

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра машиноведения

О.А. Фролова

# **ФРАКТОДИАГНОСТИКА РАЗРУШЕНИЯ**

Методические указания

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 15.03.01 Машиностроение, 24.03.01 Ракетные комплексы и космонавтика, 24.03.04 Авиастроение

Оренбург  
2018

УДК 669.15  
ББК 34.5  
Ф 22

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

**Фролова, О.А.**

Ф 22 Фрактодиагностика разрушения: методические указания / О.А. Фролова; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2018. – 34 с.

В методических указаниях рассмотрены основные вопросы фрактографических исследований. Приведены различные виды классификаций изломов, рассмотрены особенности макро- и микростроения изломов. Представлены задания для самостоятельной работы.

Методические указания предназначены для выполнения заданий на практических занятиях и для самостоятельной работы. Рекомендовано обучающимся по образовательным программам высшего образования направлений подготовки 15.03.01 Машиностроение по дисциплине «Технология и оборудование современных материаловедческих исследований», 24.03.01 Ракетные комплексы и космонавтика, 24.03.04 Авиастроение по дисциплине «Прочность конструкций».

Методические указания подготовлены 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

© Фролова О.А., 2018  
© ОГУ, 2018

## Содержание

Введение .....	4
1 Основные сведения из теории.....	5
1.1 Классификация изломов .....	5
1.2 Макростроение изломов .....	8
1.3 Микростроение изломов.....	17
2 Задания для самостоятельной работы.....	29
Список использованных источников .....	34

## 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.

Результаты освоения теоретического материала и выполнения заданий ориентированы на формирование следующих компетенций: для направления подготовки 15.03.01 Машиностроение – способность использовать современное оборудование по электронной микроскопии, вихретоковой дефектоскопии, по измерениям физических параметров материалов; для направления подготовки 24.03.04 Авиастроение – ОПК-2 (способность разрабатывать конструкции изделий авиационных летательных аппаратов и их систем в соответствии с техническим заданием на основе системного подхода к проектированию авиационных конструкций); для направления подготовки 24.03.01 Ракетные комплексы и космонавтика – ПК-1 (способность и готовность участвовать в анализе состояния ракетно-космической техники в целом, её отдельных направлений и создании базы современных конструкций и технологий).

# 1 Основные сведения из теории

## 1.1 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 [1 – 5].

Макрофрактография занимается изучением строения изломов невооруженным глазом или при небольших увеличениях (до 30 крат). Микрофрактография занимается изучением строения изломов при больших увеличениях (в электронных микроскопах).

Существуют различные виды классификаций изломов [6 – 10].

Классификация изломов по природе силовых воздействий представлена на рисунке 1.1.



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.

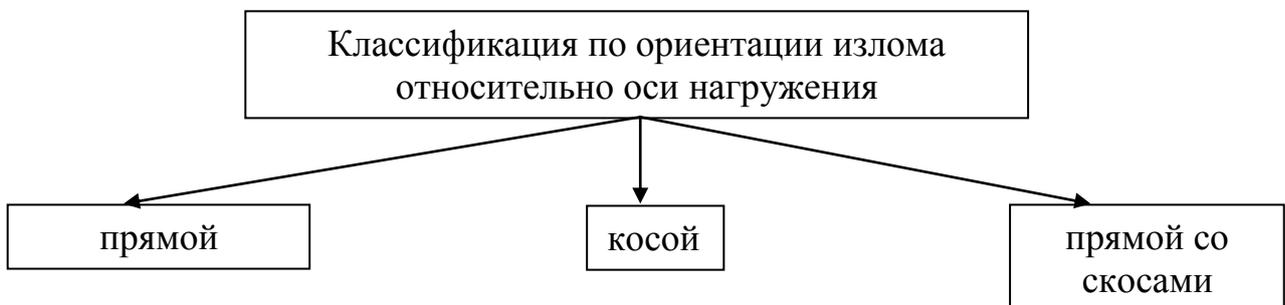


Рисунок 1.3 – Схема классификации изломов по ориентации излома относительно оси нагружения

Классификация по макрогеометрии поверхности излома представлена на рисунке 1.4.

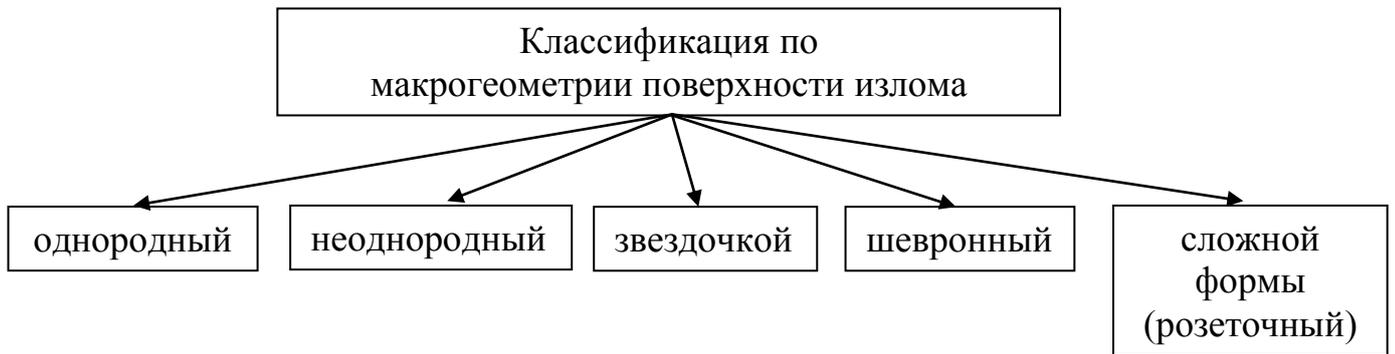


Рисунок 1.4 – Схема классификации изломов по макрогеометрии поверхности

Классификация по шероховатости, блеску и цвету излома представлена на рисунке 1.4.

