

Физико-химические особенности технологических процессов в машиностроении

Проф., д.т.н. *Скотникова Маргарита Александровна*
Skotnikova@mail.ru

Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

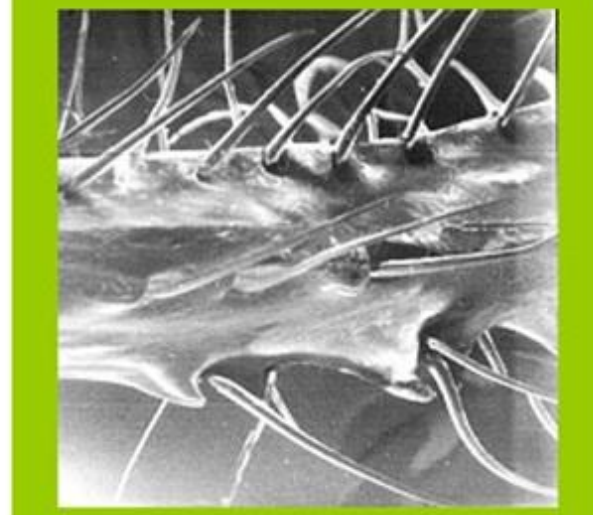
Кафедра "Машиноведение и
основы конструирования"
ИММиТ САБПУ



x 1



x 100



x 10000

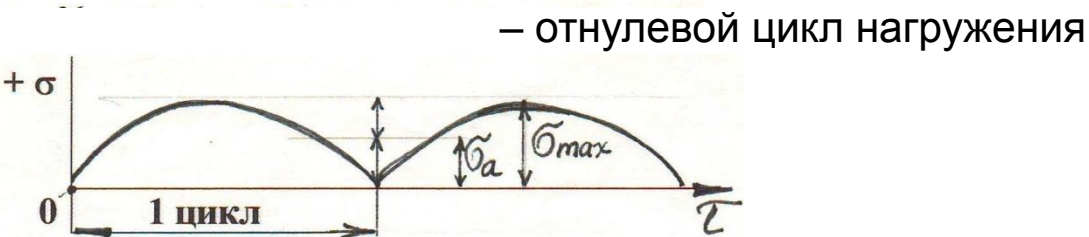
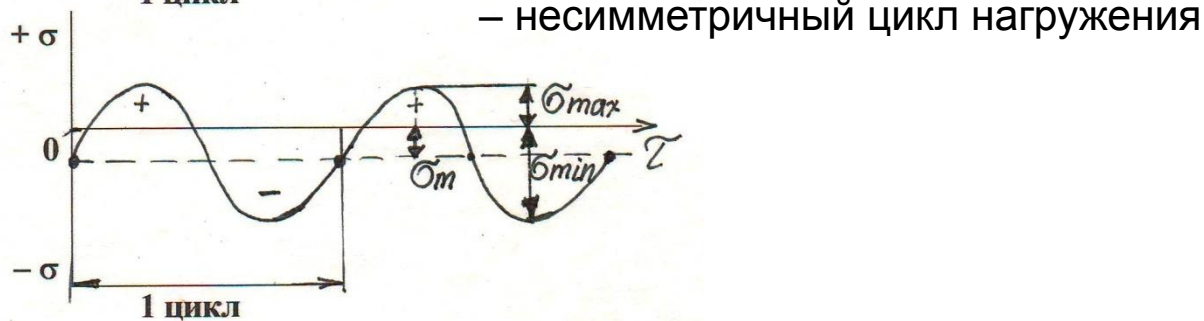
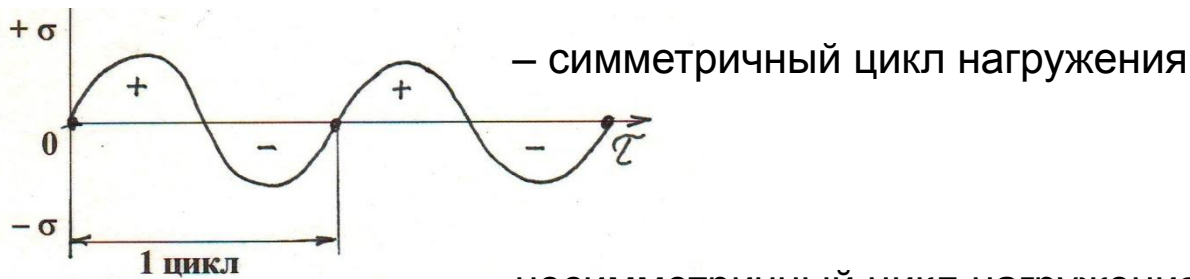
Тема 6. Обеспечение повышения качества поверхности и эксплуатационных свойств деталей машин, работающих при длительном циклическом нагружении.

1. Явление усталости металлов при циклическом нагружении. Методики проведения усталостных испытаний.
2. Механизм усталостного разрушения. Фрактографические особенности усталостного разрушения.
3. Связь выносливости с другими механическими свойствами.
4. Предел выносливости реальных изделий. Влияние различных факторов на повышение выносливости.
5. Термоциклическая обработка и термическая усталость металлов и сплавов.
6. Конструктивные и технологические методы повышения усталостной прочности машин.
7. Основные приемы упрочнения (структурные и химические) поверхностей деталей машин.
8. Испытания на трещиностойкость. Испытания на вязкость разрушения.

6.1. Явление усталости металлов при циклическом нагружении. Методики проведения усталостных испытаний.

Усталостью металла – называется явление разрушения под действием повторных или знакопеременных напряжений, максимальное значение которых меньше прочности при испытаниях на одноосное растяжение.

Основными характеристиками нагружения являются: **симметрия, период цикла, амплитуда приложенного напряжения, вид нагружения** (изгиб, кручение, растяжение, сжатие). Характер изменения знакопеременных напряжений бывает различным, например:



В качестве количественных характеристик изменения приложенных напряжений различают:

Максимальная амплитуда напряжения: σ_{max}

Минимальная амплитуда напряжения: σ_{min}

Среднее напряжение цикла:

$$\sigma_m = (\sigma_{max} + \sigma_{min}) / 2$$

Амплитуда напряжения цикла:

$$\sigma_a = (\sigma_{max} - \sigma_{min}) / 2$$

$$\sigma_{max} = \sigma_m + \sigma_a$$

Коэффициент асимметрии:

$$R_\sigma = \sigma_{min} / \sigma_{max}$$

6.1. Явление усталости металлов при циклическом нагружении.

Оказывается, металл, подвергаемый таким знакопеременным нагрузкам, повторяющимся через определенные промежутки времени, в отличие от однократного статического нагружения:

- **разрушается** при напряжениях не только ниже предела прочности (σ_B), но даже **ниже предела текучести** (σ_T);
- оказывается более **чувствителен к неоднородности структуры**, надрезам, коррозионному воздействию, остаточным растягивающим напряжениям;
- имеет существенно **менее вязкое строение излома**, что часто приводит к внезапному разрушению.

Говорят, что металл в таких условиях подвержен усталостному разрушению.

Усталостью – называется процесс постепенного накопления повреждений в материале под действием циклических нагрузок.

Выносливостью (циклической прочностью) – называется свойство материала сопротивляться усталости, то есть, способность воспринимать знакопеременные нагружения без разрушения.

Пределом выносливости (усталости) (σ_R) – называют максимальное знакопеременное напряжение, которое выдерживает материал без разрушения на выбранной базе испытаний.



Усталостной долговечностью – называется число циклов нагружения, которое выдерживает материал перед разрушением при определенном напряжении.

