

Министерство образования и науки Российской Федерации

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

Кафедра материаловедения и технологии материалов

И.Ш. Тавтилов, В.И. Юршев, В.С. Репях

# **ВИДЫ ИЗНАШИВАНИЯ И ПРИЧИНЫ ОТКАЗОВ УЗЛОВ ТРЕНИЯ**

Практикум

Рекомендовано к изданию ученым советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» для обучающихся по образовательной программе высшего образования по направлению подготовки 15.03.01 Машиностроение

Оренбург  
2017

УДК 620.178.162(07)  
ББК 34.41я7  
Т13

Рецензент – кандидат технических наук, доцент, Д.А. Проскурин

**Тавтилов, И. Ш.**  
Т13 Виды изнашивания и причины отказов узлов  
трения : практикум / И. Ш. Тавтилов, В.И. Юршев, В.С.  
Репях; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург : ОГУ, 2017. – 90 с.

ISBN 978-5-7410-2071-5

Практикум состоит из 10 работ для изучения видов изнашивания и причин отказов узлов трения. Каждая работа включает изложение основных положений теории, описание аппаратуры, оборудования, материалов и методики подготовки, проведения работы и испытаний, порядка обработки полученных результатов, а также содержит требования к составлению отчёта и контрольные вопросы для самоподготовки.

Практикум предназначен для выполнения практических и лабораторных работ по курсу «Виды изнашивания и причины отказов узлов трения», предусмотренному основной образовательной программой высшего образования для обучающихся по направлению подготовки 15.03.01 Машиностроение, и может быть полезен обучающимся по тем направлениям подготовки, где изучаются следствие трения – изнашивание.

УДК 620.178.162(07)  
ББК 34.41я7

ISBN 978-5-7410-2071-5

© Тавтилов И. Ш.,  
Юршев В.И.,  
Репях В.С., 2017  
© ОГУ, 2017

## Содержание

|                                                                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Введение .....                                                                                                                                         | 4  |
| 1 Лабораторная работа № 1. Изучение видов изнашивания .....                                                                                            | 5  |
| 2 Лабораторная работа №2. Определение видов изнашивания<br>материалов по внешним признакам .....                                                       | 19 |
| 3 Лабораторная работа № 3. Классификация и выбор металлов и сплавов<br>по их износостойкости .....                                                     | 27 |
| 4 Лабораторная работа № 4. Исследование зависимости абразивной<br>износостойкости сталей от ее механических характеристик .....                        | 35 |
| 5 Лабораторная работа № 5. Влияние углерода в сталях на ударно-абразивное<br>изнашивание .....                                                         | 41 |
| 6 Лабораторная работа № 6. Паспортизация деталей и узлов<br>эксплуатационных машин .....                                                               | 49 |
| 7 Лабораторная работа № 7. Методы измерения износа .....                                                                                               | 53 |
| 8 Лабораторная работа №8. Исследование зависимости абразивной<br>износостойкости сталей при трении о закреплённые абразивные частицы .....             | 59 |
| 9 Лабораторная работа №9. Исследование зависимости абразивной<br>износостойкости сталей при трении о нежёстко закреплённые абразивные<br>частицы ..... | 64 |
| 10 Лабораторная работа №10. Испытание машиностроительных материалов на<br>ударно-абразивное изнашивание .....                                          | 69 |
| Список использованных источников .....                                                                                                                 | 76 |
| Приложение А .....                                                                                                                                     | 78 |
| Приложение Б .....                                                                                                                                     | 89 |

## Введение

Трение – уникальный феномен природы. Оно подарило человечеству тепло, огонь, возможность в короткое время остановить поезд или автомобиль, ускорить химическую реакцию, записать человеческий голос на пластинку, услышать звуки скрипки и многое другое.

Его изучали да Винчи и Кулон, Эйлер и Рейнольдс, Ломоносов и Менделеев, от античности до наших времен. До настоящего времени трение во многих его аспектах остается загадкой. При трении (и только при трении) одновременно происходят механические, электрические, тепловые, вибрационные и химические процессы. Трение может, как упрочнить, так и разупрочнить металл, как повысить, так и понизить содержание в нем углерода, как наводородить, так и обезводородить поверхность изделия, превратить золото и платину в окислы, отполировать детали или сварить их. Трение является самоорганизующимся процессом, при котором с определенной последовательностью и весьма «разумно» протекают явления направленные на разрушение поверхности, или же, наоборот, на создание целой серии систем, снижающих трение и износ.

Сегодня с трением связана одна из проблем современности – износ машин и механизмов. Расходы на восстановление машин в результате износа огромны, причем ежегодно они увеличиваются. Удлинение срока службы машин даже в небольшой степени равноценно вводу значительных новых производственных мощностей. Вопросы повышения срока службы давно привлекли внимание инженеров. При решении проблем связанных с долговечностью, были разработаны конструктивные и технологические мероприятия по повышению срока службы машин и созданы рациональные методы по уходу за ними, были разработаны методы и приспособления для проведения трибологических испытаний, предложены методики расчета элементов трибосопряжений по фактору износа, а также на основе достижений науки были заложены основы учения о трении и изнашивании машин.

Данный сборник лабораторных работ предназначен для практического изучения некоторых основных методик, позволяющих проводить испытания на трение и износ, а также конструкций машин, применяемых при проведении трибологических исследований.

# **1 Лабораторная работа № 1. Изучение видов изнашивания**

Целью работы является ознакомление с видами изнашивания материалов, определение вида износа полученных образцов, их стадии и причины износа

## **1.1 Общие сведения**

### **1.1.1 Основные сведения о трении, износе, видах изнашивания**

До настоящего времени трение во многих его аспектах остается неясным. При трении одновременно происходят механические, электрические, тепловые, вибрационные, химические и другие процессы. При трении может происходить упрочнение или разупрочнение металлов, изменение химического состава и другие явления. Трение является самоорганизующимся процессом, при котором с определенной последовательностью протекают явления, направленные на разрушение поверхности, или же, наоборот, на создание целой серии систем, снижающих износ и трение.

Сегодня с трением связана одна из самых острых проблем современности – износ машин и механизмов. Расходы на восстановление машин в результате износа огромны, причем ежегодно они увеличиваются. Создание машин, не требующих капитальных ремонтов за весь срок их службы, и значительное сокращение текущих ремонтов по своей технико-экономической эффективности равноценны удвоению мощности машиностроительных заводов и увеличению выпуска металлов.

В отличие от высокого уровня постановки расчетов деталей и конструкций на прочность, жесткость и устойчивость, современное состояние теории трения и изнашивания не дает конструктору надежных методов расчета сопряженных пар на износ и большинства изнашивающихся деталей на долговечность на заранее предусматриваемый срок службы.

Однако теория и инженерная практика повышения износостойкости и надежности работы трущихся деталей располагают большим количеством важных качественных зависимостей, результатов экспериментальных исследований и наблюдений, использование которых позволяет существенно повысить сроки службы машин.

### **1.1.2 Виды изнашивания**

#### **1.1.2.1 Классификация видов изнашивания**

Формирование изнашиваемой поверхности происходит в результате суммирования различных по интенсивности и видам элементарных актов разрушения и изменений механических и физико-химических свойств материала под воздействием внешних факторов (среда, температура, давление, вид трения, скорость относительного перемещения поверхностей и др.).

Классификация (таблица 1.1) носит условный характер, так как виды износа очень многообразны и тесно переплетаются по внешним признакам изнашивания.

Таблица 1.1 – Виды изнашивания

| Признак классификации                | Вид изнашивания                                                                                                                                                   |
|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Механическое изнашивание             | Абразивное; эрозионное (гидро- и электро-эрозия, газовая, космическая); кавитационное; усталостное;                                                               |
| Молекулярно-механическое             | Схватывание и заедание                                                                                                                                            |
| Коррозионно-механическое изнашивание | Окислительное; фреттинг-коррозия; вследствие пластической деформации; вследствие диспергирования; в результате выкрошивания вновь образуемых структур; водородное |

Вид износа можно установить по внешнему виду поверхности, составу и физико-механическим свойствам тонких поверхностных слоев.

Введем основные понятия, относящиеся к износу деталей и рабочих органов машин.

Изменение размеров и формы детали в результате изнашивания именуют износом. Его выражают в единицах длины, объема или массы.

Интенсивность изнашивания – отношение износа детали к пути трения или объему выполненной работы. При определении интенсивности изнашивания может оказаться более целесообразным относить износ к другому показателю, общему для всех узлов и агрегатов данной машины. Так, для автомобилей в качестве такого показателя может быть принято число километров пробега.

Скорость изнашивания – отношение износа детали ко времени, в течение которого происходило изнашивание, или к числу единичных актов изнашивания.

Износостойкость оценивают величиной, обратной интенсивности или скорости изнашивания.

Предельным износом детали (узла) называют износ, при котором дальнейшая эксплуатация становится невозможной вследствие выхода детали (узла) из строя, неэкономичной или недопустимой ввиду снижения надежности механизма.

Характеристикой изнашивания является также коэффициент трения, которым называют отношение силы трения к нормальной составляющей внешней нагрузки, вызывающей перемещение трущихся деталей. Интенсивность изнашивания уменьшается с уменьшением коэффициента трения. Очевидно, что коэффициент трения характеризует и потери мощности машин на преодоление сил трения.

### 1.1.2.2 Характеристика видов изнашивания

- а) механическое изнашивание  
- абразивное изнашивание

Этот вид механического изнашивания материала образуется в результате режущего и царапающего действия твердых тел или частиц, находящихся в свободном или закрепленном состоянии.

В зависимости от условий взаимодействия детали с абразивными частицами (рисунок 1.1) разрушение металла может происходить:

- 1) путем микрорезания;
- 2) многократной пластической деформации поверхности трения;
- 3) коррозионно-механического изнашивания.

На процесс абразивного изнашивания может влиять природа абразивных частиц, агрессивность среды, свойства изнашиваемых поверхностей, ударное взаимодействие, нагрев и другие факторы. Общим для абразивного изнашивания является механический характер разрушения поверхности.

