

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 МНОГОКРАТНЫХ 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 многократных видах нагружения: методические указания / О.А. Фролова; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2018. – 29 с.

В методических указаниях рассмотрены основные вопросы механики разрушения металлических материалов при многократных 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 Характеристики условий нагружения и усталостной прочности	5
1.2 Механизм усталостного разрушения	11
1.3 Элементы механики разрушения.....	14
2 Задания для самостоятельной работы.....	25
Список использованных источников	29

Введение

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.

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 Авиационное – 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 Характеристики условий нагружения и усталостной прочности

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

Параметры цикла нагружения (рисунок 1.1):

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

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

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}; \quad (1.1)$$

– амплитуда напряжения цикла нагружения σ_a :

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}; \quad (1.2)$$

– среднее напряжение цикла нагружения σ_m :

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}; \quad (1.3)$$

– коэффициент асимметрии цикла нагружения:

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}; \quad (1.4)$$

– частота f и период цикла нагружения T :

$$f = \frac{1}{T}. \quad (1.5)$$

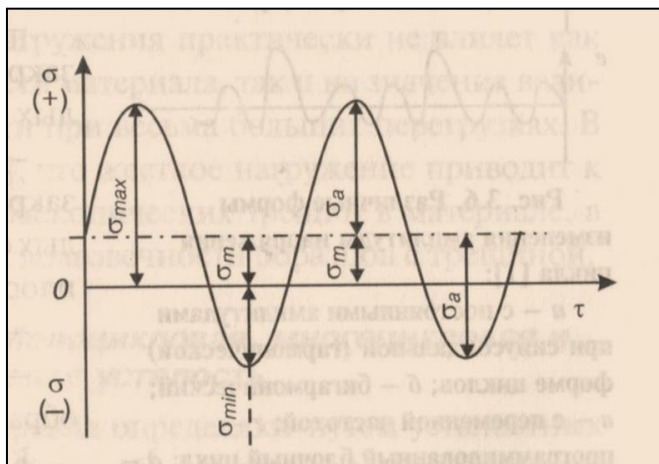
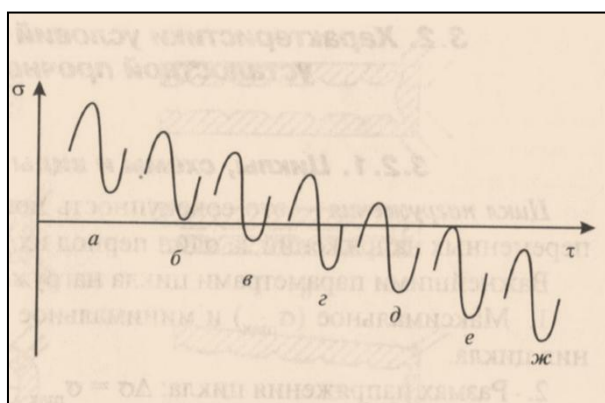


Рисунок 1.1 – Параметры цикла нагружения

В зависимости от значения коэффициента асимметрии цикла нагружения R различают следующие виды циклов нагружения (рисунок 1.2):

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

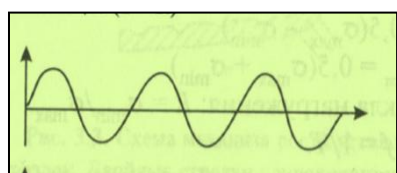


- а – растягивающие ($0 < R < 1$); б – отнулевой ($R = 0$);
- в – преимущественно растягивающие ($1 < R < 0$); г – симметричный ($R = -1$);
- д – преимущественно сжимающие ($-\infty < R < -1$); е – отнулевой сжимающий ($R = -\infty$);
- ж – сжимающие ($R > 1$).

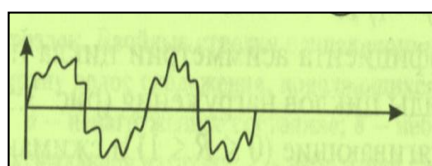
Рисунок 1.2 – Виды знакопостоянных (а, ж), знакопеременных (в, г, д) и отнулевых (б, е) циклов нагружения

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

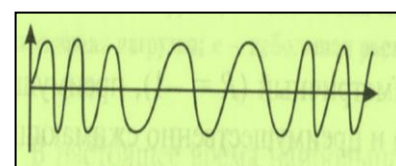
Длительность выдержки при заданном уровне напряжения влияет на форму цикла нагружения. На рисунке 1.3 представлены различные формы изменения амплитуды напряжений циклов нагружения.



