

Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации  
Кафедра № 24 - «Авиационной техники»



Разрушающие факторы,  
непрерывно воздействующие на детали  
в процессе эксплуатации

Санкт-Петербург  
2008

Важнейшими причинами изменения служебных свойств систем, агрегатов, узлов и деталей воздушных судов в процессе эксплуатации, являются:

- внешние нагрузки;
- трение в сопряжениях деталей;
- естественное старение материалов;
- агрессивные среды, влага и пыль;
- солнечная радиация;
- высокие или низкие температуры;
- биологические вредители.

Наибольшее влияние на характеристика деталей оказывают следующие процессы:

- механические повреждения и деформации;
- изнашивание;
- коррозионное разрушение металлов;
- усталостное разрушение;
- старение материалов;
- образование вредных отложений.

# ИЗНАШИВАНИЕ

**Изнашиванием** называется процесс постепенного изменения размеров тела при трении, проявляющийся в отделении с поверхностей трения материала.

Результат изнашивания называется **износом**.

Основными характеристиками процесса являются

- **интенсивность изнашивания** (отношение износа к пути трения или к объему выполненной работы),
- **скорость изнашивания**  $V_{изн}$  (отношение износа ко времени, в течение которого он возник) и
- величина, обратная скорости изнашивания и называемая **износостойкостью** ( $1/ V_{изн}$ ).

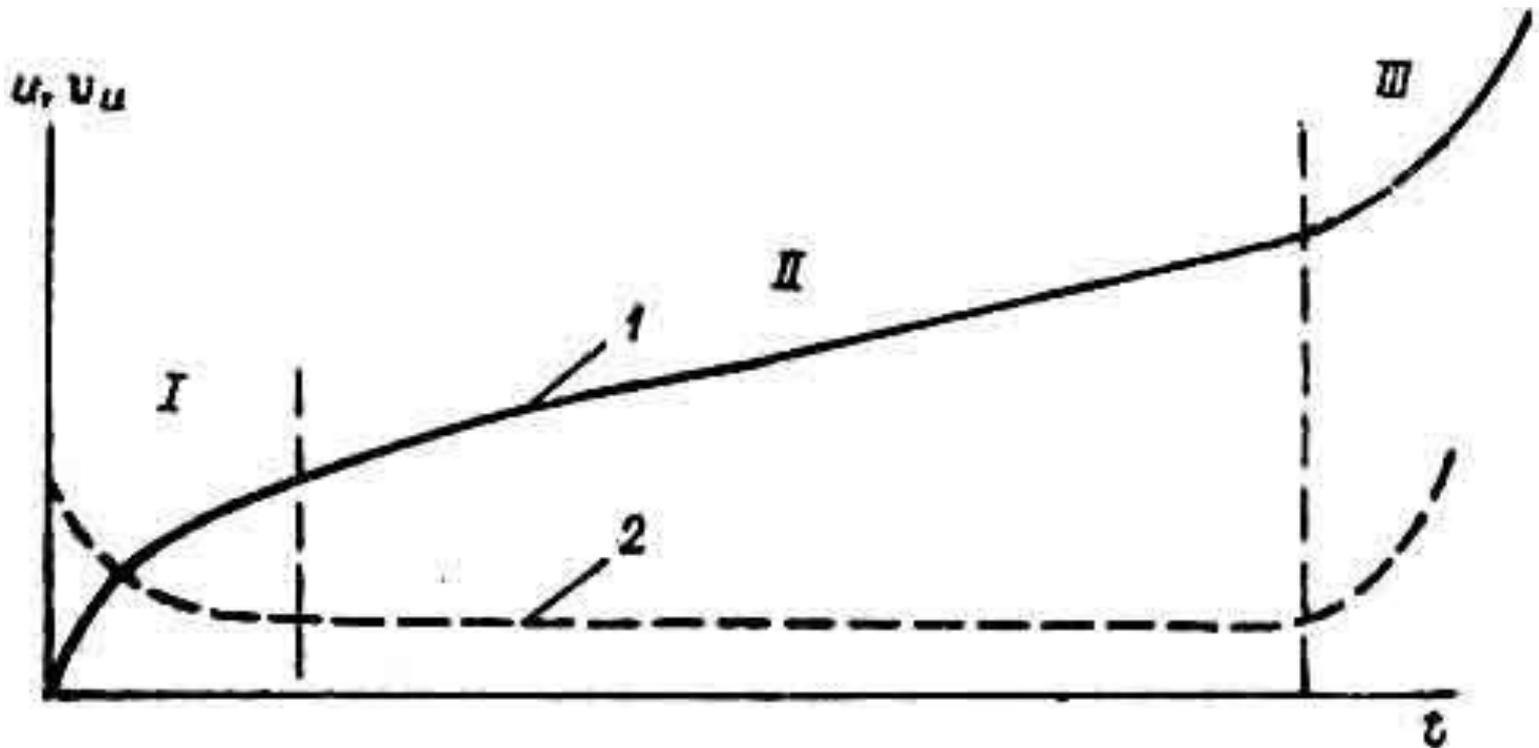


Рис. Зависимость износа  $u(t)$  и скорости изнашивания  $v(t)$  от времени  $t$  – кривая Лоренца:

1 -  $u(t)$  ; 2 -  $v(t)$ ; I – участок приработки; II – участок нормального износа; III – участок катастрофического износа

Графически полуслучайный процесс изнашивания представлен упрощенно на рис. в виде кривой Лоренца, Имеющей три характерных участка:

- приработки;
- нормального износа и
- катастрофического износа.

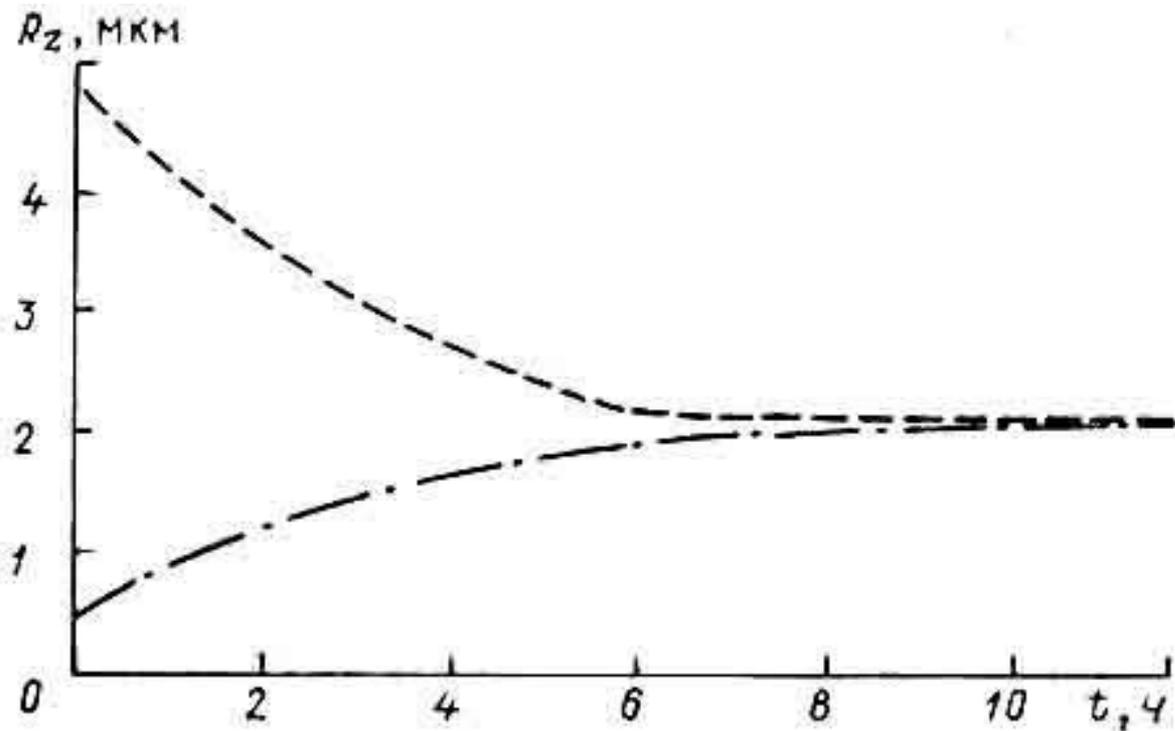


Рис. Образование «равновесной» шероховатости на деталях сопряжения на стали 45 и бронзы БрСНС-5-5-5 в процессе приработки:  
 · · · · · - сталь; - - - - бронза

Начальные моменты приработки характеризуются повышенными температурами и тепловыделением. Эти изменения приводят к образованию одинаковой («равновесной») шероховатости (см. рис.), обеспечивающей в дальнейшем наилучшие условия работы сопряжения.

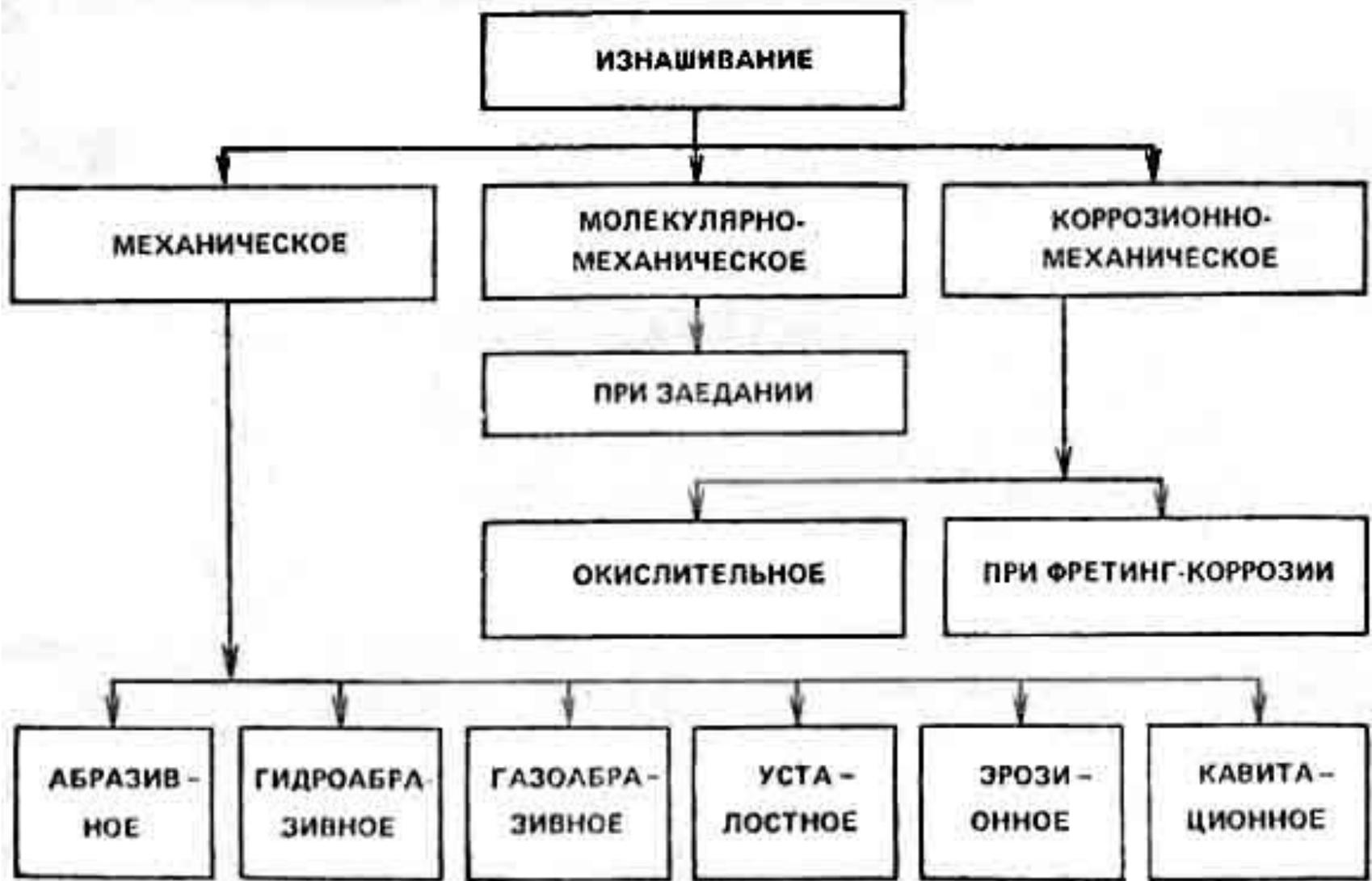


Рис. Классификация видов изнашивания

# Механическое изнашивание

***Механическим изнашиванием*** называется процесс отделения с поверхности трения материала в результате силового взаимодействия сопрягаемых деталей.

В свою очередь, механическое изнашивание подразделяют на:

- абразивное,
- гидроабразивное,
- газоабразивное,
- усталостное,
- эрозионное или ударный износ,
- кавитационное.

Абразивное, газоабразивное, гидроабразивное изнашивание подобно процессу резания металлов и происходит в результате механического воздействия на поверхность металла твердых абразивных (неорганических) частиц ( $\text{SiO}_2$  – двуокись кремния,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – оксид железа, оксиды Al, Ca, Mg, Na – и других элементов), содержащихся в почве и пыли. Размеры таких частиц могут быть 5...12 мкм, что позволяет им свободно проникать в незащищенные зазоры сопряжений, а твердость от 12 000 ( $\text{SiO}_2$ ) до 25 000 МПа ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), что намного превышает твердость рабочих поверхностей машин.

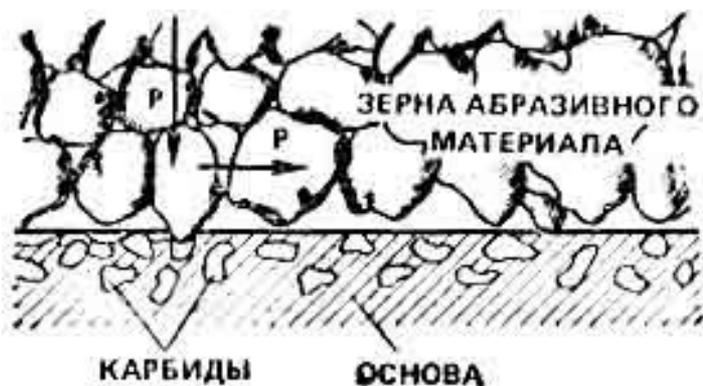


Рис. Схема абразивного изнашивания

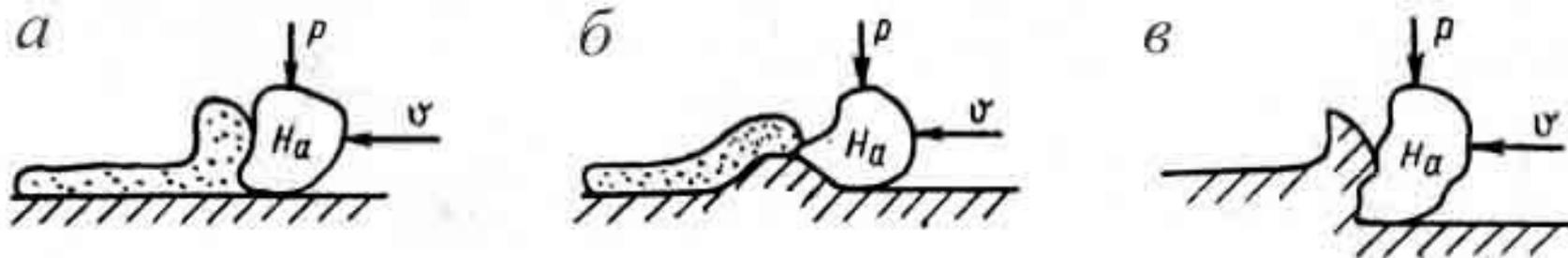


Рис. Взаимодействие абразивной частицы с поверхностью при абразивном изнашивании:

а – разрушение окисной пленки; б – пластическое деформирование; в – микрорезание;  $H_a$  – твердость абразивной частицы;  $P$  – нагрузка;  $v$  – скорость

Интенсивность абразивного изнашивания в большой степени зависит от степени превышения микротвердости абразивной частицы по отношению к твердости металла рабочего органа машины.

- Если твердость частицы  $H_a$  соизмерима с твердостью металла  $H_m$  ( $H_a \approx H_m$ ), то абразивные частицы лишь разрушают окисную пленку на поверхности металла (рис. ,а) что активизирует процесс изнашивания другого вида – коррозионно-механического.
- Если  $H_a > H_m$  ( $H_a = 1,7 H_m$ ), то абразивная частица пластически деформирует («оттесняет») поверхностный слой металла (рис. ,б).
- При  $H_a > 1,7 H_m$  абразивная частица внедряется острой гранью в поверхность, производя микрорезание (рис. ,в).

Усталостное изнашивание (питтинг) происходит при неоднократных циклических деформациях микрообъемов поверхности.

При этом на поверхности или на некоторой сравнительно небольшой глубине сначала образуются микротрещины, дальнейшее развитие которых приводит к выкрашиванию материала.

Усталостное изнашивание наиболее часто происходит у деталей, работающих при больших знакопеременных нагрузках (зубчатые колеса, подшипники качения, передаточные механизмы манипуляторов). Оно сопровождается увеличением шума и вибрацией.