Усталостная долговечность складывается из числа циклов до зарождения трещины и числа циклов распространения усталостной трещины.

$$N_{разр.} = N_{зар.} + N_{распр.}$$

В зависимости от амплитуды приложенного напряжения материал может быть разрушен при небольшом числе циклов (**малоцикловые испытания**) и большом числе циклов до разрушения (**многоцикловые испытания**).

Малоцикловая усталость в большинстве случаев связана с действием высоких напряжений.

Для изучения циклической усталости производят испытания и построение **кривой усталости**.

6.1. Методики проведения усталостных испытаний.

Методы испытаний отличаются:

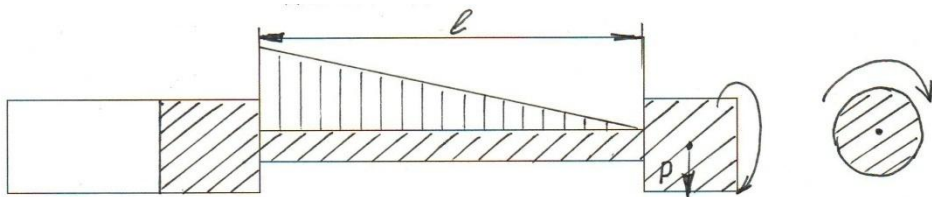
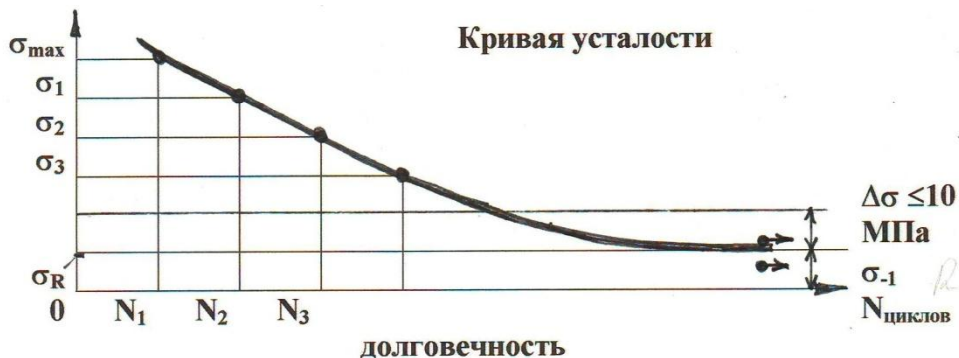
- характером **изменения напряжения во времени** (симметричный, антисимметричный и т.д.);
- **видом напряженного состояния**: (растяжение, сжатие, изгиб, кручение), имитирующего условия эксплуатации;
- наличием или отсутствием концентраторов напряжения;
- **Температурой и внешней средой** испытания.

Для определения **предела выносливости (σ_{-1})**, необходимо задать *базу испытаний* и выполнить серию экспериментов при различных амплитудах приложенного напряжения.

Обычно **база испытаний** устанавливается:

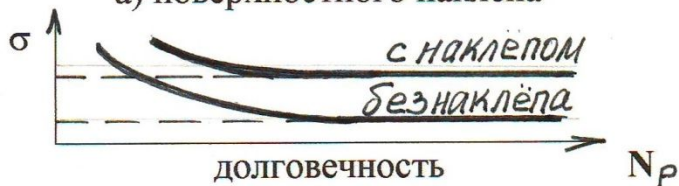
для **черных металлов** $N_{циклов} = 10 \cdot 10^6$ циклов

для **цветных металлов** $N_{циклов} = (50...100) \cdot 10^6$ циклов



Влияние на кривые усталости:

а) поверхностного наклепа



б) термообработки



Из испытуемого материала изготавливают **8...10 образцов** диаметром 5...10 мм.

Испытания производят, например, по схеме чистого консольного изгиба при вращении.

Испытания начинают с *больших* напряжений по величине $\sigma_1 \approx (0,7...0,8) \cdot \sigma_B$, оценивают N_1

Последовательно переходят к более *малым* напряжениям $\sigma_2 < \sigma_1$, оценивают N_2 и т.д.

Испытания заканчивают при напряжениях по величине $\sigma_n \approx (0,3...0,5) \cdot \sigma_B$

Испытания можно считать законченными, если **разность напряжений ($\Delta\sigma$) между не разрушившимся образцом и разрушившимся**

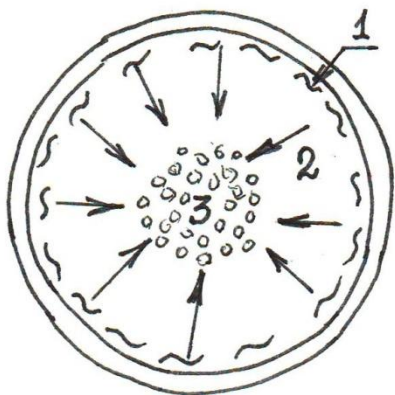
при чуть большем напряжении не превосходит 10 МПа, **$\Delta\sigma \leq 10$ МПа**. Строят **кривую усталости** в координатах $\sigma = f(N)$ (напряжение — число циклов до разрушения).

Принято **кружками** обозначать разрушенные образцы, а **кружками со стрелкой** — не разрушенные

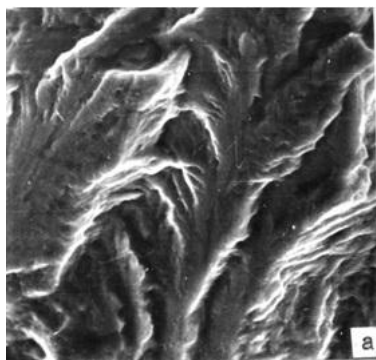
6.2. Механизм усталостного разрушения. Фрактографические особенности усталостного разрушения.

Усталостные изломы разрушенных деталей машин дают ценную информацию о реальных условиях их эксплуатации.

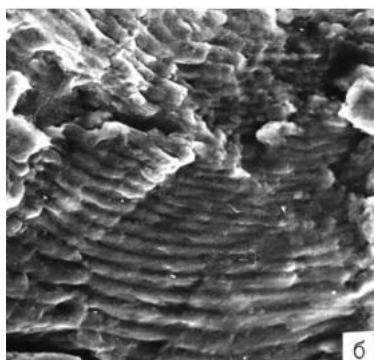
Усталостная трещина зарождается в поверхностных слоях и затем распространяется в глубь образца или детали, образуя острый надрез.



Излом образца после усталостного испытания имеет **три характерные зоны**:
1 – зона зарождения усталостной трещины (фокус излома);
2 – зона циклического разрушения, **стабильного распространения** трещины с большими полями регулярных усталостных **бороздок**, ориентированных перпендикулярно направлению распространения магистральной трещины;
3 – зона **долома**, однократного квазистатического разрушения (когда $\sigma_{\text{действующее}} > \sigma_{\text{разрушающее}}$).