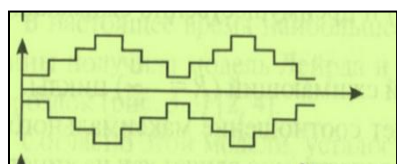
а) с постоянными амплитудами при синусоидальной (гармонической) форме циклов



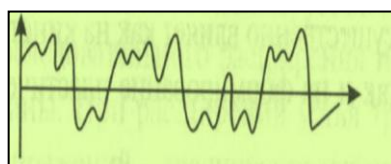
б) бигармонический



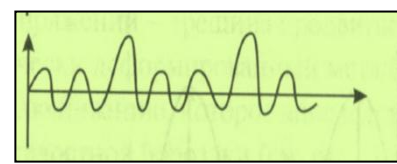
в) с переменной частотой



г) программированный блочный цикл



д) произвольный цикл



е) с перегрузкой в гармоническом цикле

Рисунок 1.3 – Формы изменения амплитуды напряжений циклов нагружения

Основные схемы нагружения [1]:

- 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).

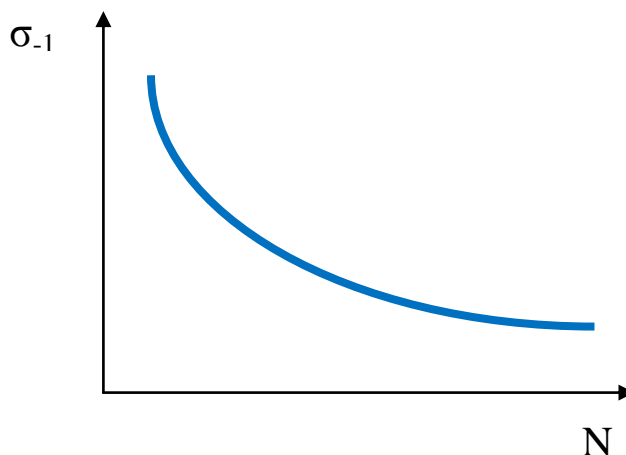
При мягком нагружении задается величина нагрузки, которая остается постоянной на всем протяжении испытания. Перемещение изменяется в зависимости от изменения жесткости нагружаемой системы в период постепенного роста усталостной трещины. Мягкое нагружение более распространенный вид нагружения в промышленных 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 [1].

Для определения усталостной прочности материалов проводят усталостные испытания определенного количества образцов при различных значениях напряжения цикла нагружения. Чаще всего используют симметричный цикл

нагрузки ($R=-1$), а напряжения цикла обозначают как σ_{-1} , МПа. При испытаниях фиксируется количество циклов нагружения до разрушения образцов N , цикл. Затем строится кривая усталости (кривая Вёлера) (рисунок 1.3).



σ_{-1} – напряжение цикла нагружения; N – количество циклов нагружения.

Рисунок 1.3 – 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 [1, 2]. В этом случае для определения предела усталости (выносливости) устанавливают базу испытания N_0 , цикл.

Предел усталости (выносливости) σ_w – это величина максимального напряжения цикла, при котором не происходит разрушения образца на базе испытаний N_0 .

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 1.4 в виде обобщенной схемы [3].

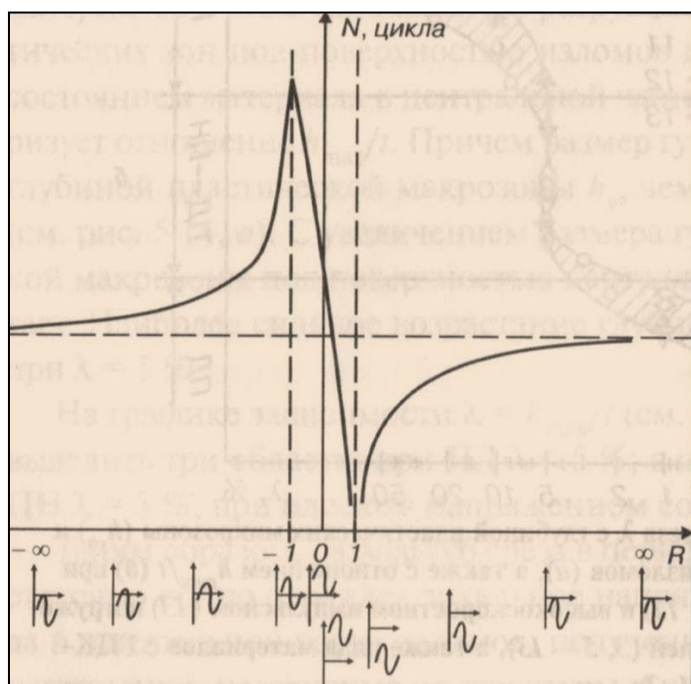


Рисунок 1.4 – Обобщенная схема влияния на долговечность образцов N коэффициента асимметрии цикла нагружения R для случая постоянного значения размаха напряжений (или деформаций) цикла ($\Delta \sigma = \text{const}$)

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 ∞ 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.