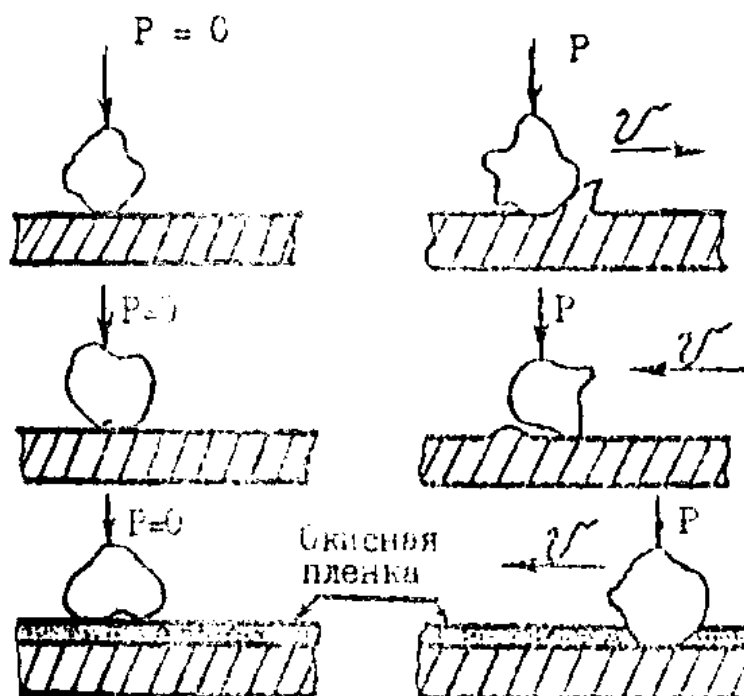


Рисунок 1.1 – Виды разрушений поверхности при абразивном износе

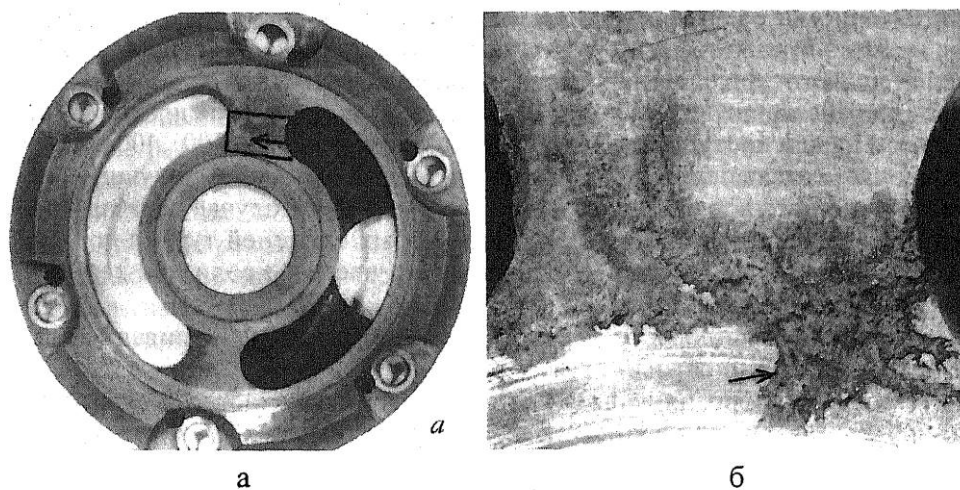
Абразивные частицы могут иметь различную форму и быть самым различным образом ориентированы относительно сопряженной поверхности. Способность абразивного зерна вдавливаясь в поверхность зависит не только от соотношения их твердостей, но и от геометрической формы зерна.

Гидро- и газоабразивное изнашивание возникает в случае воздействия потока газа или жидкости, содержащих абразивные частицы, при их нейтральности к поверхности детали.

- эрозионное изнашивание

Термин эрозия объединяет широкий класс видов поверхностного разрушения деталей машин под воздействием динамических потоков жидкостей, газов, твердых частиц или электрических разрядов.

Эрозионное воздействие высокоскоростного потока жидкости, газа или пара в чистом виде складывается из трения сплошного потока и его ударов о поверхность. В результате трения происходит расшатывание и вымывание отдельных объемов материала (рисунок 1.2).



а) общий вид; б) место разрушения

Рисунок 1.2 – Эрозионное разрушение золотника плунжера керосинового насоса высокого давления

Гидроэрозия – поверхностное разрушение деталей машин при контакте с динамическим потоком жидкостей. Этому виду разрушения подвержены детали гидронасосов, плунжерные пары, трубопроводы и другие детали, работающие в потоках воды, водных растворов, смазочных масел и т.д.

Газовая эрозия – это поверхностное разрушение деталей машин при контакте с динамическим потоком газов и прежде всего с высокой температурой, скоростью и химической активностью (сопла и лопатки реактивных двигателей газовых турбин, клапаны, поршневые кольца, выхлопные трубы и глушители автомобилей и т.д.).

Космическая эрозия – абляция – разрушение поверхности в потоке раскаленных газов, которое происходит в результате эрозии, расплавления и испарения металла.

Электроэрозионному воздействию подвержены токопроводящие материалы под действием импульсного электрического разряда (электроды свечей зажигания, контакты магнитных пускателей и т.д.).

Кавитационное изнашивание – изнашивание поверхности тела в жидкости в условиях кавитации. Кавитация – это процесс образования парогазовых

пузырьков в ограниченном объеме потока жидкости (где давление ниже соответствующего давления паров жидкости при данной температуре) и последующего их уничтожения (или сокращения) в зоне повышенного давления (лопатки гидротурбин, гребные винты, омываемые водой гильзы цилиндров в рубашках водяного охлаждения двигателей, трубопроводы).

Многokrатно повторяющиеся удары, в соответствии с рисунком 1.3, вызывают разупрочнение, перенаклеп материала на отдельных микроучастках, сопровождающиеся возникновением очагов разрушения в виде трещин.

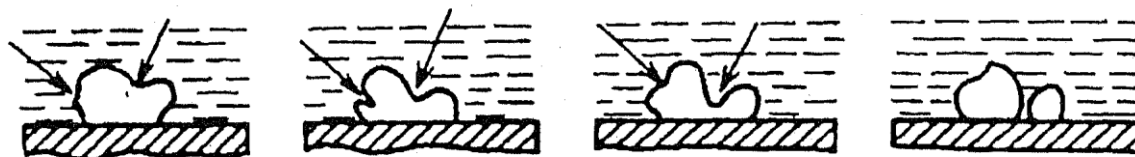


Рисунок 1.3 – Схема гидравлических ударов при сокращении кавитационного пузыря

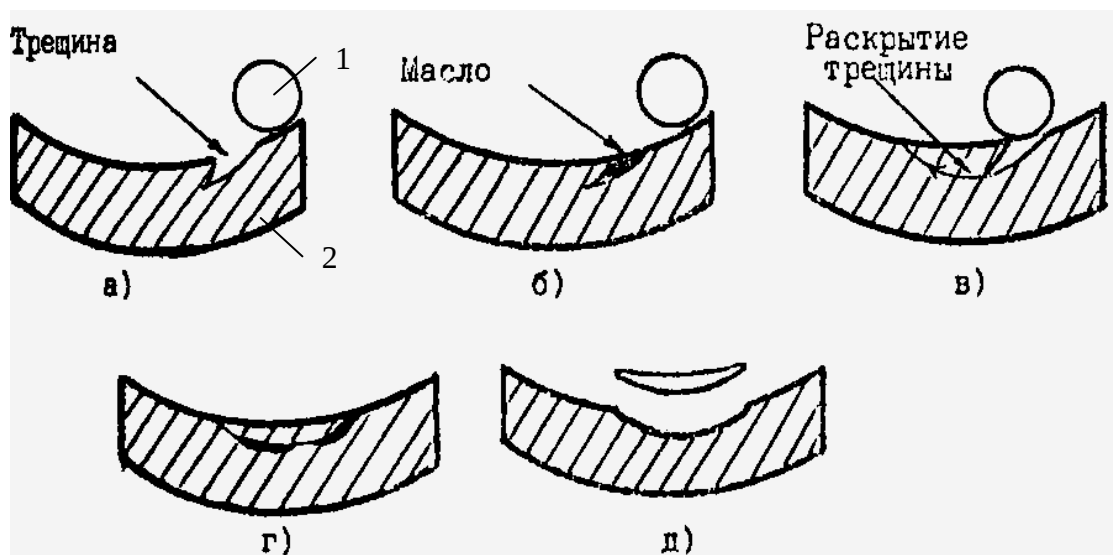
Интенсивность кавитационного изнашивания зависит от температуры, свойств жидкости и природы материала деталей. Влияние вязкости незначительно.

- усталостное изнашивание

Усталостное изнашивание (контактная усталость) – разновидность механического изнашивания, заключающаяся в усталостном разрушении при повторном деформировании микрообъектов материала поверхностного слоя, происходит при трении качения и трении скольжения (рисунок 1.4).

Сопротивление контактной усталости называется контактной выносливостью.

При трении качения усталостному изнашиванию подвержены элементы подшипников качения; при трении качения с проскальзыванием – зубья колес, валки прокатных станов, колеса рельсового транспорта и другие детали, работающие в условиях трения при многократном соударении контактирующих тел.



1 – шарик, 2 – втулка

Рисунок 1.4 – Схема образования питтинга при усталостном изнашивании

#### б) Молекулярно-механическое изнашивание.

Молекулярно-механическое изнашивание – это изнашивание в результате одновременного механического воздействия и действия молекулярных или атомных сил.

- изнашивание при заедании – изнашивание в результате схватывания, глубинного вырывания металла, переноса его с одной поверхности трения на другую и воздействия возникших неровностей на сопряженную поверхность.

- схватывание возникает как в процессе трения скольжения, так и качения.

Различают схватывание I и II рода.

Схватывание I рода возникает при трении скольжения с малыми скоростями относительного перемещения и высокими удельными давлениями, превышающими предел текучести на участках фактического контакта при отсутствии разделяющего слоя смазки и защитной пленки окислов.

Схватывание II рода возникает при трении скольжения с большими скоростями относительного перемещения ( $v \geq 0,6$  м/с) и значительными удельными давлениями, что обуславливает высокий градиент и интенсивный рост температуры в поверхностных слоях и сопровождается разупрочнением металла. Температура в зоне контакта может достигать 1500 °С. При этом образуются структуры отпуска, закалки, вторичной закалки.

Этот вид изнашивания начинается с субмикроскопических повреждений, переходя постепенно к локализованному разрушению поверхностного слоя, различимому невооруженным глазом, и к глубинному вырыванию; затем разрушение может приобрести лавинный характер (рисунок 1.5).

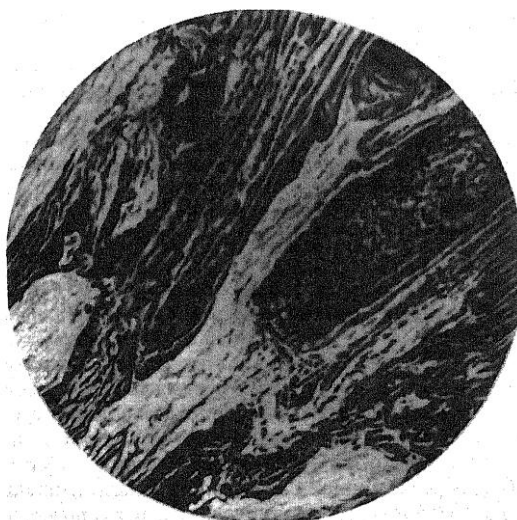


Рисунок 1.5 – Сечение поврежденной поверхности золотника в результате схватывания

При эксплуатации машин для качественной оценки степени повреждения поверхностей используют следующие термины.

Натир – участок поверхности трения, отличающийся по цвету от прилегающих участков и испытывающий наибольшее давление.

Задир – образование в результате схватывания различной невооруженным глазом борозды с отеснением материала, как в стороны, так и по направлению скольжения.

Заедание – наиболее яркая форма проявления схватывания. Образуются широкие и глубокие борозды с неровными краями, иногда слившиеся; присутствуют крупные наросты; возможно оплавление поверхности. Может произойти полное заклинивание деталей. С заеданием приходится встречаться в тяжело нагруженных подшипниках скольжения, зубчатых зацеплениях, передающих значительные крутящие моменты

в) Коррозионно-механическое изнашивание.

Коррозией называют разрушение поверхности металла в результате химического или электрохимического воздействия среды. Чистая металлическая поверхность легко подвергается химическому воздействию среды. Однако, если в процессе начавшейся коррозии продукты ее образуют прочно связанную с металлом пленку, изолирующую поверхность от коррозионной среды, то металл приобретает пассивность по отношению к ней.