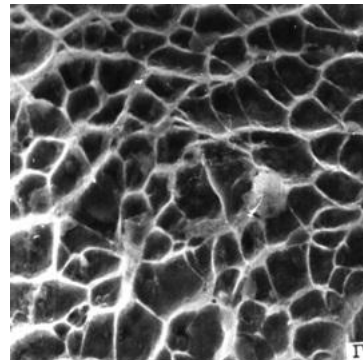


1

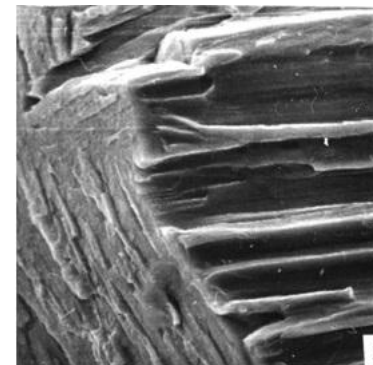


2

На воздухе



3



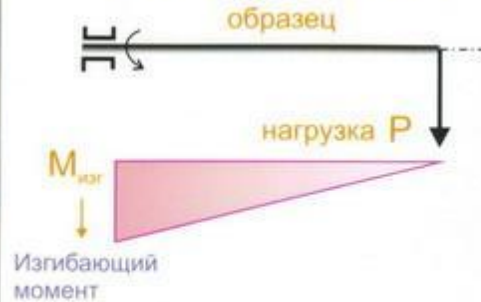
2-3

В морской воде

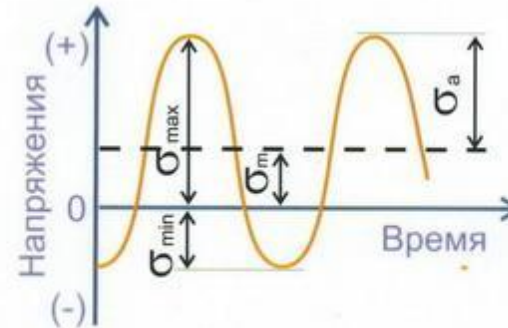
Испытания на выносливость

Испытания на выносливость

Схема нагружения - изгиб с вращением



Цикл напряжений



σ_a - амплитуда напряжений;
 $\sigma_m = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min})/2$ - среднее напряжение цикла;
 $R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ - асимметрия цикла

Кривые усталости



σ_R - физический предел выносливости
 σ_K - ограниченный предел выносливости при заданном количестве циклов N_K .

Разрушение при усталости (схема).



6.2. Механизм усталостного разрушения.

Процесс усталости связан с развитием пластической деформации, подготавливающей зарождение мельчайших трещин – **субмикротрещин**. **Субмикротрещины** постепенно разрастаются и превращаются в **микротрещины**, которые в дальнейшем увеличиваются до размеров **макротрещины**. Происходит окончательное "катастрофическое" разрушение, формируется долом испытуемого образца.

Скорость роста усталостной трещины определяется напряженным состоянием в локальной области у ее вершины, которое может быть описано в терминах механики разрушения и выражено формулой

$$\frac{dl}{dN} = C(\Delta K)^n$$

где C, n – константы материала, зависящие от кристаллографии металла и от коэффициента асимметрии цикла $R = K_{\min} / K_{\max}$, В среднем $n = 1 \dots 6$.

где K – коэффициент интенсивности напряжений у вершины трещины, определяемый по формуле

$$K = \sigma \cdot \sqrt{\pi l}$$

где K_{\max}, K_{\min} – коэффициенты интенсивности напряжений при максимальном и минимальном напряжениях цикла. σ – приложенное напряжение, $2l$ – длина трещины, ΔK – размах коэффициента интенсивности напряжений.

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$$

Макрорельеф излома во многом определяется скоростью распространения усталостной трещины. Например, в сплавах титана при $\Delta K < 10 \text{ МН} / \text{м}^{-3/2}$, усталостная трещина оказывается структурно-чувствительной, тогда как при $\Delta K > 10 \dots 12 \text{ МН} / \text{м}^{-3/2}$, распространяющаяся трещина не чувствительна к микроструктуре материала.

Скорость трещины в среднем составляет **$10^{-6} \dots 10^{-3}$ мм/цикл** и оказывается **тем меньше**, чем **больше** отношение **размера зоны пластической деформации** ($W_{\text{пл}}$) к **диаметру зерна** ($D_{\text{зер}}$). Таким образом, **в крупнозернистых материалах скорость усталостной трещины относительно более низкая**.

6.2. Механизм усталостного разрушения.

$$\frac{dl}{dN} = C(\Delta K)^n$$

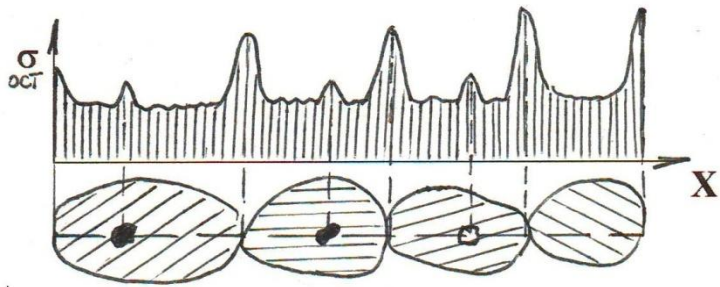
Оценка постоянных материала **c, n** – производится на основании анализа экспериментальных результатов циклических испытаний (**оценки скорости распространения усталостной трещины**), проведенных, например, при ΔK_1 и ΔK_2 равных 0,7 и 0,8 от предела текучести ($\sigma_{0,2}$). Построение в двойных логарифмических координатах графика зависимости скорости трещины от размаха коэффициента интенсивности напряжений, позволяет оценить постоянные материала **c, n**.

При $n < 2,5$ – пластическая деформация развивается симметрично относительно плоскости распространения трещины, то есть удовлетворяет **плоско-деформированному** состоянию, при этом, **скорость** распространения стабильной **усталостной трещины невелика**, формируется **плоский, линейный фронт трещины**. Ориентация поверхности разрушения перпендикулярна направлению действия главных растягивающих напряжений. **Ширина усталостных бороздок увеличивается с возрастанием скорости распространения усталостной трещины**. Установлено, что ориентация бороздок несколько изменяется на границах двойников и зерен. Характерно, что в сплавах алюминия усталостные бороздки были обнаружены только при скоростях распространения трещины 0,09...1,00 мм/цикл.

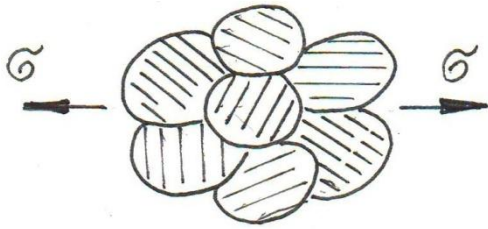
При $n > 1,1...3,1$ – пластическая деформация развивается **антисимметрично** относительно плоскости распространения трещины, при этом, **скорость распространения трещины велика**. Трещина распространяется сложно, выбирая наиболее благоприятные кристаллографические направления. Формируется хребтообразный, **нелинейный фронт трещины** – результат совместного усталостного и однократного разрушения. Ориентация поверхности разрушения находится под углом 45 град. к направлению действия главных растягивающих напряжений. При повторно-статическом нагружении **происходит** постепенный **переход плоско-деформированного** состояния в **плоско-напряженное** и все увеличивающейся при этом роли касательных напряжений. Изменение ориентации поверхности разрушения с 90 до 45 град. по отношению к направлению главных растягивающих напряжений связано с увеличением деформируемого объема, то есть с уменьшением локальности процесса деформации и разрушения.

6.2. Механизм усталостного разрушения.

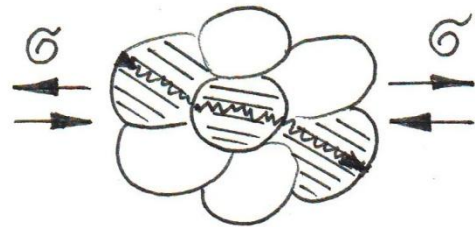
Металлы состоят из зерен, разделенных большеугловыми границами и содержащих неметаллические включения и структурные дефекты кристаллического строения. Перечисленные дефекты являются концентраторами внутренних напряжений II-го рода.