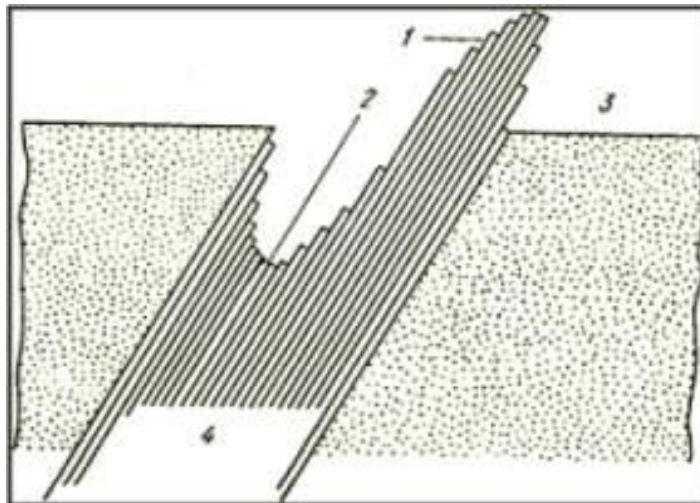
Таким образом, увеличение растягивающих и сжимающих напряжений снижает общую долговечность образцов [2, 3].

1.2 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° 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) [4, 5] (рисунок 1.5).



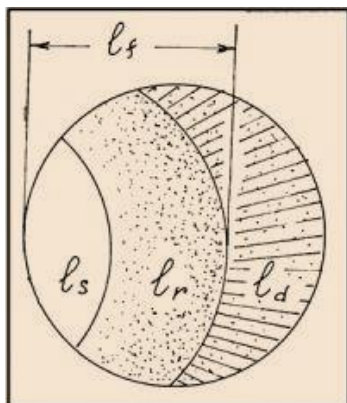
1 – экструзии; 2 – интрузии; 3 – поверхность; 4 – полосы скольжения.

Рисунок 1.5 – Схема образования выпуклостей (экструзий) и впадин (интрузий) [5]

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 1.6).

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.



х5 (аустенитная сталь) [3]

а) схема строения усталостного излома

б) усталостный излом

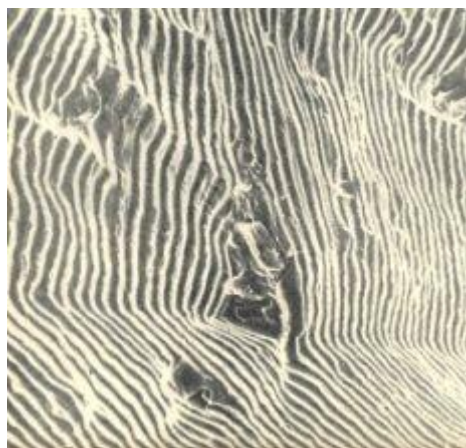
l_s – зона медленного стабильного роста трещины; l_r – зона ускоренного нестабильного развития трещины; l_f – зона усталостного развития трещины; l_d – зона долома.

Рисунок 1.6 – 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 1.7). Профиль отдельных усталостных бороздок зависит от природы материала, величины и характера нагрузки.



x2500 (никелевый сплав) [5]

Рисунок 1.7 – 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.

1.3 Элементы механики разрушения

При усталостном нагружении образца или детали напряжения за один цикл нагружения изменяются от максимального значения σ_{\max} до минимального значения σ_{\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 [6]:

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

$$K_{\max} = f(\sigma_{\max}, l); \quad (1.6)$$

– размах коэффициента интенсивности напряжения ΔK , $\text{МПа}\sqrt{\text{м}}$

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} = f(\Delta\sigma, l). \quad (1.7)$$