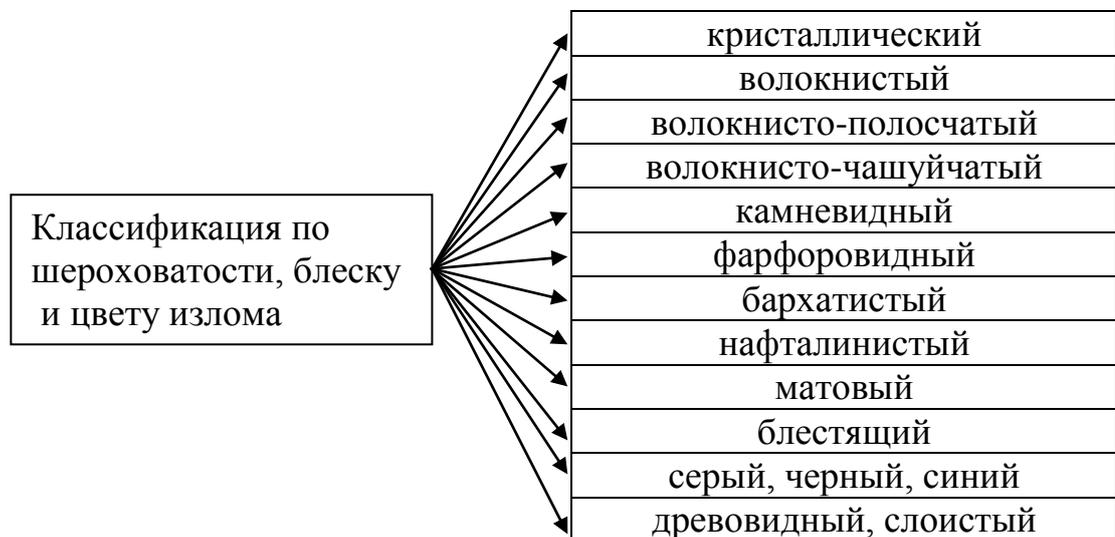


Рисунок 1.4 – Схема классификации изломов по шероховатости, блеску и цвету

## 1.2 Макростроение изломов

Изучение макростроения изломов позволяет выявлять различные зоны и области:

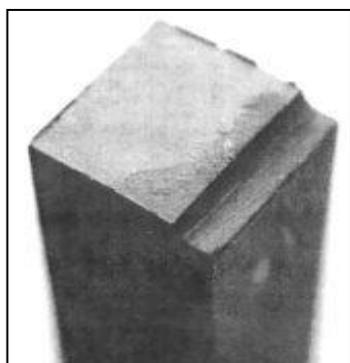
- область очага или зону зарождения трещины;
- зону устойчивого развития трещины;
- зону неустойчивого развития трещины.

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.

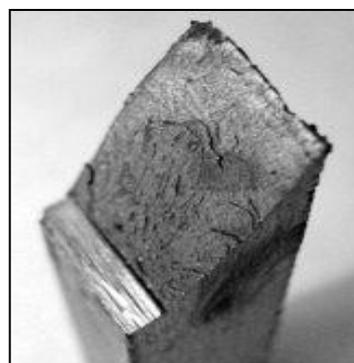
Рассмотрим макростроение различных видов изломов.

Поверхность разрушения прямого излома расположена перпендикулярно к оси детали или образца, что характерно для хрупкого разрушения (рисунок 1.5 а). Поверхность косого 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 косого (вблизи боковой поверхности) разрушения (рисунок 1.5 б). Такой излом образуется при вязком разрушении с образованием губ среза при растяжении.



а)



б)

Рисунок 1.5 – Прямой (а) и прямой со скосами (б) изломы

При растяжении гладкого образца образуется чашечный излом или излом типа «чашка-конус» (рисунок 1.6), которые относятся к разновидности прямого со скосами излома.

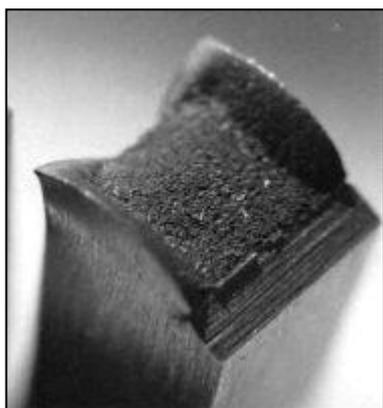


х3 (аустенитная сталь) [1]

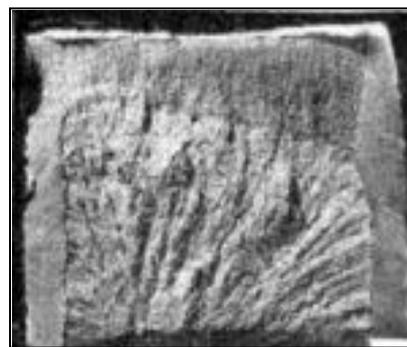
Рисунок 1.6 – Изломы типа «чашка-конус»

Однородный излом характеризуется поверхностью разрушения без различимых зон и участков на его поверхности (рисунок 1.7 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 1.7 б).