- окислительное изнашивание.

Это изнашивание, возникающее вследствие химической реакции материала с кислородом окружающей среды. От других видов коррозионно-механического изнашивания оно отличается отсутствием агрессивной среды, протекает при нормальных и повышенных температурах при трении без смазочного материала или при недостаточном его количестве.

В процессе трения в воздушной среде (сухое трение) в условиях контакта со смазкой (граничное или жидкостное трение) контактирующие поверхности металлов окисляются.

При этом образуются окислы металлов с определенными физико-механическими свойствами, экранирующими поверхность трения от молекулярного воздействия (рисунок 1.6). Это позволяет исключить схватывание контактирующих поверхностей, стабилизирует износ, повышает износостойкость.

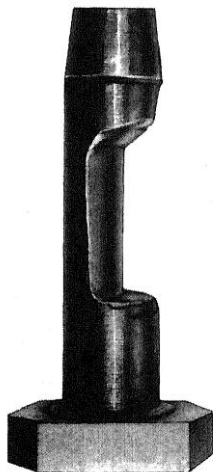


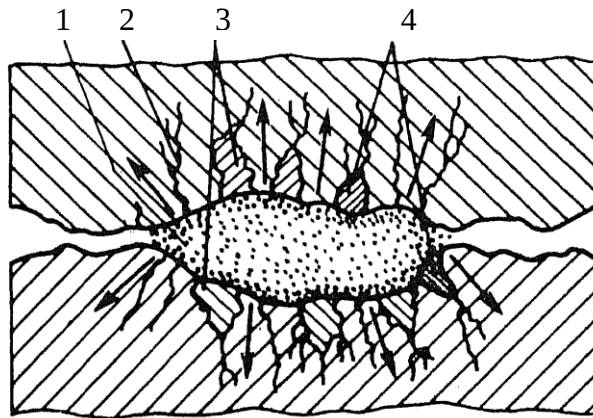
Рисунок 1.6 – Болт крепления коллектора авиационного поршневого двигателя, поврежденной вследствие окислительного изнашивания

- изнашивание при фреттинг-коррозии.

Фреттинг-коррозия – это коррозионно-механическое изнашивание соприкасающихся тел при малых колебательных относительных перемещениях.

Разрушение заключается в образовании на поверхностях взаимного касания деталей язв и продуктов коррозии в виде налета, пятен и порошка. Продукты фреттинг-коррозии состоят в основном из окислов.

Механизм фреттинг-коррозии заключается в следующем: под действием силы трения происходит активизация поверхности за счет циклических тангенциальных сил с последующим окислением. Окисление металлов происходит с увеличением объема, что приводит к местному повышению давления в сопряженных замкнутых контурах (рисунок 1.7).



1 – общая большая каверна; 2 – трещины; 3 – отколовшиеся объемы металла; 4 – отколовшиеся частицы с твердой структурой

Рисунок 1.7– Механизм изнашивания металлических поверхностей при фреттинг-коррозии

Это способствует при дальнейшей вибрации разрушению окисных пленок. Кроме того, окислы, как правило, имеющие большую твердость, чем основной металл, оказывают абразивное воздействие

- изнашивание вследствие пластической деформации

Этот вид изнашивания (смятие) заключается в изменении размеров или формы детали в результате пластической деформации ее микрообъемов. Пластическое деформирование обычно сопровождается износ металлов и наблюдается в зоне, непосредственно прилегающей к поверхности трения (зоны смятия на рисунке 1.8 показаны стрелками).

Смятие может произойти при трении, но может быть, и не связано непосредственно со скольжением или качением поверхностей.

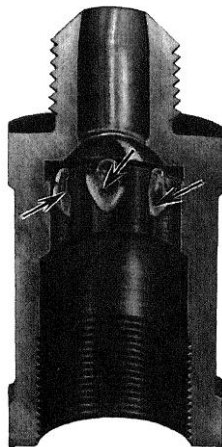


Рисунок 1.8 – Разрез корпуса шарового крана, поврежденного пластической деформацией

Смятие является характерным видом повреждения шпоночных пазов и шпонок, шлицевых соединений, штифтов и упоров, резьбовых соединений и других деталей. Пластическая деформация вызывается либо чрезмерными допускаемыми напряжениями, либо случайными значительными перегрузками.

- изнашивание вследствие диспергирования

Разрушение поверхностного слоя происходит в результате диспергирования (измельчения) отдельных участков контакта (рисунок 1.9). Интенсивность этого вида изнашивания невысока, а шероховатость поверхности деталей, малая.

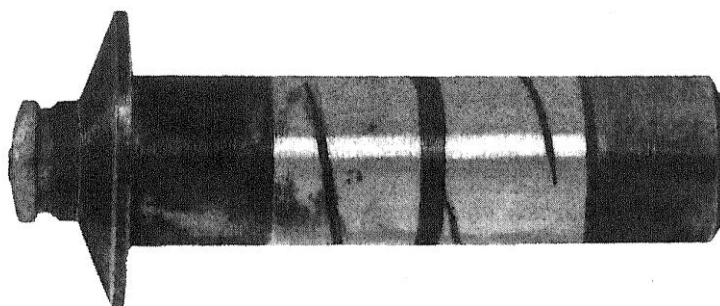


Рисунок 1.9 – Болт шарнирного соединения шасси самолета

Процесс изнашивания протекает так: на площадках фактического контакта материал подвергается многократной упругой и пластической деформации, что приводит к разупрочнению, разрыхлению в отдельных местах структуры материала с последующим отделением небольших блоков. Изнашиванию вследствие диспергирования подвергаются хорошо смазываемые шарнирно-болтовые соединения, валики различных агрегатов и сопряженные с ними подшипники, поршневые пальцы прицепных шатунов, пары трения топливной аппаратуры и др.

- изнашивание в результате выкрошивания вновь образуемых структур

При тяжелых условиях работы на поверхностях трения происходят физико-химические изменения. Они являются результатом пластического деформирования, повышения температуры слоев металла, прилегающих к зоне контакта, последующего быстрого охлаждения и химического действия окружающей среды (рисунок 1.10).

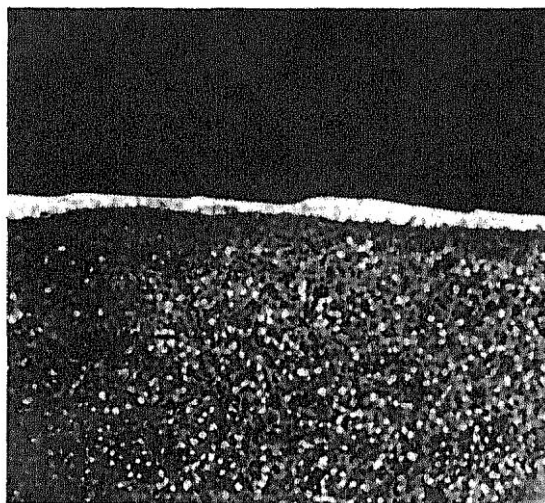


Рисунок 1.10 – Сечение стального золотника с образовавшимся белым слоем на его поверхности в процессе заклинивания в стальной втулке

Процесс возникновения и развития белого слоя на поверхностях трения представляется следующим. На отдельных участках фактического контакта происходит интенсивная пластическая деформация, сопровождающаяся значительным тепловыделением. Теплота, концентрируясь в поверхностных микрообъемах, создает большой температурный градиент по глубине, в результате скорости нагрева и охлаждения микрообъемов больше, чем при термической обработке. Повышение температуры в отдельные моменты выше критической точки приводит к образованию аустенита из феррито-цементитной смеси, а последующее резкое охлаждение — к появлению закалочных структур, которые в дальнейшем, подвергаясь пластической деформации и периодическому воздействию температурного фактора, переходят в белый слой. Аналогично описанному образуется белый слой при «пропахивании» поверхности трения абразивом.

Одновременно с образованием белого слоя возникает система внутренних напряжений, которая совместно с рабочими напряжениями приводит к растрескиванию слоя и выкрошиванию его отдельных частиц. Продукты износа, попадая в зазоры между сопряженными деталями, могут вызывать интенсивное, достигающее до катастрофического, изнашивание.

- водородное изнашивание

Водородное изнашивание происходит в результате наводороживания и охрупчивания стальной поверхности детали при контакте в процессе трения с углеводородными смазками, парами воды, деревом и пластмассой.

При небольших концентрациях водород образует твердые растворы внедрения, располагаясь в междоузлиях кристаллической решетки. При этом происходит увеличение параметра кристаллической решетки.

После достижения предела растворимости в твердом растворе водород образует химические соединения с примесями и легирующими элементами. В чистых металлах образуются гидриды в процессе охлаждения в виде тонких

пластинок по границам зерен и вдоль плоскостей скольжения и двойникования, а в сплавах – непосредственно при температуре диффузии.

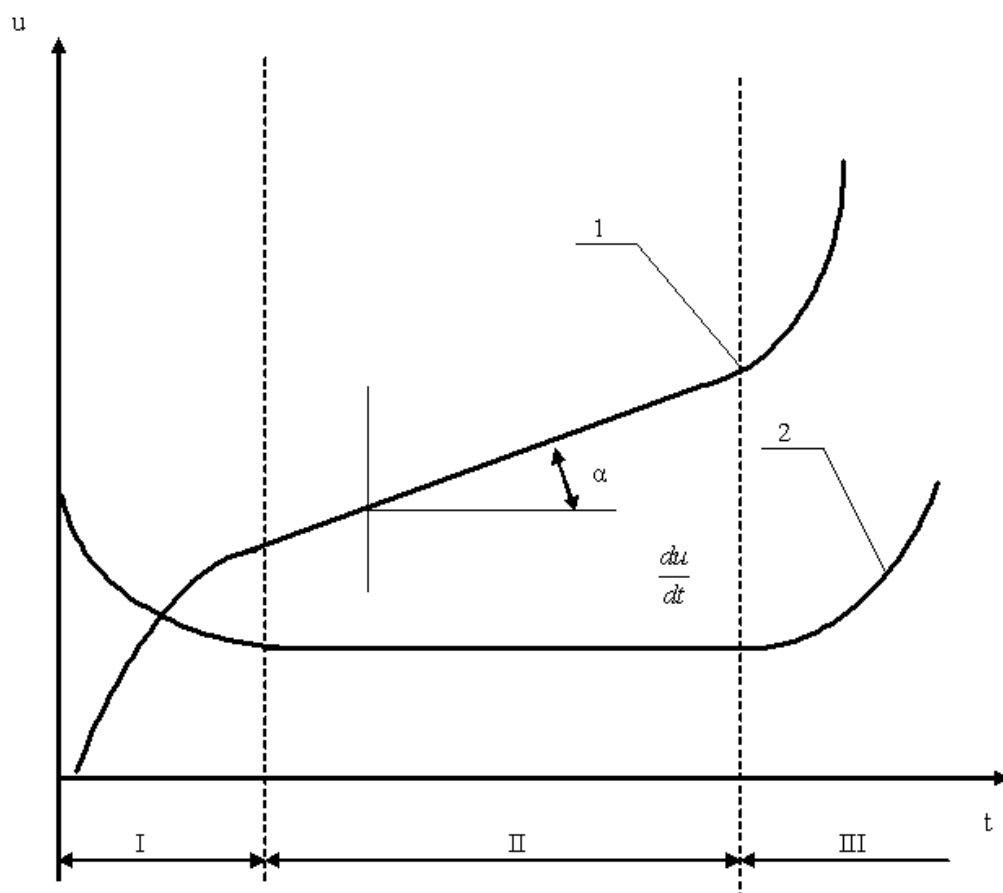
Удельный объем гидридов больше удельного объема металлов, что приводит к возникновению больших внутренних напряжений.