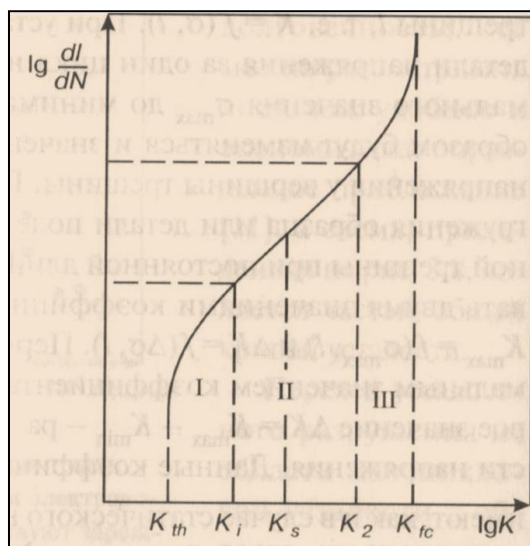
Максимальный коэффициент интенсивности напряжения K_{\max} и размах коэффициента интенсивности напряжения ΔK связаны между собой через коэффициент асимметрии цикла нагружения R уравнением:

$$\Delta K = (1-R)K_{\max}. \quad (1.8)$$

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

Полная кинетическая диаграмма усталостного разрушения в двойных логарифмических координатах представляет собой S-образную кривую (рисунок 1.8), ограниченную 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 [7].



$\frac{dl}{dN}$ – 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 1.8 – Кинетическая диаграмма усталостного разрушения

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 ΔK или K_{max} в этой области определяется уравнением Пэриса:

$$\frac{dl}{dN} = C \cdot \Delta K (K_{max})^n, \quad (1.9)$$

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.

На определенных стадиях развития усталостной трещины доминируют различные механизмы разрушения. В области низких значений коэффициентов интенсивности нагружения ΔK (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 [7]. 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.

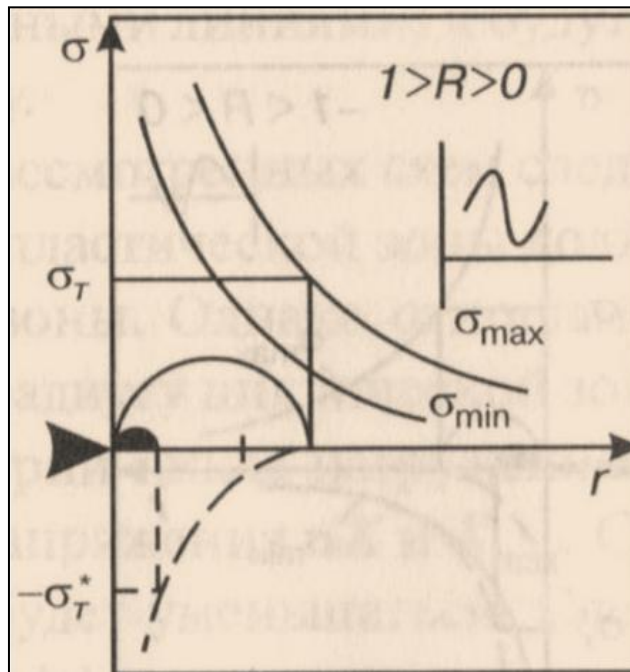
При более высоких скоростях распространения трещины микрорельеф излома сталей, образованный выше и ниже критической температуры хрупкости, существенно отличается. На изломах стали с ярко выраженным интервалом вязко-хрупкого перехода выше критической температуры хрупкости преобладает бороздчатый механизм, ниже – скол, иногда с вязкими участками [7].

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.

Согласно модели образования пластических зон [8], 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 1.9 представлены схемы образования монотонной и циклической пластических зон у вершины усталостной трещины при различных значениях коэффициента асимметрии цикла нагружения R [3].



σ_T – предел текучести материала;
 σ_T^* – предел текучести при сжатии деформационно-упрочненного материала.

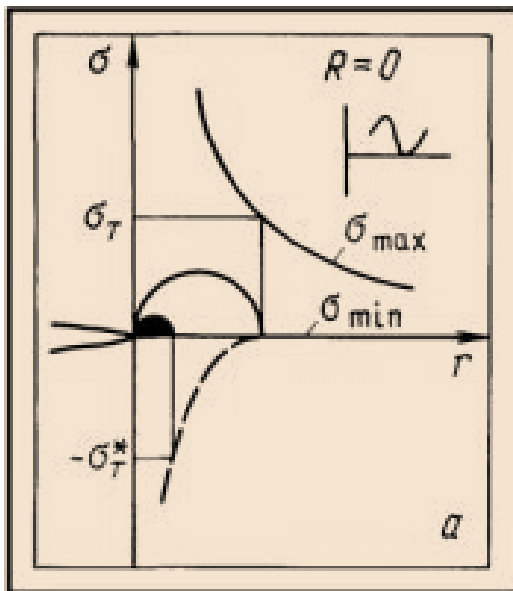
Рисунок 1.9 – Схема образования у вершины усталостной трещины монотонной r_y (светлое поле) и циклической r_{yh} (темное поле) пластических зон при растягивающих циклах нагружения