Так выглядит эпюра локальных напряжений в структуре металла. Зерна, в силу разной дефектности своего строения и кристаллографической ориентации относительно внешних приложенных напряжений, будут обладать разной микроупругостью, микропластичностью и микропрочностью. Поэтому, после приложения нагрузки, **пластически деформироваться начнут наиболее "слабые" зерна поликристаллов в местах максимальных перенапряжений.**



Во время **статического растяжения** локализация деформации в таких "слабых" зернах приводит к их упрочнению (наклепу) и перераспределению концентраторов напряжения по образцу. Относительно "слабым" становятся теперь **другие** зерна, в которых опять локализуется пластическая деформация и наступает их упрочнение и т.д. При этом (статическом) нагружении имеет место **равномерная пластическая деформация**, захватывающая весь рабочий объем испытываемого образца.



Во время **циклического нагружения**, при **прямом** приложении нагрузки, процессы развиваются как и при статическом нагружении: локализация деформации в самых "слабых" зернах приводит к их упрочнению (наклепу) и **перераспределению концентраторов напряжения** в другие относительно менее "слабые" зерна. Однако, при приложении нагрузки **обратного знака**, эти концентраторы напряжения **релаксируют**, и возможности локализации деформации (сдвига) в первоначальных полосах скольжения восстанавливаются. Это позволяет при много-цикловом знакопеременном нагружении, накопить аномально-высокие степени сильно-локализованной деформации **в первоначальных "слабых" зернах**. В этих же зернах формируется критическая структура и возникает **зародышевая микротрещина**. В результате возникает **усталостное разрушение**.

6.2. Виды усталостного разрушения.

Все усталостные испытания в зависимости от уровня приложенного напряжения и длительности испытания, частоты нагружения подразделяют **следующие виды**:

Малоцикловая усталость.

Небольшие базы испытания, **высокие** напряжения ($\approx 0,8 \sigma_{0,2}$) и **малую частоту циклов нагружения**. При малоцикловых низкочастотных испытаниях действующие нагрузки оказываются редкими, но значительными по абсолютной величине. При этом накопление усталостных повреждений и разрушение происходит **при упругопластической деформации**.

Малоцикловые усталостные испытания осуществляются при частоте нагружения (f) **f = 3...5 гц.**

При этом реально материал выдерживает **до разрушения** ($N_{\text{разр}} \leq 5 \cdot 10^4 \text{цикл.}$)

Многоцикловая усталость.

Большие базы испытания и **значительную частоту нагружения**. При этом усталость материала, накопление усталостных повреждений и разрушение происходит **при упругой деформации**.

Многоцикловые усталостные испытания осуществляются при частоте нагружения (f) **f = 10...300 Гц.**

При этом реально материал выдерживает **до разрушения** ($N_{\text{разр}} \leq 10^7 \text{цикл.}$)

Высокочастотная усталость.

Усталость при циклических нагрузках при частотах превышающих **300 Гц** (иногда до звукового диапазона). **f > 2000 Гц** – достигается на магнитострикционных установках. **300 < f < 2000 Гц** – на электродинамических виброустановках.

Контактная усталость.

Процесс накопления повреждений и развития разрушения поверхностных слоев материала под действием переменных контактных нагрузок, вызывающих образование **ямок выкрашивания (питтингов) или трещин** и снижение долговечности.

Ударная усталость.

Процесс накопления повреждений и развития трещин, вызванный ударными нагрузками при их циклическом нагружении. Ударную усталость характеризует ударно-усталостная прочность.

Коррозионная усталость.

Процесс постепенного накопления повреждений, которые обусловлены одновременным воздействием циклических нагрузок и коррозионной среды.

Особенности коррозионной усталости:

- на кривой усталости **отсутствие предела усталости**;
- наличие многоочагового разрушения, **множественного зарождения трещин** в участках коррозионного повреждения;
- суущественно **более низкая прочность при растяжении, чем при сжатии**;
- более **сильная зависимость от частоты циклов**;
- более частое возникновение **межкристаллитного разрушения**;

Фреттинг – коррозионная усталость.

Процесс постепенного накопления повреждений при совместном действии ударных напряжений и коррозии.

6.3. Связь выносливости с другими механическими свойствами.

В целом, выносливость материала оказывается несколько менее чувствительна к структурным изменениям, чем многие другие механические свойства.

Высокие значения выносливости, обычно достигаются на тех материалах, которые обладают и высокими прочностными и пластическими свойствами. Так, например, дисперсионно-упрочненные сплавы на основе Al, Fe, Ni, обладающие высокой прочностью, однако, имеют низкую выносливость, потому что, под воздействием циклических нагрузок, происходит их разупрочнение.

а) Корреляция выносливости с прочностью на растяжение.

Предел усталости, σ_{-1}	Коэффициент корреляции	Предел прочности, σ_B	Материал
	0,4...0,6		сталь
	0,3...0,5		сплавы меди
	0,25...0,4		сплавы алюминия

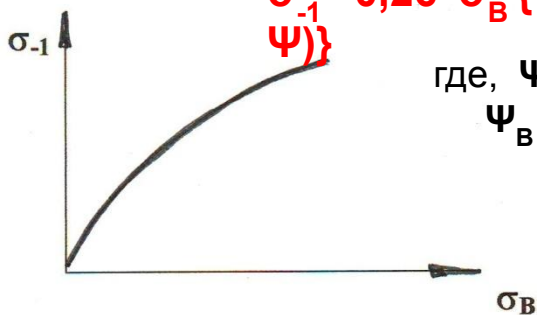
б) Корреляция выносливости с твердостью на сжатие.

Предел усталости, σ_{-1}	Коэффициент корреляции	Твердость, НВ	Материал
	0,35		сталь
	0,55		сплавы меди
	0,26		сплавы алюминия
	0,1		сплавы динка

в) Корреляция выносливости с пределом прочности и относительным сужением на растяжение.

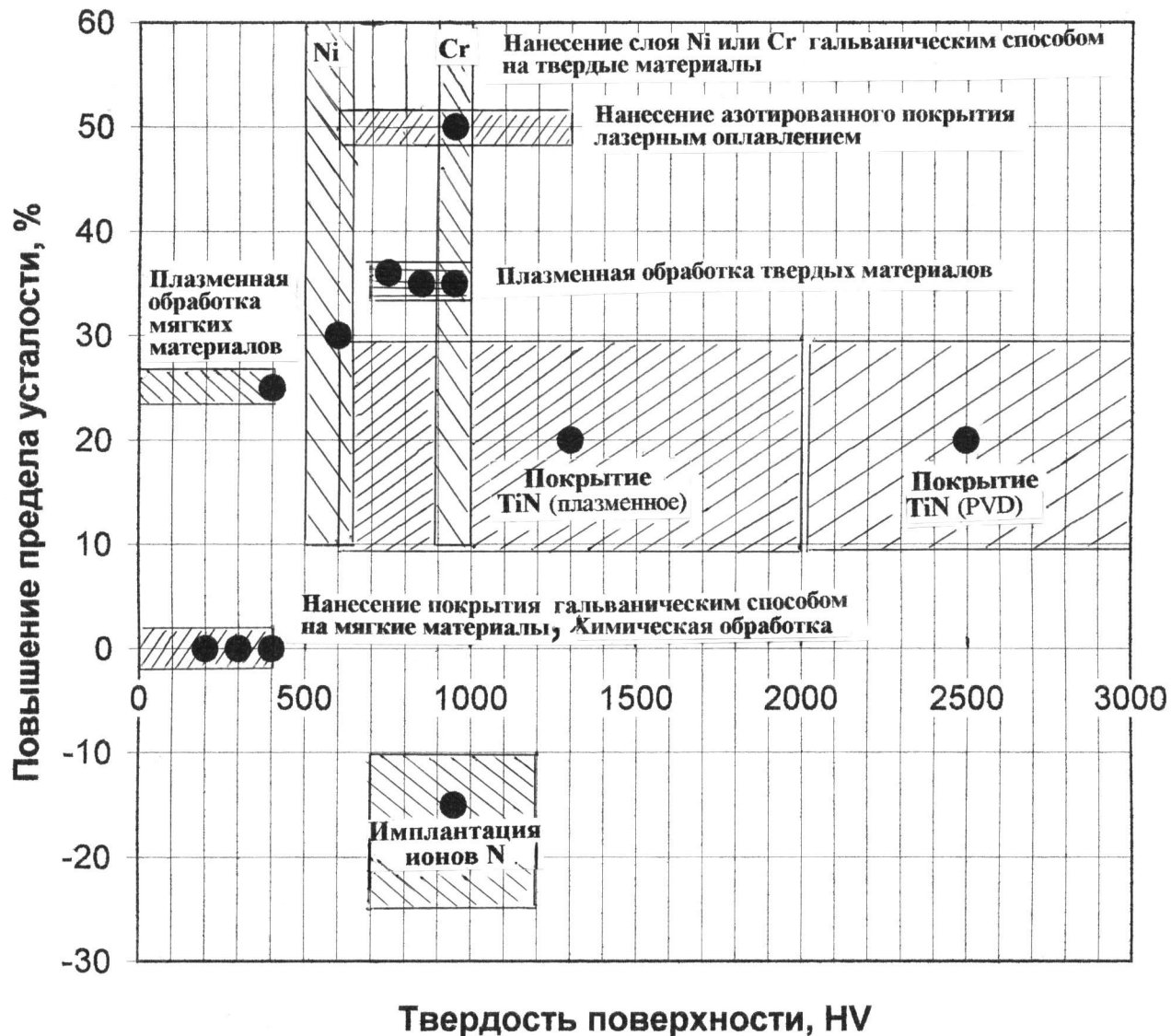
$$\sigma_{-1} = 0,26 \cdot \sigma_B \left\{ 1 + 0,5 \cdot \ln \left[\frac{(1 + \Psi)(1 - \Psi_B)}{(1 + \Psi_B)(1 - \Psi)} \right] \right\}$$