При разборке сопряжения усталостное изнашивание может определяться визуально по наличию двух характерных областей:

относительно гладкой поверхности по краям микротрещин и шероховатой поверхности дна образовавшихся раковин.

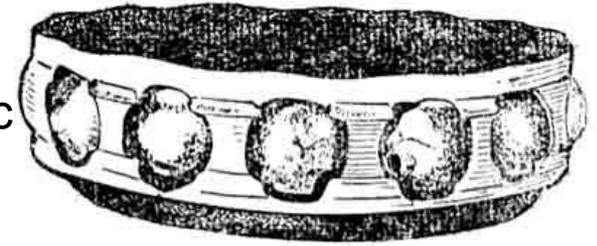
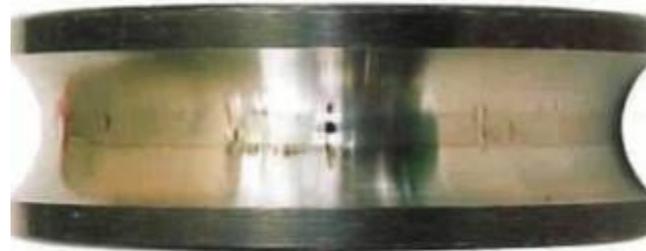
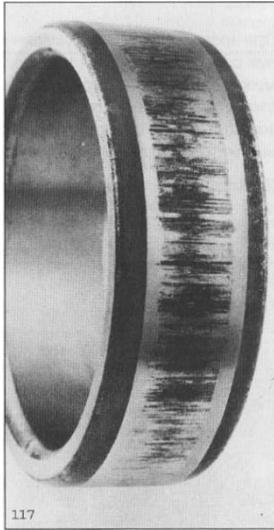


Рис. Разрушение шариков вследствие масляного голодания подшипника



**Бринеллирование** - (эффект Бринелля\*) (следы вдавливания) brinelling – образование вмятин на поверхностях качения подшипников. Бринеллирование является следствием действия больших сил, вдавливающих тела качения (шарики или ролики) в кольцо подшипника. При этом на дорожке кольца образуются углубления.



Эрозионное изнашивание поверхности происходит под воздействием на нее потоков жидкости или газа, движущихся с большими скоростями.

Эрозия металлов (от лат. erosio – разъедание) – постепенное разрушение поверхности металлических изделий в потоке газа или жидкости, а также под влиянием механических воздействий или электрических разрядов.

Эрозия металлов – комплексный физический и физико-химический процесс, протекающий в результате влияния окружающей среды, окисления, наклепа, температурных и остаточных напряжений, хрупкого и усталостного разрушения.

К эрозионному изнашиванию относятся газоэрозионное, гидроэрозионное и кавитационное изнашивания.

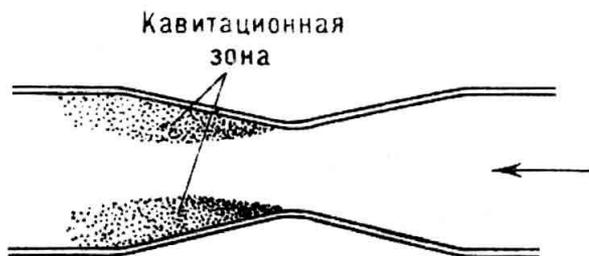


Рис. Кавитационная зона в трубке с местным сужением

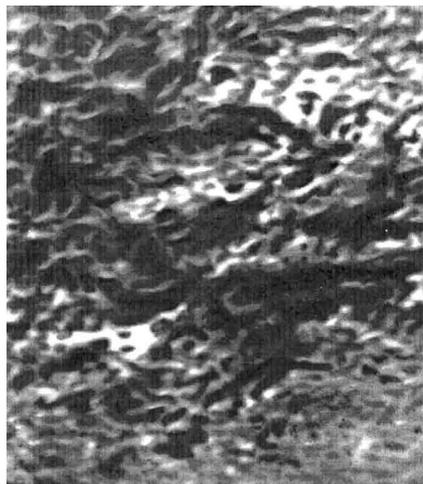


Рис. Участок разрушенной поверхности гребного винта

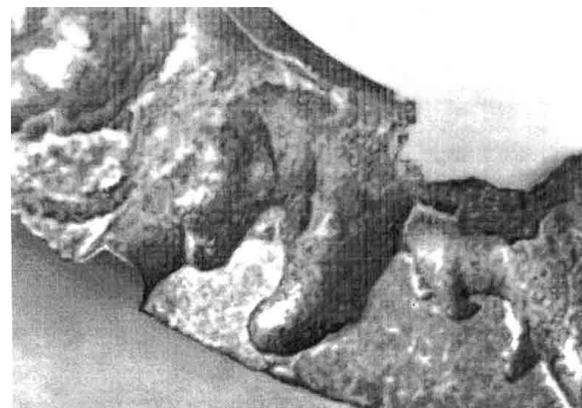


Рис. Всасывающий патрубок насоса, выполненный из чугуна, со следами кавитационной эрозии

Механический износ происходит в тех случаях, когда масло подается к деталям

- ***в недостаточном количестве*** или
- ***несоответствующего качества.***

Механический износ может быть сведен до минимума

**правильным подбором масла.**

# ***Молекулярно-механическое изнашивание***

***Молекулярно-механическое*** изнашивание проявляется при одновременном воздействии на материал механических и атомных или молекулярных сил трения.

ГОСТ 23.002-87 предусматривает только один подвид этого изнашивания –

***изнашивание при заедании***, возникающее за счет схватывания поверхностей, глубинного вырывания материала, переноса его с одной поверхности на другую.

Это явление наблюдается при недостаточной смазке, при значительном удельном давлении, когда две поверхности сближаются настолько плотно, что начинают действовать молекулярные силы, приводящие к схватыванию поверхностей при трении. При молекулярно-механическом износе возможно сравнительно медленное разрушение поверхностных слоев, либо на поверхности появляются глубокие задиры и вырыв значительных участков (наступает «заедание»).

Схватывание металлов при трении подразделяется на два рода.

Схватывание первого рода происходит при малых, а второго рода – при больших относительных скоростях трения.

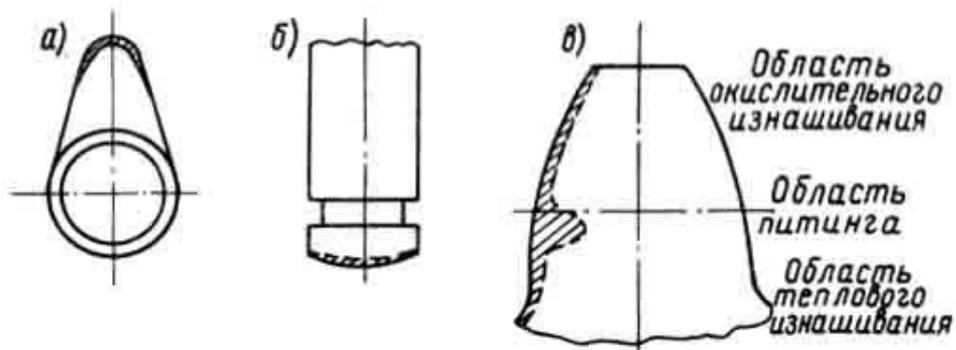


Рис. Зоны выкрашивания:  
*а* – кулачка; *б* – толкателя клапана; *в* –  
 зуба шестерни

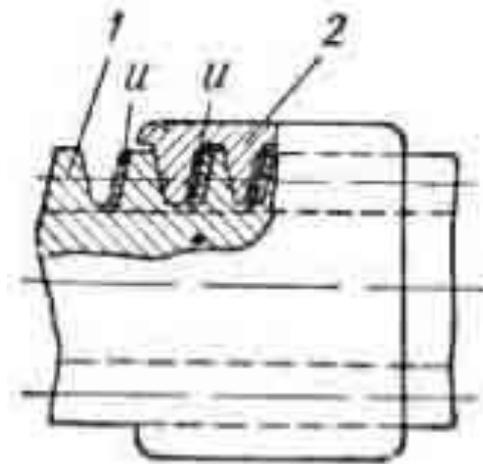


Рис. Зоны изнашивания резьбы  
 винта (отмечены буквой *u*):  
 1 – винт; 2 - гайка

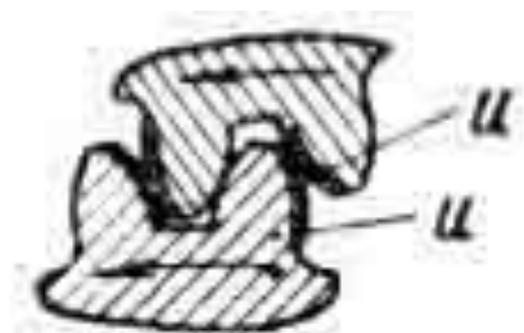


Рис. Зоны изнашивания зубчатых  
 колес (отмечены буквой *u*)

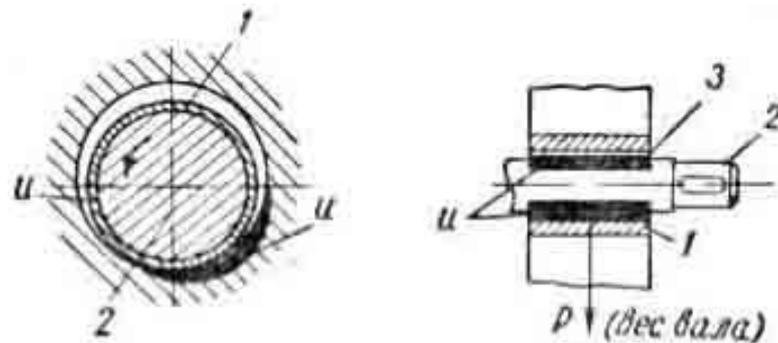


Рис. Зоны изнашивания подшипников  
 скольжения (отмечены буквой *u*):  
 1 – вкладыш подшипника скольжения; 2 -  
 шейка вала; 3 - зазор



**Рис. Задирь (питтинг) внутри головки  
рулежно-демпфирующего цилиндра (РДЦ)  
передней ноги самолета Ту-134**

# **Коррозионно-механическое изнашивание**

Коррозионный износ обычно появляется у деталей машин и установок, испытывающих непосредственное действие воды, воздуха, химических веществ, температуры. Если температура воздуха в пространстве (зоне) применения АТ неустойчива, то каждый раз при ее повышении содержащиеся в воздухе водяные пары, соприкасаясь с более холодными металлическими деталями, осаждаются на них в виде конденсата. Это вызывает коррозию металла, то есть соединение металла с кислородом воздуха.

Под влиянием коррозии, металл приобретает губчатую поверхность, теряет механическую прочность.

Обычно коррозионный износ сопровождается и механическим в силу сопряжения одной детали с другой. В этом случае происходит так называемое коррозионно-механическое изнашивание, то есть образуется комплексный износ.

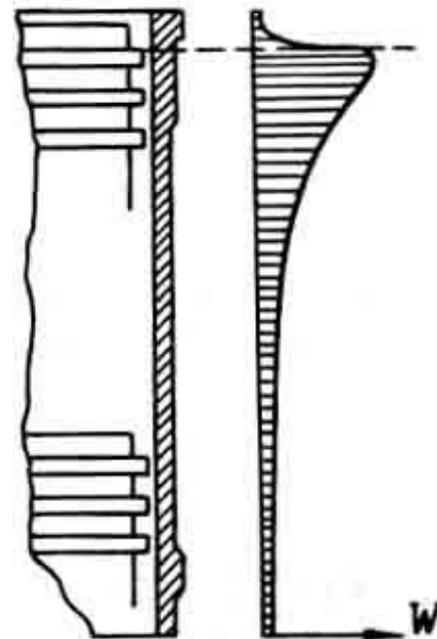


Рис. График  
неравномерности  
износа ( $W$ ) цилиндра по  
высоте

Мерами борьбы с коррозионно-механическим изнашиванием являются:

- улучшение коррозионной стойкости деталей двигателя;
- повышение качества масла и топлива;
- периодическая работа двигателя при длительной стоянке (через 15...30 дней);
- консервация двигателей по инструкции на длительный срок хранения;
- прокручивание роторов двигателя через 7...10 дней стоянки на 8...15 оборотов.

## ***Изнашиваем при фреттинге***

называют процесс механического изнашивания соприкасающихся деталей при малых колебательных относительных перемещениях.

Оно происходит обычно

- на поверхностях валов с напрессованными на них муфтами, дисками или обоймами подшипников скольжения;
- на осях и ступицах колес, опорных кольцах пружин, шпоночных и шлицевых соединениях;
- на опорных поверхностях корпусов двигателей и редукторов.

Характерными признаками фреттинг-изнашивания является налипание металла, появление раковин и трещин.

**Основное условие защиты** деталей машины от износа, их надежной работы

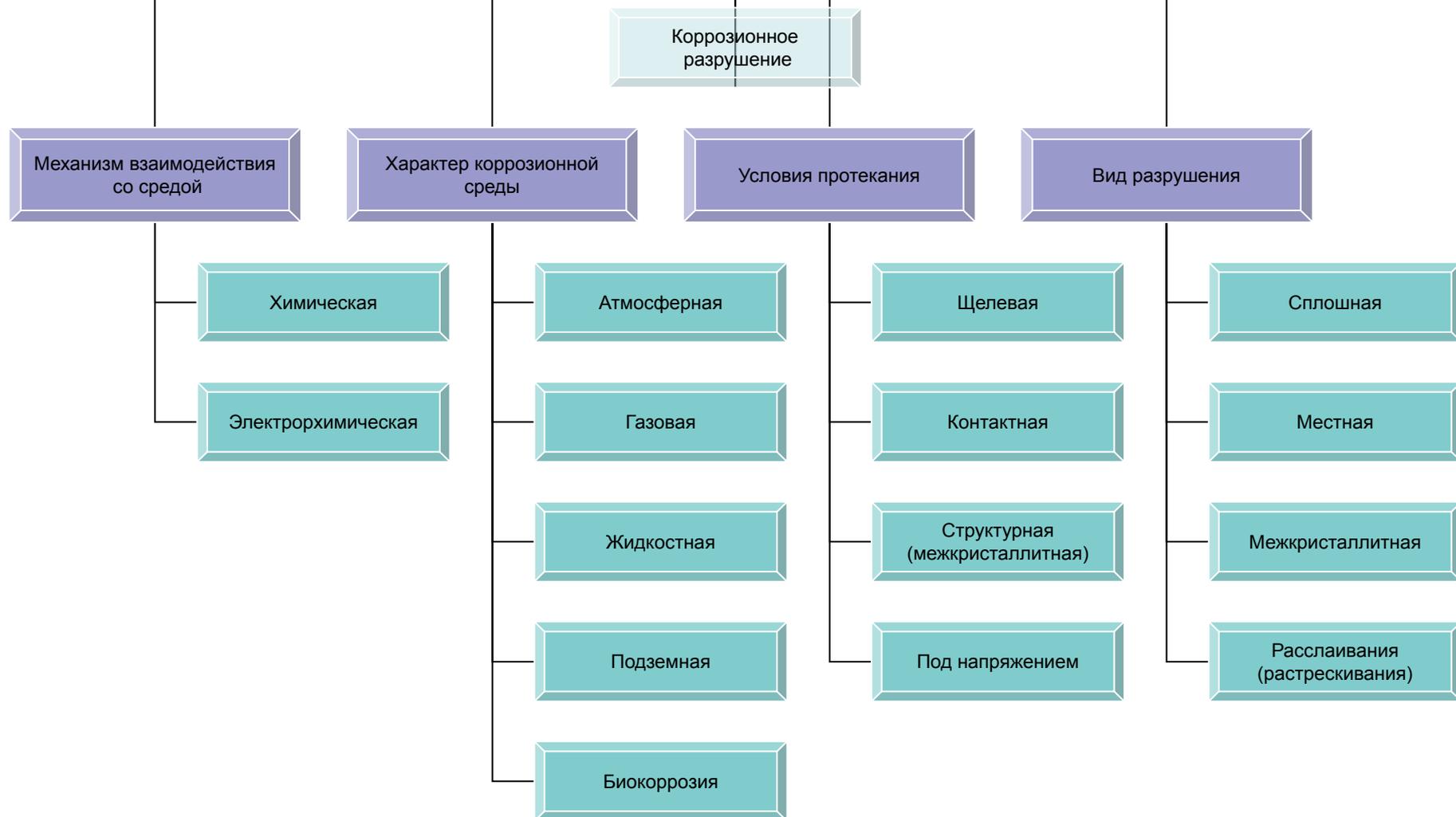
**– это регулярная и правильная смазка трущихся поверхностей.**

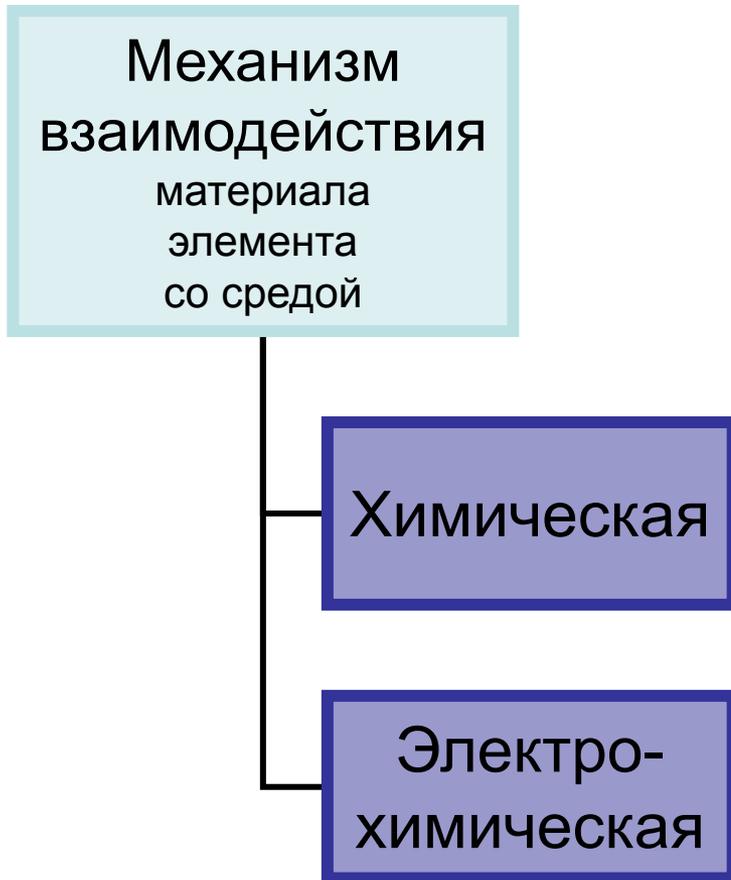
Смазанные поверхности во время работы разделяются слоем смазочного материала (например, масла), в результате этого

- мельчайшие неровности, которые в большом количестве имеются на этих поверхностях, не соприкасаются между собой.
- Уменьшению трения благоприятствует и подвижность смазки.
- Наконец, масло очень хорошо отводит тепло и уносит частицы металла, обладающие абразивным (истирающим) свойством.
- В то же время смазка предохраняет детали от коррозии.