При больших пересыщениях водородом в дефектах и других несплошностях кристаллической решетки возникают высокие давления, приводящие к разрушению металлов.

### 1.1.3 Стадии изнашивания

Если отложить по оси абсцисс время работы пары трения  $t$ , а по оси ординат износ  $u$ , то получим кривую изнашивания детали во времени. Тангенс угла наклона  $\alpha$ , образованного осью абсцисс и касательной кривой в произвольной точке, определяет скорость изнашивания в данный момент времени.

На кривой изнашивания (рисунок 1.11) в общем случае (кривая 1) можно выделить 3 участка.



1 – теоретическая кривая изнашивания; 2 – скорость изнашивания

Рисунок 1.11 – Кривые изнашивания

Эти участки соответствуют 3 стадиям изнашивания:

I – начальное изнашивание, наблюдаемое при приработке детали;

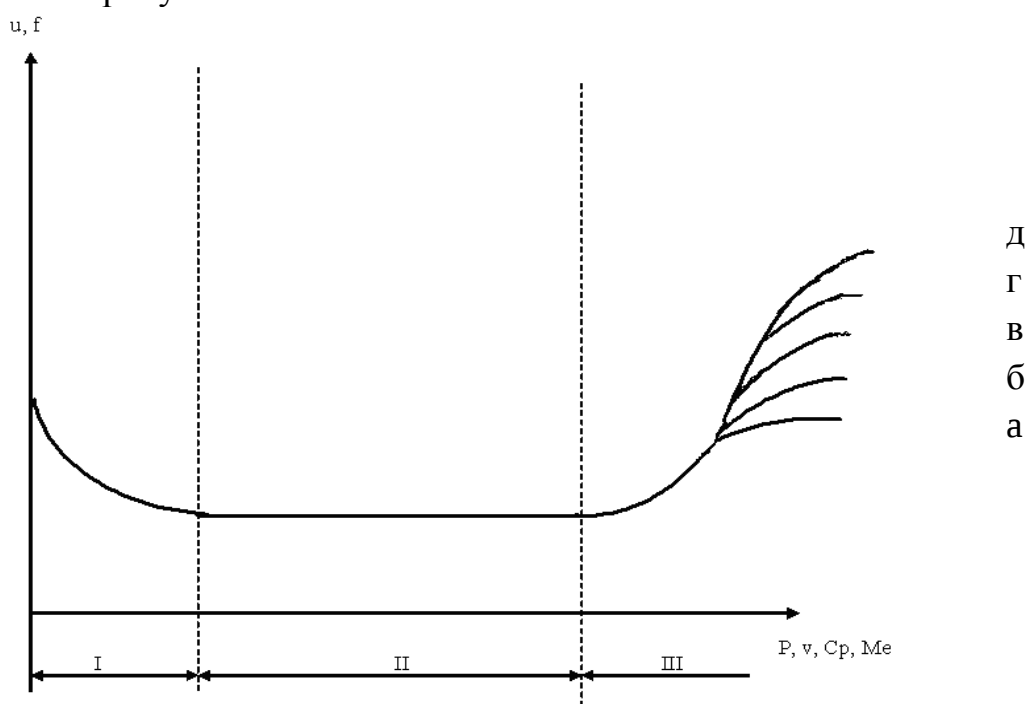
II – (прямолинейный участок кривой) установившееся изнашивание  $\text{tg}\alpha=\text{const}$ , наблюдаемое при нормальной эксплуатации сопряжения;

III – процесс резкого возрастания скорости изнашивания, соответствующий стадии катастрофического изнашивания.

Кривая 2 изображает скорость изнашивания; определяется как отношение износа детали (образца) к обусловленному пути на котором происходило изнашивание.

#### 1.1.4 Классификация видов изнашивания и повреждаемости материалов деталей машин при трении

Анализ различных видов изнашивания позволяет дать обобщенную зависимость износа от параметров работы узлов трения и материалов трущихся пар. Общая закономерность изменения коэффициентов трения и интенсивности изнашивания  $\mu$ ,  $f$  в зависимости от нагрузки  $P$ , скорости скольжения  $v$ , температуры  $T$ , природы контактирующих материалов  $Me$  и состава среды  $C_p$  показана на рисунке 1.12.



I – область неустановившихся процессов; II – нормальный окислительный (механо-химический) износ; III – область патологического износа (недопустимый износ, при котором происходит повреждаемость поверхности, кроме механо-химической формы абразивного износа); а – механо-химическая форма абразивного изнашивания; б – фреттинг-коррозия; в – схватывание 1-го рода; г – схватывание 2-го рода; д – механическая форма абразивного изнашивания

Рисунок 1.12 – Общая закономерность изменения коэффициента трения и интенсивности изнашивания

Основные признаки нормального износа в отличие от различных видов повреждаемости заключаются:

- в отсутствии любых видов разрушения основного металла;
- локализация разрушения в тончайших поверхностных слоях вторичных структур, образующихся при трении;
- в динамическом равновесии механо-химических процессов образования и разрушения вторичных структур, обеспечивающих установившееся протекание процесса.

## **1.2 Задание**

Определить вид и предположить причины износа предложенных образцов.

## **1.3 Порядок выполнения работы**

- 1.3.1 Ознакомьтесь со всеми разделами руководства;
- 1.3.2 Определите вид износа полученных образцов (в работе используется набор деталей с различными видами изнашивания);
- 1.3.3 Определите стадии и причины износа полученных образцов;
- 1.3.4 Сделайте выводы по полученным результатам.

## **1.4 Содержание отчета**

Необходимо указать цель работы, изобразить эскизы видов износа предложенных образцов. Сделайте выводы по причинам износа.

## **1.5 Контрольные вопросы**

- 1.5.1 Какие виды изнашивания Вы знаете?
- 1.5.2 Перечислите стадии изнашивания и их характеристики.
- 1.5.3 Какими параметрами характеризуется износ?
- 1.5.4 Как определяются износостойкость, интенсивность изнашивания, коэффициент трения?
- 1.5.5 Что называют предельным износом?
- 1.5.6 Как взаимосвязаны интенсивность изнашивания и коэффициент трения?

## **2 Лабораторная работа №2. Определение видов изнашивания материалов по внешним признакам**

Цель работы: научиться определять поверхности деталей, изнашивающихся при схватывании 1-го рода, схватывании 2-го рода (тепловом износе), работающие при окислительном, абразивном и осповидном изнашиваниях. Эти навыки позволят применять методы контроля качества изделий и объектов в сфере профессиональной деятельности, проводить анализ причин нарушений технологических процессов в машиностроении и разрабатывать мероприятия по их предупреждению.

### **2.1 Общие сведения**

Для многих случаев практики определение вида изнашивания может быть произведено по отдельным признакам, относящимся к условиям службы сопряженных деталей и узлов машин, количественным данным о скорости и интенсивности износа, внешним признакам износа на поверхности трения.

Правильное понимание связи между условиями службы и видом изнашивания, кроме возможностей определения вида износа, является также важным элементом создания рациональных конструкций машин и механизмов.

Процесс изнашивания определяется внешними силовыми воздействиями на поверхности трения, средой в зоне трения и материалами, из которых изготовлены сопряженные детали. Зависимость вида изнашивания от условий службы, к которым относятся внешние силовые воздействия и среды в зоне трения, неоспорима, но вид изнашивания зависит еще и от материала и способа обработки исследуемых деталей.

Условия службы во всех исследованиях изнашивания деталей машин являются важным и неотъемлемым элементом исследования. В одних и тех же условиях службы изменение материала исследуемых деталей или способа их обработки может вызвать изменение не только количественных, но и качественных характеристик износа, т.е. вида износа. Поэтому определять вид износа только по условиям службы, в которые не входит материал и технология обработки исследуемой детали, влияющие на вид износа, в принципе неверно.

Связывать вид изнашивания только с условиями службы было бы также неверно, как связывать его только с материалом, из которого изготовлены детали.

Если вид износа зависит от трех групп факторов (внешние механические воздействия, среда, материал), то определять и анализировать его в зависимости от одной группы или двух групп нельзя. Поэтому не случайно при паспортизации деталей машин, основной задачей которой является определение ведущего вида износа, рассматриваются в I и II разделах паспорта указанные три группы факторов.

Далеко не всегда учет даже всех трех групп факторов может явиться критерием определения вида изнашивания. Это объясняется тем, что законо-

мерности возникновения видов изнашивания в зависимости от всех трех групп факторов еще недостаточно изучены. Поэтому и введен третий раздел паспорта, освещающий качественные и количественные характеристики процесса изнашивания, являющиеся основанием для определения вида изнашивания.

Условия службы реальных деталей машин чрезвычайно разнообразны. Можно назвать множество случаев разных условий службы деталей и сопряжений различных машин и с этой позиции связывать точное определение вида изнашивания с условиями службы пока весьма затруднительно.

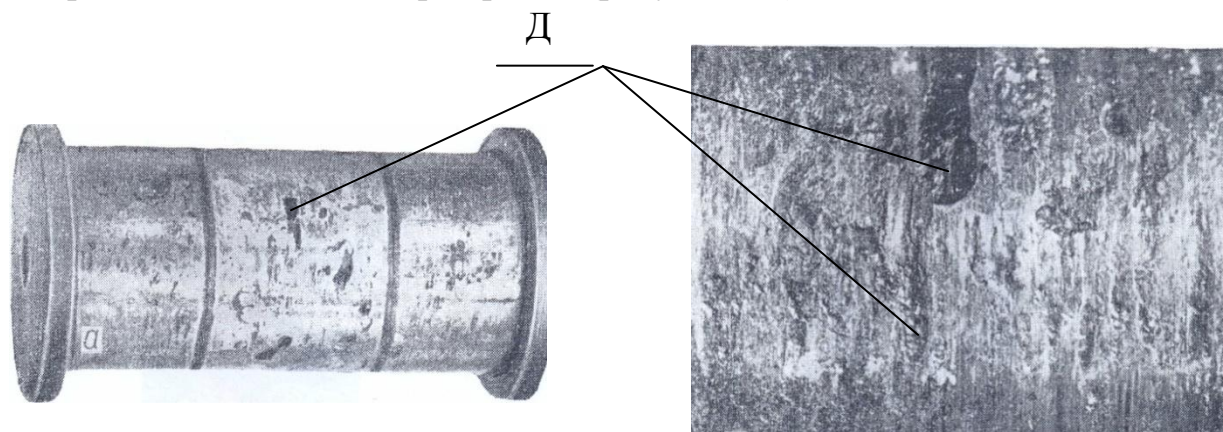
Условия службы являются одним из важнейших критериев определения вида изнашивания при условии детального изучения закономерностей изменения видов изнашивания в зависимости от внешних механических воздействий и среды в зоне трения.