где, Ψ – конечное относительное сужение
 Ψ_B – наибольшее равномерное сужение



6.3. Связь выносливости с другими механическими свойствами

Влияние твердости обработанной поверхности на изменение усталостных свойств материала



6.4. Предел выносливости реальных изделий. Влияние различных факторов на повышение выносливости.

Разрушение деталей машин под действием переменных напряжений чаще всего возникает **на поверхности**. Это вызвано сочетанием ряда неблагоприятных условий:

- в сложных напряженных состояниях, которые характерны для движущихся частей машин, **наибольшие расчетные напряжения**, как правило, получаются на поверхности;
- на поверхности **больше** всего имеются **концентраторов напряжения** в виде различной шероховатости обработки;
- помимо общих **дефектов структуры**, поверхностным слоям присущи специфические несовершенства, как трещиноватость, следы коррозии, адсорбционные явления, обезуглероживание, повреждения от износа;
- в поверхностных слоях часто возникают **значительные** растягивающие **остаточные напряжения**;

Влияние качества обработки поверхности очень велико, особенно для высокопрочных сталей. **Чем меньше шероховатость поверхности, тем выше предел усталости.**

Характер обработки	Шероховатость, Ra	Предел усталости, σ_1 , МПа		
		470	930	1400
Шкала снижения предела усталости				
Чистое полирование		1,00	1,00	1,00
Грубое полирование		0,95	0,93	0,90
Тонкое шлифование		0,93	0,90	0,88
Грубое шлифование		0,90	0,80	0,70
Фрезерование		0,70	0,50	0,35

Для различных марок стали **предел усталости** при **грубой шероховатости** поверхности составляет 65...90% от **усталостной прочности полированных образцов**, при **штамповке** – 46...80%. Катастрофическое снижение предела усталости отмечается у **высокопрочных хромоникелевых сталей** с пределом прочности $\sigma_B = 1830...2140$ МПа. У них **при штамповке** предел усталости падает до 13...18% от усталостной прочности полированных образцов.

Чем выше прочность стали, тем сильнее снижается предел усталости от **обезуглероживания** поверхности. В сталях обычных и высокопрочных предел усталости падает до 20 и 77% от усталостной прочности образцов с необезуглероженной поверхностью, соответственно.

6.5. Термоциклическая обработка и термическая усталость металлов и сплавов.

Термическая усталость.

Процесс постепенного накопления повреждений в материале **при постоянном напряжении и циклическом изменением температуры.**

В условиях термической (малоцикловой низкочастотной) усталости работают *камеры сгорания двигателей, поверхности прокатных валков, поверхности тормозных элементов колес.*

Термостойкость – способность материала сопротивляться разрушению в условиях проявления термической усталости.

Пути повышения термостойкости материалов являются:

1. уменьшение коэффициента термического расширения;
2. повышение теплопроводности;
3. уменьшение концентрации легирующих и примесных атомов;
4. увеличение способности материала к локализации пластической деформации под действием концентраторов напряжений (например, вблизи отверстий, резьбы);
5. ликвидация самих концентраторов:

конструктивных (галтельные переходы, шпонки, отверстия, резьбы)

технологических (шероховатость, царапины, надрезы)

металлургических (несплошности, грубые включения избыточных фаз)

6.6. Конструктивные и технологические методы повышения усталостной прочности машин.

1. Улучшение **качества обработки поверхностных** слоев деталей (по шероховатости и физико-механическим свойствам).
2. Повышение **однородности пластической деформации** в объеме материала. Предотвращение появления трещин и зон локализованной деформации, в которых облегчено их зарождение.
3. **Оптимальное легирование**, создание стабильной однородной структуры, введение дозированного количества дисперсных частиц избыточных фаз. Уменьшение количества включений ($d > 1$ мкм) избыточных фаз. Повышение прочностных и пластических свойств материала.
4. **Снижение концентрации напряжений** путем повышения качества обработки поверхности.

(Уменьшение влияния концентраторов напряжения):

конструктивные способы: придание детали формы с плавными переходами от одного сечения к другому, нанесение дополнительных плавных борозд вокруг шпоночной канавки;

технологические способы: создание чистой и гладкой поверхности, упрочнение поверхности за счет **пластического деформирования**, например, обкаткой закаленным роликом, обдувкой стальной дробью. При этом, повышается дефектность кристаллической решетки, создаются благоприятные сжимающие остаточные напряжения (400...1150 МПа). Глубина наклепанного слоя колеблется в пределах 100...400 мкм. Повышение предела усталости при этом происходит на 20...90%;

технологические способы: упрочнение поверхности за счет химико-термической обработки (ХТО), например **азотирования**, цементации, цианирования приводит к созданию сжимающих остаточных напряжений (200...900 МПа) и повышению усталостной прочности на 15...50%. Природа возникновения напряжений сжатия основана на появлении в поверхностном слое большого числа внедренных атомов, расширяющих кристаллическую решетку;

технологические способы: поверхностная закалка.

5. Учет **масштабного фактора** (или влияния абсолютных размеров поперечного сечения).
6. Учет **эксплуатационных факторов** – влияние коррозии, температуры, частоты изменения нагрузки и др.