а) х5 (аустенитная сталь) [1]



б) х5(катаная сталь 40ХНМ) [4]

Рисунок 1.7 – Однородный (а) и неоднородный (б) изломы

Излом звездочкой характеризуется формированием радиальных рубцов, которые исходят из очага разрушения, располагающегося в центре образца (рисунок 1.8). 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) [5]

Рисунок 1.8 – Излом звездочкой

Шевронные изломы образуются при нестабильном, быстром развитии трещины (рисунок 1.9). В центре образца присутствуют прямолинейные рубцы, развивающиеся в направлении роста трещины, которые вблизи боковой поверхности искривляются, и следуют перпендикулярно направлению роста трещины.

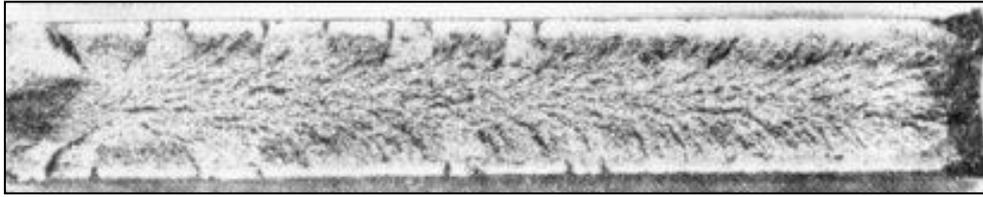
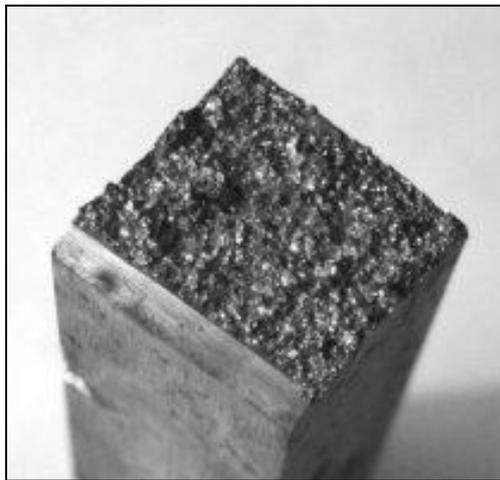


Рисунок 1.9 – Шевронный излом [6]

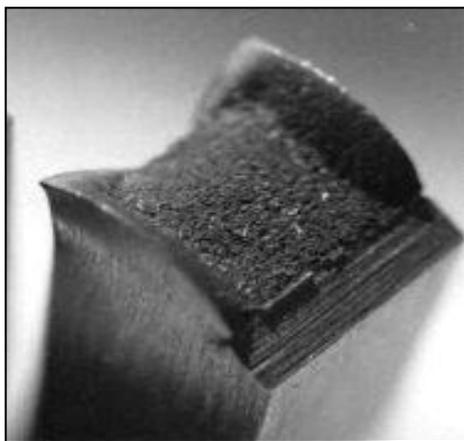
Кристаллический излом представляет собой однородную поверхность хрупкого разрушения с блестящим кристаллическим строением без признаков макропластической деформации (рисунок 1.10).



х5 (аустенитная сталь) [1]

Рисунок 1.10 – 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 1.11).



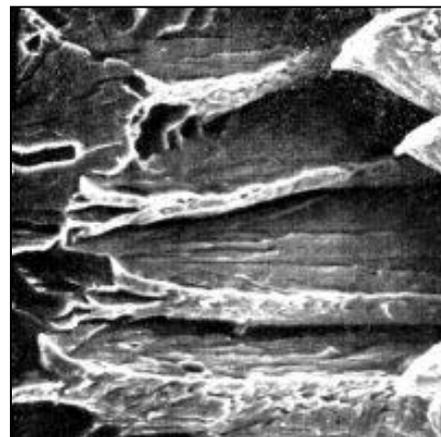
x5 (аустенитная сталь) [1]

Рисунок 1.11 – Волокнистый излом

Волокнисто-полосчатый (рисунок 1.12 а) и волокнисто-чашуйчатый (рисунок 1.12 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 [4].



а) x15 (катаная сталь) [4]



б) x2000 (катаная сталь) [4]

Рисунок 1.12 – Волокнисто-полосчатый (а) и  
волокнуто-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 1.13 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) [6]

Рисунок 1.13 – Камневидный излом

Фарфоровидный излом (рисунок 1.14) имеет мелкокристаллическое строение, сглаженную поверхность светло-серого цвета, похожую на поверхность разрушенного фарфора. Образуется при разрушении стали с пониженной пластичностью и высоким уровнем прочности.



х2 (сталь 45XNMΦA) [4]

Рисунок 1.14 – Фарфоровидный излом

Бархатистый излом встречается при разрушении аустенитных сталей при низких температурах, цветных сплавов и закаленных инструментальных сталей (рисунок 1.15). Излом внешне напоминает фарфоровидный излом; имеет мелкозернистое строение и гладкую поверхность серого цвета с тусклым металлическим отливом, напоминающим бархат.