Простым и достаточно важным для целого ряда случаев является метод определения видов изнашивания по его внешним признакам, наблюдаемым невооруженным взглядом и при небольших увеличениях в 5-10 раз.

### 2.1.1 Схватывание 1-го рода

Поверхности деталей машин, изнашивающихся схватыванием 1-го рода, во всех случаях характеризуются неравномерными грубыми шероховатостями с резкими переходами от вершин к впадинам, вырывами и наличием частиц на поверхности трения.

Твердые поверхности, изнашивающиеся схватыванием 1-го рода, имеют следы хрупких местных разрушений, мягкие поверхности характеризуются течением пластической деформации, вытеснением металла по направлению движения при трении, царапинами и глубокими впадинами, ориентированными по направлению движения при трении (рисунок 2.1).



а – палец противовеса авиадвигателя; б – поверхность изношенной части пальца ( $\times 10$ ); Д – дефекты, образующиеся при схватывании 1-го рода (местные разрушения, царапины, впадины).

Рисунок 2.1 – Схватывание 1-го рода

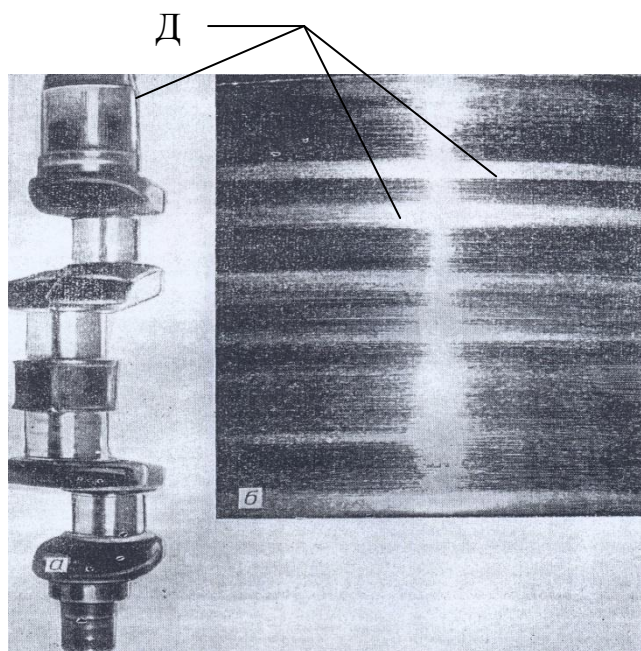
На деталях, изготовленных из мягких металлов, схватывание распространяется на всей поверхности контакта. На твердых деталях явление схватывания носит местный характер, не охватывая всей поверхности трения.

При контакте твердых поверхностей с мягкими металл переносится с мягких поверхностей на твердые. Но в случаях, когда твердые поверхности образованы электролитическими покрытиями или обладают большой хрупкостью, металл может переноситься с твердой на мягкую поверхности.

Поверхности, изнашивающиеся со схватыванием 1-го рода, дефекты, искажающие макрогеометрию деталей машин. Наблюдаются большие неравномерности линейного износа на поверхности трения. Цвета побежалости, размягчение и оплавление поверхностей, связанные с увеличением температуры при трении, отсутствуют.

### 2.1.2 Окислительное изнашивание

Поверхности деталей машин, изнашивающиеся окислением при трении, характеризуются большой чистотой. В зависимости от формы окислительного изнашивания поверхности деталей машин могут быть блестящими полированными или матовыми, напоминающими поверхности травления после полирования (рисунок 2.2).



а – коленчатый вал двигателя трактора; б – поверхность шатунной шейки ( $\times 20$ ); Д – дефекты, образующиеся при окислительном износе (чередующиеся блестящие и матовые участки).

Рисунок 2.2 – Окислительный износ

В ряде случаев блестящие и матовые участки чередуются на поверхности одной детали.

На поверхности деталей, работающих при окислительном изнашивании, не обнаруживаются следы схватывания и прилипания металла, нет также следов вырывов металла. В некоторых случаях могут быть легкие следы побежалости. На поверхности таких металлов могут наблюдаться при небольших увеличениях царапины, вызванные абразивным изнашиванием, как правило, сопутствующим окислительному процессу.

Поверхности, работающие с окислительным изнашиванием, имеют равномерные и небольшие изменения макрогеометрии деталей, линейный износ равномерно распределен по всей поверхности трения.

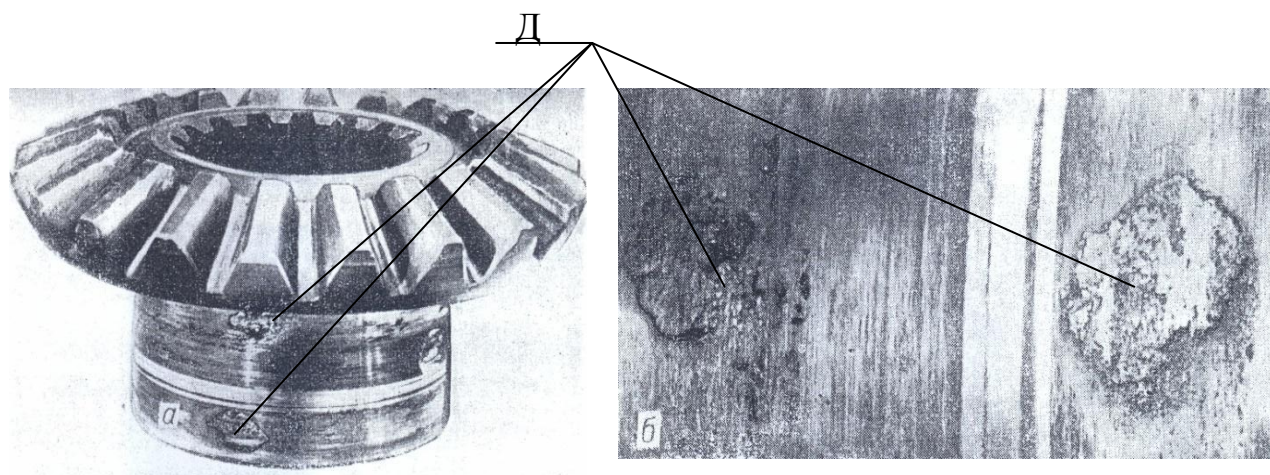
### 2.12.3 Схватывание 2-го рода (тепловой износ)

Поверхности деталей машин при тепловом износе (схватывание 2-го рода) характеризуются неравномерными грубыми шероховатостями с плавными переходами от вершин к впадинам, размыванием, налипанием и оплавлением металла на поверхностях трения. Хрупкого разрушения поверхностей трения при тепловом изнашивании не обнаруживается.

Поверхности деталей машин, работающие при начальных стадиях теплового износа, носят следы пластического разрушения, налипшие частицы имеют достаточно четкие очертания.

В конечных стадиях теплового износа на поверхностях деталей машин обнаруживаются следы разрушения сильно размягченного и оплавленного металла.

На поверхностях деталей машин, работающих в начальных стадиях теплового изнашивания, при небольших увеличениях могут быть обнаружены надрывы поверхности с малым интервалом чередования. Поверхности имеют цвета побежалости (рисунок 2.3).



а – шестерня полуоси заднего моста автомобиля (износ цилиндрической части); б – макроповерхность ( $\times 5$ );

Д – дефекты, образующиеся при схватывании 2-го рода (грубые шероховатости, волнистости, размывание, налипание и оплавление металла).

Рисунок 2.3 – Схватывание 2-го рода

Поверхности деталей машин, работающие при начальных стадиях теплового износа, несут следы пластического разрушения, налипшие частицы имеют достаточно четкие очертания.

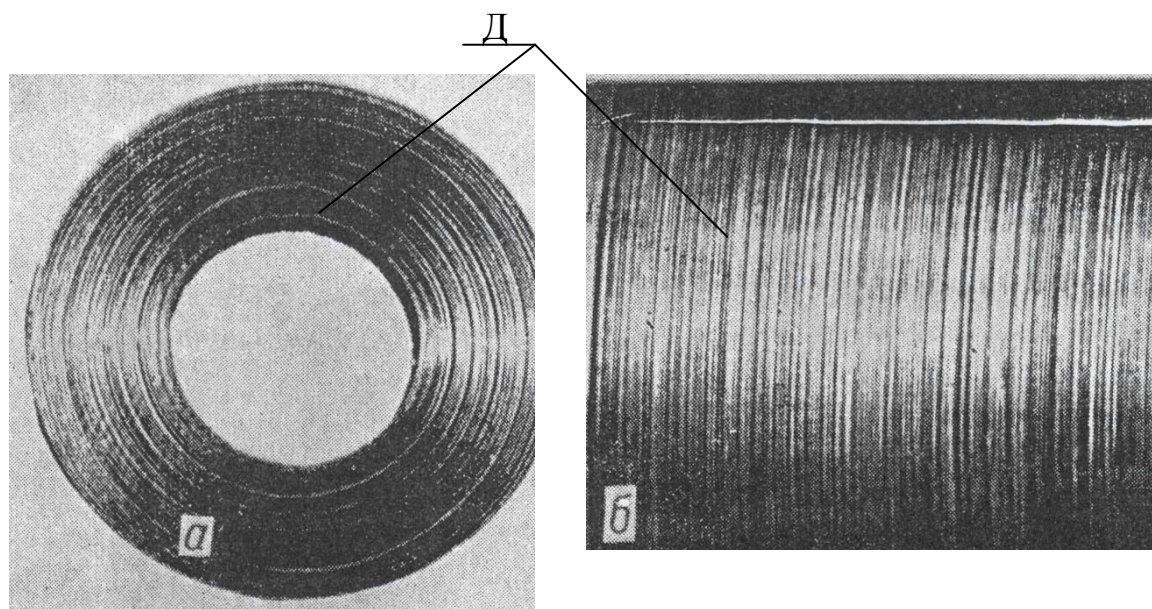
В конечных стадиях теплового износа на поверхностях деталей машин обнаруживаются следы разрушения сильно размягченного и оплавленного металла.

На поверхностях деталей машин, работающих в начальных стадиях теплового изнашивания, при небольших увеличениях могут быть обнаружены надрывы поверхности с малым интервалом чередования. Поверхности имеют цвета побежалости.

Поверхности деталей машин, изнашивающиеся схватыванием 2-го рода имеют большие линейные износы, неравномерно распределенные по поверхности трения и искажающие макрогеометрию деталей.

#### 2.1.4 Абразивное изнашивание

Поверхности деталей машин, работающие при абразивном изнашивании, во всех случаях характеризуются равномерными шероховатостями, величина которых зависит от рода абразива, материала деталей и условий трения (рисунок 2.4).



а – регулировочная шайба; б – шейка валика бензонасоса ( $\times 5$ );

Д – дефекты, образующиеся при абразивном износе (равномерная шероховатость, вид полированных или шлифованных поверхностей).