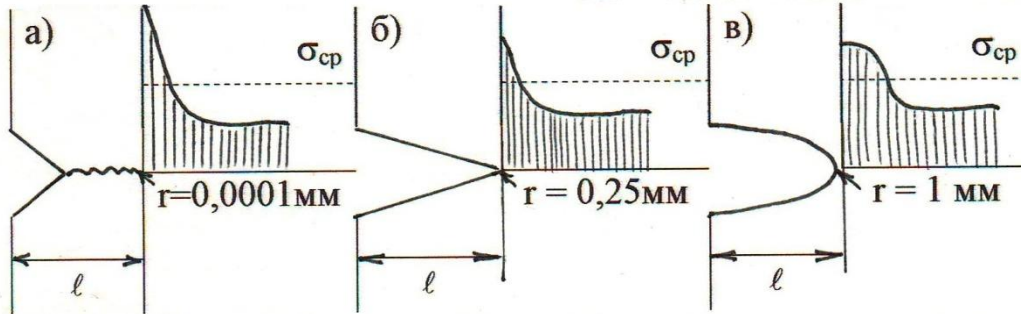
6.7. Основные приемы упрочнения (структурные и химические) поверхностей деталей машин.

Нанесение защитных покрытий облагораживающих поверхность (**металлизация**), в большинстве случаев приводит к возникновению растягивающих напряжений и **снижению предела усталости**. Установлено, что никелирование сплавов на основе железа (диаметр атома $d_{\text{атома}} = 2,54 \text{ \AA}$) приводит к снижению предела усталости на 50%, хромирование ($d_{\text{атома}} = 2,56 \text{ \AA}$) – на 40%, цинкование ($d_{\text{атома}} = 2,78 \text{ \AA}$) на 10%, покрытие оловом ($d_{\text{атома}} = 3,16 \text{ \AA}$), кадмием ($d_{\text{атома}} = 3,12 \text{ \AA}$), алюминием ($d_{\text{атома}} = 2,86 \text{ \AA}$), свинцом ($d_{\text{атома}} = 3,50 \text{ \AA}$) – на 7...10%.

6.8. Испытания на трещиностойкость. Испытания на вязкость разрушения.

Разрушение высокопрочных материалов обусловлено имеющимися в теле микротрещинами. Контроль скорости роста микротрещин позволяет прогнозировать работоспособность материалов в конструкциях.

Трещиностойкость – называется способность материала сопротивляться распространению трещины при статическом или циклическом нагружении.



Концентрация напряжений в устье дефекта:
 а - трещина; б - острый надрез; в - "мягкий" надрез.

$$K = 2 \left(\frac{l}{r} \right)^{1/2}$$

где, K – концентратор напряжений,
 l – полудлина дефекта,
 r – радиус закругления в вершине дефекта.

$l, \text{ мм}$	1	0,1	0,01
K	60	20	6

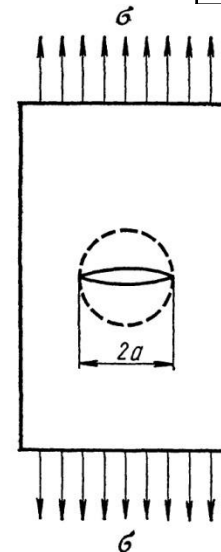
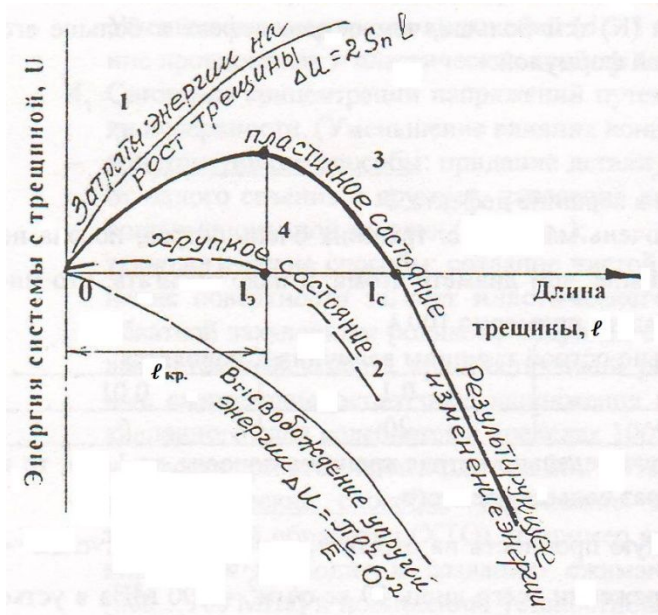


Рис. 48. Схема пластины с эллиптической трещиной.

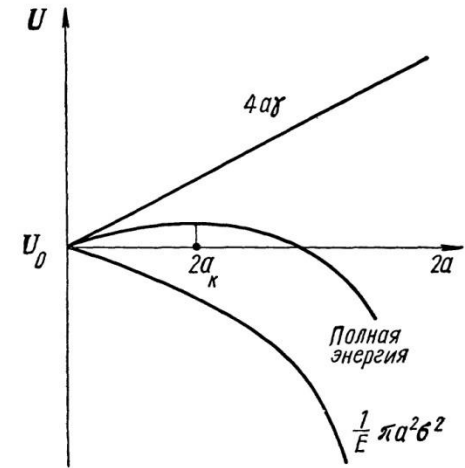


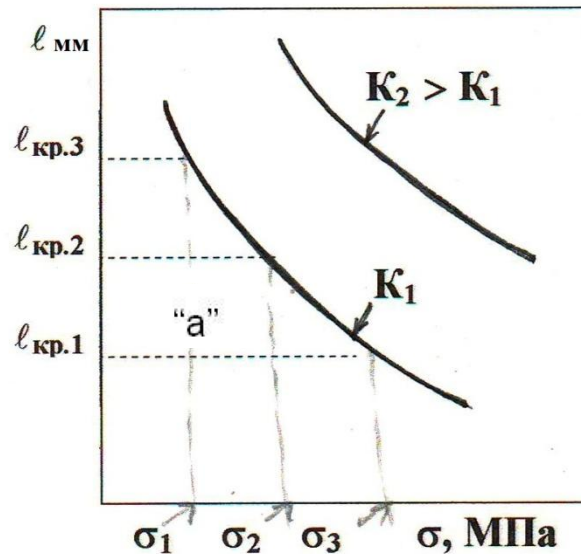
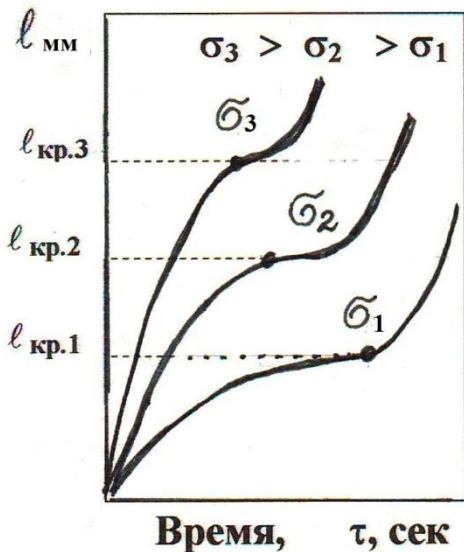
Рис. 49. Изменение полной энергии пластины в зависимости от длины трещины.

6.8. Испытания на трещиностойкость.

Трещиностойкостью – называется способность материала сопротивляться распространению трещины при статическом или циклическом нагружении.

Зная рабочее **напряжение** в детали, можно предсказать **критический размер трещин**, при достижении которого произойдет разрушение. Если **точка "а"** на этой схеме показывает механическое состояние материала, то дефект при таком напряжении **не опасен**, однако разрушение произойдет в момент пересечения с кривыми K_1 , если будет расти рабочее напряжение или увеличиваться длина трещины, например, в результате усталостных повреждений. **Повышением трещиностойкости** материала ($K_2 > K_1$) зависимость $l_{кр} = f(\sigma)$ можно сместить в **область больших допустимых длин трещин** (концентраторов). Очевидно, материал с более высоким значением K более надежен, так как при большем напряжении или длине трещин произойдет разрушение.

$$K = 2 \left(\frac{l}{r} \right)^{1/2}$$



где, K – концентратор напряжения,
 l – полудлина дефекта,
 r – радиус закругления в вершине дефекта.