# Коррозия

**Коррозией** называют процесс разрушения металлов вследствие химического или электрохимического взаимодействия их с внешней средой.





При **химической коррозии** материал детали разрушается в результате химической реакции с окружающей средой (газом, воздухом или жидкостью).

Интенсивность процесса химической коррозии зависит от химической активности среды и температуры, коррозионной стойкости материала. При повышении температуры интенсивность химической коррозии возрастает. Следует заметить, что в чистом виде химическая коррозия встречается редко

**Электрохимическая коррозия** – это коррозия протекающая в результате электрохимических процессов. При этом электролитом может служить вода или водные растворы кислот и щелочей, образующиеся при взаимодействии воды с топливом, маслами, газами и т. д.

# Механизм разрушения при электрохимической коррозии следующий:

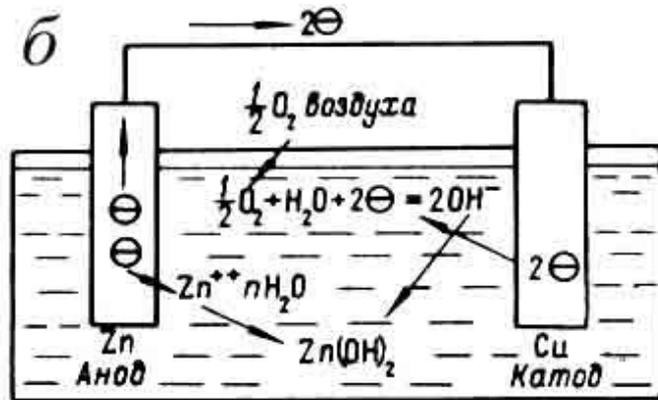
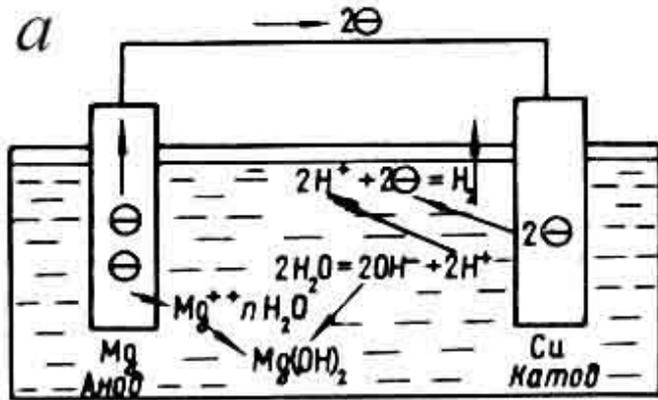


Рис. Схемы процессов электрохимической коррозии, протекающих с водородной (а) и кислородной (б) деполяризацией катода

потерянные металлом в анодной зоне электроды по электролиту перемещаются в катодную зону и там вступая в реакцию с водой и кислородом, образуют гидроксильные ионы. В результате реакции гидроксильных ионов с двухвалентными ионами железа (например) в анодной зоне образуется гидратированный оксид железа  $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{H}_2\text{O})_2$  - ржавчина.

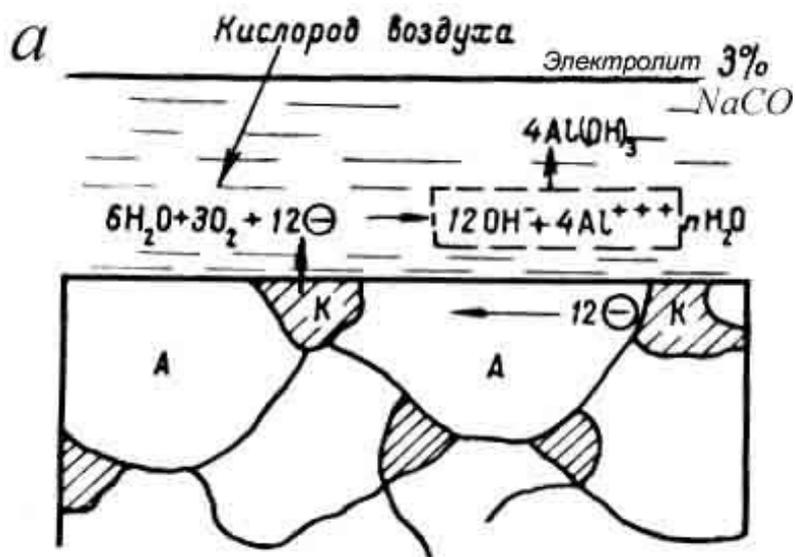


Рис. Схема электрохимической коррозии:

а – двухфазного сплава; б – чистого металла под каплей влаги

У некоторых сплавов металлов, например сталей, иногда электрохимические процессы протекают по границам кристаллов, обладающих разными электрохимическими потенциалами. При этом имеются отдельные зерна, обладающие либо анодными, либо катодными свойствами. Процесс разрушения металла при этом называется **межкристаллитной** коррозией

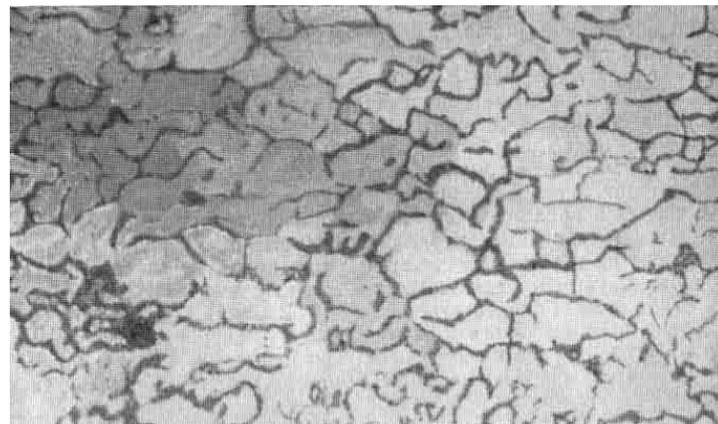


Рис. Межкристаллитная (интеркристаллитная) коррозия

# Характер коррозионно й среды

Атмосферная

Газовая

Жидкостная

Подземная

Биокоррозия

## Атмосферная коррозия.

Содержащиеся в атмосфере твердые частицы различных химических соединений при оседании на поверхность металла образуют совместно с влагой электролит, обуславливающий протекание электрохимической коррозии.

Интенсивность этого процесса зависит от изменений температуры. Так, при переходе от отрицательных к положительным температурам коррозия усиливается за счет конденсации влаги на поверхности. Скорость и характер атмосферной коррозии зависят также от степени увлажнения поверхности.

## **Газовая коррозия**

Газовая коррозия происходит, как правило, в результате воздействия агрессивных газов высокой температуры. Процесс сопровождается химическими реакциями и встречается в двигателях внутреннего сгорания, газогенераторах, компрессорах и т. д. Следует также иметь в виду, что газовая коррозия происходит и при технологических процессах обработки металлов, таких, какковка и штамповка, термообработка, сварка и т. д.

## **Жидкостная коррозия**

Жидкостная коррозия происходит в результате химического взаимодействия поверхности металла с жидкостями. Наиболее коррозионно активными компонентами жидкостей при этом являются сера и сернистые соединения, а также органические кислоты, образующиеся в результате окисления углеводородов (смазок) под влиянием кислорода воздуха. Жидкостная коррозия особенно сильно проявляется у элементов двигателей внутреннего сгорания, работающих на топливах с высоким содержанием серы.

## **Подземная коррозия**

Под подземной коррозией понимается электрохимический процесс разрушения металлических и бетонных конструкций, находящихся в грунте, под влиянием грунтовой влаги.

## **Биологическая коррозия**

Биологическая коррозия (биокоррозия) происходит в результате воздействия на металлы различных микроорганизмов.

Это воздействие может быть непосредственным, когда на поверхности находятся бактерии, питательной средой которых является железо и его сплавы. Чаще всего, однако, воздействие микроорганизмов проявляется косвенно, когда продукты их жизнедеятельности образуют среду, благоприятствующую химической или электрохимической коррозии.

Биокоррозия происходит чаще всего во влажной среде и при сравнительно высокой температуре воздуха (10...40°C). В некоторых случаях биокоррозия явилась причиной разрушения топливных насосов, баков и других емкостей для хранения топлив и масел.

**Условия протекания  
коррозионного  
процесса**

**Щелевая**

**Контактная**

**Структурная  
(межкристаллитная)**

**Под  
напряжением**

## **Щелевая коррозия**

Щелевая коррозия происходит в щелях и зазорах металлических конструкций, а также в зонах контакта металла с неметаллами. Непосредственной причиной щелевой коррозии является появление анодно-катодной пары из-за неравномерной концентрации агрессивного компонента вне и внутри щели. Возникающий при этом электрохимический процесс приводит к интенсивному разрушению участка поверхности, являющегося анодом.

# Контактная коррозия

Контактная коррозия происходит при электрохимическом взаимодействии металлов, имеющих разные потенциалы. В существующих конструкциях ВС можно выделить три типа контактов, при которых происходит коррозия:

- контакты **разных металлов**, находящихся в электропроводящей среде;
- контакты одинаковых металлов, расположенных **в средах с различной концентрации**;
- контакты при **разных температурах**

Металл в контактной паре, имеющей более положительный потенциал, является катодом. Металл с меньшим потенциалом, являющийся анодом, подвергается в процессе контактной коррозии наиболее интенсивному разрушению.

Исходя из условий контактной коррозии, различают:

1. **Ограниченно допустимые**,
2. **Допустимые** и
3. **Недопустимые сочетания металлов в сопряжениях.**

На интенсивность контактной коррозии влияет и **соотношение площадей поверхностей анодных и катодных участков.**

Так, если поверхность катода гораздо больше поверхности анода, то, менее благородный металл подвергается интенсивной коррозии. Например, если поверхность стальных листов, соединенных медными заклепками, в 100 раз больше суммарной поверхности заклепок, то скорость коррозии соединения будет примерно одинаковой. При обратном соотношении (соединение медных листов стальными заклепками) скорость коррозии заклепок возрастает в 100 раз.

## **Структурная коррозия**

Структурная коррозия возникает при неоднородной структуре материала и проходит в соответствии с механизмом протекания межкристаллитной коррозии.

Возникновение структурно неоднородных участков в сталях вызывается, в частности, различными скоростями диффузии углерода и легирующих элементов (например, хрома) при образовании твердого раствора.

Наиболее высокую склонность к межкристаллитной коррозии имеют стали с ферритной структурой, а также алюминиевые сплавы с содержанием 4...5% меди (ковкие - АК2, АК8, дюралюмины - Д16 и др.); особенно при перегревах во время термообработки и сварке.

Металл детали при межкристаллитной коррозии разрушается по границам зерен, и деталь очень быстро выходит из строя.

Межкристаллитную коррозию трудно обнаружить до разрушения детали.

Поэтому для предотвращения внезапных отказов детали из нержавеющей стали в процессе ремонта сваркой (или наплавкой) проверяют на склонность к межкристаллитной коррозии.

## Коррозия под напряжением

Коррозия под напряжением – это процесс разрушения поверхностей материалов при одновременном воздействии коррозионной среды, а также механических напряжений.

При постоянных растягивающих напряжениях, не превышающих предел текучести, и одновременно воздействию коррозионной среды на поверхности материала могут интенсивно развиваться трещины (**коррозионное растрескивание**), резко снижающее несущую способность конструкции.

При одновременном воздействии коррозионной среды и циклической нагрузке снижается предел выносливости конструкции (**коррозионная усталость**). Это явление особенно характерно для таких деталей, как рессоры, пружины, канаты, штоки гидроцилиндров и т. д.

В определенной степени коррозионно-механическое изнашивание также может интерпретироваться как коррозия под напряжением.

Особенностью этого разрушения является локальный характер происходящего явления.

**По характеру  
разрушения**

**равномерная**

**местная**

**межкристаллитная**

**Коррозионное  
растрескивание**

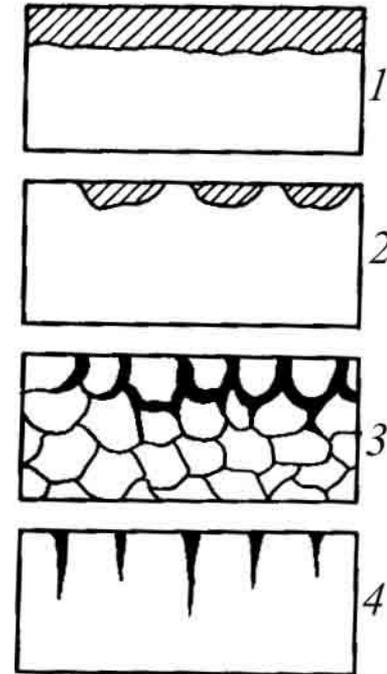


Рис. Основные виды  
коррозионного разрушения:  
1 – равномерная; 2 – местная  
коррозия; 3 – межкристаллитная; 4 –  
коррозионное растрескивание

## **Равномерная коррозия**

Равномерная коррозия характеризуется развитием процесса по всей поверхности металла с одинаковой скоростью, в результате чего слой продуктов коррозии получается более или менее одинаковым по толщине.

## **Местная коррозия**

Местная коррозия протекает избирательно и характеризуется разрушением отдельных участков поверхности металла. При этом очаги коррозии могут быть точечными или язвенными. Местная коррозия оказывает более неблагоприятное влияние на эксплуатационную надежность изделий, чем равномерная, поскольку вызывает неравномерное разрушение металла и образование концентраторов напряжений.

# Межкристаллитная коррозия

Межкристаллитная коррозия развивается по границам зерен сплава и приводит к нарушению связи между кристаллами.

Межкристаллитная коррозия вызывает значительное ухудшение механических свойств изделия и является весьма коварной, так как внешне почти ничем не проявляется.

Межкристаллитная коррозия может быть обнаружена:

- по утрате изделием **металлического звука**,
- по снижению **электропроводности**, а также
- по уменьшению **пластичности** и **прочности**.



Вихретоковый  
дефектоскоп  
“ВД-96”



Толщиномер DMS  
(Германия)



Ультразвуковые  
микропроцессорные  
толщиномеры  
“Булат-1S” и БУЛАТ®-1



## Коррозионное растрескивание

Коррозионное растрескивание является следствием совместного действия на металл агрессивной среды и механических растягивающих напряжений. Оно развивается при длительной работе изделия в тяжелых условиях коррозии под напряжением.