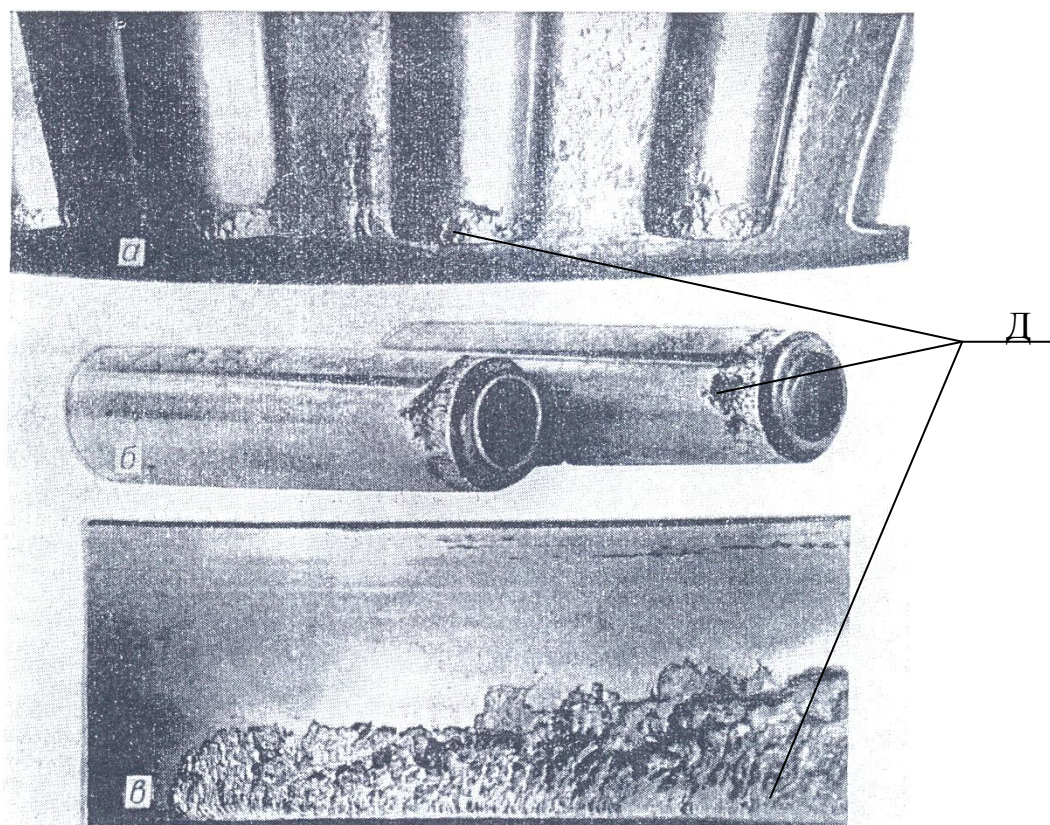
Рисунок 2.4 – Абразивный износ

Поверхности, работающие с абразивным изнашиванием, имеют всегда большие линейные износы, равномерно распределенные на поверхности контакта и сильно искажающие макрогеометрию деталей.

Чистота поверхности может находиться в очень широких пределах, однако во всех случаях при визуальном наблюдении или при небольших увеличениях внешний вид рабочих поверхностей деталей, испытывающих абразивное изнашивание, имеет вид полированных или шлифованных поверхностей. Никаких следов налипания, схватывания, оплавления, цветов побежалости при абразивном изнашивании не обнаруживается.

#### 2.1.5 Осповидный износ

Поверхности деталей машин, изнашивающиеся осповидным износом, характеризуются наличием трещин, единичных и групповых впадин и полного разрушения поверхностей контакта. Осповидные разрушения легко обнаруживаются невооруженным глазом (рисунок 2.5).



а – сепаратор с роликами ( $\times 3$ ); б – ролики ( $\times 3$ ); в – наружное кольцо ( $\times 2$ ); Д – дефекты, образующиеся при осповидном износе (трещины, впадины, следы хрупких разрушений).

Рисунок 2.5 – Осповидный износ деталей конического подшипника

На твердых деталях осповидное изнашивание носит характер хрупкого разрушения, мягкие поверхности имеют следы больших пластических де-

формаций, как бы уменьшающих следы осповидного разрушения сжатием впадин и сдвигом краев трещин. Во всех случаях осповидного разрушения места, еще не охваченные трещинами и впадинами, имеют блестящий или матовый цвет, обусловленный окислительным износом, сопутствующим осповидному износу.

Микрорельеф поверхностей деталей, работающих с осповидным изнашиванием, отличается большим изнашиванием и чистотой.

Осповидный износ возникает вследствие перегрузок поверхностей контакта, поэтому при неправильном монтаже осповидные разрушения могут возникать в отдельных, наиболее перегруженных участках контакта деталей. Осповидный износ крайне неравномерен по поверхности контакта и возникает в отдельных участках поверхностей деталей машин.

При осповидном износе твердых поверхностей макрорельеф деталей мало изменяется, возникают местные глубокие впадины и трещины. Линейный износ очень большой, но носит местный характер.

Осповидный износ мягких поверхностей резко изменяет форму деталей за счет больших пластических деформаций. Местные линейные износы при этом уменьшаются путем их заволакивания.

## **2.2 Задание**

Определить вид и предположить причины износа предложенных образцов по внешним признакам.

## **2.3 Порядок выполнения работы**

2.3.1 Ознакомьтесь со всеми разделами руководства;

2.1.2 Ознакомьтесь с альбомом типовых видов изнашивания (приложение А);

2.1.3 Определите вид износа полученных образцов (в работе используется набор деталей с различными видами изнашивания);

2.1.4 Определите вид износа поверхностей деталей машин, изнашивающихся схватыванием 1-го рода, схватыванием 2-го рода (тепловом износе), работающих при окислительном, абразивном и осповидном изнашиваниях;

2.1.5 Зарисуйте эскизы деталей с указанием вида изнашивания.

2.1.6 Сделайте выводы по полученным результатам.

## **2.4 Содержание отчета**

Необходимо указать цель работы, краткую характеристику видов изнашивания, изобразить эскизы видов износа предложенных образцов с указанием вида изнашивания и выявленных признаков. Сделайте выводы о значении грамотного выявления вида изнашивания при эксплуатации деталей машин.

## **2.5 Контрольные вопросы**

2.5.1 Как определить вид изнашивания по отдельным признакам работы деталей машин?

2.5.2 Как определить вид изнашивания по внешним признакам?

2.5.3 Какие основные признаки поверхностей деталей машин, изнашивающихся схватыванием 1-го рода?

2.5.4 Перечислите основные признаки твердых и мягких поверхностей деталей машин, изнашивающихся схватыванием 1-го рода.

2.5.5 Какие основные признаки поверхностей деталей, изношенных при контакте мягких поверхностей с твердыми схватыванием 1-го рода?

2.5.6 Расскажите об основных признаках поверхностей деталей машин при окислительном износе.

2.5.7 Какие основные признаки поверхностей деталей машин при тепловом износе?

2.5.9 Перечислите основные признаки поверхностей деталей машин при абразивном изнашивании.

2.5.10 Охарактеризуйте поверхности деталей машин при осповидном износе.

### **3 Лабораторная работа № 3. Классификация и выбор металлов и сплавов по их износостойкости**

Целью работы является получение практических навыков выбора материала для изготовления различных деталей машин и ознакомление с существующей классификацией металлических материалов по их износостойкости.

#### **3.1 Общие сведения**

Для изготовления деталей существующих и новых типов машин и механизмов применяются металлы и сплавы, разнообразные по составу, свойствам и методам их производства. Применяются сотни различных марок сталей, чугунов, сплавов на основе меди, алюминия, магния и других металлов. Выбор и назначение различных материалов для изготовления деталей машин производится на основе характеристик их прочности, полученных при статических, динамических и других испытаниях и на основании данных об их особых свойствах: коррозионной устойчивости, электросопротивлении, жароупорности и других. Для грамотного выбора материала при изготовлении деталей машин, разнообразных по составу и свойствам, существует их классификация.

На основе существующих классификаций все металлические материалы разделяются на отдельные классы, группы и подгруппы. В основу принятых классификаций положены различные признаки, позволяющие указать наиболее характерные особенности данного сплава или группы сплавов.

Наиболее обширная группа сплавов – стали – классифицируются по химическому составу, по способу производства и по применению. Классификация сталей по применению является наиболее характерной. Она позволяет лучше всего отметить основные свойства различных марок. Легированные стали дополнительно классифицируются по структуре. Хотя эта классификация и не является основной, но в металловедении она применяется достаточно часто. В основу этой классификации положена структура, которую сталь приобретает во время нормализации.

Чугуны классифицируются по механическим свойствам, что отражает вместе с тем и способы их производства. Сплавы на медной основе, применяемые в промышленности, классифицируются преимущественно по составу. Алюминиевые сплавы отличаются по химическому составу и свойствам не только в зависимости от назначения, но и в зависимости от способа изготовления из них деталей. Алюминиевые сплавы разделяются на сплавы, обрабатываемые давлением, и литейные сплавы. Сплавы на магниевой основе классифицируются таким же образом, как и алюминиевые сплавы. Подшипниковые сплавы (баббиты) классифицируются по составу.

Однако, несмотря на такую обширную и разнообразную классификацию металлических материалов по различным признакам, отсутствует клас-

сификация по износостойкости, которая определяла бы стойкость против износа металлов и сплавов.

Отсутствие классификации металлов и сплавов по такому признаку, как износостойкость, не способствует правильному использованию металлов и сплавов для изготовления деталей машин, что приводит к многим ошибкам при выборе и назначении металлов и сплавов для изготовления вновь спроектированных машин и механизмов, не способствует развитию эффективных методов ремонта машин и тормозит дальнейшую разработку и изыскание износостойких металлических материалов.

По классификации, разработанной на основании исследований сущности явлений, протекающих в тонких поверхностных слоях металла при трении скольжения, основными видами износа являются:

- 1) износ схватыванием 1-го рода;
- 2) окислительный износ;
- 3) тепловой износ или износ схватыванием 2-го рода;
- 4) абразивный износ.

Возникновение первых трех видов изнашивания связано с характеристиками свойств трущихся материалов и взаимодействия поверхностей с кислородом воздуха. Эти виды изнашивания могут возникать при сухом трении и появляться при граничной смазке.

Четвертый вид изнашивания – абразивный – зависит от наличия абразивной среды и свойств этой среды. В широких диапазонах при изменении условий трения в деталях машин обнаруживаются два сложных процесса:

- 1) процесс схватывания металлов, возникающий в результате взаимодействия поверхностей при трении при определенном пластическом состоянии поверхностных слоев, обусловленном скоростью деформации, напряженным состоянием и температурой активных объемов металла;
- 2) процесс окисления пластически деформируемых поверхностных слоев с образованием твердых химических соединений кислорода с металлом.

Каждый из этих двух процессов характеризуется резко различающимися проявлениями силы трения и величины износа, имеет определенные стадии, свою схему развития и определенный механизм разрушения поверхностных слоев. Проявление одного из этих процессов устраняет другой. В зависимости от того, как проявляется в металлах способность к схватыванию 1-го и 2-го рода и склонность к окислению при трении, а так же в зависимости от свойств оксидных пленок, образующихся на поверхности трения, металлы и сплавы следует классифицировать по износостойкости, которая определяет сроки службы и работы машин (таблица 3.1).

Классификация показывает, что все металлы и сплавы могут быть разделены на четыре большие группы.

Первая группа включает металлы и сплавы, которые проявляют недостаточную способность к схватыванию 1-го и 2-го рода. При условиях окислительного трения металлы и сплавы этой группы образуют защитные оксидные пленки, хорошо сопротивляющиеся изнашиванию, так как они от-

носителем прочно связаны с основным металлом и обладают более высокой твердостью по сравнению с исходным металлом.