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

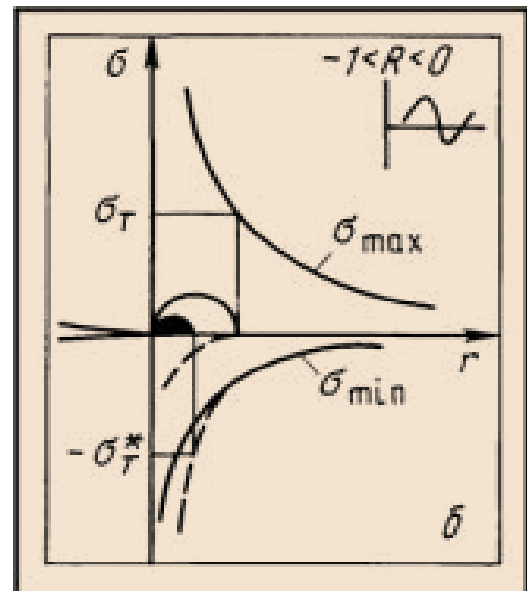
Образование монотонной пластической зоны связано с максимальными растягивающими напряжениями, возникающими у вершины усталостной трещины. Размеры этой зоны коррелируют с максимальным коэффициентом интенсивности напряжения K_{max} . При изменении знака нагружения, в случае одноименно

растягивающих циклов нагружения ($1 > R > 0$), в пределах монотонной пластической зоны возникают сжимающие напряжения (на рисунке 1.9 показаны пунктирными линиями). При достижении предела текучести деформационно-упрочнённого материала σ_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 ΔK .

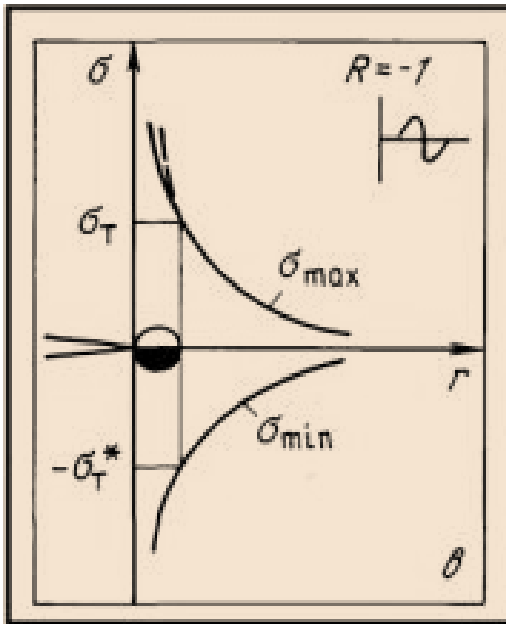
Аналогичным образом формируются монотонная и циклическая пластические зоны у вершины усталостной зоны и при отнулевом цикле нагружения ($R=0$) (рисунок 1.10 а).