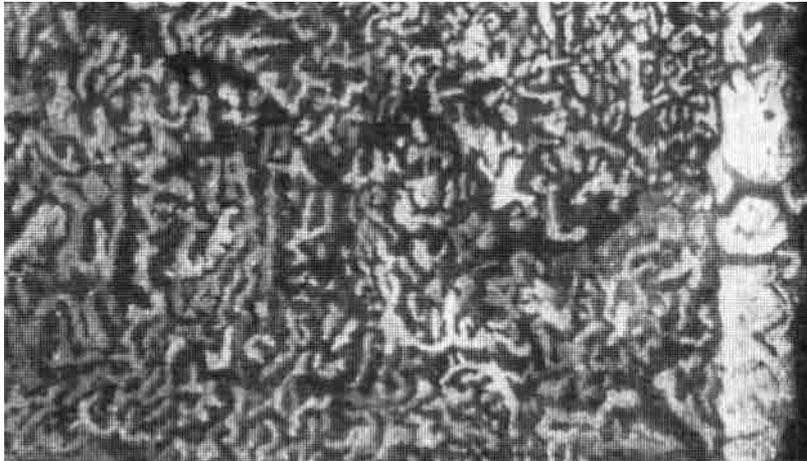


Рис. Коррозионное растрескивание

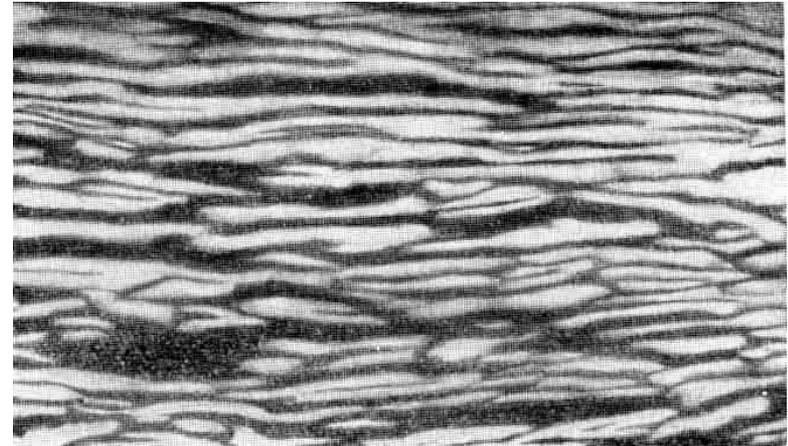
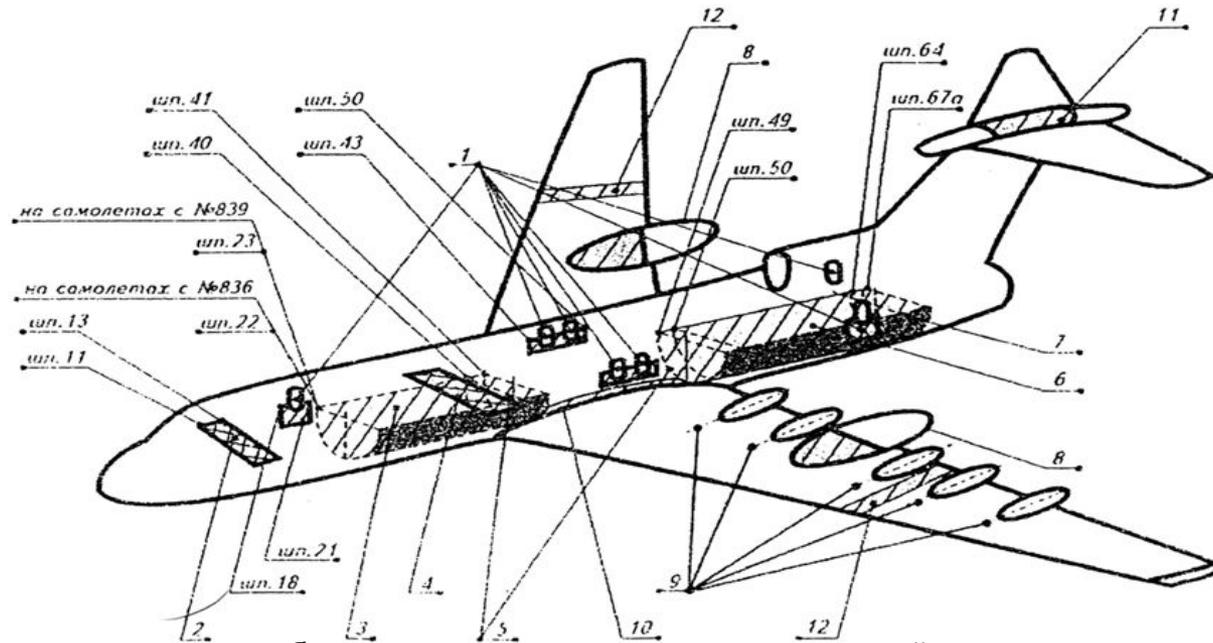


Рис. Расслаивающая коррозия



**Рис. Расслаивающаяся коррозия**  
стенки верхнего пояса второго лонжерона центроплана шп. № 34 слева (Ту-134А бортовой номер RA 65618 Ф-12 к/н № 12 от 26.01.2005 г.; С.Н.Э.- 30 лет 6 мес., 34647 л.ч., 20237,5 пол., П.П. Р.- 1 год 8 мес., 2419 л.ч., 1011,5 пол.)

# КАРТА КОРРОЗИОННО-ОПАСНЫХ ЗОН САМОЛЕТА Ту-154



1. Внутренняя поверхность обшивки и элементы каркаса вокруг аварийных выходов и входных дверей.
2. Элементы конструкции пола переднего туалета (балки шп11-13).
3. Внутренняя поверхность обшивки фюзеляжа и элементы каркаса в багажном отделении №1 (стр22-36-22 шп22-40)
4. Элементы конструкции пола кухни (балки шп30-36)
5. Внутренняя поверхность обшивки фюзеляжа и элементы каркаса в техническом отсеке №3 в районе шп40-4, стр22-36-22, шп49-50, стр22-36-22 ).
6. Внутренняя поверхность обшивка фюзеляжа и элементы каркаса в багажном отделении №2 (стр22-36-22, шп50-64).
7. Внутренняя поверхность обшивки фюзеляжа и элементы каркаса в техническом отсеке №4 ( стр20-36-20, шп64-67А, днище шп67А на высоту 400мм от стр36 ).
8. Обшивка верхних панелей крыла под обтекателем gondoly шасси.
9. Передние узлы навески балок закрылков.
10. Поверхность крыла под зализом крыла с фюзеляжем
11. Верхняя часть центрального узла стабилизатора.
12. Элементы конструкции в зоне стыка ЦЧК с ОЧК.

## ПРИЗНАКИ ПОЯВЛЕНИЯ КОРРОЗИИ

1. **Вспучивание лакокрасочного покрытия.** Оно может быть размером с булавочную головку и может доходить до сплошного отслаивания и шелушения покрытия.

Вспучивание покрытия легко разрушается при механическом воздействии, вскрывая очаги коррозии. Это способствует ускорению процесса коррозии.

**П р и м е ч а н и е.** В некоторых случаях за признаки появления коррозии можно принять следы ранее произведенной обработки поверхности, покрытые лаком. Они разбросаны по поверхности в виде небольших точек темного цвета без налета порошка и легко просматриваются сквозь неразрушенную лаковую пленку при помощи лупы.

2. Признаком коррозии **алюминиевых сплавов** служит появление на поверхности детали **белых или серых пятен** или отдельных изолированных друг от друга еле заметных язвин, иногда имеющих вид черных точек с налетом порошка.

3. Коррозия **магниевого сплава** обнаруживается по вспучиванию лакокрасочного покрытия и появлению **влажного солеобразного налета грязно-белого цвета.**

При эксплуатации и обслуживании ВС особое внимание следует обращать на сохранность защитных покрытий деталей из магниевого сплава, так как они менее стойки к коррозии по сравнению с деталями, изготовленными из других сплавов. Кроме того, эти детали, будучи сильно поврежденными коррозией, теряют свою прочность.

Процесс коррозии магниевого сплава может развиваться интенсивно, если своевременно не будут удалены продукты коррозии и восстановлено покрытие.

4. Коррозия **стали** сопровождается образованием на поверхности детали **коричневато-красного налета** — ржавчины. Ржавчина иногда выступает из-под разрушенного лакокрасочного покрытия.

5. Коррозия **медных сплавов** - сопровождается образованием на поверхности детали налета **черного** или **изумрудно-зеленого цвета.**

Оценка коррозии осуществляется путем определения весовой потери металла и степени разрушения его.

### Пятибалльная шкала коррозионной стойкости по Круппу

Характеристика стойкости материала	Потеря веса, г/м <sup>3</sup> час	балл
Весьма устойчив	До 0,1	1
Устойчив	0,1...1,0	2
Сравнительно устойчив	1,0....3,0	3
Малоустойчив	3,0....10,0	4
Неустойчив	Более 10	5

Потери металла по весу (коррозионные потери) представляют собой количество металла, превращенное в продукты коррозии за данный промежуток времени.

В зависимости от характера продуктов коррозии потери металла могут определяться убылью в весе или, наоборот, привесом.

Методы защиты от коррозии можно разделить на три группы: повышение коррозионной стойкости самих элементов конструкции; воздействие на среду; комбинированные.

Методы защиты от коррозии

повышение  
коррозионной стойкости  
самых элементов конструкции

воздействие  
на среду

комбинированные

Способы повышения коррозионной стойкости металлических изделий

Конструктивные способы

Уменьшение щелевой коррозии

Уменьшение накопления влаги

Предотвращение контактной коррозии

Нанесение защитных покрытий

Гальванических

Оксидных, фосфатных

Органических, полимерных

Активное воздействие на коррозионную среду

Контактные ингибиторы

Летучие ингибиторы

## **повышение коррозионной стойкости самих элементов конструкции**

К первой группе относятся такие методы, как :

- нанесение различных защитных покрытий;
- Повышение коррозионной стойкости самого металла легированием
- Замена металлических деталей на пластмассовые там, где это возможно.

## **воздействие на среду**

К методам второй группы следует отнести:

- герметизацию сопряжений,
- устранение зазоров, щелей и застойных зон,
- введение в смазки противокоррозионных присадок,
- регулярную консервацию деталей.

## **Комбинированные**

Комбинированные методы представляют собой сочетание указанных выше мероприятий первой и второй групп.

Однако описанные

**методы защиты от коррозии ее полностью**

**не исключают.**

# Газовая эрозия и эрозионная стойкость материалов

*Эрозия* представляет собой процесс механического поверхностного разрушения материала под воздействием внешней среды.

Эрозия происходит при обтекании изделий потоком твердых, жидких или газообразных частиц или при электрических разрядах. При этом ударяющиеся о поверхность материала мельчайшие частицы потока разрушают поверхностный слой и приводят к образованию каверн, бороздок и т. д.

Процесс эрозии усиливается

- с увеличением кинетической энергии потока,
- повышением температуры,
- при коррозионном действии среды и т. д.

# Усталость (циклическая прочность) авиационных конструкций

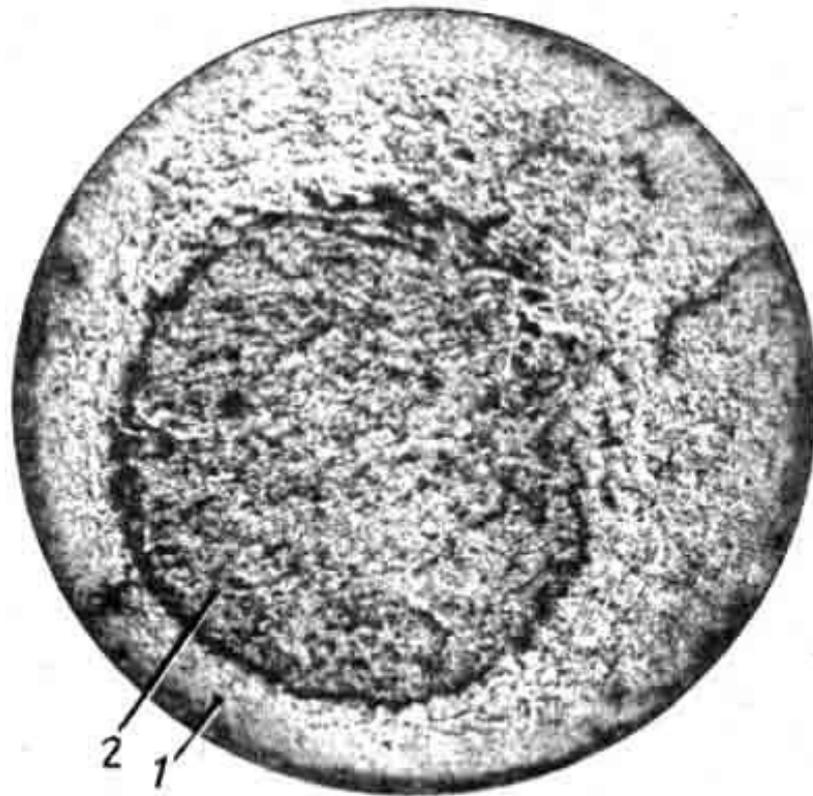


Рис. Характерный вид  
усталостного излома:

1 – зона постепенного разрушения; 2  
– зона быстрого разрушения

Давно было замечено, что образец материала, будучи нагружен переменным напряжением, через некоторое число нагружений разрушается, хотя при этом напряжение существенно ниже его временного сопротивления  $\sigma_b$ . Излом разрушившегося образца имеет своеобразный характерный вид (рис. ).

Можно отметить две зоны разрушения – медленного, характеризуемого определенной «затертостью» поверхности сечения и быстрого, имеющего шероховатую поверхность сечения и соответствующего обычному статическому разрушению образца.

Длительное время не было сколь-нибудь уверенного физического объяснения этому явлению и соответствующей теории разрушения. Согласно современным представлениям, объяснение указанного раннего разрушения лежит в поликристаллической природе материала и его атомной структуре.

Наибольшее распространение в настоящее время получила так называемая теория дислокаций, предложенная в 1929 г. Делингером.

Атомы в кристаллическом твердом теле располагаются в пространстве закономерно, периодически повторяясь в трех измерениях через строго определенные расстояния, то есть образуют **кристаллическую решетку**.

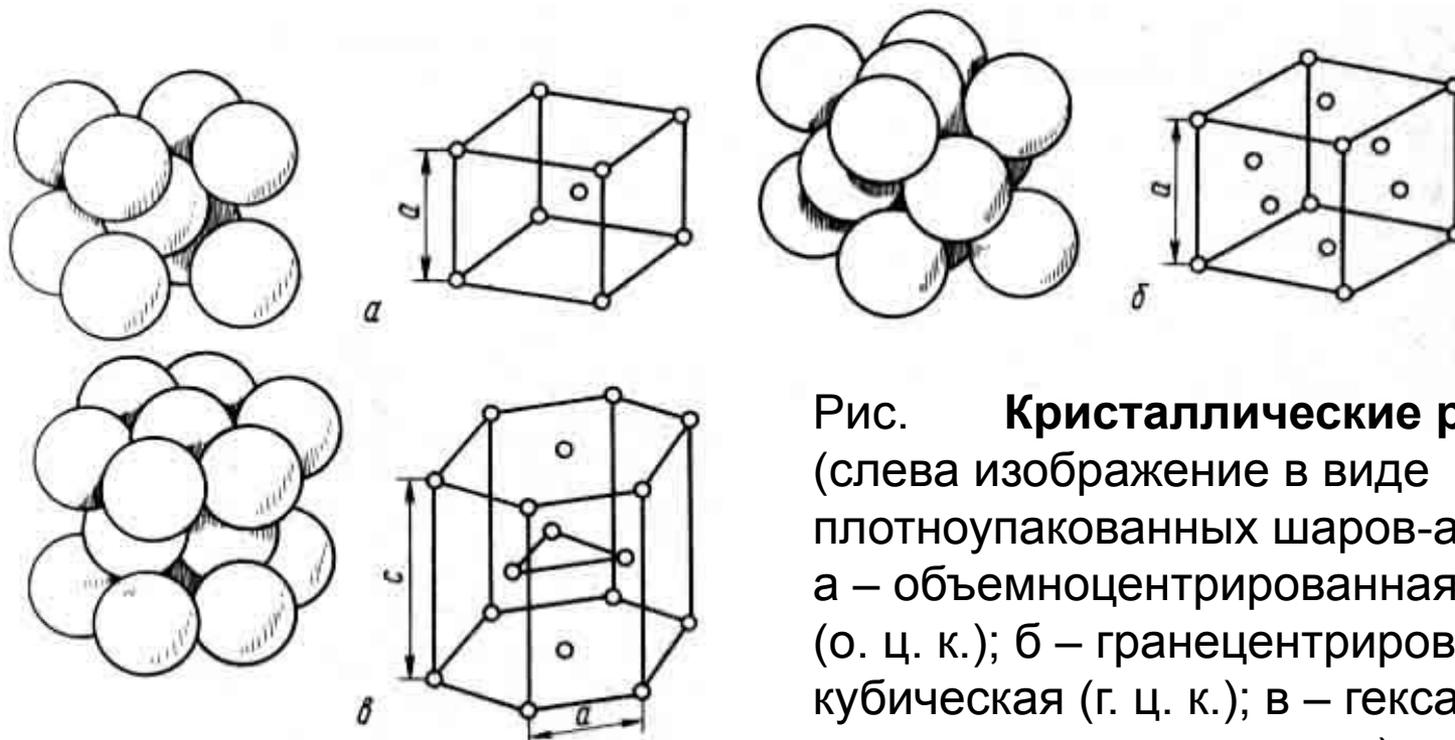


Рис. **Кристаллические решетки** (слева изображение в виде плотноупакованных шаров-атомов): а – объемноцентрированная кубическая (о. ц. к.); б – гранецентрированная кубическая (г. ц. к.); в – гексагональная плотноупакованная г.п. у.)

Сумма кристаллов образует кристаллит (зерно), а зерна, связанные прослойкой образуют поликристаллический образец.