Таблица 3.1 – Таблица классификации металлов и сплавов по износостойкости

| Группы металлов и сплавов | Характеристика способностей к проявлению схватывания при трении |                          | Характеристика способности к окислению при трении |                                          |                        | Оценка износостойкости                                                     |
|---------------------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
|                           |                                                                 |                          | Склонны к окислению                               |                                          | Не склонны к окислению |                                                                            |
|                           | Склонны к схватыванию                                           | Не склонны к схватыванию | Пленки окислов более стойкие, чем металл          | Пленки окислов менее стойкие, чем металл |                        |                                                                            |
| 1                         | +                                                               |                          | +                                                 |                                          |                        | Износостойкие в условиях окислительного вида изнашивания                   |
| 2                         |                                                                 | +                        | +                                                 |                                          |                        | Износостойкие                                                              |
| 3                         |                                                                 | +                        |                                                   | +                                        |                        | Износостойкие в условиях трения, исключая наличие окислительных процессов. |
| 4                         | +                                                               |                          |                                                   | +                                        |                        | Не износостойкие                                                           |

В первую группу входит железо и его сплавы, медь и некоторые ее сплавы (БрАМц, БрАЖМГ) и другие. Крайним представителем этой группы является алюминий, отличающийся большой склонностью к схватыванию и недостаточной стойкостью оксидных пленок.

Во вторую группу входят металлы и сплавы, которые не склонны к схватыванию, а при окислительном трении образуют защитные пленки окислов, хорошо сопротивляющихся изнашиванию. В эту группу входят олово и его сплавы, а так же целый ряд антифрикционных металлов и сплавов.

В третью группу входят металлы и сплавы, которые не проявляют способности к схватыванию, а при окислительном трении образуют очень хрупкие, интенсивно разрушающиеся пленки оксидов, резко усиливающие скорость износа. К этой группе относятся сурьма, висмут, кадмий и другие металлы.

Четвертая группа состоит из металлов и сплавов, в которых проявляется способность к схватыванию, а в условиях окислительного трения образуются интенсивно разрушающиеся пленки оксидов, в результате чего скорость

износа резко увеличивается. В эту группу входят цинк, магний и другие металлы.

Поверхности трения каждой группы металлов имеют свои характерные особенности, отражающие процессы их разрушения при трении.

На поверхности трения металлов первой группы в результате окислительного изнашивания образуются сплошные пленки оксидов, что хорошо видно на приведенной микрофотографии (рисунок 3.1).

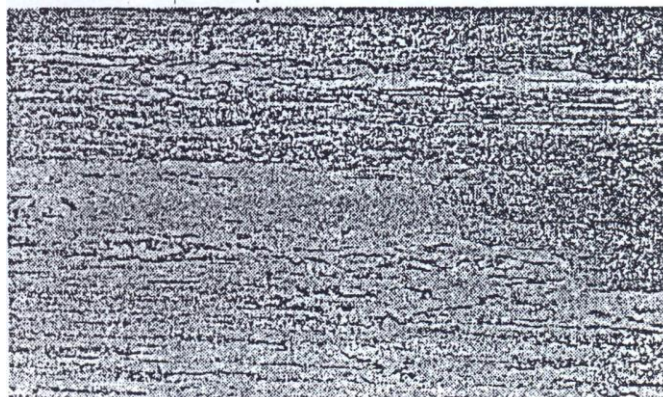


Рисунок 3.1 – Микрофотография поверхности трения образца (сталь 45), испытанного в среде кислорода,  $V_{\text{ск}} = 6$  м/с ( $\times 350$ )

Микротвердость поверхностей трения, покрытых пленкой оксидов, гораздо выше микротвердости исходного металла.

Поверхность трения, характерная для образцов из металлов первой группы, изнашивание которых произошло в результате проявления способности схватывания, показана на рисунке 3.2, которая с достаточной ясностью указывает на большую склонность к проявлению схватывания металлов первой группы.

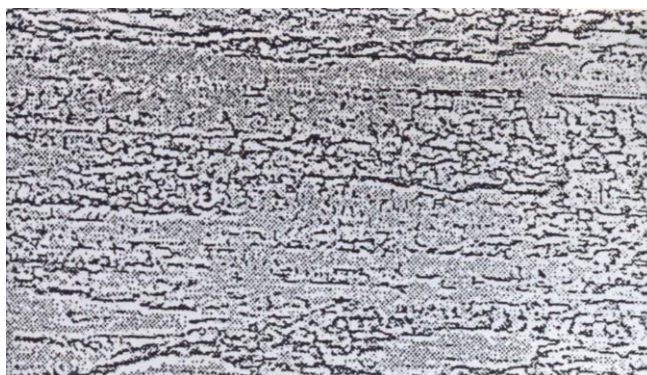


Рисунок 3.2 – Микрофотография поверхности трения образца (сталь 45), испытанного в среде аргона;  $V_{\text{ск}} = 6$  м/с ( $\times 350$ )

На рисунке 3.3 представлена микрофотография поверхности трения, характерная для образцов металла второй группы, которые испытывались при наличии окислительных условий трения. На рисунке поверхность трения

покрыта сплошными пленками оксидов, обладающими большой износостойкостью благодаря их твердости.



Рисунок 3.3 – Микрофотография поверхности трения образца (Бр.0-14), испытанного в среде кислорода;  $V_{ск} = 6 \text{ м/с}$  ( $\times 350$ )

Микрофотография поверхностей трения, характерных для материалов третьей группы, показана на рисунках 3.4 и 3.5.

На рисунке 3.4 показана поверхность трения, образующаяся в результате изнашивания металлов третьей группы в условиях окислительного трения. Поверхность трения покрыта рыхлыми непрочными пленками оксидов.

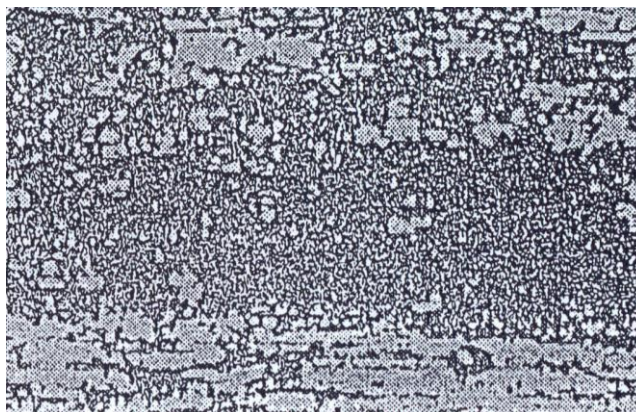


Рисунок 3.4 – Микрофотография поверхности трения образца (сурьма), испытанного в среде кислорода;  $V_{ск} = 6 \text{ м/с}$  ( $\times 350$ )

На рисунке 3.5 показано, что в условиях, благоприятных для развития процессов схватывания, металлы третьей группы не проявляют склонности к схватыванию.

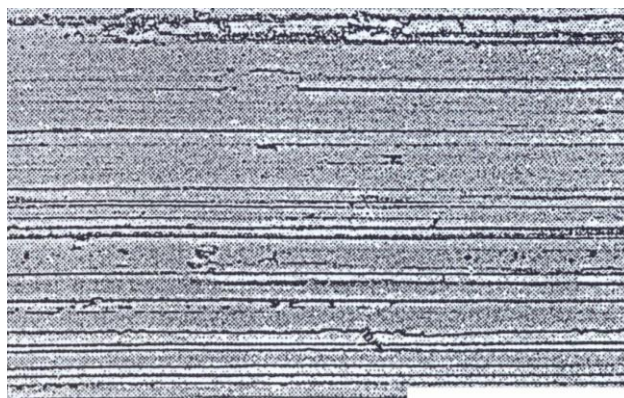


Рисунок 3.5 – Микрофотография поверхности трения образца (сурьма), испытанного в среде аргона;  $V_{\text{ск}} = 6 \text{ м/с}$  ( $\times 350$ )

Металлы четвертой группы в условиях окислительного трения образуют на поверхностях интенсивно разрушающиеся пленки оксидов, а в условиях, благоприятных для развития процессов схватывания, в значительной степени проявляют способность к схватыванию (рисунки 3.6 и 3.7.).

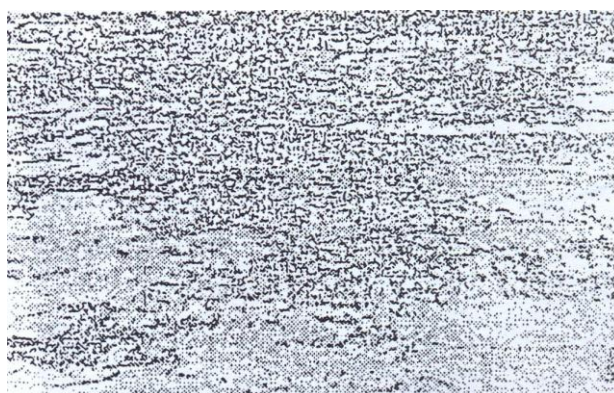


Рисунок 3.6 – Микрофотография поверхности трения образца (цинк), испытанного в среде кислорода;  $V_{\text{ск}} = 6 \text{ м/с}$  ( $\times 350$ )

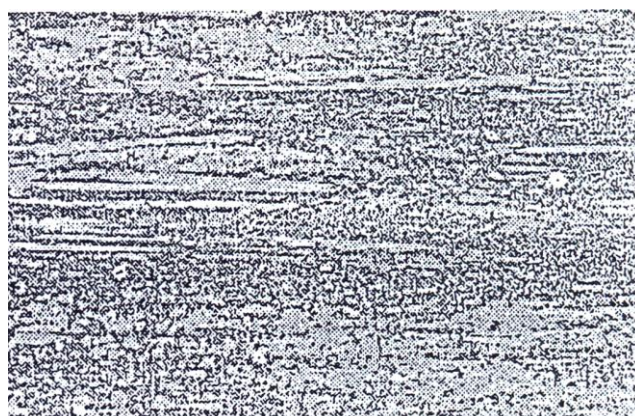


Рисунок 3.7 – Микрофотография поверхности трения образца (цинк), испытанного в среде аргона;  $V_{\text{ск}} = 6 \text{ м/с}$  ( $\times 350$ )

Металлы и сплавы первой и второй групп нашли широкое применение для изготовления деталей машин, работающих в условиях трения 1-го и 2-го рода. Для повышения износостойкости металлов и сплавов первой группы ведется борьба за ограничение процессов схватывания путем уменьшения возможностей пластической деформации (для чего производится специальная упрочняющая механическая, термомеханическая, химико-термическая обработка и др.) и предпринимаются меры для усиления защитного действия окислов (оксидирование, фосфатирование, сернение и др.).

При использовании металлов второй группы, к которой относятся антифрикционные металлы и сплавы, бороться со схватыванием не надо. Здесь, главным образом, нужно добиваться улучшения таких свойств металлов и сплавов, как прирабатываемость, снижение коэффициента трения и повышения общей износостойкости путем введения легирующих присадок.

