  – нижняя критическая температура хрупкости, ниже которой излом полностью (> 95 %) хрупкий.

В случае дискретного перехода от вязкого разрушения к хрупкому в узком температурном интервале, когда  $T_{xp}^B - T_{xp}^H = 10^\circ\text{C}$ , за КТХ принимают середину температурного интервала резкого изменения вида излома и обозначают  $T_{50}$ .



Для материалов, характеризующихся протяженным температурным интервалом перехода от вязкого разрушения к хрупкому, различают  $T_{90}$ ,  $T_{50}$ ,  $T_{10}$  – температуры, соответствующие наличию в изломе соответственно 90, 50 и 10 % вязкой составляющей. В качестве КТХ наиболее широко используют  $T_{50}$ .

Участок вязкого разрушения у надреза, расположенный под углом к поверхности взлома, называют зоной вытягивания; длину зоны вытягивания обозначают  $\theta$  (рисунок 5.1). Участок вязкого развития трещины от надреза до зоны хрупкого разрушения, включая  $\theta$ , называют зоной стабильного роста трещины и ее длину обозначают  $l_c$ . Участок вязкого развития трещины на стороне, противоположной надрезу, называют участком вязкого долома. Участки вязкого разрушения у боковых сторон ударного образца, расположенные под углом  $45^\circ$  к поверхности излома, называют боковыми скосами или губами среза и обозначают  $\lambda$ .



$\theta$  – зона вытягивания;  $l_c$  – вязкая зона стабильного роста трещины;  
 $\lambda$  – губы среза.

Рисунок 5.1 – Схема строения излома, полученного при ударном нагружении

Хрупкой составляющей в изломе называют участки развития трещины, характеризующиеся при визуальном наблюдении блестящим кристаллическим строением, а при электронномикроскопическом – имеющие вид фасеток скола с ручьистым узором или гладких фасеток межзеренного разрушения.

В закаленных и отпущенных сталях хрупкая составляющая при визуальном наблюдении имеет гладкую фарфоровидную поверхность без кристаллического блеска, а наблюдение в электронном микроскопе выявляет в таких сталях дисперсные фасетки скола без ручьистого узора.

Долю вязкой составляющей на поверхности изломов  $V$ , %, определяется по формуле [24]:

$$V = 100 - XP, \quad (5.1)$$

где  $XP$  – доля хрупкой составляющей, %.

Фрактографические измерения образцов с целью построения температурной зависимости процентного содержания вязкой составляющей или длины стабильного роста трещины  $l_c$  проводят по результатам испытаний не менее 18 образцов. Испытания целесообразно проводить в две серии, испытывая сначала по одному образцу на температуру через  $40^\circ\text{C}$  для определения температурного интервала вязко-хрупкого перехода, а затем, для уточнения хода кривой в этом интервале, испытывают остальные образцы в количестве 2-3 при одной температуре, чтобы обеспечить получение внутри интервала (выше  $T_{xp}^H$  и ниже  $T_{xp}^B$ ) не менее 4-х температурных точек.

Измерения основаны на определении площади хрупкой составляющей  $F_{xp}$ . Данная методика применима только для изломов, имеющих сосредоточенные области вязкой и хрупкой составляющих.

Долю вязкой составляющей определяют как отношение разности исходной площади поперечного сечения образца под надрезом  $F_0$  и площади хрупкой составляющей к исходной площади поперечного сечения под надрезом:

$$B = \frac{F_0 - F_{xp}}{F_0} \cdot 100 \% = \left(1 - \frac{F_{xp}}{F_0}\right) \cdot 100 \%, \quad (5.2)$$

где  $F_0$  – площадь поперечного сечения образца под надрезом;

$F_{xp}$  – площадь хрупкой составляющей.

В случае сложной формы зоны хрупкого разрушения, для определения площади хрупкой составляющей  $F_{xp}$  производят планиметрирование площади соответствующего участка на увеличенном изображении. При наличии нескольких зон хрупкого разрушения определяют площади отдельных хрупких участков и суммируют по всему излому. Для ускорения и удобства измерений рекомендуется определять долю вязкой составляющей методом сопоставления со шкалой (рисунок 5.2) [24].

