

Министерство образования и науки Российской Федерации

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

Кафедра машиноведения

О.А. Фролова

МЕХАНИЗМЫ И ХАРАКТЕР РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ОДНОКРАТНЫХ ВИДАХ НАГРУЖЕНИЯ

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 Механизмы и характер разрушения металлических материалов при однократных видах нагружения: методические указания / О.А. Фролова; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2018. – 25 с.

В методических указаниях рассмотрены основные вопросы разрушения металлических материалов при однократных видах нагружения. Рассмотрены виды и механизмы разрушения, а также некоторые вопросы механики разрушения. Представлены вопросы для самопроверки и 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 Виды и механизмы разрушения.....	5
1.1.1 Вязкое разрушение	6
1.1.2 Хрупкое разрушение	9
1.1.3 Смешанное разрушение	11
1.2 Элементы механики разрушения.....	12
2 Задания для самостоятельной работы.....	22
Список использованных источников	25

Введение

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.

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 Виды и механизмы разрушения

К основным видам разрушения металлических материалов при однократных видах нагружения относят вязкое, хрупкое и смешанное разрушения.

На рисунке 1.1 представлены основные виды разрушения при однократных нагружениях, особенности макро- и микростроения изломов, а также механизмы разрушения.

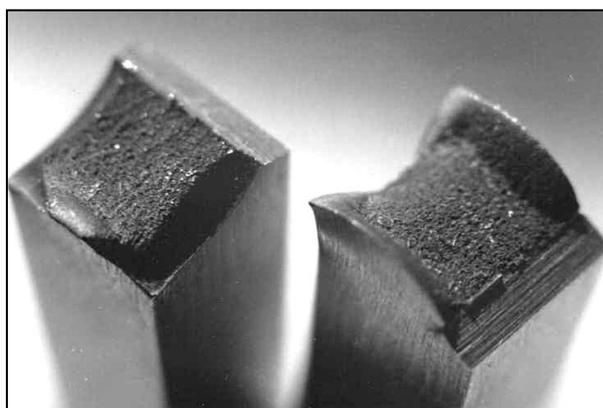


Рисунок 1.1 – Виды разрушения металлических материалов при однократных видах нагружения

1.1.1 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 1.2) 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.

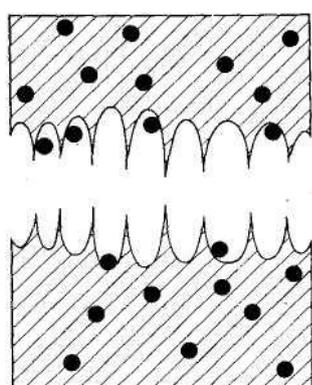


х5 (аустенитная сталь)

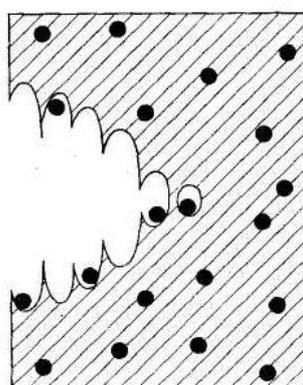
Рисунок 1.2 – Вязкие изломы

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.

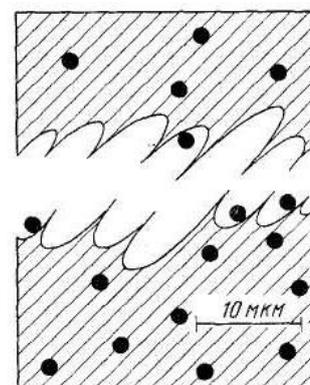
Вязкое разрушение в металлических материалах связано с образованием в области локализованной пластической деформации (утяжки) пористости материала [1, 2]. В процессе пластического течения на включениях, нерастворенных частицах вторых фаз, (например, карбидах), границах зерен, в полосах деформации или 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 1.3).