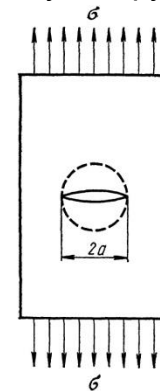


Рис. 48. Схема пластины с эллиптической трещиной.

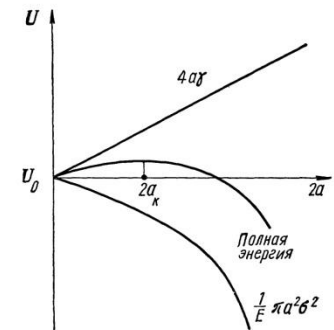


Рис. 49. Изменение полной энергии пластины в зависимости от длины трещины.

6.8. Испытания на вязкость разрушения.

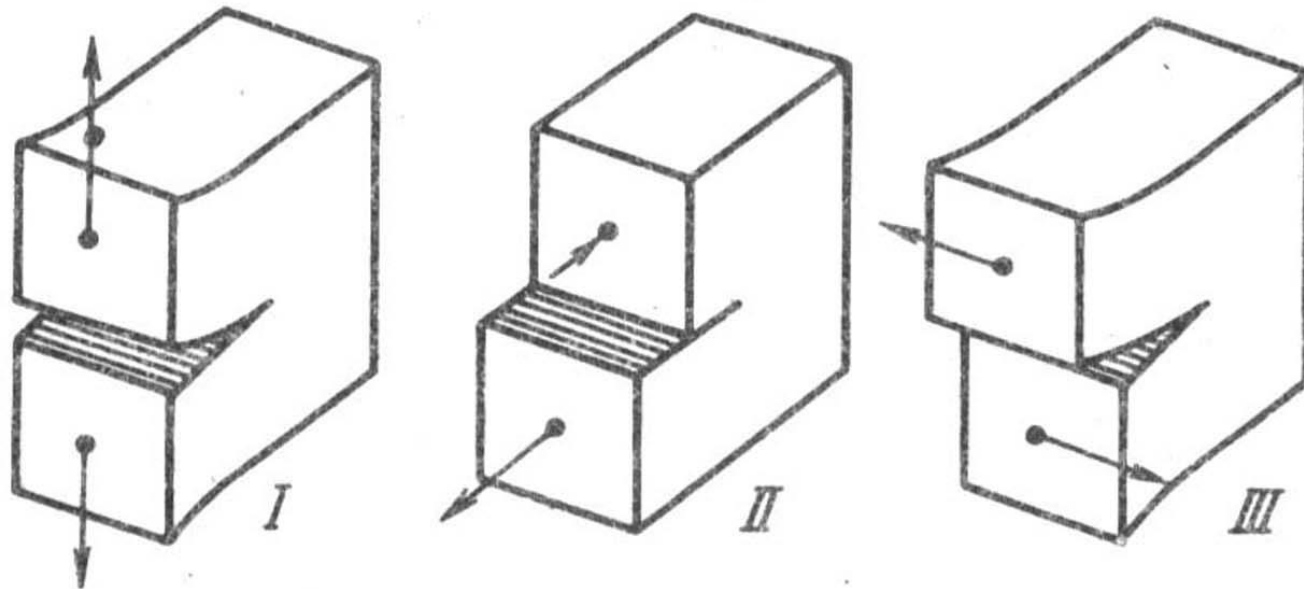
Трещиностойкостью – называется способность материала сопротивляться распространению трещины при статическом или циклическом нагружении.

Сила, необходимая для того, чтобы продвинуть трещину на 1 см, и обозначаемая через G , по своему смыслу и размерности (кг/см или кгс*м/см²) аналогична работе распространения трещины (a_p , кгс*м/см²).

Математической интерпретацией критерия G является параметр K (называемый **коэффициентом интенсивности напряжения**), более удобный, чем G , для экспериментального определения и использования в расчетах на прочность: $G=K^2/E$ или

$$K = \sqrt{G * E} = \sigma * \sqrt{\pi * l} \quad \text{кг/мм}^{3/2}$$

Коэффициент интенсивности напряжения K при разрушении в зависимости от вида напряженного состояния обозначают как K_I , K_{II} , K_{III} и определяют на массивных образцах при ряде ограничительных условий: K_I – при нормальном отрыве; K_{II} – при поперечном сдвиге; K_{III} – при продольном сдвиге.



6.8. Испытания на вязкость разрушения. Обобщение экспериментального материала.

Сила, необходимая для того, чтобы продвинуть трещину на 1 см, и обозначаемая через G , по своему смыслу и размерности ($\text{кг}/\text{см}$ или $\text{кгс}\cdot\text{м}/\text{см}^2$) аналогична работе распространения трещины (a_p , $\text{кгс}\cdot\text{м}/\text{см}^2$).

Математической интерпретацией критерия G является параметр K (называемый коэффициентом интенсивности напряжения), более удобный, чем G , для экспериментального определения и