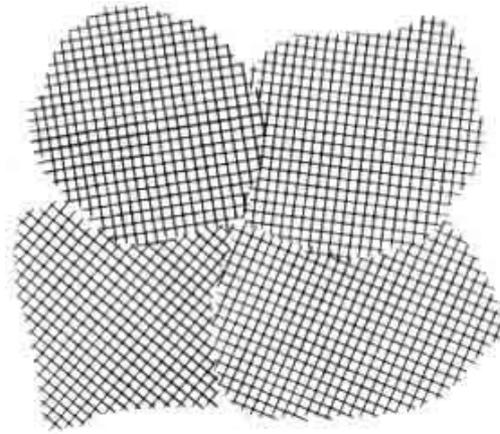
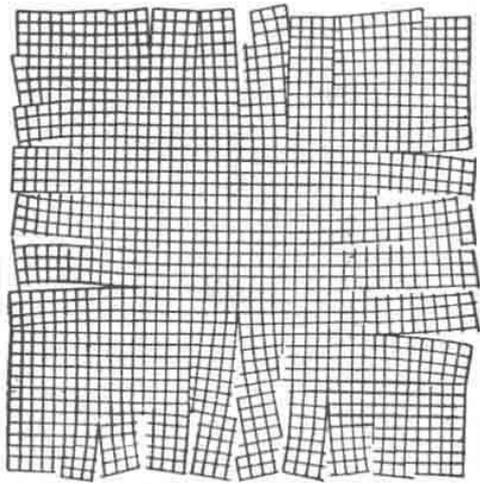


Рис. **Схемы структуры поликристалла твердого тела**

(слева схема кристаллической решетки с дефектами; справа – отдельные зерна, ориентированные произвольным образом)

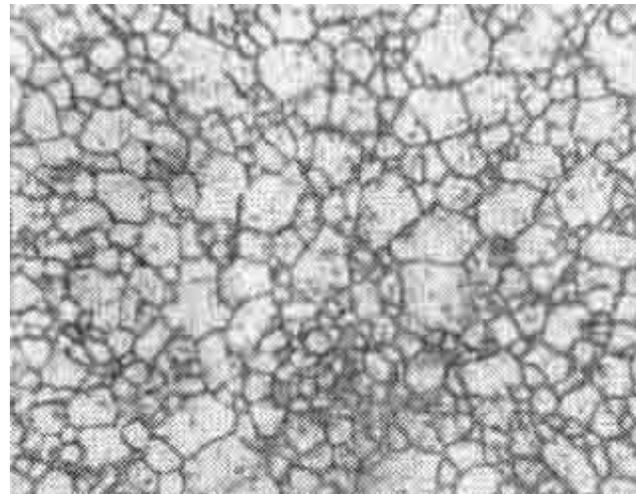


Рис. **Электронные микрофотографии блочной (мозаичной) структуры поликристалла твердого тела**

(разный масштаб увеличения)

Обычно кусок металла состоит из скопления большого числа маленьких кристаллов неправильной формы, называемых **зернами**.

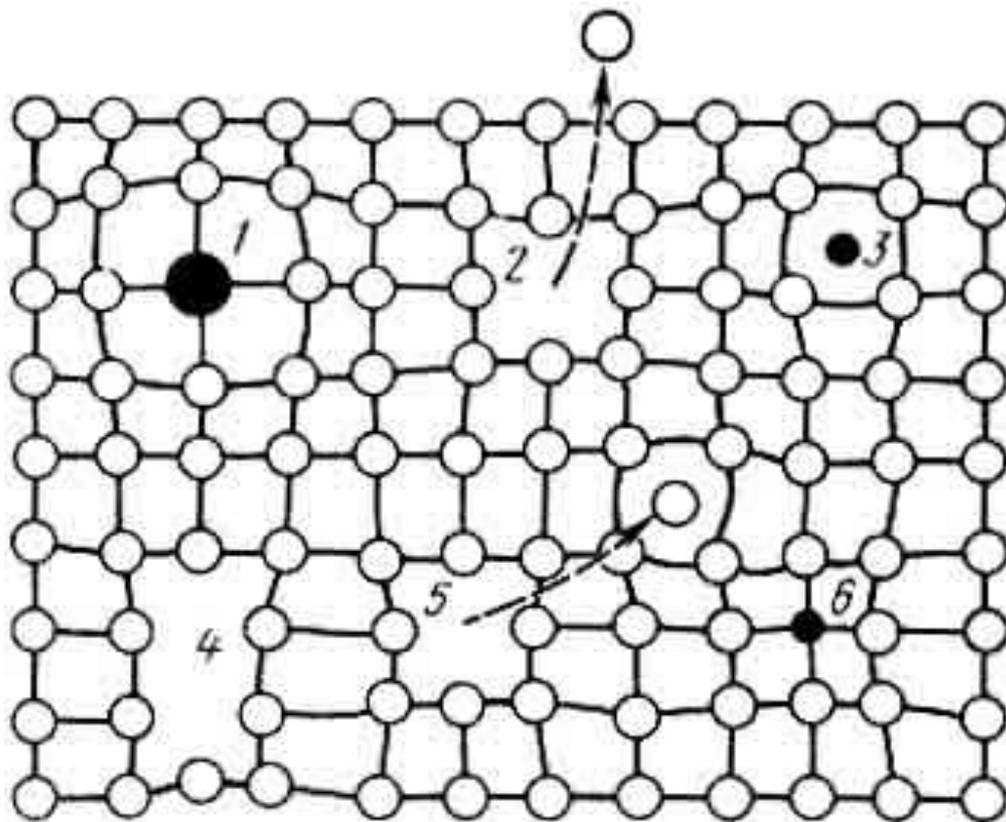


Рис. **Схема точечных дефектов в кристалле:**

1 – примесный атом замещения; 2 – дефект Шоттки; 3 – примесный атом внедрения; 4 – дивакансия; 5 – дефект Френкеля (вакансия и межузельный атом); 6 – примесный атом замещения

*Дислокация* в дословном переводе – смещение.

К точечным дефектам в кристалле относят **вакансии** (узлы в кристаллической решетке, свободные от атомов), **межузельные атомы** (атомы, находящиеся вне узлов кристаллической решетки), а также **примесные атомы**, которые могут или замещать атомы основного металла (примеси замещения), или внедряться в наиболее свободные места решетки (поры или межузлия) аналогично межузельным атомам (**примеси внедрения**) (рис.).

Современная теория дислокаций учитывает смещение отдельных атомов в процессе диффузии, приводящее к нарушению правильности в атомной решетке.

Линии дислокаций связывает отдельные нарушения в атомных слоях.

Пересечение дислокаций образует вакансии, а группировка вакансий – поры, которые уже физически нарушают сплошность материала и является исходным очагом для зарождения трещины.

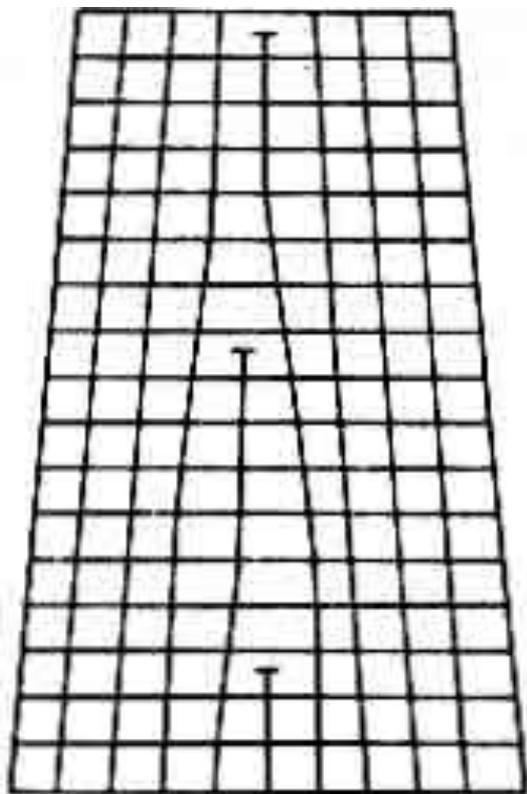


Рис. **Дислокационное строение малоуглеродистой стали**

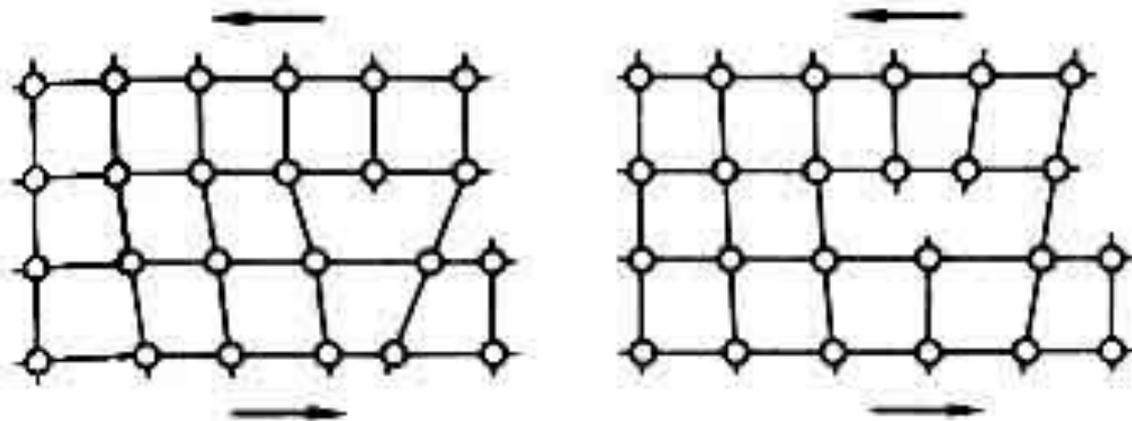


Рис. **Схема сдвига дислокаций**

Исходя из указанного, можно представить следующим образом

## **схему разрушений под влиянием переменных напряжений:**

1. Поры, нарушение сплошности. Зарождение **субмикротрещины**, которая может быть зафиксирована только с помощью электронного микроскопа.
2. Объединение пор и образование **микротрещины**, захватывающей часть или все отдельное зерно.
3. Объединение трещин в **более крупные микротрещины**, захватывающие уже ряд зерен. Эти микротрещины могут быть зафиксированы с помощью металлографического микроскопа.
4. Крупные микротрещины образуют **макротрещины**, видимые уже невооруженным глазом.
5. Макротрещины, объединяются в **магистральную трещину**, приводящую к нарушению поперечного сечения образца.
6. Происходит разрушение от недостатка статической прочности, появившееся вследствие нарушения магистральными трещинами сечения образца.

# схема разрушений под влиянием переменных напряжений:

1. Поры, нарушение сплошности.  
Зарождение **субмикротрещины**,  
которая может быть зафиксирована  
только с помощью электронного  
микроскопа.



Рис. Электронный  
микроскоп – внешний  
вид

2. Объединение пор и образование **микротрещины**, захватывающей часть или все отдельное зерно.
3. Объединение трещин в **более крупные микротрещины**, захватывающие уже ряд зерен. Эти микротрещины могут быть зафиксированы с помощью металлографического микроскопа.



**Рис. Металлографический микроскоп – внешний вид**

4. Крупные микротрещины образуют **макротрещины**, видимые уже невооруженным глазом.



5. Макротрещины, объединяются в **магистральную трещину**, приводящую к нарушению поперечного сечения образца.

6. Происходит разрушение от недостатка статической прочности, появившееся вследствие нарушения магистральными трещинами сечения образца.

Рис. **Лупы кратного увеличения**



Рис. **Биноккулярная лупа**

Присущие поликристаллическому образцу микродефекты являются очагами зарождающегося усталостного повреждения.

Но еще более уязвимым являются поверхностный слой материала в конструктивном образце, где сосредотачиваются уже макродефекты, приводящие к существенному снижению прочности такого образца.

Поверхности присущи такие несовершенства, как

- трещиноватость,
- коррозия,
- повреждения от износа,
- пониженная пластичность.

Кроме того, в сложных напряженных состояниях наибольшие расчетные напряжения, как правило, получаются на поверхности.

На поверхности же имеют место также концентраторы напряжений или в виде **резких изменений геометрии конструкции детали**, или в виде **несовершенства технологической обработки**.