а) одноосное растяжение



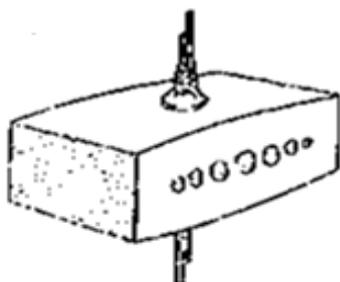
б) внецентренное растяжение



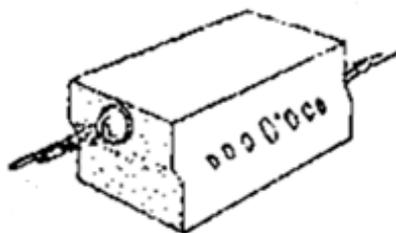
в) ямки, возникшие при срезе

Рисунок 1.3 – Схема вязкого разрушения с образованием ямочного микрорельефа [3]

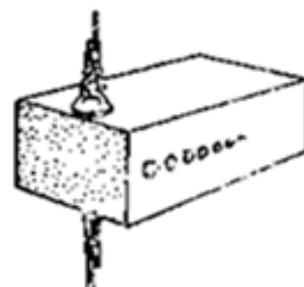
Поверхность вязкого излома содержит многочисленные чашеподобные углубления (ямки). Размеры и форма ямок вязких изломов неоднородны [4]. На форму ямок влияет относительное направление максимального напряжения, вызвавшего разрушение. Различают (рисунок 1.4): равноосные ямки (растяжения), ямки сдвига, ямки отрыва [4, 6].



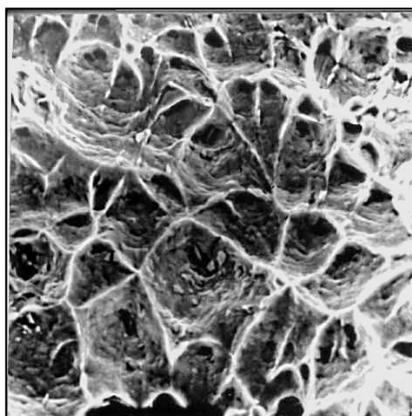
а) одноосное растяжение



б) сдвиг

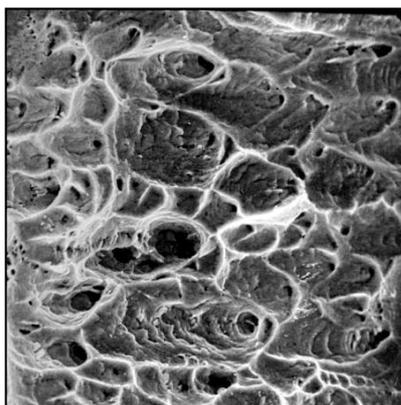


в) отрыв



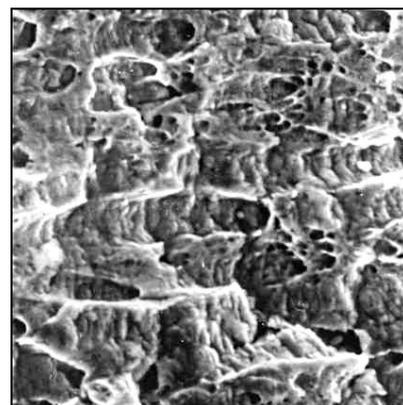
x100 (H26T3)

г) равноосные ямки



x100 (H32T3)

д) вытянутые ямки



x100 (40X4Г18Н8Ф)

е) удлиненные ямки

Рисунок 1.4 – Схемы нагружения (а, б, в) и формы ямок (г, д, е) в зависимости от вида нагружения [4, 7]

Равноосные ямки образуются, например, в центральной части излома образца, испытанного в условиях одноосного растяжения (рисунок 1.4 а, г).

Ямки сдвига образуются на поверхности губ среза; они вытянуты в одном направлении, а на сопряженной поверхности разрушения – в противоположном направлении (рисунок 1.4 б, д).

Ямки отрыва (рисунок 1.4 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.

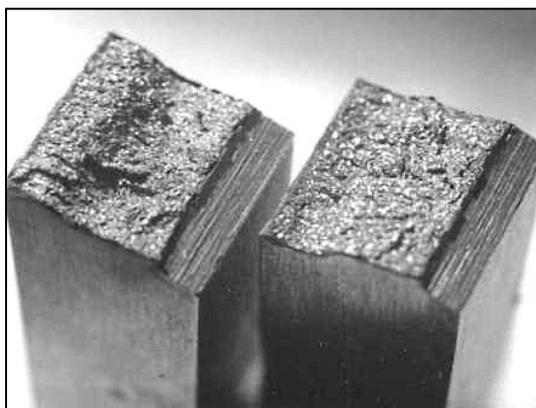
1.1.2 Хрупкое разрушение

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 [2, 8].

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 [2].