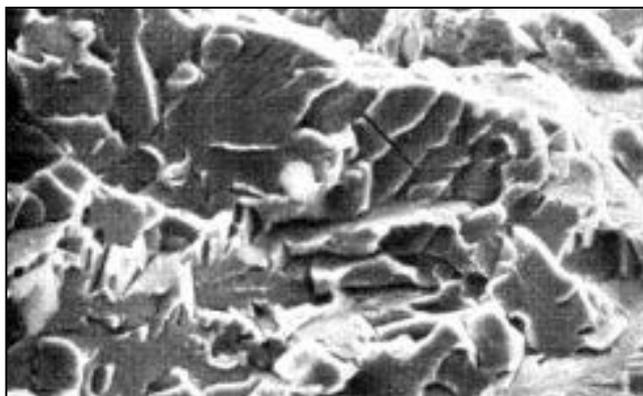


х5 (катаная сталь 45XNMΦA) [4]

Рисунок 1.15 – Бархатистый излом

Нафталинистый (нафталиновый) излом представляет собой однородную поверхность разрушения, не имеющую явных признаков макропластической деформации (рисунок 1.16). Крупные плоские участки в изломе имеют характерный

отенок 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.



x2000 (катаная сталь 30ХНМФА) [4]

Рисунок 1.15 – Нафталинистый излом

На поверхности усталостных изломов образуются усталостные зоны, являющиеся характеристикой стадийности усталостного разрушения (рисунок 1.16). 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.

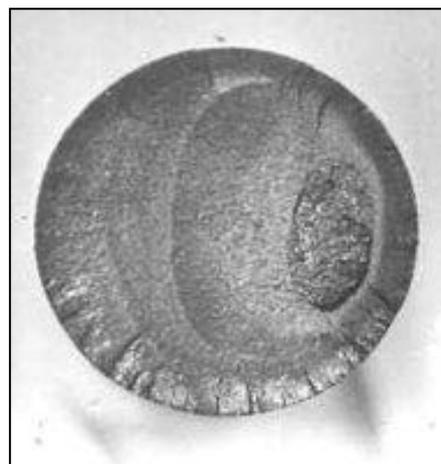
В области малоциклового усталости на поверхности изломов образуется две зоны: зона усталостного развития трещины и зона долома (рисунок 1.16 а).

В области многоциклового усталости на поверхности изломов образуется три зоны: зона стабильного роста трещины, зона ускоренного развития трещины и зона долома (рисунок 1.16 б).



х5 (аустенитная сталь) [1]

а) малоцикловая усталость

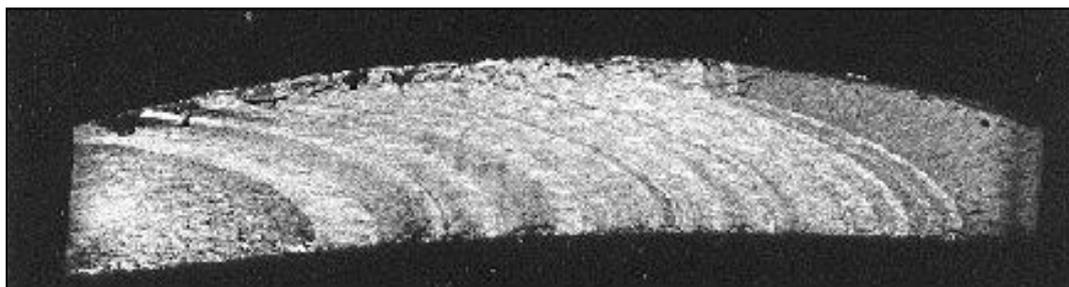


х5 (аустенитная сталь) [1]

б) многоцикловая усталость

Рисунок 1.16 – 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 1.17).



х3 (титановый сплав ВТ3) [4]

Рисунок 1.17 – 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 [3].

### **1.3 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 внутризеренное и межзеренное распространение трещины [2, 5].

Механизмы разрушения при внутризеренном (транскристаллитном) развитии трещины представлены на рисунке 1.18.

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).