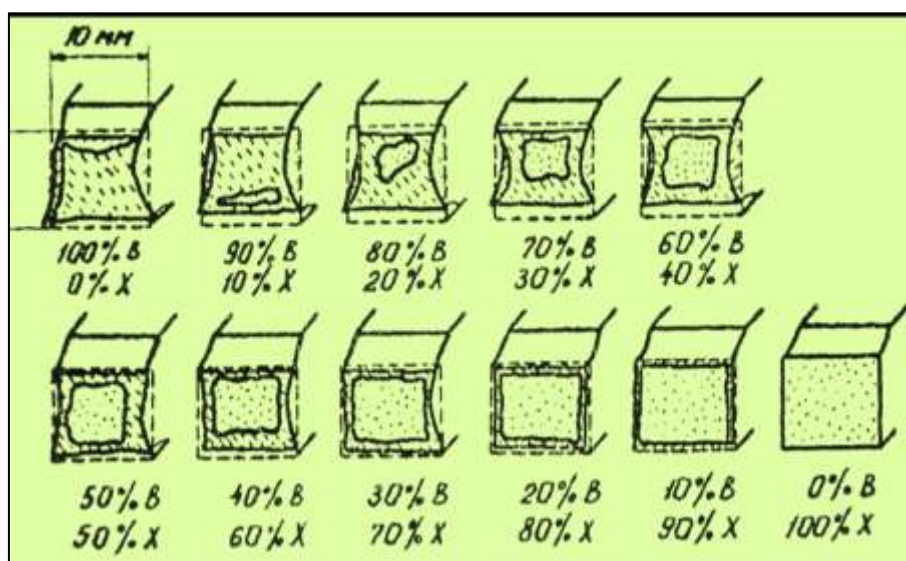


Рисунок 5.2 – Шкала изломов с различной долей вязкой составляющей

Участки, занятые расслоениями или расщеплениям, условно относят к вязкой составляющей.

В зависимости от используемых инструментальных средств, размера и формы зоны хрупкого разрушения, измерение величины доли вязкой составляющей осуществляют с абсолютной, погрешностью до 10 %.

Определив долю вязкой составляющей при каждой температуре испытания, по средним значениям вязкой составляющей строят кривую температурной зависимости в координатах «В – Т» и на полученном графике находят температуру, при которой в изломе наблюдается 50 % вязкой составляющей (рисунок 5.3).

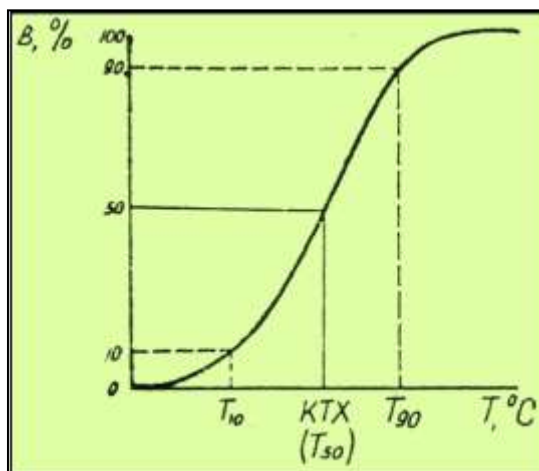


Рисунок 5.3 – Температурная зависимость доли вязкой составляющей в изломе и схема определения КТХ

### Определение критических температур хрупкости по критической длине трещины.

Работоспособность материала на стадии развития трещины в основном характеризуется длиной зоны стабильного роста трещины.

Выбор в качестве критерия сопротивления хрупкому разрушению заданной длины трещины является обоснованным с точки зрения механики разрушения, поскольку достижение критической длины трещины соответствует реализации в вершине трещины такого напряженного состояния, при котором происходит смена механизма разрушения [6, 12].

Критическая длина трещины  $l_c$  в интервале вязко-хрупкого перехода уменьшается от своего максимального значения при температуре  $T_{xp}^B$ , выше которой излом полностью вязкий, до нуля при температуре  $T_{xp}^H$ , ниже которой излом полностью хрупкий.

Оценка КТХ по длине стабильной трещины применима для изломов с локализованными зонами разрушения [6, 12].