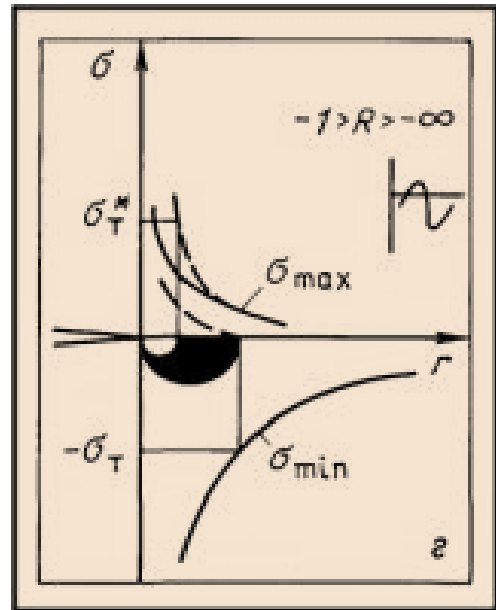
а) отнулевой



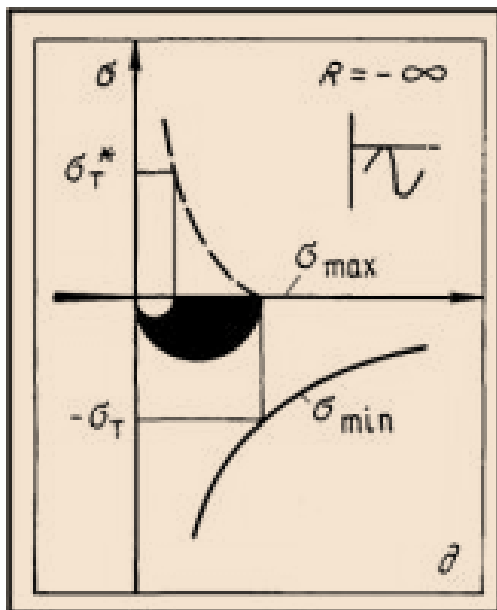
б) преимущественно растягивающий



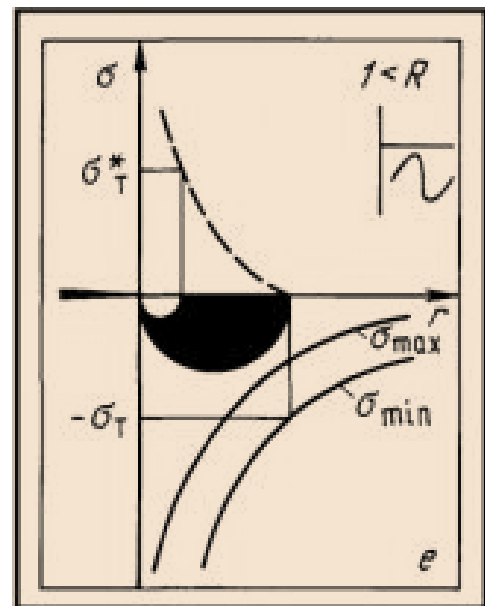
в) симметричный



г) преимущественно сжимающий



д) отнулевой сжимающий



е) полностью сжимающий

σ_T – предел текучести материала;
 σ_T^* – предел текучести при сжатии деформационно - упрочненного материала.

Рисунок 1.10 – Схемы образования пластических зон у вершины усталостной трещины при различных циклах нагружения

В случае преимущественно растягивающих ($-1 < R < \infty$) циклов нагружения (рисунок 1.10 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.

На рисунках 1.11, 1.12 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 $P_{\text{min}} = \text{const}$) [3].

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

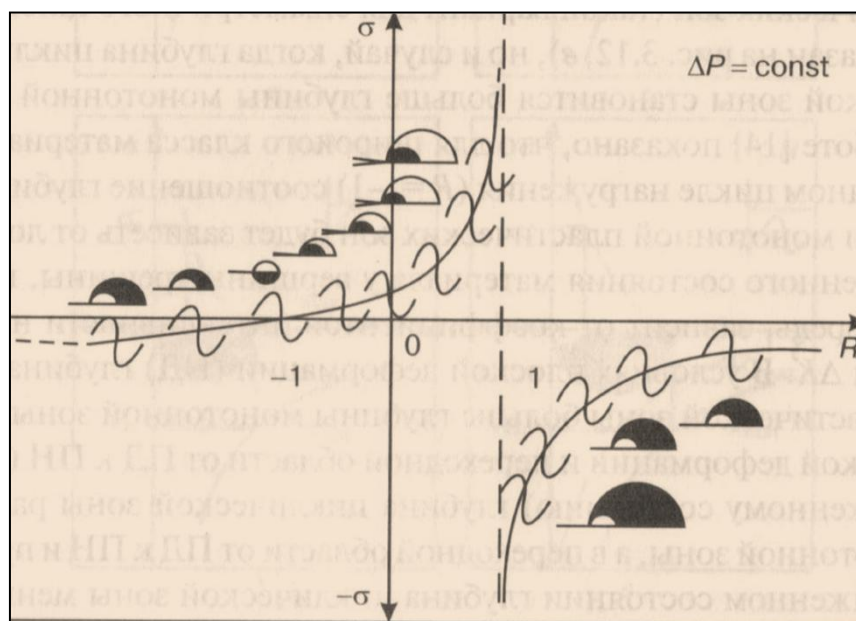


Рисунок 1.11 – Обобщенная схема образования пластических зон у вершины усталостной трещины в зависимости от коэффициента асимметрии цикла нагружения R при $\Delta P = \text{const}$