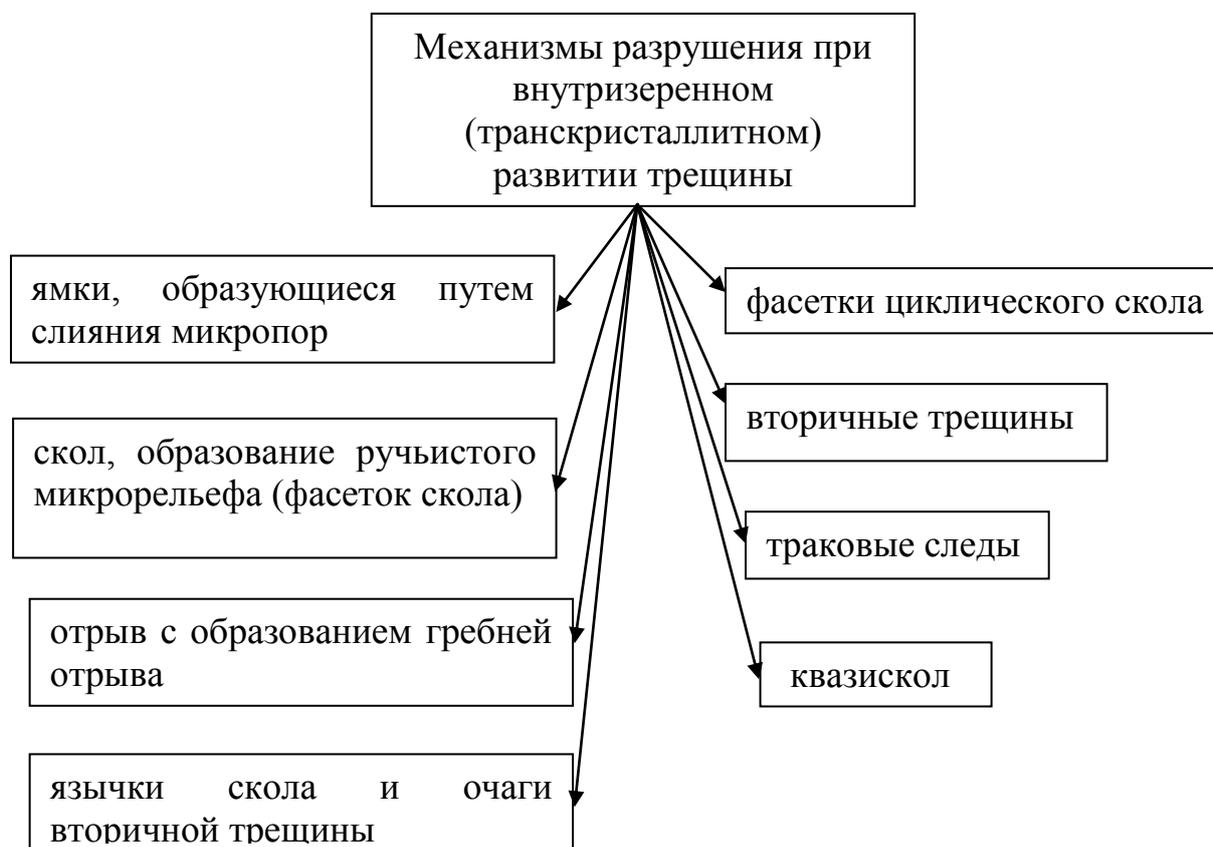


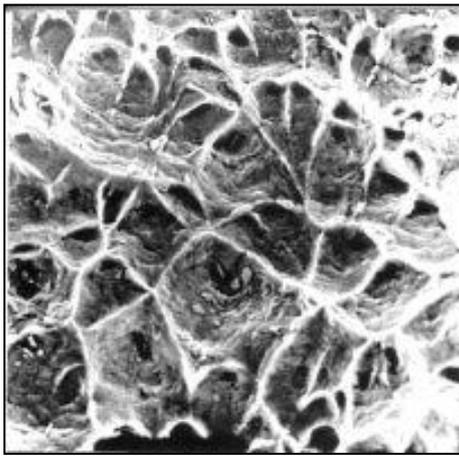
Рисунок 1.18 – Механизмы разрушения при внутризеренном (транскристаллитном) развитии трещины

Механизмы разрушения при межзеренном (интеркристаллитном) развитии трещины представлены на рисунке 1.19.



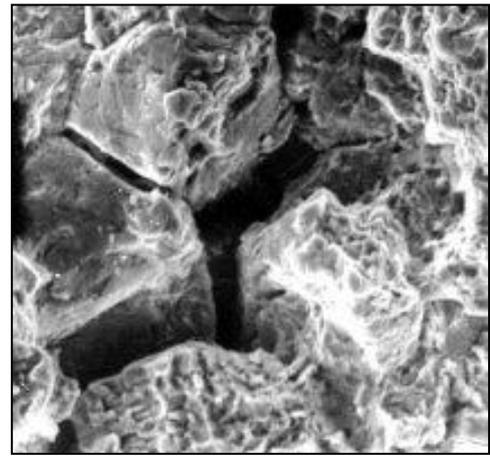
Рисунок 1.19 – Механизмы разрушения при межзеренном (интеркристаллитном) развитии трещины

Как правило, ямки образуются при внутризеренном вязком разрушении (рисунок 1.20 а). При вязком межзеренном (интеркристаллитном) разрушении трещина проходит по границам зерен, в результате чего на изломе наблюдаются отдельные зерна (рисунок 1.20 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.



x1000 (аустенитная сталь 40Г18Ф) [10]

а) внутризеренное вязкое разрушение



x1000 (аустенитная сталь 40Г18Ф) [10]

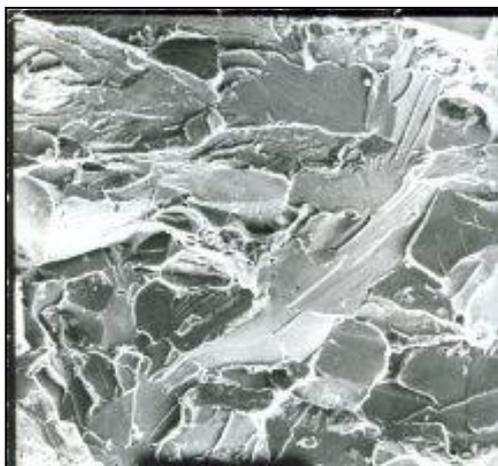
б) межзеренное вязкое разрушение

Рисунок 1.20 – Микрорельеф образца

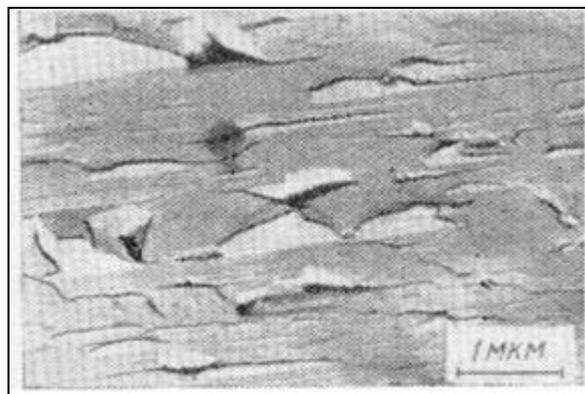
Отрыв – это локальное разрушение, которое возникает в результате нарушения распространения трещины по какому-либо другому механизму разрушения.