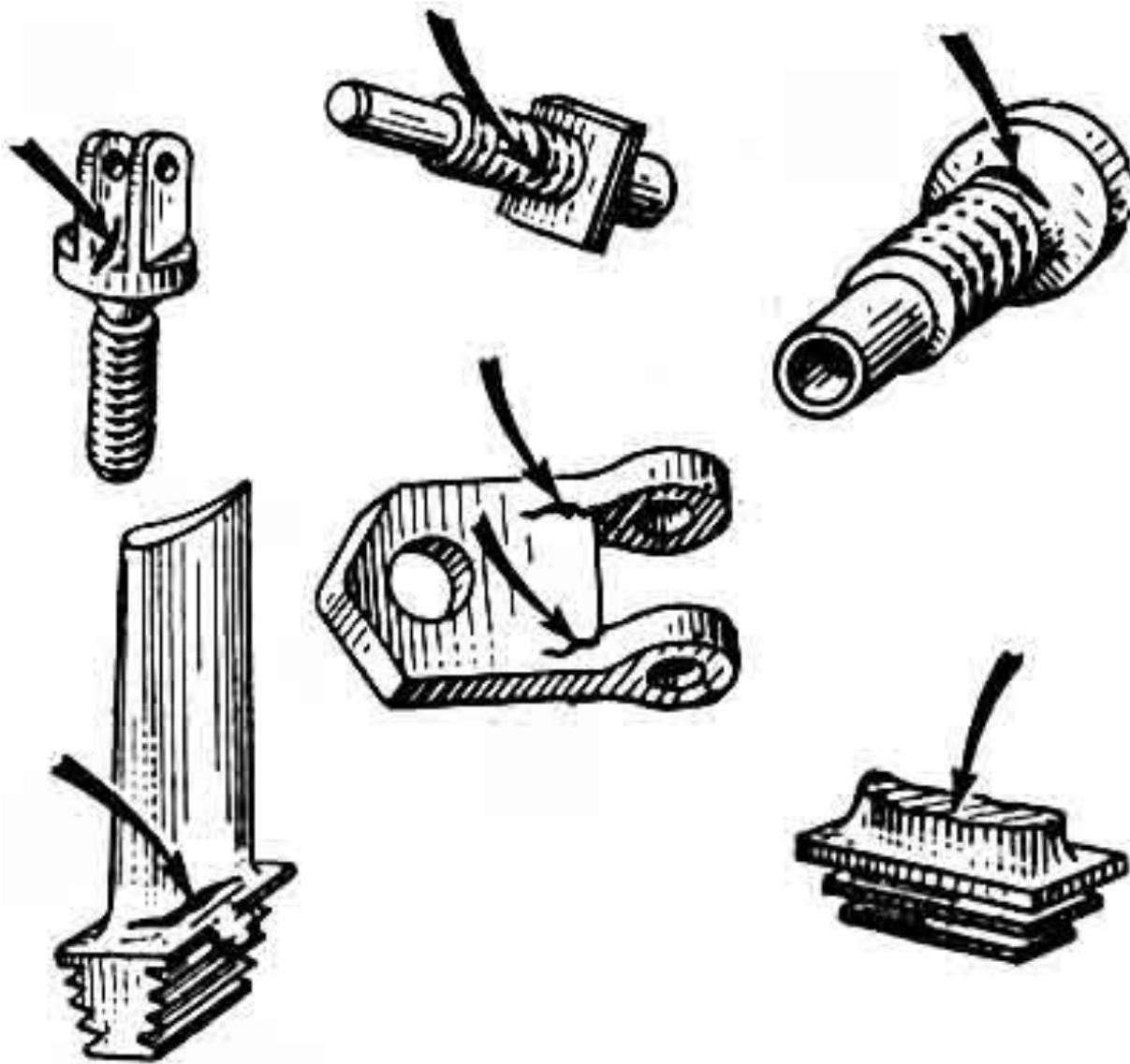


Рис. Усталостные разрушения деталей

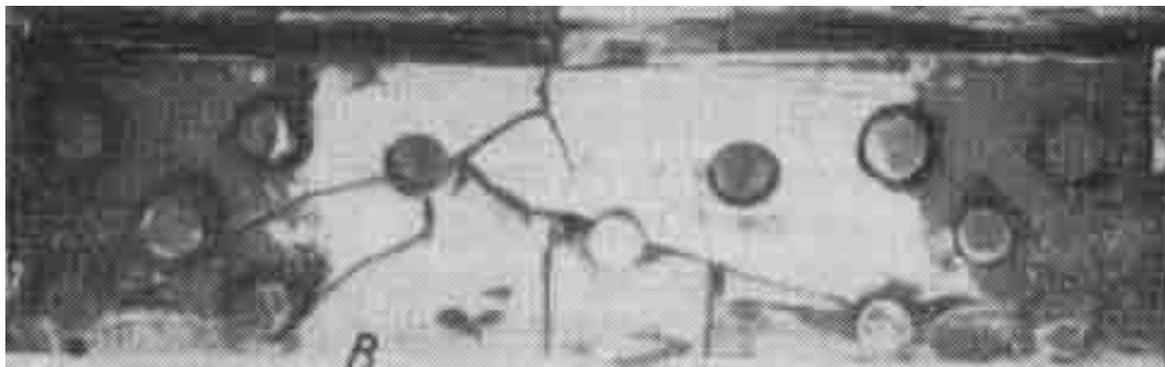


Рис. Вид усталостного разрушения заклепочного шва

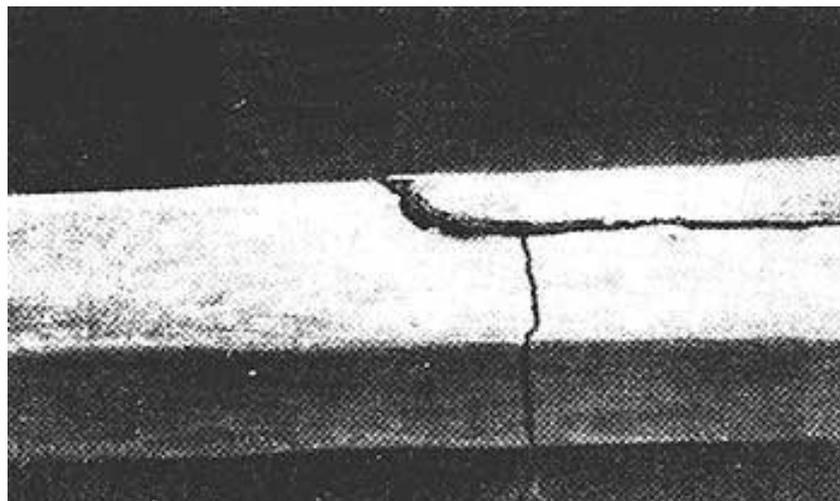
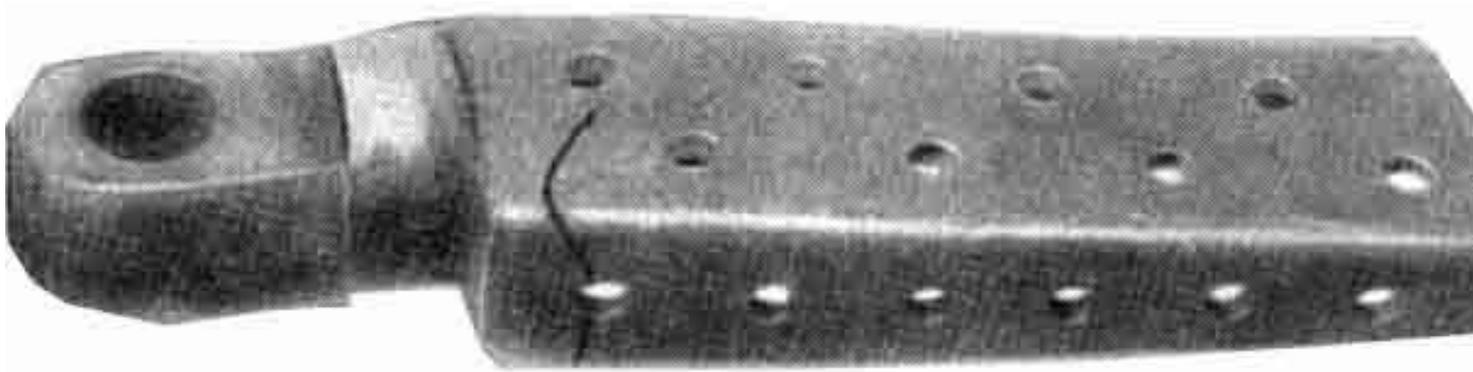
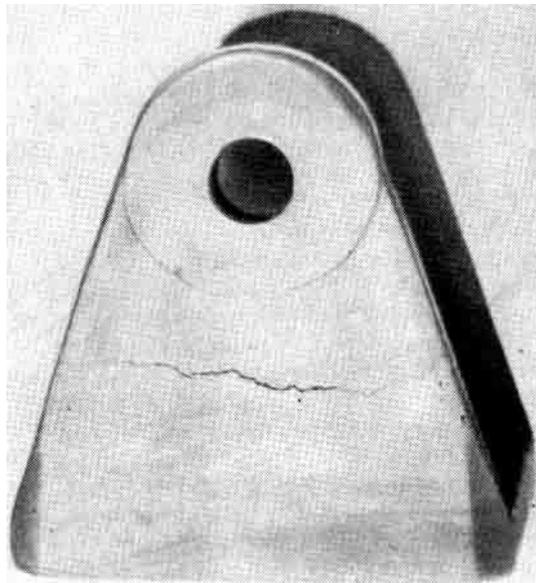


Рис. Вид усталостного разрушения рельса



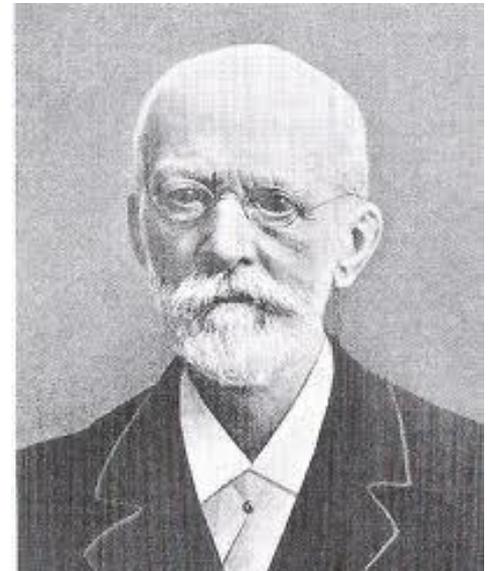
**Рис. Усталостная трещина в узле крепления моторной рамы к фюзеляжу самолета Ан-2**



**Рис. Усталостная трещина в литом кронштейне**

Основной характеристикой циклической прочности является кривая усталости (кривая Веллера), устанавливающая связь между максимальным напряжением  $\sigma_{max}$  и числом циклов, выдерживаемых деталью до разрушения.

Август Веллер (**August Wöhler**) (22 июня 1819 - 21 марта 1914) немецкий инженер более известный за свои систематические исследования в области усталостной (циклической прочности) материалов. Предложил одну из опор моста делать на шарнире, чтобы уменьшить напряженность от температурных деформаций.



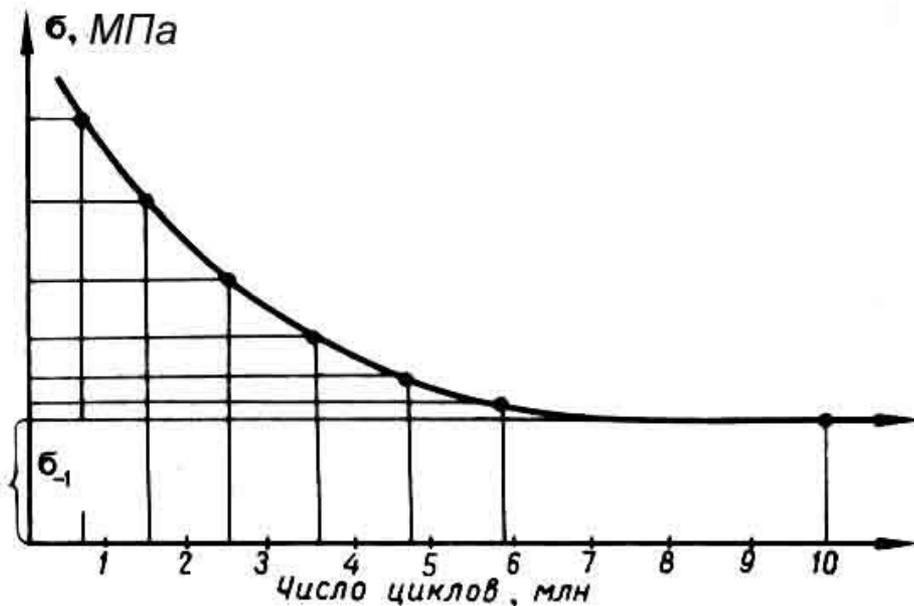


Рис. Кривая выносливости

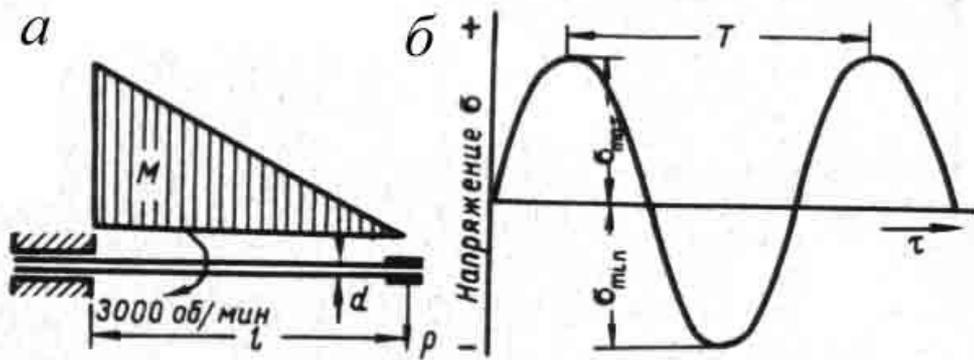


Рис. Консольная схема нагружения (а), обеспечивающая симметричный цикл напряжений (б) при испытаниях на усталость

Кривая выносливости дает зависимость разрушающего напряжения  $\sigma$  от числа симметричных циклов нагружения  $N$  (рис. ). Асимптотическое значение напряжения в этой зависимости носит название **предела усталости  $\sigma_{-1}$**  и является чрезвычайно важной характеристикой материала или конструктивного силового элемента.

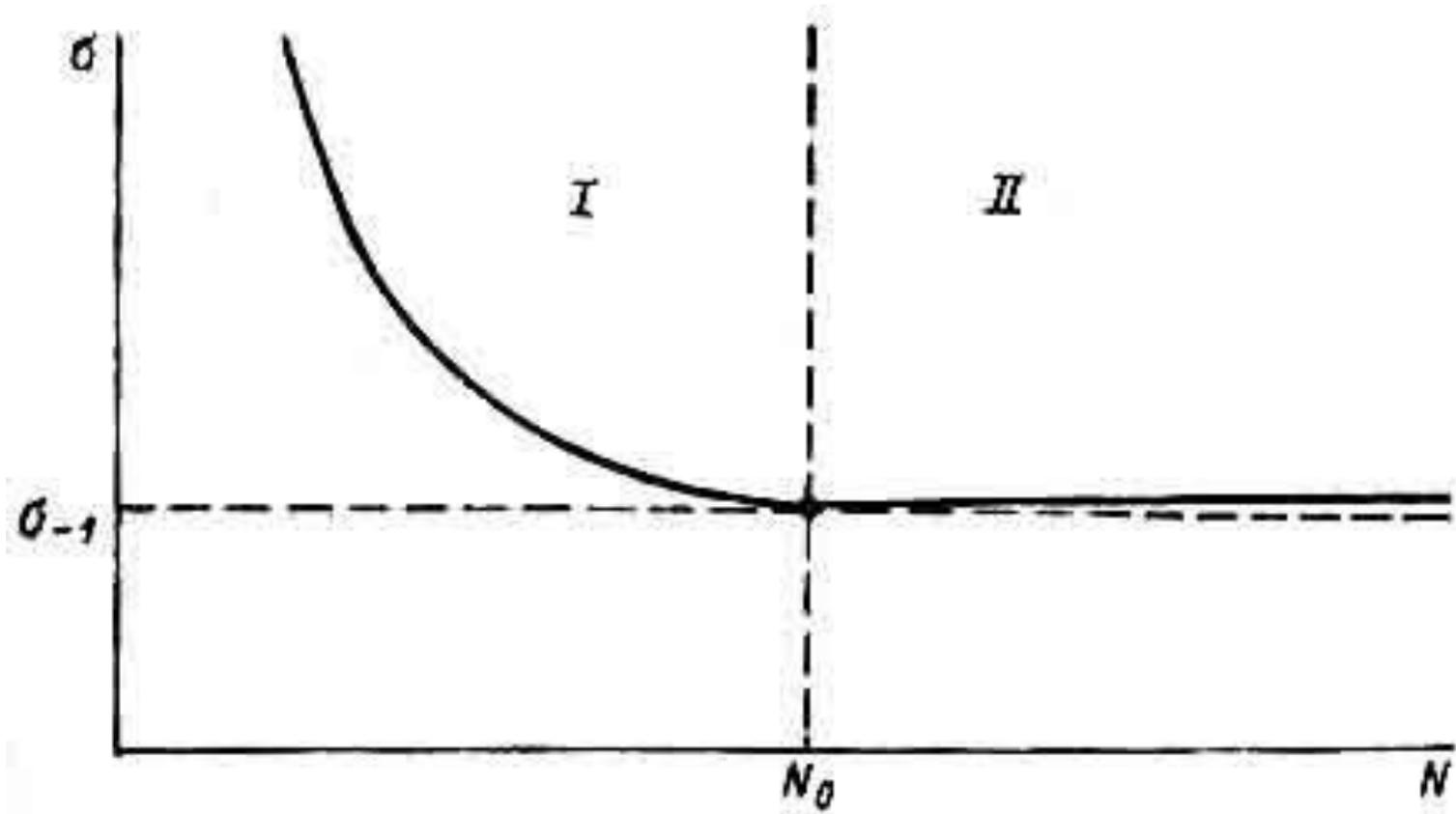


Рис. Кривая усталости:

*I* - нелинейный участок; *II* - линейный участок;  $\sigma_{-1}$  - предел выносливости;  $N_0$  – базовое число циклов

Как видно из графика (рис.) на кривой усталости можно выделить два характерных участка *I* – и *II*. На участке *II*, характерном для большинства сталей, накопление усталостных повреждений не приводит к поломке (отказа не происходит) .

Участок I с большой степенью точности может быть описан уравнением

$$\sigma^m N = \text{const},$$

где  $m$  – показатель степени кривой усталости;  $N$  - число циклов.

Показатель степени  $m$  и предел выносливости  $\sigma_{-1}$  зависят от

- ✓ свойств материала,
- ✓ размера,
- ✓ формы,
- ✓ технологии изготовления,
- ✓ режима нагружения,
- ✓ и т. д.

Для гладких образцов  $m = 6 \dots 12$ , для деталей с концентраторами напряжений  $m = 3 \dots 8$ .

С понижением температуры и скорости деформации предел выносливости для большинства материалов возрастает.

Особенно сильно влияют на предел выносливости параметры цикла напряжений. К ним относятся значение максимального, минимального и среднего напряжений ( $\sigma_{max}$ ,  $\sigma_{min}$ ,  $\sigma_{cp}$ ), а также коэффициента асимметричности цикла  $r$  ( $r = \sigma_{max} / \sigma_{min}$ ).

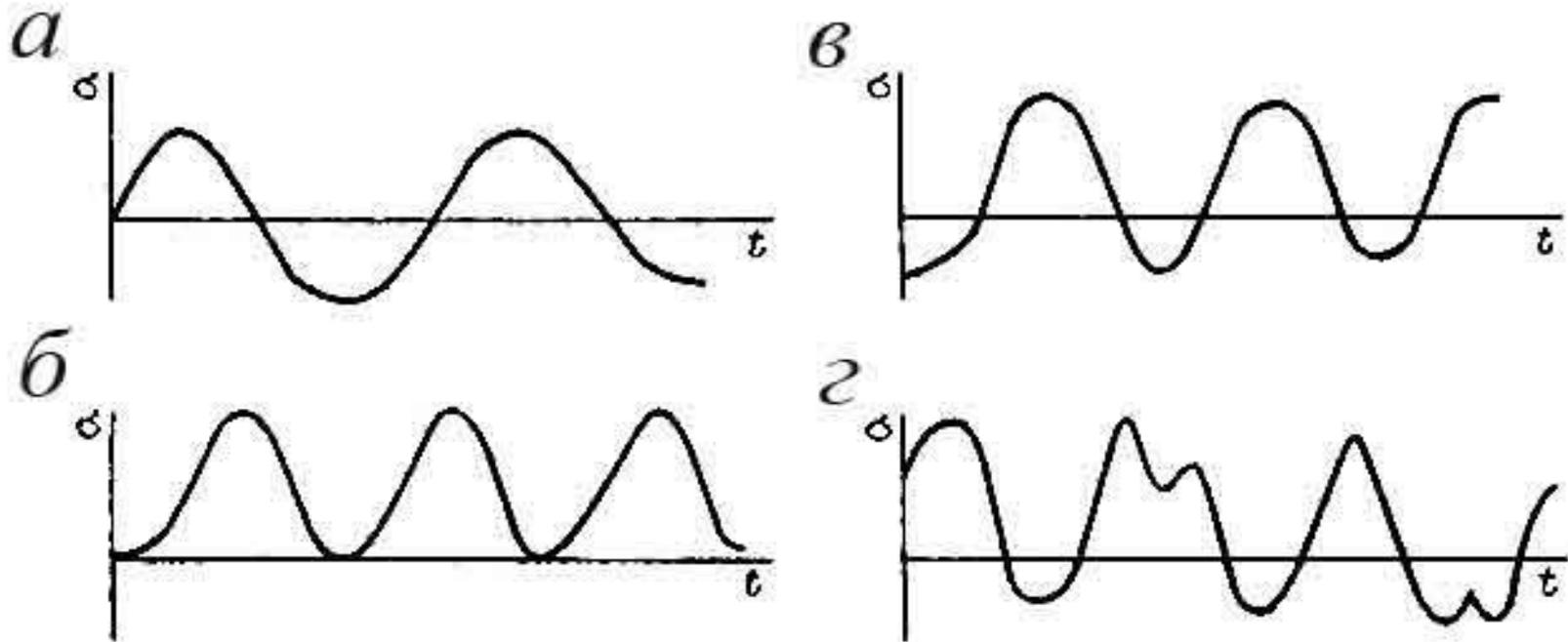


Рис. **Виды циклов нагружения:**  
 а – симметричный; б – пульсирующий; в – асимметричный; г -  
 сложный

Различают следующие виды нагружения:

- по симметричному циклу ( $r = 1$ ),
- пульсирующие ( $r = 0$ ),
- асимметричные ( $\sigma_{max} \neq \sigma_{min}$ ) и
- сложные, включающие сочетание перечисленных циклов (см. рис.).