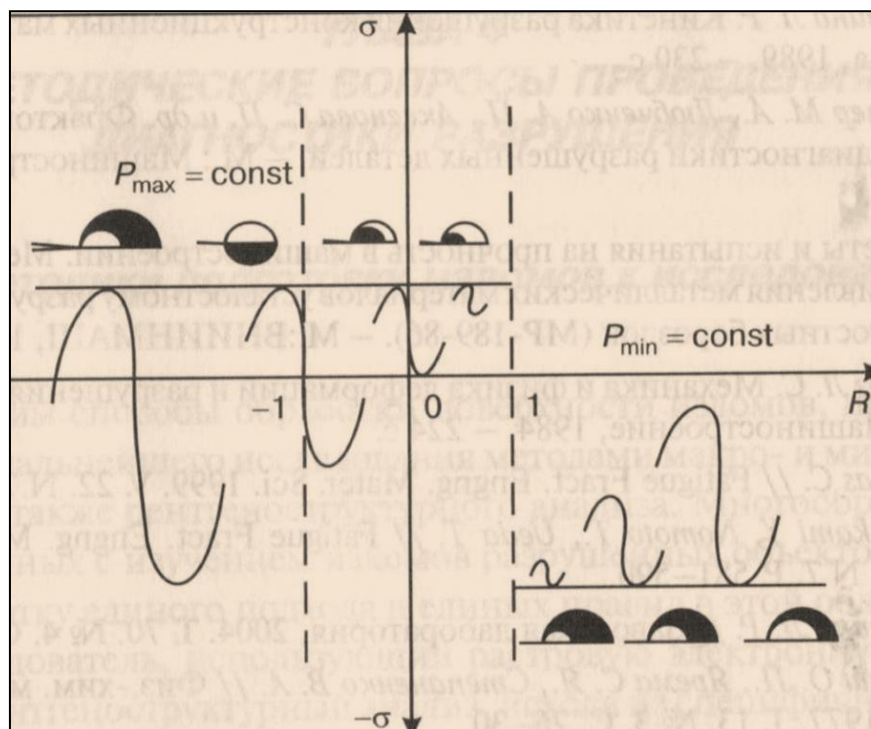


Рисунок 1.2 – Обобщенная схема образования пластических зон у вершины усталостной трещины в зависимости от коэффициента асимметрии цикла нагружения R при $P_{\max} = \text{const}$ или $P_{\min} = \text{const}$

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.

Вопросы для самопроверки

- 2 Каковы механизмы зарождения усталостной трещины?
- 3 Какое строение имеют усталостные изломы?
- 4 Какие зоны образуются на поверхности усталостных изломов?
- 5 Какие механизмы разрушения реализуются в пределах данных зон?
- 6 Что такое усталостные бороздки на поверхности изломов?
- 7 Что представляет собой кривая Вёлера?
- 8 Что понимают под пределом усталости (выносливости) материала?
- 9 Как определяются коэффициенты интенсивности напряжения при усталостном нагружении?
- 10 Как влияет коэффициент асимметрии цикла нагружения на усталостную прочность материала и скорость распространения усталостной трещины?
- 11 Что представляет собой кинетическая диаграмма усталостного разрушения?
- 12 Сколько характерных участков имеет диаграмма усталостного разрушения?
- 13 Что представляют собой пороговые значения коэффициентов интенсивности напряжения?
- 14 Какой микрорельеф образуется на каждой стадии распространения усталостной трещины?
- 15 Какой вид имеет уравнение Пэриса?
- 16 Какие пластические зоны образуются у вершины усталостной трещины?
- 17 Каковы схемы образования пластических зон при растягивающих циклах нагружения?
- 18 Каковы схемы образования пластических зон при сжимающих циклах нагружения?
- 19 Как влияет коэффициент асимметрии цикла нагружения на образование пластических зон у вершины усталостной трещины?
- 20 Что представляет собой обобщенная схема образования пластических зон у вершины усталостной трещины?

2 Задания для самостоятельной работы

Задание 1 – Изучение влияния схемы нагружения образцов из алюминиевого сплава АК6 на характер изменения критических длин зон развития трещины на поверхности усталостных изломов от коэффициента асимметрии цикла нагружения.

Для образцов из алюминиевого сплава АК6 изучить влияние схемы нагружения образцов при $\Delta P = \text{const}$ и $P_{\text{max}} = \text{const}$ на изменение критических длин зон усталостного развития трещины от коэффициента асимметрии цикла нагружения R.

Последовательность выполнения задания:

1. Изучить строение усталостных изломов образцов из алюминиевого сплава АК6.