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.

Внутризеренное (транскристаллитное) хрупкое разрушение происходит по механизму скола с образованием фасеток скола и ручьистого микрорельефа (рисунок 1.21 а). 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).



а) x300 (сталь 45) [11]



б) сталь Ст3 [11]

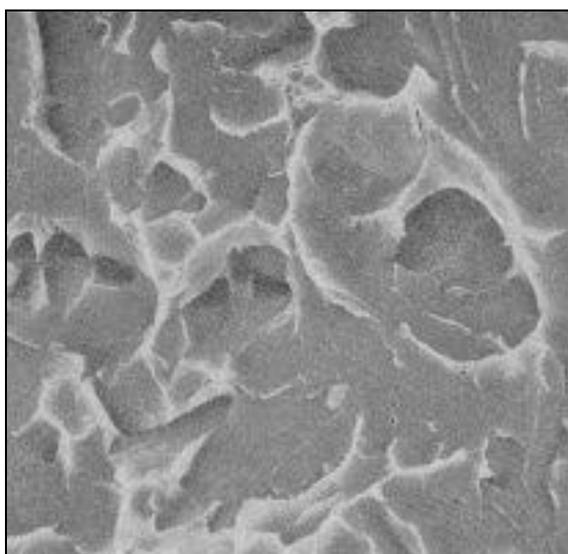
Рисунок 1.21 – Микрорельеф хрупкого разрушения

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.

Язычки скола (рисунок 1.21 а, б) 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 1.22) разрушаются, например, закаленные и отпущенные стали, в структуре которых имеются дисперсные карбидные включения, а также некоторые высокопрочные металлические материалы.



x1500 (Cu-Mo-V сталь) [6]

Рисунок 1.22 – 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.

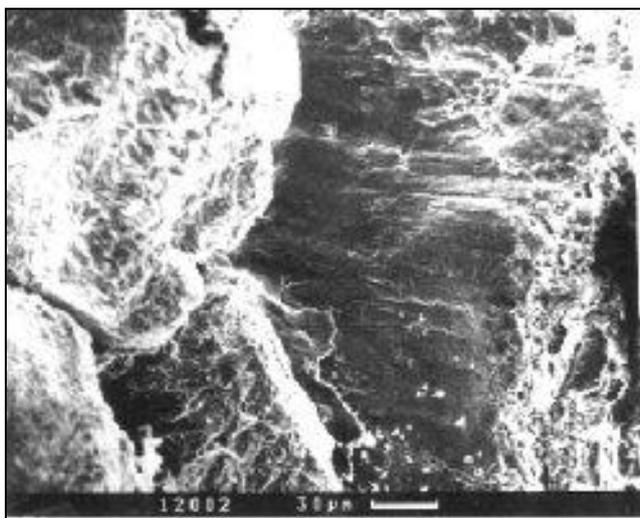
При межзеренном (интеркристаллитном) хрупком разрушении трещина проходит по границам зерен. На изломе наблюдаются отдельные зерна в виде межзеренных фасеток, имеющих форму многогранников (рисунок 1.23). При межзеренном разрушении по границам зерен образуются вторичные трещины. Причины возникновения межзеренного хрупкого разрушения различны, это наличие хрупких выделений по границам зерен, трехосное напряженное состояние, воздействие активной среды, наличие водорода.



x100 (сталь Н32Т3) [10]

Рисунок 1.23 – Микрорельеф межзеренного хрупкого разрушения

Усталостное разрушение происходит при циклическом действии нагрузок. Для усталостных изломов характерно наличие на поверхности усталостных бороздок (рисунок 1.24). Бороздки обычно распространяются по многим террасам (или плато), которые соединяются между собой ступеньками сдвига.

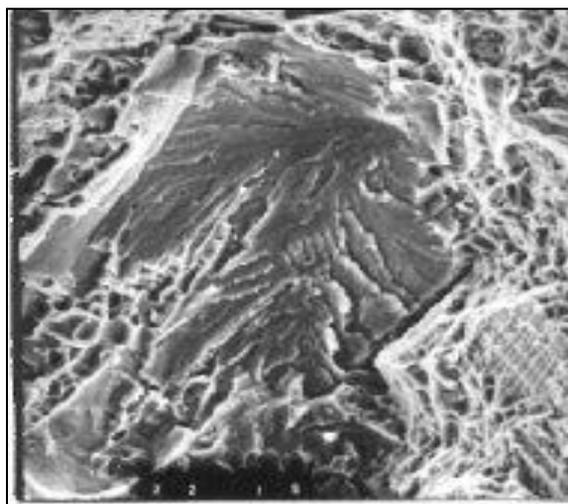


x2500 (никелевый сплав) [6]

Рисунок 1.24 – 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 [11].