С помощью штангенциркуля, компаратора или инструментального микроскопа производят измерение максимальной зоны стабильного роста в направлении распространения трещины до границы перехода ее к нестабильному хрупкому разрушению.

Затем строятся температурная зависимость  $l_c$  (рисунок 5.4). За критическую температуру принимают температуру при которой критический размер трещины  $l_c$  равен 1 мм.

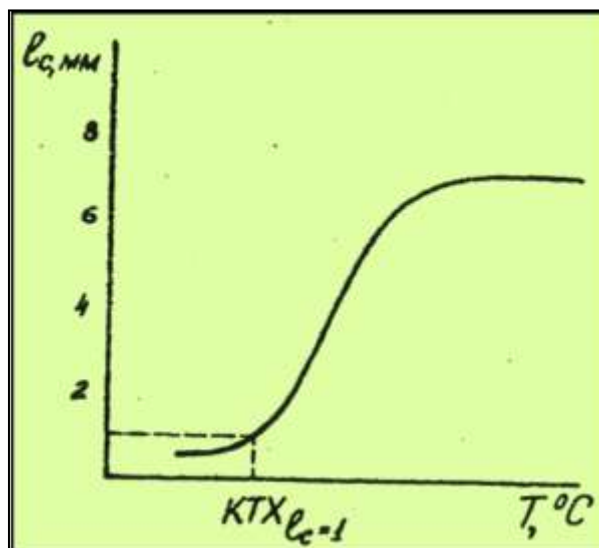


Рисунок 5.4 – Температурная зависимость длины стабильной трещины  $l_c$  и схема определения КТХ

Возможно также построение температурной зависимости отношения  $l_c$  к длине излома. Температура, при которой это отношение равно 0,25, принимают за критическую температуру хрупкости. Критическая температура хрупкости, определенная таким способом для надрезанных образцов, испытанных на ударный изгиб, соответствует критической температуре хрупкости, определенной по 50 %-ной вязкой составляющей в изломе.

## 5.2 Оценка длительности роста усталостной трещины по ширине усталостных бороздок

Данный метод основан на измерении с помощью электронного микроскопа ширины усталостных бороздок, соответствующей длине трещины, и установлении границ интервала совпадения микро- и макроскорости роста усталостной трещины, оцененной по характеристикам излома [25]. Измерение шага усталостных бороздок производят в направлении максимального удаления линии фронта усталостной трещины от очага разрушения, одновременно оценивая длину трещины от очага до точек измерения бороздок. За ширину бороздок в каждой точке принимают средние значения шага 4-10 бороздок.

По результатам измерения строят зависимость ширины бороздок  $s$  от длины трещины  $l$ , форма которой определяется уровнем напряжения, но в общем случае имеет S-образный характер, подобный характеру зависимости  $s - \Delta K$ .

В двойных логарифмических координатах данная зависимость имеет вид ломанной линии (рисунок 5.5) с тремя участками: в пределах первого и третьего участков шаг бороздок мало зависит от длины трещины, а на втором, ограниченном длинами трещин  $l_s$  и  $l_r$  и соответствующими размахами коэффициентов интенсивности напряжений  $\Delta K_s - \Delta K_r$ , ширина бороздок увеличивается с длиной трещины и число бороздок соответствует числу циклов нагружения.

В области малоциклового усталости обнаруживаются второй и третий участки, в области многоциклового — первый и второй. Поскольку совпадение микро- и макроскорости роста трещины наблюдается лишь на втором участке, при оценке длительности роста трещины важно определить его границы.

Помимо характера зависимости шага бороздок от длины трещины и увеличения ширины бороздок, наблюдаемого на втором участке, фрактографическими признаками начала интервала совпадения (достижения коэффициента интенсивности напряжений  $\Delta K_s$ ), могут служить: появление и увеличение с длиной трещины доли статических механизмов разрушения, областей сдвигового разрушения вблизи поверхности образца и составных бороздок.