При повышении среднего напряжения предел усталости возрастает, но амплитуда, которую он может выдержать, не разрушаясь, уменьшается.

Влияние параметров цикла напряжений учитывается коэффициентом чувствительности к асимметрии цикла  $\rho$ . При этом предельное значение напряжений, которое элемент выдержит, не разрушаясь, будет равно

$$\sigma_{max} = \sigma_{-1} + \sigma_{cp}(1 - \rho).$$

$\rho = 0,1 \dots 0,2$  – для углеродистых сталей,

$\rho = 0,2 \dots 0,3$  – для легированных сталей.

При кручении уменьшается в 2 раза по сравнению со сжатием – растяжением.

Нам предел выносливости большое влияние оказывают участки местной концентрации напряжений (резкие переходы, углы, отверстия, надрезы и т. д.), а также разброс свойств материала.

Конструкция самолета подвергается действию сплошного спектра переменных нагрузок, величина которых изменяется в широком диапазоне. Однако эти нагрузки могут быть в первом приближении разбиты на два класса:

**I – нерегулярные циклические последовательности статических нагрузок.** К этому классу относятся:

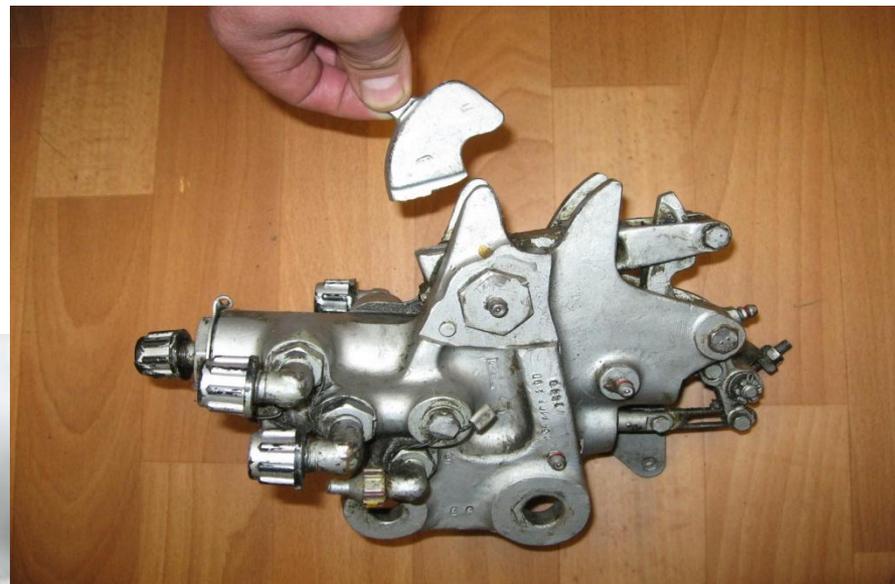
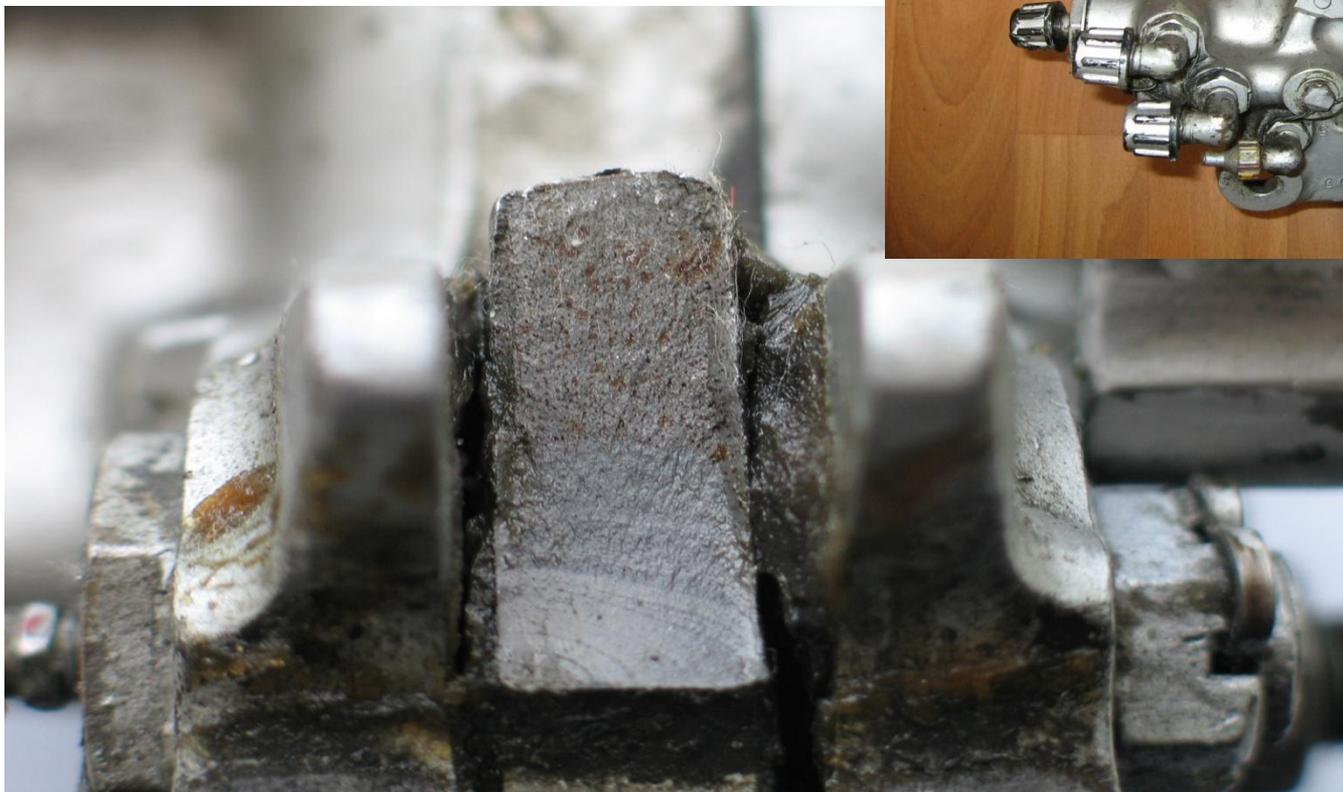
- а) нагрузки, возникающие при полете в беспокойном воздухе или при совершении маневра;
- б) нагрузки, возникающие при взлете и посадке самолета;
- в) давление в герметической кабине самолета.

Эти нагрузки имеют частоту в пределах от долей герца до нескольких единиц герц.

**II – вибрационные нагрузки.** К этому классу относятся колебания:

- а) срывные (бафтинг);
- б) от силовой установки;
- в) акустические.

Данные нагрузки имеют частоту от нескольких герц (бафтинг), до нескольких десятков и сотен герц (акустика).



**Рис. Усталостное разрушение крюка подвески основной опоры шасси самолета Ту-134**

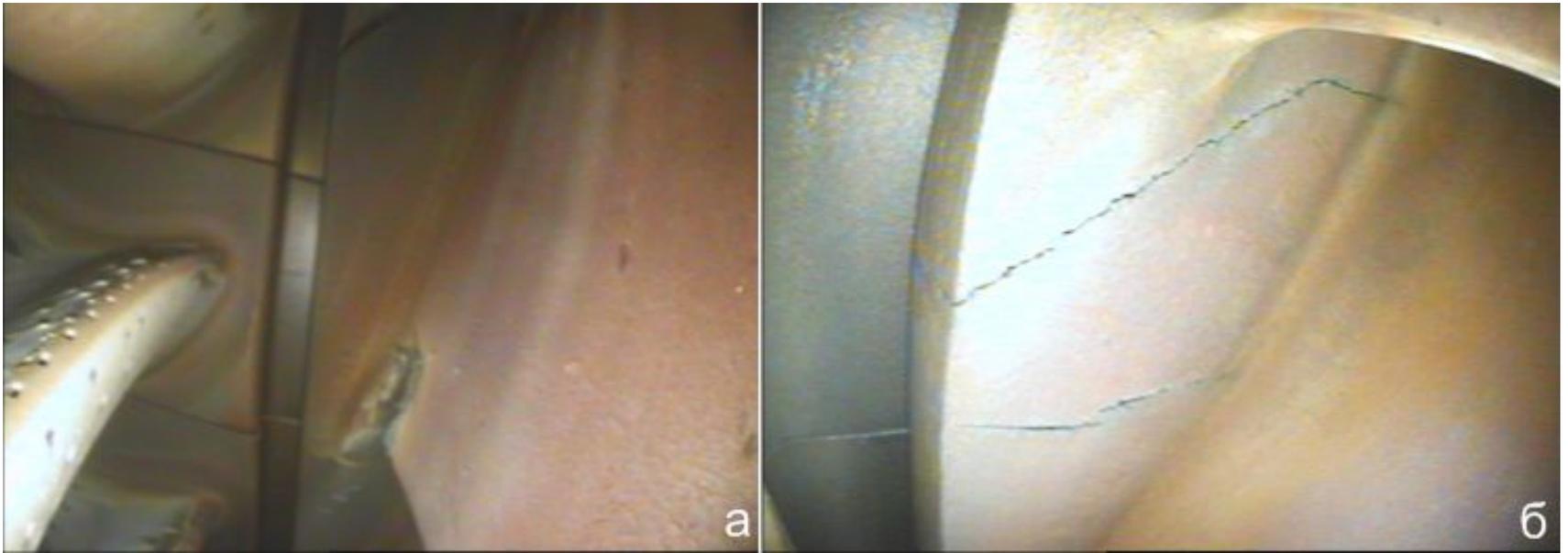


Рис. Повреждения лопаток соплового аппарата ТВД двигателя CFM56-5В:  
а – разрушение защитного покрытия; б – усталостные трещины на внутренней  
бандажной полке

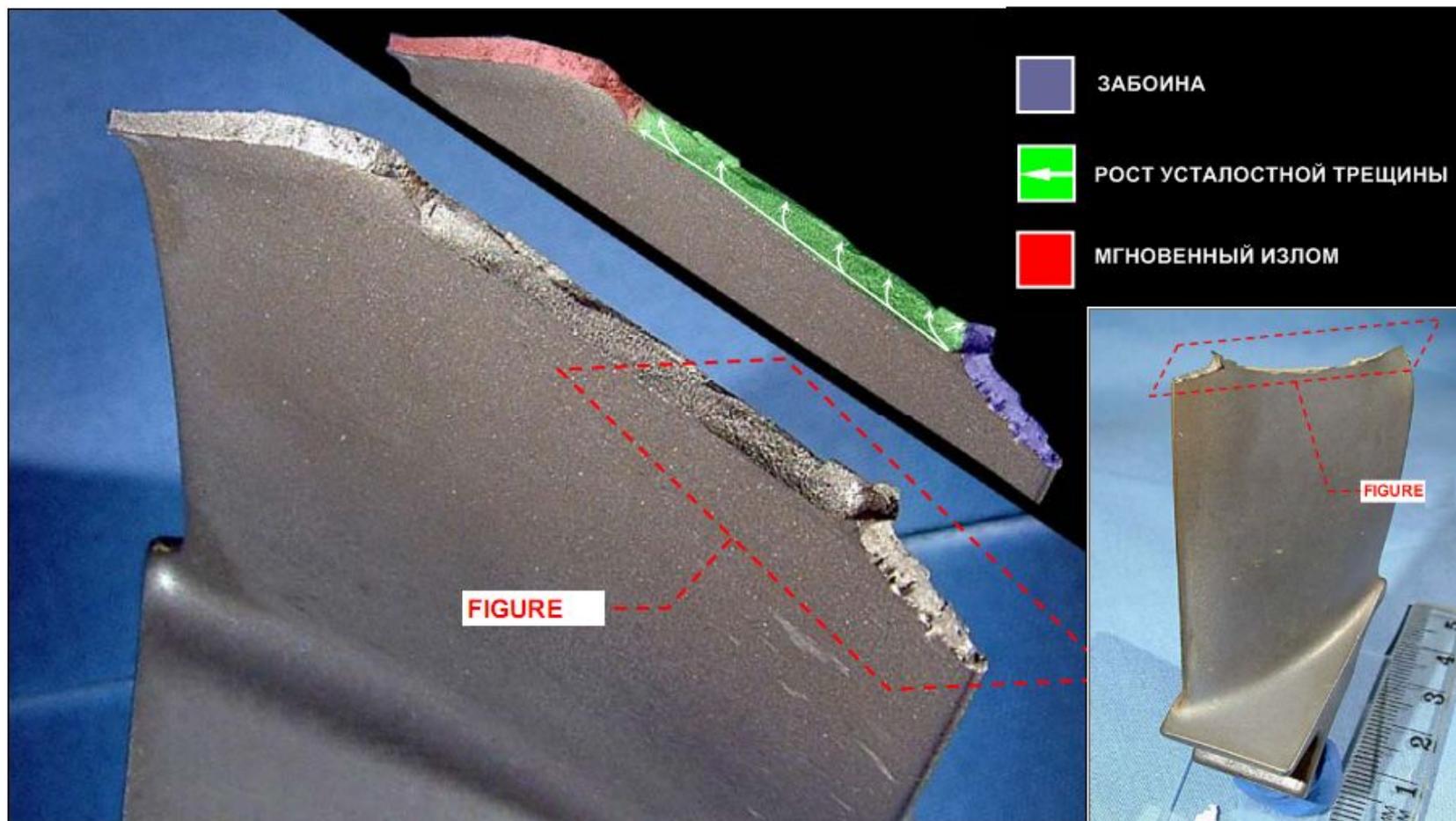


Рис. Этапы развития повреждения рабочей лопатки КВД  
(компрессора высокого давления) авиационного  
газотурбинного двигателя

Основным методом предотвращения усталостного разрушения является

- ❖ **модификация конструкции механизма** с целью исключения циклических нагрузок, либо
- ❖ **замена материалов** на менее склонные к усталости.

Значительное увеличение выносливости даёт **химико-термическая обработка** металлов, например азотирование.

**Газотермическое напыление**, особенно высокоскоростное газопламенное напыление, создаёт напряжение сжатия в покрытии материала и способствует защите деталей от разрушения.

# СТАРЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ

**СТАРЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ** — медленное самопроизвольное необратимое изменение свойств **материалов**; изменение физико-химических и механических свойств и структуры материалов при эксплуатации и длительном хранении.

Происходит в *материалах с повышенным уровнем внутренней энергии.*

Старение материалов обусловлено в основном:

- рекристаллизацией материалов,
- диффузией,
- хемосорбцией,
- химическими реакциями,
- коррозионными процессами и увлажнением, вызывающих изменение начальных свойств материалов, из которых изготовлены элементы.

Эти изменения могут привести к повреждению элемента и к опасности возникновения критического отказа системы.

**Рекристаллизация** – процесс роста одних кристаллических зерен поликристалла за счет других.

**Хемосорбция** – процесс сорбции, при котором частицы поглощаемого вещества и поглотителя взаимодействуют химически

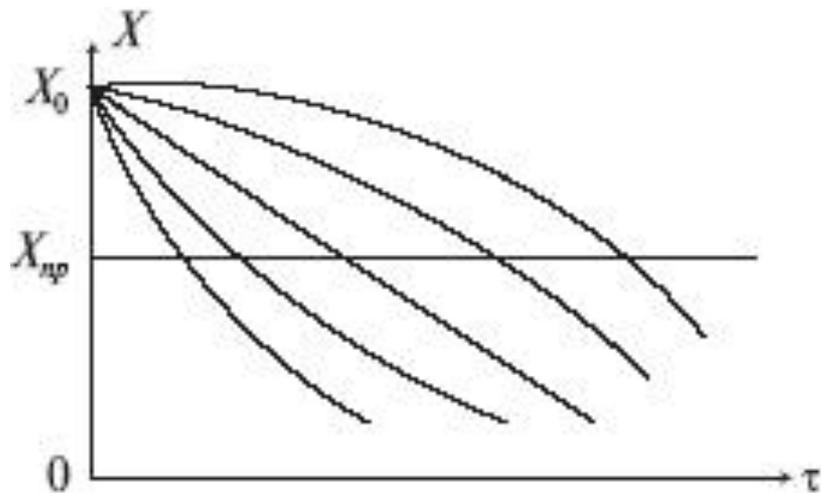


Рис. **Схема снижения свойств материалов в процессе старения**

Во всех случаях старение материалов представляет собой необратимый процесс.

В общем виде процесс снижения свойств материалов может быть представлен некоторыми кривыми (рис).

В зависимости от назначения материала снижение его свойств до некоторых предельных значений  $X_{кр}$ , это и определяет продолжительность использования материала.

Полимерные материалы намного чувствительнее металлических к различным воздействиям, вызывающим старение. Этим, пожалуй, объясняется некоторая замедленность в применении пластмасс для долговременно нагруженных конструкций.