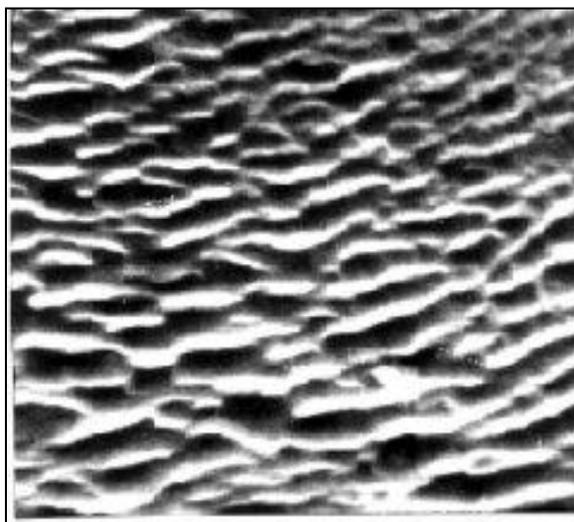
Вблизи очага усталостной трещины при низких амплитудах циклического напряжения различают иногда (при больших увеличениях) квазитороздки (рисунок 1.25), отличающиеся от обычных усталостных бороздок тем, что их ширина почти постоянна по длине трещины, а сами бороздки нерегулярные. Предполагают, что они образуются в результате выхода многочисленных линий скольжения на поверхность излома.



x1400 (алюминиевый сплав) [5]

Рисунок 1.25 – Микрорельеф усталостного излома (квазибороздки)

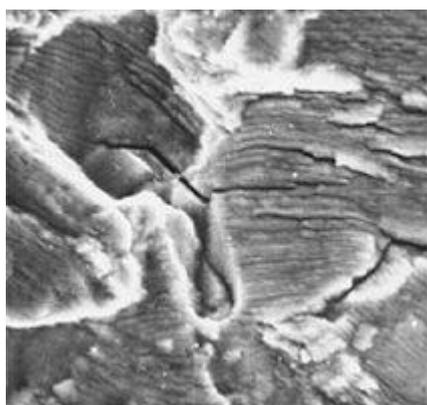
В начальной зоне усталостных изломов, полученных при низких амплитудах напряжения, могут обнаруживаться фасетки циклического скола (рисунок 1.26), образование которых связано с развитием усталостной трещины вдоль определенных кристаллографических плоскостей.



x500 (аустенитная сталь) [5]

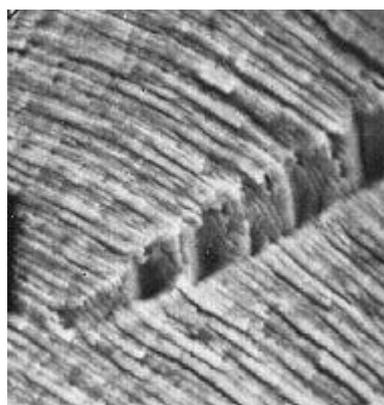
Рисунок 1.26 – Микрорельеф усталостного излома  
(фасетки циклического скола)

Перпендикулярно направлению роста магистральной усталостной трещины встречаются вторичные трещины (рисунок 1.27 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.



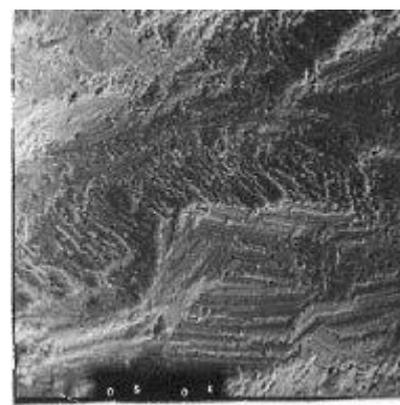
x1200

а) вторичные трещины



x3000

б) вторичные трещины



x3000

в) траковые следы

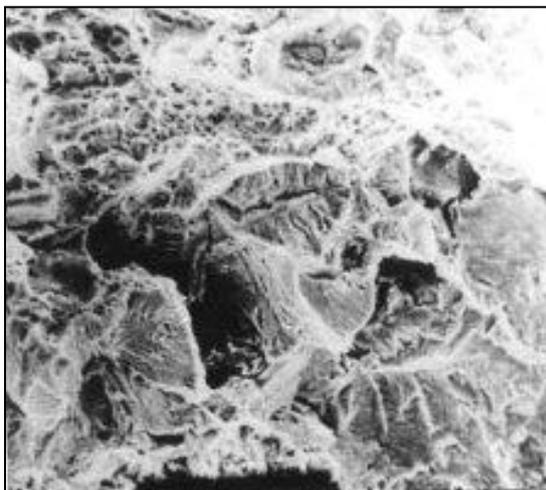
Рисунок 1.27 – Микрорельеф усталостного излома [4]

Кроме того, на усталостных изломах иногда наблюдаются траковые следы (рисунок 1.27 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 гранцентрированной 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 1.28). 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 [2]. Возможно сочетание одновременно нескольких микромеханизмов разрушения.



x1000 (сталь 40XГ18Ф) [4]

Рисунок 1.28 – Смешанный механизм разрушения

Сочетания механизмов разрушения при смешанном разрушении [2]:

- 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.

## 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 Задания для самостоятельной работы

### Задание 1 – Изучение строения изломов.

Изучить строение вязких, хрупких и усталостных изломов. Установить характер и возможные причины разрушения.

Последовательность выполнения задания:

1. Ознакомиться с макро- и микрофрактографией вязкого, хрупкого и усталостного разрушений.
2. По результатам макрофрактографических исследований изломов образцов установить вид изломов.
3. По результатам микрофрактографических исследований изломов образцов установить механизмы разрушения.
4. Установить характер и возможные причины разрушения образцов по строению изломов.
5. Результаты исследования представить в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Результаты фрактографических исследований

№ образца	Макрофрактография (вид излома)	Микрофрактография (механизмы разрушения)	Характер и возможные причины разрушения
1	2	3	4
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			

## Задание 2 – Определение очага разрушения и траектории распространения трещины.

На изломах металлических образцов определить очаг разрушения и траекторию распространения трещины.