использования в расчетах на прочность: $G=K^2/E$ или

$$K = \sqrt{G * E} = \sigma * \sqrt{\pi * l}$$

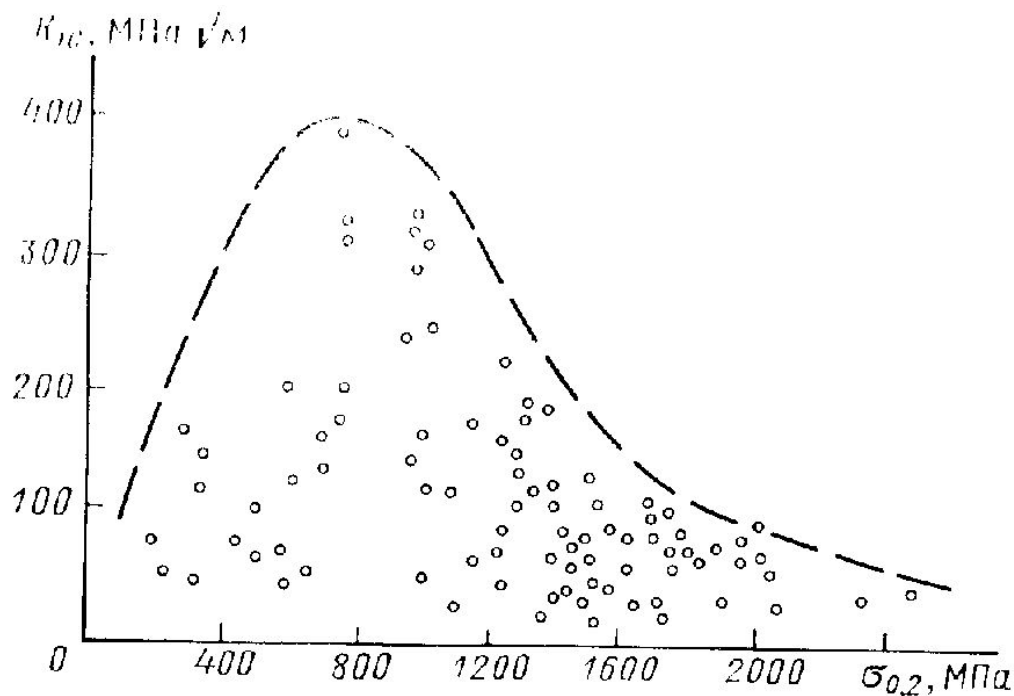
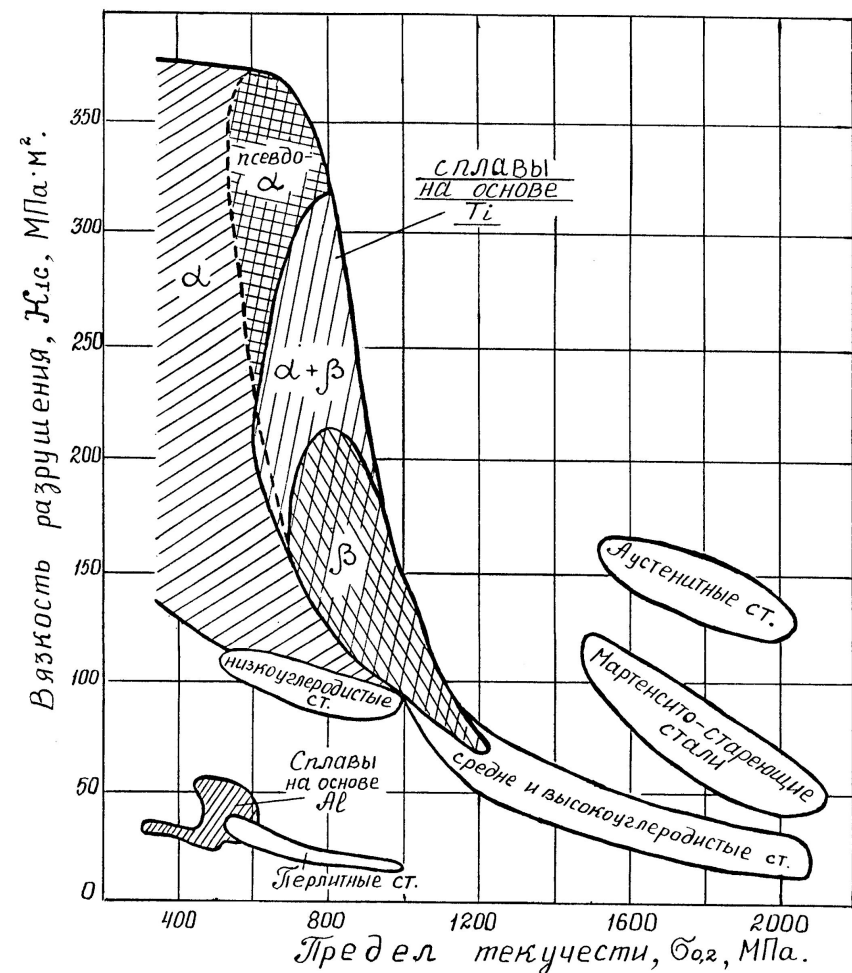
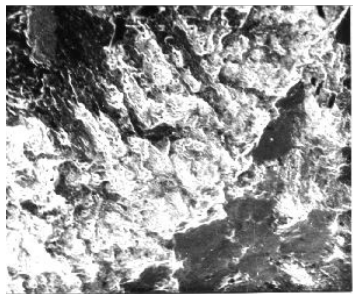


Рис. 2.2. Поле экспериментальных данных K_{Ic} и $\sigma_{0.2}$ для сталей

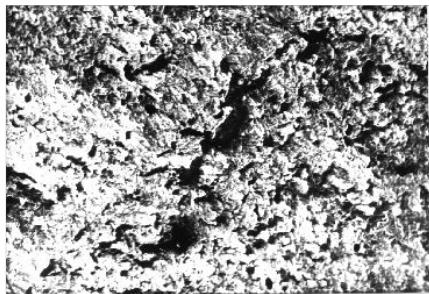
6.9. Экспертиза.

Фрактографическое исследование поверхности излома разрушенного фланца передней концевой части ротора турбины ТГЭ-150 из стали 26ХН3М2ФА



x 325

рис. 6



x81

Окисленная зона
распространения
магистральной трещины

Излом с
концентрическими
кольцами

«Очаг»

«Очаг»



Галтель
направление
кернация



x 15

2,25 мм

Рис. 2.

Резьба



x 60

2,25 мм

Пластический
Сдвиг

Рис. 3.

6.9. Экспертиза.

Возрастание ширины концентрических колец и скорости движения магистральной трещины с увеличением ее длины									
Длина магистральной трещины, мм									
0,4	1,0	1,9	3,0	4,3	5,5	7,2	9,2	11,7	14,7
Скорость движения магистральной трещины, V, мм/цикл									
0,4	0,6	0,9	1,1	1,3	1,3	1,7	2,0	2,5	3,0

Таким образом, вероятно, **причиной зарождения магистральной усталостной трещины** явился **пластический сдвиг металла стали в приповерхностном слое ротора в направлении резьбового соединения.**

В результате близости впадины первого резьбового зуба к поверхности (1,5мм), пластический сдвиг создал **технологический концентратор** напряжения, вблизи которого зародилась, и далее скачкообразно распространилась усталостная трещина.

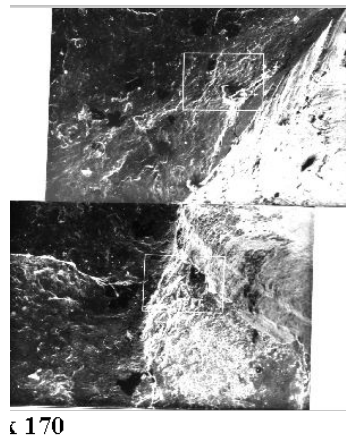
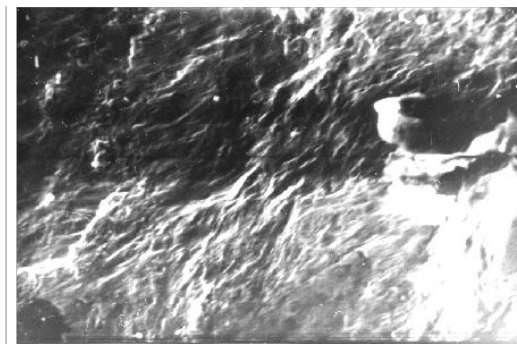
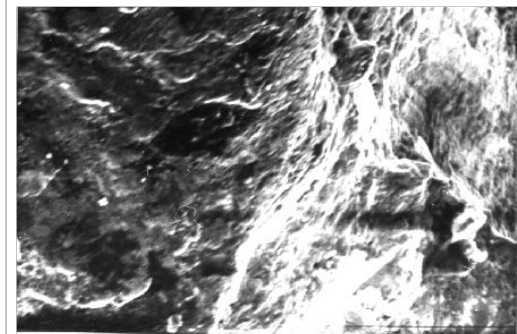


рис. 5



x 650



x 650

Зона распространения усталостной трещины от впадины 1-ого резьбового зуба



рис. 4

«Очаг»

x 650

Зона зарождения усталостной трещины вблизи впадины 1-ого резьбового зуба

Контрольные вопросы по Теме 6

- 1. Явление усталости металлов при циклическом нагружении. Дать определение.**
- 2. Механизм усталостного разрушения. Фрактографические особенности усталостного разрушения.**
- 3. Связь предела усталости с другими механическими свойствами материала изделия (прочностью, шероховатостью, размером, наличием концентраторов).**
- 4. Дать (написать) определения: «фреттинг- коррозионная усталость»; «термоусталость».**
- 5. Выбрать условия изменения приложенных напряжений и числа циклов до разрушения при малоцикловых (многоцикловых) испытаниях.**
- 6. Какие структуры обладают высокой (низкой) выносливостью (циклической прочностью): мартенсит; троостит; сорбит; перлит?**
- 7. Дать определение параметрам: R_σ , σ_m , σ_a , σ_{max}**
- 8. В чём отличие кривых усталости после испытания в морской воде и на воздухе?**
- 9. Нарисовать кривую усталости. По кривой определить предел усталости.**
- 10. Обозначение предела усталости.**

**Спасибо
за внимание**