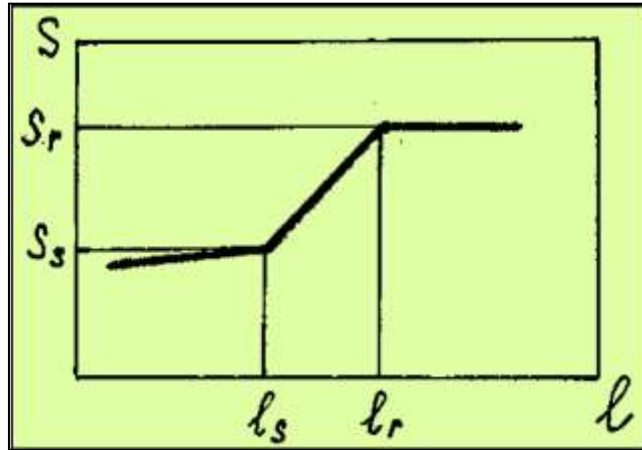


Рисунок 5.5 – Обобщенная зависимость шага усталостных бороздок  $s$  от длины трещины  $l$  в двойных логарифмических координатах

Оценка длительности роста трещины на первом и третьем участках затруднительна и требует либо моделирования разрушения в лабораторных условиях с определением методами фрактографии ширины бороздок на модели и установления связи между шириной бороздок и средней макроскоростью развития трещины, либо использования экспериментально установленных эмпирических соотношений между микро- и макроскоростью роста трещины для образцов из исследуемого материала [26].

### 5.3 Определение величины номинального напряжения по параметрам микрорельефа излома

Данный способ основан на использовании соотношения Форсайта, связывающего длину трещины  $l$  и длину ее фронта на изломе  $L$  с номинальным напряжением и статической трещиностойкостью  $K_{Ic}$  [27].

Величина амплитуды напряжения подсчитывается по соотношению:

$$\sigma_{\max} = \frac{K_{IC}}{Y\sqrt{\pi L_0}} \sqrt{\frac{1}{L}}, \quad (5.3)$$

где  $K_{IC}$  – статическая трещиностойкость;

$Y$  – коэффициент, учитывающего конечный размер образца или детали ;

$l$  – длина трещины в направлении максимального удаления фронта от очага разрушения;

$L$  – длина линии фронта трещины на изломе.

#### 5.4 Вопросы для самопроверки

1 Перечислите параметры эксплуатационных повреждений, которые могут быть выявлены фрактографически.

2 Как определяется критическая температура хрупкости материала по доле вязкой составляющей?

3 Что называется долей хрупкой составляющей?

4 Как определяется критическая температура хрупкости материала по критической длине трещины?

5 Что считается критической длиной трещины?

6 Как провести оценку длительности роста усталостной трещины по ширине усталостных бороздок?

7 Что принимают за ширину бороздок?

8 Как определить величины номинального напряжения по параметрам микрорельефа излома?

9 Как определить величину амплитуды напряжения?

10 Что представляет собой соотношение Форсайта?



## Список использованных источников

1 Клевцов, Г. В. Физика и механика разрушения. Основы диагностики разрушения металлических материалов: электронное гипессылочное пособие / Г. В. Клевцов, Н. А. Клевцова, О.А. Фролова; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2011.

2 Фрактодиагностика разрушения металлических материалов и конструкций / Г. В. Клевцов [и др.]. – М. : МИСиС, 2007. – 264 с. – ISBN 978-5-87623-176-5.

3 Фридман, Я. Б. Строение и анализ изломов металлов / Я. Б. Фридман, Т. А. Гордеева, А. М. Зайцев. – М. : Машгиз, 1960. – 128 с.

4 Фрактография – средство диагностики разрушенных деталей / М. А. Балтер [и др.]. – М. : Машиностроение, 1978. – 184 с.

5 Гордеева, Т. А. Анализ изломов при оценке надежности материалов / Т. А. Гордеева, И. П. Жегина. – М. : Машиностроение, 1979. – 199 с.

6 Клевцов, Г. В. Пластические зоны и диагностика разрушения металлических материалов / Г. В. Клевцов. – М. : МИСИС, 1999. – 112 с. – ISBN 978-5-02-032647-7.

7 Расчеты и испытания на прочность. Классификация видов изломов металлов: РД 50-672-88 : утв. Гос. комитетом СССР по стандартам 29.07.1988 : введ. в действие с 01.07.1989. – М.: ВНИИНМАШ, 1988. – 32 с.