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 1.5).



x5 (аустенитная сталь)

Рисунок 1.5 – 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 1.6).

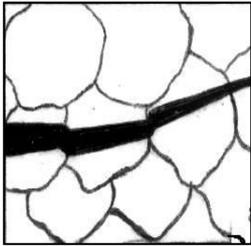
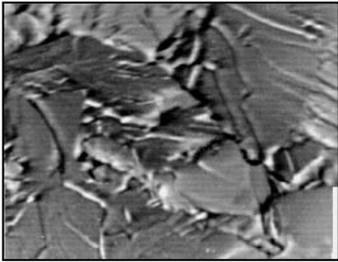
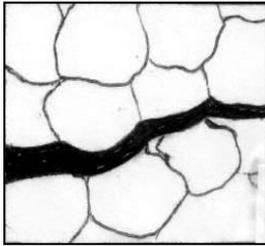
Внутризеренное разрушение (транскристаллитное)		Межзеренное разрушение (интеркристаллитное)	
Схема излома	Микрорельеф излома	Схема излома	Микрорельеф излома
			

Рисунок 1.6 – Внутризеренное (транскристаллитное) и межзеренное (интеркристаллитное) хрупкое разрушение

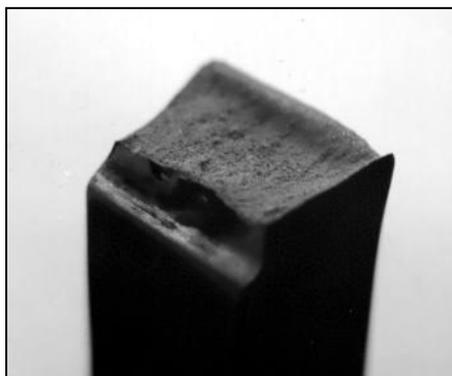
При внутризеренном (транскристаллитном) хрупком разрушении (по механизму скола) трещина обычно распространяется вдоль кристаллографической плоскости с малыми индексами. На изломах наблюдаются фасетки скола со ступеньками в виде ручьистых узоров. Это характерно для разрушения материалов с ОЦК и ГПУ кристаллическими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

1.1.3 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).

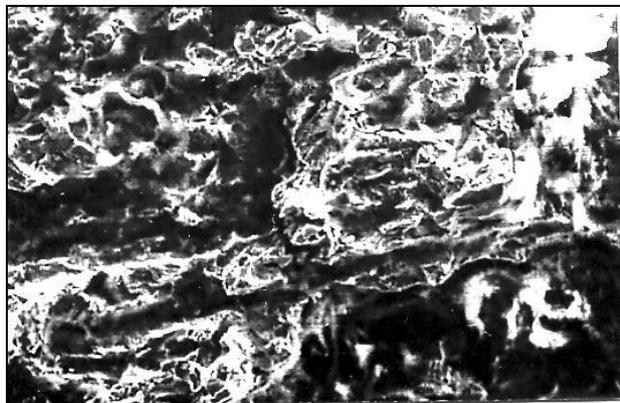
Полученные изломы имеют матовую и «бархатистую» поверхность; они ровные, без губ среза или имеют небольшие губы среза (рисунок 1.7) и небольшую шероховатость; металлический блеск отсутствует.



х5 (аустенитная сталь)

Рисунок 1.7 – Смешанное разрушение

При микрофрактографическом исследовании таких изломов можно обнаружить практически все виды микрорельефа: ямочный, квазискол, межзеренное хрупкое разрушение (рисунок 1.8).



x300 (аустенитная сталь)

Рисунок 1.8 – Микрорельеф смешанного разрушения

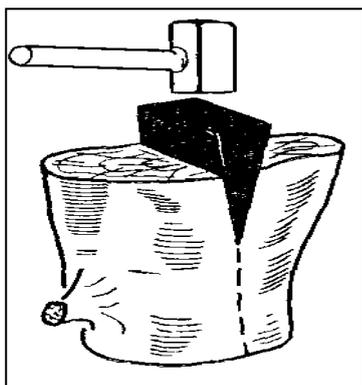
1.2 Элементы механики разрушения

Область в окрестности трещины, в которой развивается разрушение, называется зоной разрушения.