Последовательность выполнения задания:

1. Ознакомиться с изломами образцов.
2. По результатам макрофрактографических исследований изломов образцов определить рельеф очага разрушения и траекторию распространения трещины.
3. Результаты исследования представить в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Результаты исследований

№ образца	Рельеф очага разрушения	Траектория распространения трещины
1	2	3
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		

Детали рельефа, облегчающие идентификацию очага разрушения:

- концентрические волокнистые линии;
- радиальные линии;
- следы остановки трещины;
- детали, показывающие направление распространения трещины: шевронные узоры, ветвление трещины, ручьиные узоры.

При изучении изломов образцов можно проследить путь трещины в обратном направлении – к источнику ее зарождения, и таким образом определить, возникла

ли эта трещина на включении, на участке пористости, на частицах выделившейся фазы, у коррозионной ямки, у механического надреза, на закате послековки, на внутренней трещине или царапине или образовалась просто в результате перегрузки.

### **Задание 3 – Определение типа нагружения.**

По изломам металлических образцов определить тип нагружения.

Последовательность выполнения задания:

1. Ознакомиться с изломами образцов.

2. По результатам макро- и микрофрактографических исследований изломов образцов определить вид излома, механизм разрушения и тип нагружения.

При наличии равноосных ямок разрушение произошло в результате простого растяжения, а ось напряжения была нормальна к поверхности разрушения.

Если ямки вытянутые, то разрушение произошло по механизму либо сдвига, либо отрыва; если ямки отсутствуют, а разрушение произошло по механизму внутризеренного скола, то ручьистые узоры служат индикатором локальных напряжений движения трещины. Остаточная деформация свидетельствует о том, что приложенное напряжение существенно выше предела текучести материала.

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.

### 3. Результаты исследования представить в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Результаты исследований

№ образца	Макрофрактография (вид излома)	Микрофрактография (механизмы разрушения)	Тип нагружения
1	2	3	4
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			

#### **Задание 4 – Определение материала и наличия в нем механических и термических трещин.**

По изломам металлических образцов определить материал образца.

Последовательность выполнения задания:

1. Ознакомиться с изломами образцов.

2. По результатам макро- и микрофрактографических исследований изломов образцов определить вид излома, механизм разрушения, наличие механических или термических трещин и вид материала.

Вязкие сплавы разрушаются в результате слияния микропор, а разрушение хрупких материалов происходит по механизму внутриверенного скола или межзеренного разделения.

Сегрегацию каких-либо элементов можно выделить фрактографическими методами по резким отличиям рельефа участка поверхности разрушения от характерного для данного сплава.

Складки при ковке и волосовины легко выявляются, поскольку на поверхностях этих дефектов нет никаких характерных признаков разрушения.

Для усадочной пористости (усадочной раковины) характерна дендритная структура.

На поверхности термических трещин присутствуют окисные пленки или продукты коррозии, состав которых зависит от способов и режимов нагревали детали в процессе термической обработки или горячей пластической деформации после образования трещины, а также от того, была ли трещина заполнена жидким или газообразным корродирующим веществом перед началом ее распространения в процессе эксплуатации.

На поверхности или внутри сварного шва, в зоне термического влияния сварки могут возникать трещины. Если эти трещины образовались при температуре окружающей среды, то они 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.

3. Результаты исследования представить в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Результаты исследований

№ образца	Макрофрактография (вид излома)	Микрофрактография (механизмы разрушения)	Наличие трещин	Вид материала
1	2	3	4	5
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

## Список использованных источников

- 1 Фрактодиагностика разрушения металлических материалов и конструкций / Г. В. Клевцов [и др.]. – М. : МИСиС, 2007. – 264 с. – ISBN 978-5-87623-176-5.
- 2 Фридман, Я. Б. Строение и анализ изломов металлов / Я. Б. Фридман, Т. А. Гордеева, А. М. Зайцев. – М. : Машгиз, 1960. – 128 с.
- 3 Фрактография – средство диагностики разрушенных деталей / М. А. Балтер [и др.]. – М. : Машиностроение, 1978. – 184 с.
- 4 Гордеева, Т. А. Анализ изломов при оценке надежности материалов / Т. А. Гордеева, И. П. Жегина. – М. : Машиностроение, 1979. – 199 с.
- 5 Клевцов, Г. В. Пластические зоны и диагностика разрушения металлических материалов / Г. В. Клевцов. – М. : МИСИС, 1999. – 112 с. – ISBN 978-5-02-032647-7.
- 6 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.
- 7 Феллоуз, Дж. Фрактография и атлас фрактограмм. Справочник; под ред. М. Л. Бернштейна / Дж. Феллоуз; перевод с англ. Е. А. Шура. – М. : Metallurgia, 1982. – 489 с.
- 8 Энгель, Л. Растровая электронная микроскопия / Л. Энгель, Г. Клингел. – М. : Metallurgia, 1986. – 232 с.
- 9 Герасимова, Л. П. Изломы конструкционных сталей / Л. П. Герасимова, А. А. Ежов, М. И. Маресев. – М. : Metallurgia, 1987. – 272 с.
- 10 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.
- 11 Ботвина, Л. Р. Кинетика разрушения конструкционных материалов / Л. Р. Ботвина. – М. : Наука, 1989. – 230 с.