Сильно подвержены старению **резины,**  
**пластмассы** и **дерево.**

У этих материалов под воздействием

- кислорода воздуха,
- влаги,
- прямых солнечных лучей,
- высоких или низких температур, а иногда и
- микроорганизмов

происходит разрушение цепей молекул  
(**деструкция**).



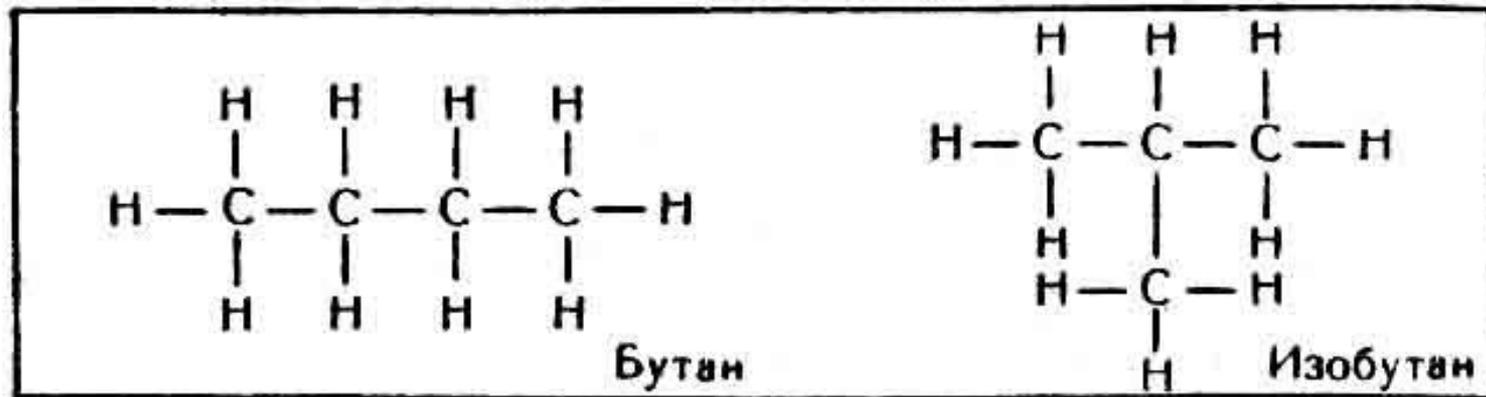
Бутлеров  
Александр Михайлович  
(1828-1886)

Дело в том, что на свойства веществ существенное влияние оказывает порядок соединения атомов в молекуле.

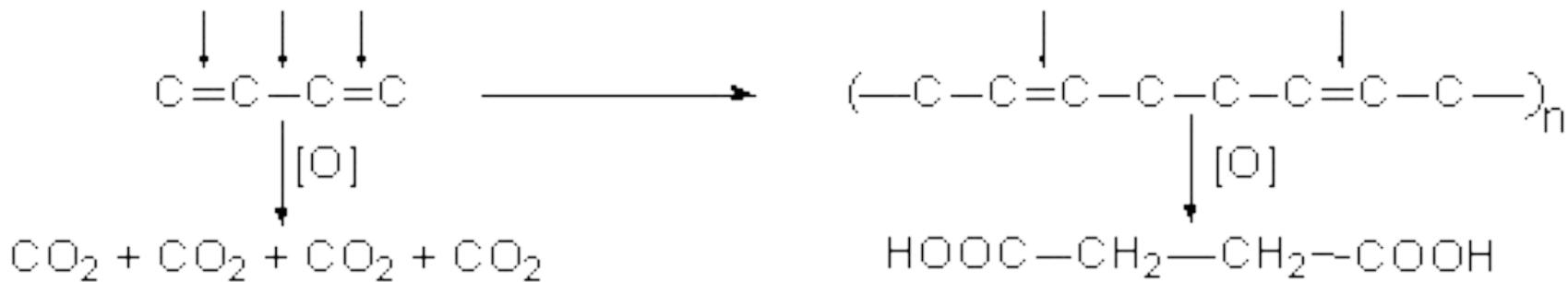
**Различному порядку взаимосвязи атомов при одном и том же качественном и количественном составе молекул должны отвечать**, как учит теория химического строения, **разные вещества**.

Основы теории химического строения создал в 1861 г. профессор Казанского университета Александр Михайлович Бутлеров.

Так, например, существуют два бутана, имеющих один и тот же состав  $C_4H_{10}$ , но различающихся по своему строению и свойствам. Это явление носит название **изомерии**.



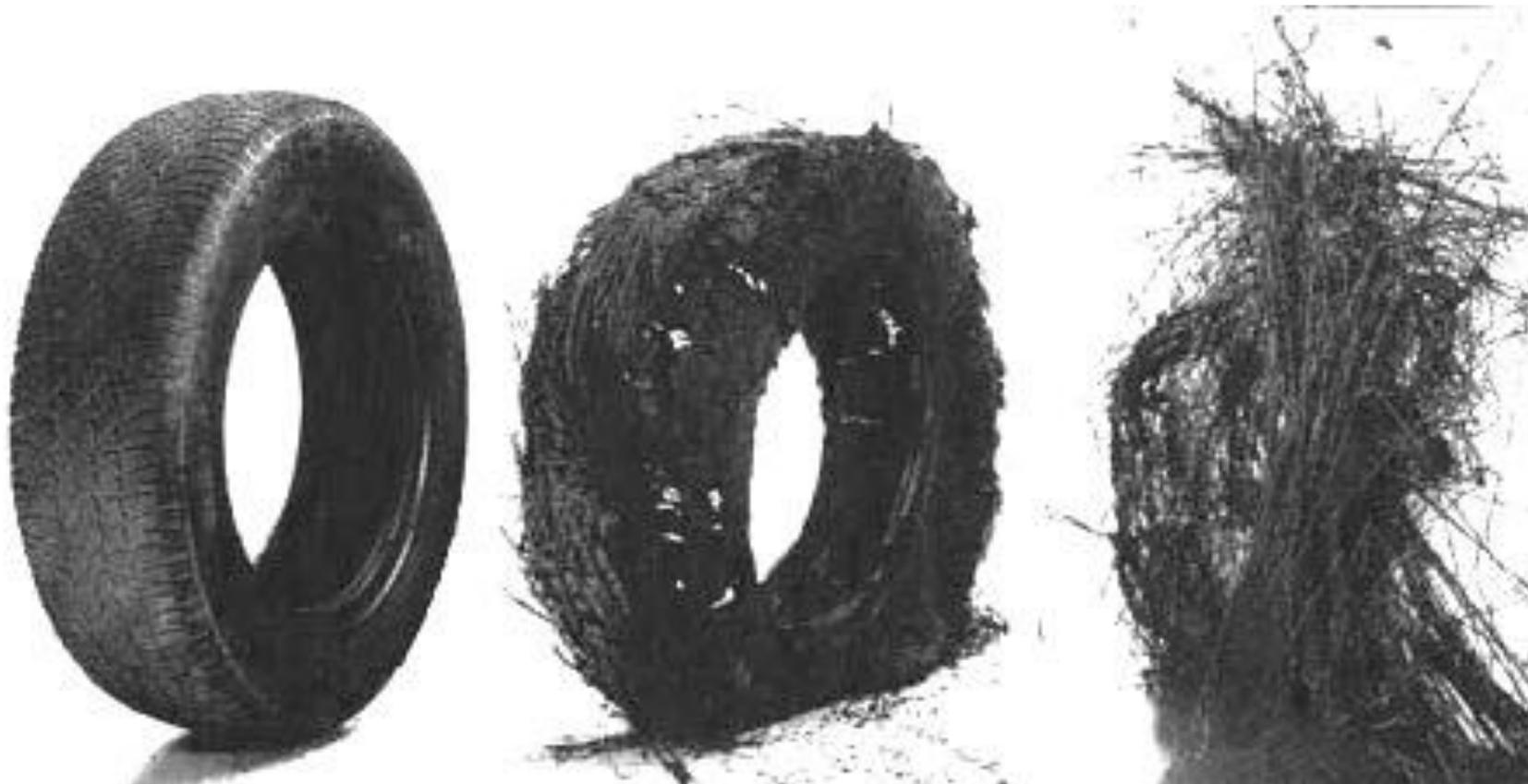
Старение резиновых и других уплотнительных прокладок из полимерных материалов проявляется в затвердевании и охрупчивании их за счет «сшивки» молекул материала.



Результатом этого процесса – старения - является потеря прочности и пластичности полимеров, расслаивание и набухание резины, гниение дерева.



**Рис. Изменения состояния (старение) стирательной резинки - ластика**



**Рис. Изменения состояния пневматика под влиянием старения и нагрузок**



**Рис. Изменения состояния уплотнительных прокладок под влиянием старения**



Рис. Направленный под углом к поверхности остекления луч света может помочь выявить всякого рода дефекты – мелкие трещины, расслоения, «серебрение» (появление мелких трещин как следствия влияния сочетания динамических и статических нагрузок, атмосферных перепадов температуры и т. д.)

Образование «серебра» - сетки мельчайших трещин на поверхности оргстекла – еще один пример старения полимерных материалов, широко используемых в остеклении кабин и салонов самолетов и вертолетов.



Рис.  
**Образование  
«серебра» -  
сетки  
мельчайших  
трещин на  
поверхности  
оргстекла**



Поскольку эффективных способов оценивания действительного технического состояния неметаллических материалов пока не существует, **в процессе ремонта большинство деталей из**

- ✓ резины,
- ✓ дерева и
- ✓ некоторых пластмасс

**заменяется без дефектации.**

Следует иметь ввиду, что материал деталей, хранящихся в ЗИП, также стареет.

Поэтому на оборудование летательных аппаратов и авиационных двигателей принято устанавливать только такие детали из ЗИП, у которых осталось **не менее 50%** гарантийного срока хранения.

Для защиты от старения в процессе хранения

- **резиновые** детали пересыпаются **тальком**,
- **войлочные** и **кожаные** – **дустом**.

Эти методы защиты замедляют старение полимеров, но не исключают его полностью.

# Вредные отложения

**Накипь** – твердый осадок на омываемых водой стенках труб паровых котлов и др. теплообменных аппаратов, образующийся при испарении и нагревании воды, содержащей те или иные соли. Накипь ухудшает теплоотдачу в теплообменника, что приводит к перегреву металла.

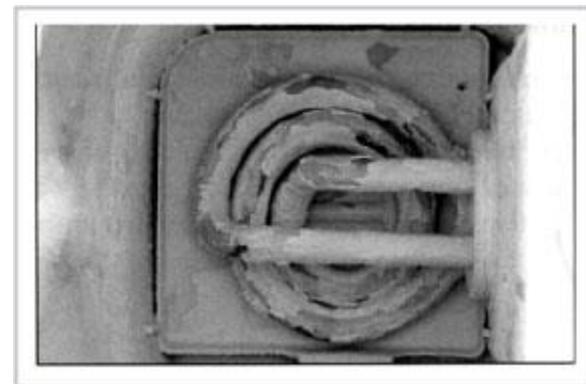


Рис. Примеры конструктивных элементов с отложениями накипи



Рис. Солевые отложения на рабочих лопатках компрессора  
авиационного газотурбинного двигателя



Рис. Примеры лаковых отложений

Лаковые отложения образуются под воздействием кислорода воздуха, высоких температур и каталитического действия металлов. Внешний вид лаковых отложений представляет собой тонкую прочную пленку с гладкой поверхностью. Лаковые отложения наблюдаются на подшипниках опор роторов ГТД и трубопроводах маслосистемы в зоне повышенных температур. В поршневых двигателях лакообразование является причиной пригорания поршневых колец.



Причиной подклинивания чаще всего является образование **лаковых отложений** на поверхности поршня и цилиндра, а также обычная грязь или неравномерный износ поршня, вызывающий его перекос.



- При работе агрегаты гидравлической системы неизбежно загрязняется не только твердыми частицами (грязью), но и смолистыми и **лаковыми отложениями.**



Рис. Форсунки,  
забитые  
углеродистыми и  
лаковыми  
отложениями

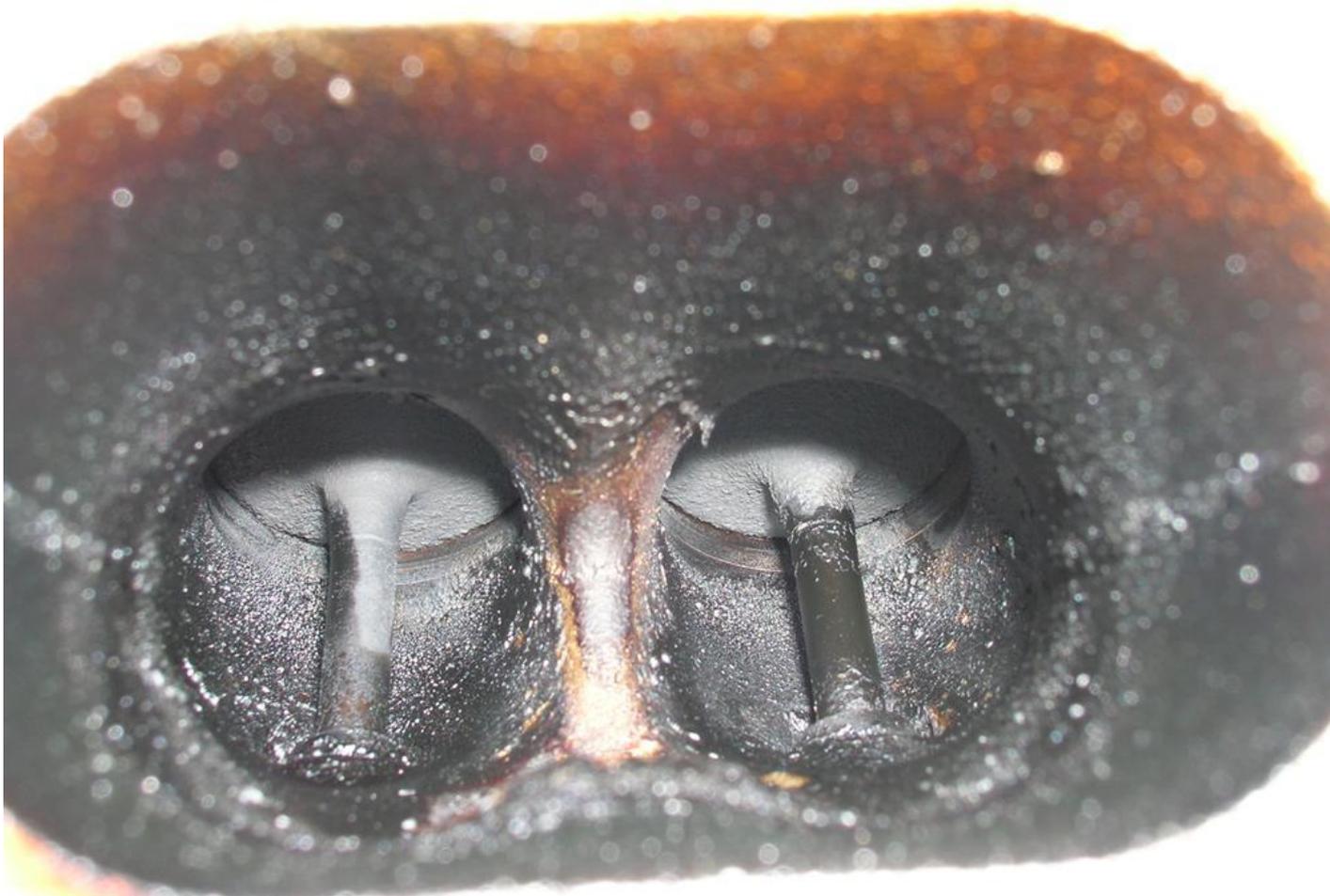


Рис. **Смолистые отложения** от  
некачественного топлива и паров масла



- дроссельная заслонка в **СМОЛИСТЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ** из-за паров вентиляции картеров может заедать и не полностью закрываться



- Если на его поверхности Вы обнаружите большие **смолистые отложения** клапан необходимо очистить и промыть

**Использованная литература:**

- 1. Ремонт летательных аппаратов: Учебник для вузов гражданской авиации. А. Я. Алябьев, Ю. М. Болдырев, В. В. Запорожец и др.; Под ред. Н. Л. Голего. – 2-е изд., перераб. и доп.- М: Транспорт, 1984. – 422 с.*
- 2. Бейлин. Л. А., Мейер А. А. Ремонт самолетов, вертолетов и авиационных двигателей. Учеб. пос. для сред. учеб. заведений ГА. – М.: Транспорт, 1966. – 428 с.*
- 3. Ингликов М. А. Ремонт технических систем. Л.: ВИКИ им. А. Ф. Можайского, 1978. – 322 с.*
- 4. Ремонт и техническая эксплуатация лесотехнического оборудования. – Л.: Агропромиздат. ленингр. отд-не, 1989. – 312 с.*
- 5. Горохов В. А., Лоцманов С. Н., Михайлов А. А., Петрунин И. Е. Авиационное ремонтное дело. Часть 1 и часть 2. Под ред. д.т.н. проф. А. А. Михайлова. М.: Военное издательство МО СССР, 1970.*

Якущенко В.Ф. Ремонт воздушных судов: Учебное пособие  
/ СПбГУГА. С.-Петербург, 2008.