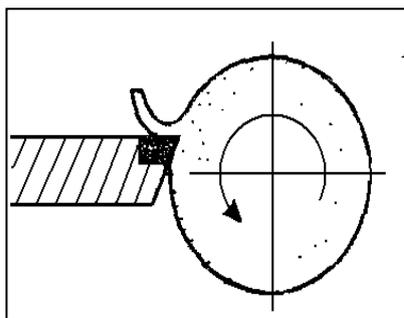
Линия, соединяющая противоположные берега трещины, называется фронтом трещины. При постепенном разрушении образца или детали фронт трещины будет перемещаться и описывать геометрическую поверхность, которая называется поверхностью разрушения или изломом.

В зависимости от схемы нагружения различают три основных типа разрушения (рисунок 1.9): тип I, тип II и тип III.

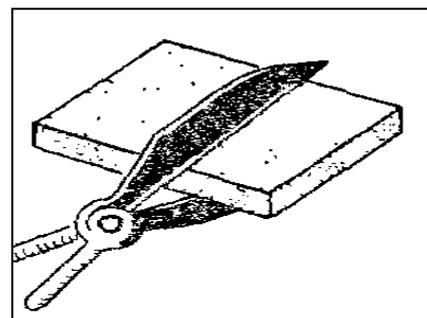
У вершины трещины при нагружении реализуется определенный вид или их комбинация с преобладанием какого-либо одного типа трещины.



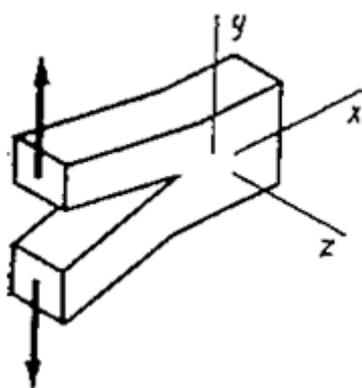
а) отрыв



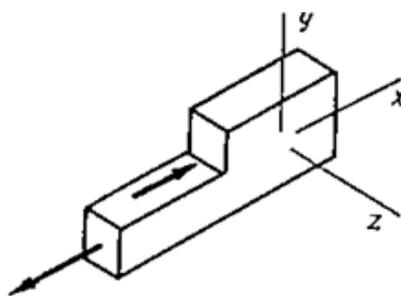
б) поперечный сдвиг



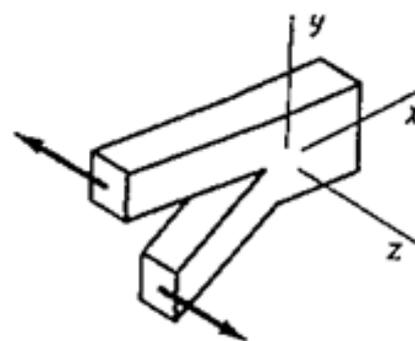
в) продольный сдвиг



г) Тип I



д) Тип II



е) Тип III

Рисунок 1.9 – Схемы нагружения (а, б, в) и основные типы разрушений (г, д, е)

Разрушение по типу I (рисунок 1.9 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 1.9 б, д) и типу III (рисунок 1.9 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 [8, 9].

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

$$K = \sigma \sqrt{\pi \cdot l} \cdot Y, \quad (1.1)$$

где σ – приложенное напряжение, МПа;

l – длина трещины или дефекта, м;

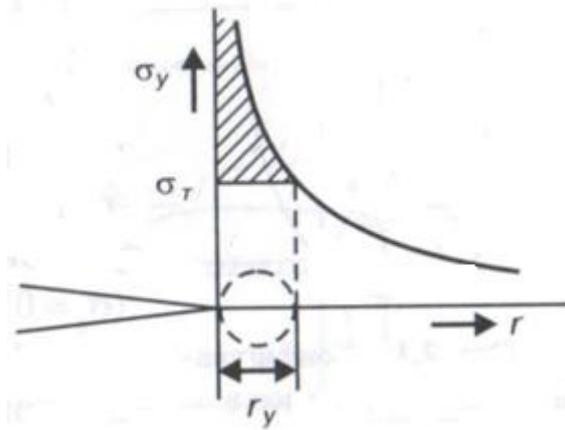
Y – функция (полином), которая зависит от конфигурации образца или детали.

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 σ_T , вблизи вершины трещины, металл переходит в пластическое состояние и формируется пластическая зона (или пластические зоны) (рисунок 1.10).



r_y – размер пластической зоны; σ_T – предел текучести материала.