2. Исследовать макрорельеф поверхности изломов. Выделить зоны стабильного l_s и усталостного l_f развития трещины на поверхности изломов. Измерить с помощью штангенциркуля длины этих зон. Результаты исследования представить в таблицах 2.1, 2.2.

Таблица 2.1 – Результаты исследования при $\Delta P = \text{const}$

№ образца	R	l_s , мм	l_f , мм
1	3	4	5
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			

Таблица 2.2 – Результаты исследования при $P_{\max}=\text{const}$

№ образца	R	l_s , мм	l_f , мм
1	3	4	5
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			

3. Определить характер изменения длин зон в зависимости от коэффициента асимметрии цикла нагружения R.

4. Построить графики зависимости критических длин трещин l_s и l_f от коэффициента асимметрии цикла нагружения R в координатах « l_s , мм – R», « l_f , мм – R» при различных схемах нагружения ($\Delta P=\text{const}$ и $P_{\max}=\text{const}$).

5. Изучить влияние схемы нагружения образцов на изменение критических длин зон l_s и l_f усталостного развития трещины на поверхности изломов от коэффициента асимметрии цикла нагружения R.

Задание 2 – Изучение механизмов разрушения образцов из высокопрочного литейного алюминиевого сплава ВАЛ 15 в зависимости от коэффициентов интенсивности напряжения.

Для образцов из высокопрочного литейного алюминиевого сплава ВАЛ 15 в зависимости от коэффициентов интенсивности напряжения K_{max} и ΔK определить механизм усталостного разрушения.

Последовательность выполнения задания:

1. Изучить строение усталостных изломов из высокопрочного литейного алюминиевого сплава ВАЛ 15.
2. Проанализировать макрорельеф поверхности изломов.
3. Проанализировать механизм усталостного разрушения в зависимости от коэффициентов интенсивностей напряжений K_{max} и ΔK по результатам микрофрактографических исследований.
4. Результаты исследований представить в таблицах 2.3, 2.4.

Таблица 2.3 – Результаты исследования

№ образца	$K_{max},$ $МПа\sqrt{м}$	Макрофрактография (вид излома)	Микрофрактография (механизмы разрушения)
1			
2			
3			
4			
5			

Таблица 2.4 – Результаты исследования

№ образца	ΔK , МПа $\sqrt{м}$	Макрофрактография (вид излома)	Микрофрактография (механизмы разрушения)
1			
2			
3			
4			
5			

5. Изучить влияние коэффициентов интенсивности напряжения K_{max} и ΔK , МПа $\sqrt{м}$ на механизм усталостного разрушения.

Задание 3 – Изучение влияния коэффициента асимметрии цикла нагружения на скорость распространения усталостной трещины и механизмы разрушения образцов из алюминиевого сплава Д16 при различных схемах нагружения.

Для образцов из алюминиевого сплава Д16 изучить влияние коэффициента асимметрии цикла нагружения R на скорость распространения усталостной трещины dl/dN и механизмы разрушения при различных схемах нагружения ($\Delta P = const$ и $P_{max} = const$).

Последовательность выполнения задания:

1. Изучить строение усталостных изломов алюминиевого сплава Д16.
2. Исследовать макрорельеф поверхности изломов.
3. Изучить влияние коэффициента асимметрии цикла нагружения R на скорость распространения усталостной трещины dl/dN , м/цикл (по кинетическим диаграммам зависимости скорости распространения трещины dl/dN , м/цикл от коэффициента интенсивности напряжения K_{max} (ΔK), МПа $\sqrt{м}$ при различных схемах нагружения ($\Delta P = const$ и $P_{max} = const$).

Список использованных источников

- 1 Школьник, Л. М. Скорость роста трещин и живучесть металла / Л. М. Школьник. – М. : Metallurgy, 1973. – 215 с.
- 2 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.
- 3 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.
- 4 Коцаньда, С. Усталостное растрескивание металлов; пер. с польск. / С. Коцаньда; под ред. С. Я. Яремы. – М. : Metallurgy, 1990. – 623 с.
- 5 Энгель, Л. Растровая электронная микроскопия / Л. Энгель, Г. Клингел. – М. : Metallurgy, 1986. – 232 с.
- 6 Мороз, Л. С. Механика и физика деформаций и разрушения материалов / Л. С. Мороз. – Л. : Машиностроение, 1984. – 224 с.
- 7 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.
- 8 Rice, J. R. Mechanics of crack tip deformation and extension by fatigue / J. R. Rice // ASTM, Special Technical Publication. – 1966. – № 415. – P. 247–311.