8 Феллоуз, Дж. Фрактография и атлас фрактограмм. Справочник; под ред. М. Л. Бернштейна / Дж. Феллоуз; перевод с англ. Е. А. Шура. – М. : Металлургия, 1982. – 489 с.

9 Энгель, Л. Растровая электронная микроскопия / Л. Энгель, Г. Клингел. – М. : Металлургия, 1986. – 232 с.

10 Герасимова, Л. П. Изломы конструкционных сталей / Л. П. Герасимова, А. А. Ежов, М. И. Маресев. – М. : Металлургия, 1987. – 272 с.

11 Клевцова, Н. А. Разрушение аустенитных сталей и мартенситные превращения в пластических зонах / Н. А. Клевцова, О. А. Фролова,

Г. В. Клевцов. – М. : Изд-во Академии Естествознания, 2005. – 155 с. – ISBN 5-7410-0677-9.

12 Ботвина, Л. Р. Кинетика разрушения конструкционных материалов / Л. Р. Ботвина. – М. : Наука, 1989. – 230 с.

13 Владимиров, В. И. Физическая природа разрушения материалов / В. И. Владимиров. – М. : Metallurgy, 1984. – 280 с.

14 Энгель, Л. Растровая электронная микроскопия / Л. Энгель, Г. Клингел. – М. : Metallurgy, 1986. – 232 с.

15 Феллоуз, Дж. Фрактография и атлас фрактограмм / Дж. Феллоуз; перевод с англ. Е. А. Шура под ред. М. Л. Бернштейна. – М. : Metallurgy, 1982. – 489 с.

16 Бичем, К. Д. Микропроцессы разрушения / К. Д. Бичем. – М. : Мир, 1973. – Т. 1. – С. 265–275.

17 Мороз, Л. С. Механика и физика деформаций и разрушения материалов / Л. С. Мороз. – Л. : Машиностроение, 1984. – 224 с.

18 Школьник, Л. М. Скорость роста трещин и живучесть металла / Л. М. Школьник. – М. : Metallurgy, 1973. – 215 с.

19 Клевцов, Г. В. Механизмы разрушения металлических материалов и пластические зоны под поверхностью изломов / Г. В. Клевцов [и др.]. – Оренбург : ИПК ГОУ ОГУ, 2008. – 159 с. – ISBN 9785-7410-0710-5.

20 Коцаньда, С. Усталостное растрескивание металлов; пер. с польск. / С. Коцаньда; под ред. С. Я. Яремы. – М. : Metallurgy, 1990. – 623 с.

21 Хеллан, К. Введение в механику разрушения / К. Хеллан; пер. с англ. – М. : Мир, 1988. – 364 с.

22 Ярема, С. Я. Исследования роста усталостных трещин и кинетические диаграммы усталостного разрушения / С. Я. Ярема // Физико-химическая механика материалов. – 1977. – Т. 13. – № 4. – С. 3–19.

23 Rice, J. R. Mechanics of crack tip deformation and extension by fatigue / J. R. Rice // ASTM, Special Technical Publication. – 1966. – № 415. – P. 247–311.

24 MP5-81. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Фрактографический метод определения критической температуры хрупкости

металлических материалов. Методические рекомендации. – М.: ВНИИНМАШ Госстандарта СССР, 1081. – 22 с.

25 МР-189-86. Расчеты и испытания на прочность. Метод оценки сопротивления металлических материалов усталостному разрушению по шагу усталостных бороздок. – М.: ВНИИНМАШ Госстандарта СССР, 1986. – 36 с.

26 Иванова, В. С. Фрактографический метод определения длительности роста усталостных трещин в образцах и деталях в условиях плоской деформации / В.С. Иванова, А.А. Шанявский. – М.: Инс-т металлургии АН СССР, 1977. – 47 с.

27 Ботвина, Л. Р. Оценка параметров скачкообразного роста усталостной трещины в компрессорных лопатках из титанового сплава ВТЗ-1 / Л.Р. Ботвина, Л.В. Лимарь, Б.С. Логовиков // Физико-химическая механика материалов, 1981. – № 1.– С. 71–74.