Рисунок 1.10 – Распределение напряжений перед трещиной и формирование пластической зоны

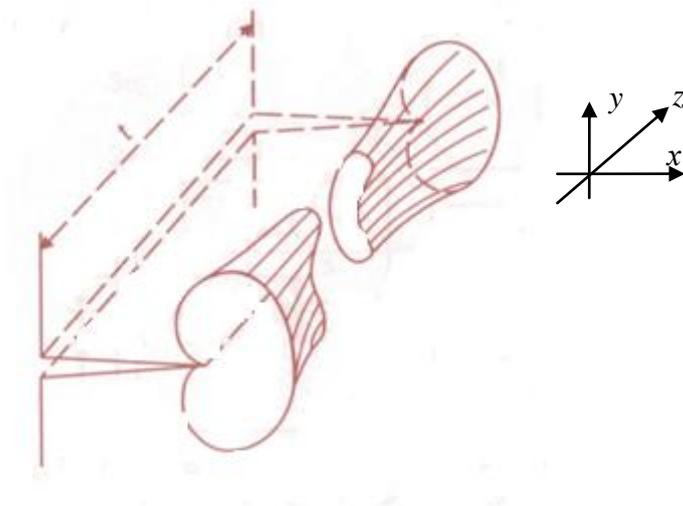
При формировании пластической зоны пластическое течение материала происходит в основном путем накопления сдвиговых деформаций под углом 45° . Форма пластической зоны вытянута в направлении течения металла. Количество, форма и размеры пластических зон зависят от вида приложенной нагрузки и локального 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 [8, 9]:

- 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 1.11), 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 1.11 – Пластическая зона при плоском деформированном состоянии

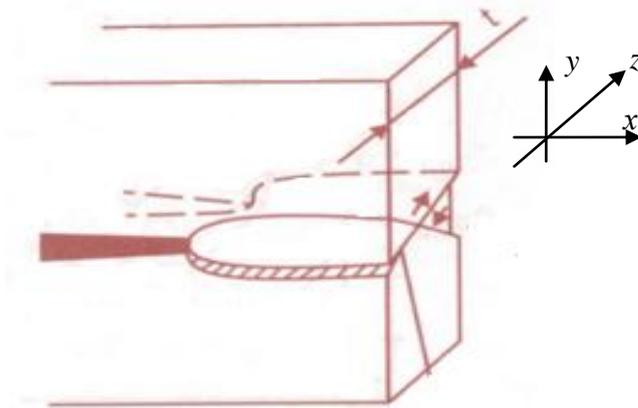
Размер пластической зоны r_y , м, образовавшейся в условиях плоской деформации, определяется по формуле:

$$r_y = 1/6\pi(K/\sigma_T)^2, \quad (1.2)$$

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

σ_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 1.12), не будет. В этом случае у вершины трещины реализуется условие плоского напряженного состояния.



t – толщина образца или детали.

Рисунок 1.12 – Пластическая зона при плоском напряженном состоянии

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

$$r_y = 1/6\pi(K/\sigma_T)^2. \quad (1.3)$$

Пластическая зона в условиях плоской деформации будет не больших размеров, а конфигурация данной зоны, как показывает анализ поля упругих напряжений у вершины трещины [8, 9], будет иметь вид «бабочки» (рисунок 1.13).

При плоском напряженном состоянии пластическая зона вытянута в направлении распространения трещины [8, 9] (рисунок 1.13).

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.

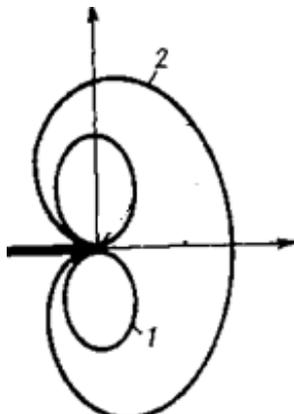
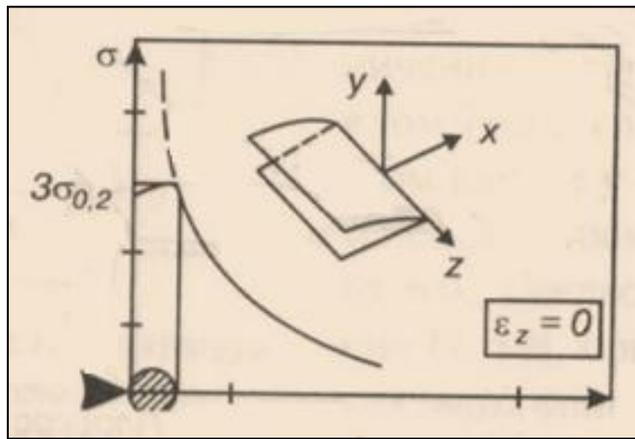


Рисунок 1.13 – Конфигурация пластических зон в условиях плоской деформации (1) и плоского напряженного состояния (2)

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 r_y и сильнодеформированная микрозона r_{yh} , которые отличаются размерами и степенью искаженности кристаллической структуры материала в данных зонах [1, 10, 11].

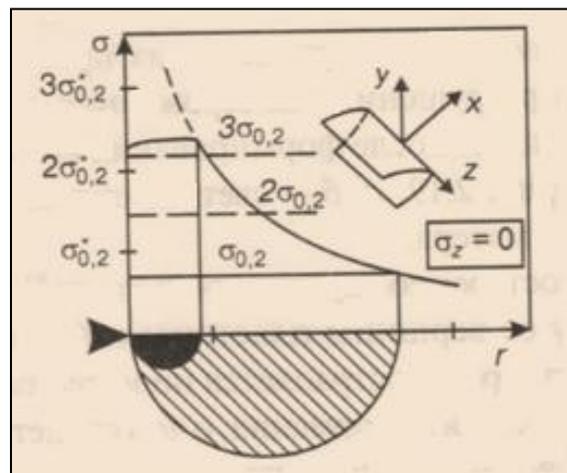
Напряжения, которые возникают в процессе нагружения образца или детали непосредственно в вершине трещины, при разрушении металлических материалов в условиях плоской деформации будут равны пределу текучести материала $\sigma_{0,2}$, что связано с эффектом затупления трещины. Затем напряжения резко возрастают до напряжения текучести $3\sigma_{0,2}$ [8, 9] (рисунок 1.14). У вершины трещины формируется одна пластическая зона r_y .



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

Рисунок 1.14 – Схема формирования пластической зоны у вершины трещины при плоской деформации

При разрушении материала в условиях плоского напряженного состояния под действием возникающих напряжений образуется слабodeформированная макрoзона γ_y , размеры и форма которой определяются расстоянием от вершины трещины до точек, где напряжения достигнут предела текучести исходного материала $\sigma_{0,2}$ (рисунок 1.15).

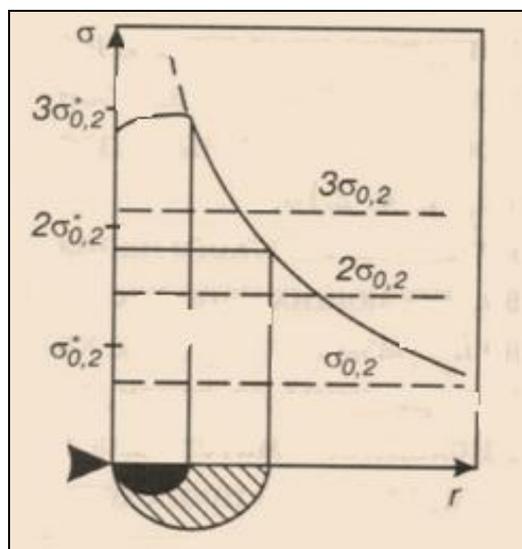


$\sigma_{0,2}$ – предел текучести материала; $\sigma^*_{0,2}$ – предел текучести деформационно-упрочненного материала.

Рисунок 1.15 – 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 $\sigma_{0,2}^*$ [10, 11].

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 1.16). В этих условиях размеры слабодеформированной макрзоны r_y будут меньше, чем при плоском напряженном состоянии [10, 11].



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

Рисунок 1.16 – 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 [10, 11].

Вопросы для самопроверки

- 1 Каковы признаки вязких изломов?
- 2 Какие бывают механизмы хрупкого разрушения?
- 3 В каком случае возможна реализация данных механизмов?
- 4 Что представляет собой транс- и интеркристаллитное хрупкое разрушение?
- 5 Как влияет напряженное состояние на переход материалов в хрупкое состояние?
- 6 Что понимают под смешанным разрушением?
- 7 Какие задачи решает механика разрушения?
- 8 Что представляет собой коэффициент интенсивности напряжения у вершины трещины?
- 9 Какова размерность коэффициента интенсивности напряжения?
- 10 Какие различают типы трещин и соответствующие им значения коэффициента интенсивности напряжения?
- 11 Что понимают под трещиностойкостью материала?
- 12 Какие реализуются виды локального напряженного состояния материала у вершины трещины?
- 13 Какие возникают зоны пластической деформации у вершины трещины при однократных видах нагружения?
- 14 Как влияет локальное напряженное состояние материала у вершины трещины на форму пластических зон?
- 15 Каков механизм образования пластических зон у вершины трещины?

2 Задания для самостоятельной работы

Задание 1 – Определение критической температуры хрупкости материала по доле вязкой составляющей на поверхности излома.

Для металлических материалов, склонных к охрупчиванию при понижении температуры, определить критическую температуру хрупкости материала (КТХ) в серии образцов, подвергнутых испытаниям на ударный изгиб при различных температурах, по доле вязкой составляющей на поверхности излома.

Последовательность выполнения задания:

1. Долю вязкой составляющей B , % для каждого образца, испытанного при определенной температуре, на поверхности изломов определить по формуле:

$$B = \frac{F_0 - F_{xp}}{F_0} \cdot 100 \% = \left(1 - \frac{F_{xp}}{F_0}\right) \cdot 100 \%, \quad (2.1)$$

где F_0 – площадь поперечного сечения образца под надрезом;

F_{xp} – площадь хрупкой составляющей.

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.

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

2. Построить кривую температурной зависимости процентного содержания вязкой составляющей в координатах «В, % – Т, °С».

3. За критическую температуру хрупкости принять температуру, при которой в изломе наблюдается 50 % вязкой составляющей.

4. Полученные результаты представить в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Результаты расчета

№ образца	Т, °С	F ₀ , мм ²	F _{хр} , мм ²	В, %	КТХ, °С
1	2	3	4	5	6
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

Задание 2 – Определение критической температуры хрупкости материала по критической длине трещины на поверхности излома.

Для металлических материалов определить критическую температуру хрупкости материала (КТХ) в серии ударных образцов, испытанных при различных температурах, по критической длине трещины на поверхности излома.

Последовательность выполнения задания:

1. С помощью штангенциркуля измерить длину максимальной зоны стабильного роста трещины l_c , мм в направлении ее распространения до границы перехода к нестабильному хрупкому разрушению.

2. Построить температурную зависимость длины трещины l_c в координатах « l_c , мм – Т, °С».

3. За критическую температуру хрупкости принять температуру, при которой критический размер трещины l_c равен 1 мм.

4. Полученные результаты представить в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Результаты расчета

№ образца	T, °C	l_c , мм	КТХ, °C
1	2	3	4
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			

Список использованных источников

- 1 Ботвина, Л. Р. Кинетика разрушения конструкционных материалов / Л. Р. Ботвина. – М. : Наука, 1989. – 230 с.
- 2 Владимиров, В. И. Физическая природа разрушения материалов / В. И. Владимиров. – М. : Metallurgia, 1984. – 280 с.
- 3 Энгель, Л. Растровая электронная микроскопия / Л. Энгель, Г. Клингел. – М. : Metallurgia, 1986. – 232 с.
- 4 Феллоуз, Дж. Фрактография и атлас фрактограмм / Дж. Феллоуз; перевод с англ. Е. А. Шура под ред. М. Л. Бернштейна. – М. : Metallurgia, 1982. – 489 с.
- 5 Бичем, К. Д. Микропроцессы разрушения / К. Д. Бичем. – М. : Мир, 1973. – Т. 1. – С. 265–275.
- 6 Фрактодиагностика разрушения металлических материалов и конструкций / Г. В. Клевцов [и др.]. – М. : МИСиС, 2007. – 264 с. – ISBN 978-5-87623-176-5.
- 7 Гуляев, А. П. Ударная вязкость и хладноломкость конструкционной стали / А. П. Гуляев. – М. : Машиностроение, 1969. – 69 с.
- 8 Мороз, Л. С. Механика и физика деформаций и разрушения материалов / Л. С. Мороз. – Л. : Машиностроение, 1984. – 224 с.
- 9 Хеллан, К. Введение в механику разрушения / К. Хеллан; пер. с англ. – М. : Мир, 1988. – 364 с.
- 10 Клевцов, Г. В. Пластические зоны и диагностика разрушения металлических материалов / Г. В. Клевцов. – М. : МИСИС, 1999. – 112 с. – ISBN 978-5-02-032647-7.
- 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.