Металлы и сплавы третьей и четвертой группы не нашли применения для изготовления деталей машин, работающих в условиях трения 1-го и 2-го рода, потому что превалирующим процессом, возникающим при взаимодействии между трущимися поверхностями металла и кислородом воздуха, является окисление, которое не может дать положительных результатов вследствие образования в металлах и сплавах этих групп хрупких, легко разрушающихся пленок.

Предлагаемая классификация металлов и сплавов по их износостойкости включает основные положения из общей теории трения и изнашивания деталей машин. Данная классификация позволяет научно и обоснованно подбирать и назначать для изготовления деталей машин различные металлы и сплавы, а также назначать методы их обработки. Она позволяет обоснованно проектировать технологии изготовления и ремонта деталей машин и разрабатывать методы изготовления новых сплавов с определенными, необходимыми свойствами в отношении трения и изнашивания.

## **3.2 Задание**

Провести испытание для выявления характера износа и определить группу металла по износостойкости.

## **3.3 Порядок выполнения работы**

### **3.3.1 Приборы, оборудование и принадлежности:**

- атласы микроструктур изношенных деталей (приводится в приложении А);
- образцы изношенных деталей;
- увеличительная лупа, штангенциркуль.

### **3.3.2 Проведение испытаний**

3.3.2.1 Ознакомиться со всеми разделами методического указания.

3.3.2.2 Ответить на контрольные вопросы.

3.3.2.3 По рисункам атласа изучить поверхности трения материалов всех четырех групп металлов.

3.3.2.4 Получить у преподавателя 2-3 образца изношенных деталей. Зарисовать эскизы деталей, выявить характер износа и определить группу металла по износостойкости.

### **3.4 Содержание отчета**

В отчете должны быть изложены: цель работы, краткие сведения по классификации и выбору металлов и сплавов по их износостойкости, рисунки изношенных деталей и характеристика их работы, выводы о значении классификации по износостойкости и выбору металлов и сплавов при изнашивании.

### **3.5 Контрольные вопросы**

3.5.1 На основании каких факторов происходит выбор и назначения материалов для изготовления деталей машин?

3.5.2 Какие признаки положены в основу принятых классификаций?

3.5.3 Как классифицируются материалы в материаловедении?

3.5.4 Перечислите основные виды износа и дайте их определение.

3.5.5 Какие процессы наблюдаются в деталях машин при изменении условий трения и чем они характеризуются?

3.5.6 Какие признаки заложены в классификации материалов по износостойкости?

3.5.7 Назовите группы материалов по износостойкости и дайте краткую характеристику каждой группе.

3.5.8 Какие материалы относятся к каждой группе при классификации по износостойкости?

3.5.9 Какие характерные черты имеют поверхности трения материалов каждой группы?

3.5.10 Где применяются материалы этих групп?

3.5.11 Что включает классификация по износостойкости?

3.5.12 Что позволяет классификация по износостойкости?

## **4 Лабораторная работа № 4. Исследование зависимости абразивной износостойкости сталей от ее механических характеристик**

Целью работы является установление взаимосвязей износостойкости и механических характеристик стали и определение основных критериев оценки износостойкости стали.

### **4.1 Общие сведения**

#### **4.1.1 Взаимосвязь износостойкости и механических характеристик стали**

При выборе стали всегда стремятся иметь высокую ее износостойкость. В отличие от прочности величина износостойкости стали всегда зависит от многих факторов, в первую очередь от соотношения механических характеристик абразива и металла, а также от нагрузки, температурного воздействия и угла атаки абразивного потока.

При изменении свойства абразива возможно изменение износостойкости сталей от малых до больших значений, даже с тенденцией к бесконечности.

Увеличением удельной нагрузки на поверхность трения можнократно изменить износостойкость. До настоящего времени основным критерием механического изнашивания стали считали ее твердость. Этот подход утвердился, прежде всего, потому, что механическое изнашивание закаленных сталей коррелируют с ее твердостью, полученной при разных температурах отпуска.

На самом деле природа изнашивания значительно сложнее и износостойкость нельзя оценивать только твердостью. Влияние на износостойкость механических характеристик стали, кроме твердости, долгое время не изучали.

Абразивное изнашивание является механическим и сводится к съему металла с поверхности трения при сложном напряжении. Абразивное изнашивание – механическое изнашивание материала в результате режущего и царапающего действия твердых тел или частиц, находящихся в свободном или закрепленном состоянии.

В зависимости от условий взаимодействия детали с абразивными частицами разрушение металла может происходить:

- а) путем микрорезания;
- б) многократной пластической деформации поверхности трения;
- в) коррозионно-механического изнашивания.

Абразивные частицы могут иметь различную форму и быть самым различным образом ориентированы относительно сопряженной поверхности. Способность абразивного зерна вдавливаясь в поверхность зависит не только от соотношения их твердостей, но и от геометрической формы зерна.

Как уже отмечалось выше, на процесс абразивного изнашивания может влиять природа абразивных частиц, агрессивность среды, свойства изнашиваемых поверхностей, ударное взаимодействие, нагрев и другие факторы. Общим для абразивного изнашивания является механический характер разрушения поверхности.

Отделение частиц металла при изнашивании по своей природе – разновидность разрушения, поэтому к нему вполне правомерно применять классические понятия о прочности. В связи с этим методически целесообразно рассмотреть роль всех стандартных характеристик стали, так как иных критериев оценки износостойкости сталей пока нет.

Проведение исследований взаимосвязи износостойкости закаленной стали со всеми стандартными механическими характеристиками имело своей целью подбор стали разных структурных классов с разным уровнем механических характеристик: перлитного класса средней и высокой прочности, карбидного, аустенитного, мартенситностареющего классов.

В равных условиях изнашивания при трении скольжения по абразиву оценивали раздельное влияние на износостойкость каждой механической характеристики стали: временное сопротивление предела текучести, твердости, относительного удлинения, относительного сужения, ударной вязкости, сопротивления срезу, предела выносливости.

Износостойкость оценивали как величину, обратную износу, а износ – по потере массы образца. При одной схеме механического изнашивания сталей с одинаковой основой влияние всех характеристик на износостойкость было различным.

В условиях трения скольжения по абразиву при повышении твердости, пределов прочности и текучести износостойкость увеличивается, а при увеличении относительного удлинения, относительного сужения, ударной вязкости – снижается.

В переходной пограничной зоне (переход от зоны хрупких структур к зоне вязких) одному значению характеристики (предел текучести, относительное удлинение, относительное сужение) соответствует несколько значений износостойкости.

Это объясняется только разными структурами, полученными при разных температурах отпуска.

В закаленной стали при разных температурах отпуска сопротивление срезу и предел выносливости имеет определенную симметрию относительно границы хрупко-вязкого перехода: по мере повышения температуры отпуска эти характеристики увеличиваются и, достигнув максимального значения, начинают снижаться.

Взаимной однозначной зависимостью износостойкость не связана ни с одной стандартной механической характеристикой.

Раздельный учет взаимосвязи износостойкости стали со всеми стандартными механическими характеристиками позволил заключить, что ни одна из них не может служить критерием оценки износостойкости, поскольку

ни с одной из них износостойкость не связана взаимно однозначной зависимостью.

В каждом классе сталей тенденция изменения показателей прочности и пластичности в условиях нагрева при отпуске неодинакова:

- для сталей перлитного класса при повышении температуры отпуска показатели прочности снижаются, а показатели пластичности увеличиваются;

- для сталей мартенситного класса – та же тенденция, что и для сталей перлитного класса, но снижение характеристик прочности и увеличение характеристик пластичности смещаются в область более высоких температур отпуска;

- для сталей аустенитного класса при повышении температуры отпуска до 400 °С показатели прочности и пластичности не изменяются; дальнейшее повышение температуры отпуска приводит к снижению предела прочности и характеристик пластичности, твердость сталей несколько повышается;

- для мартенситностареющих сталей по мере повышения температуры отпуска до 500 °С показатели прочности увеличиваются при сохранении высокой пластичности;

- для сталей карбидного класса по мере повышения температуры отпуска показатели прочности сталей сначала снижаются, а при температуре отпуска свыше 400 °С начинают увеличиваться; характеристики пластичности почти не изменяются.

Прочностные характеристики сталей в каждом структурном классе определяют уровень и тенденцию изменения износостойкости при нагреве (таблица 4.1).

Пластичность и ударная вязкость влияют на износостойкость в той мере, в какой они повышают предел прочности и выносливости.

Состав стали имеет определяющее значение, так как этим обусловлены все свойства и структурная устойчивость закаленной стали после нагрева, а, следовательно, и ее износостойкость.

Таблица 4.1 – Физико-механические свойства сталей

| Сталь    | HRC | $\sigma_B$ ,<br>МПа | $\sigma_{0,2}$ ,<br>МПа | $\delta$ ,<br>% | $\psi$ ,<br>% | KCU,<br>Дж/см <sup>2</sup> | I,<br>г <sup>-1</sup> |
|----------|-----|---------------------|-------------------------|-----------------|---------------|----------------------------|-----------------------|
| 45       | 18  | 570                 | 315                     | 12              | 30            | 0,3                        | 1,1                   |
| 95X18    | 24  | -                   | -                       | -               | -             | -                          | 2,4                   |
| H18K9M5T | 42  | 1900                | 1830                    | 8               | 50            | 0,6                        | 0,75                  |
| 110Г13Л  | 18  | 800                 | 400                     | 25              | 35            | 0,7                        | 0,9                   |
| P18      | 63  | 1600                | -                       | -               | -             | -                          | 3,2                   |

Максимальную износостойкость имеет сталь карбидного класса P18. Высокая износостойкость этой стали обусловлена ее высокой твердостью и теплостойкостью; высокая твердость сохраняется до температуры 600 °С.

Мартенситостареющая сталь H18K9M5T имеет высокую теплостойкость и низкую твердость, а, следовательно, и износостойкость. Твердость и прочность сохраняются до температуры отпуска 300 °С.

У сталей аустенитного класса низкая износостойкость обусловлена ее малой прочностью.

Проанализировав результаты исследования изнашивания, можно сделать вывод: относительное сужение, ударная вязкость не влияет на износостойкость.

Предел прочности начинает заметно влиять на износостойкость стали только при высокой твердости. При постоянных значениях твердости 30, 40, 50 HRC значительное изменение предела прочности не влияет на износостойкость. При повышении твердости более 50 HRC увеличение предела прочности приводит к линейному увеличению износостойкости.

В механизме абразивного изнашивания определяющей является прочностная основа: структура стали и другие механические характеристики не определяют результирующую тенденцию функциональной связи.

Так при увеличении предела текучести в два раза и при твердости (30, 40, 50 HRC) износостойкость остается постоянной. И только повышение твердости до 60 HRC незначительно влияет на износостойкость. И твердость здесь является определяющей.

#### 4.1.2 Основные критерии оценки износостойкости стали

Влияние характеристик пластичности и ударной вязкости на износостойкость при постоянных уровнях твердости аналогично.

Относительное удлинение оказывает влияние на износостойкость при постоянных уровнях твердости. При увеличении относительного удлинения примерно в три раза износостойкость повышается незначительно.

Относительное сужение оказывает большое влияние на износостойкость при высоких значениях твердости. При относительном сужении около 40 % повышение твердости от 30 до 50 HRC приводит к увеличению износостойкости примерно в три раза.

Интенсивность прироста износостойкости с повышением ударной вязкости при равных уровнях твердости более значимы. Чем выше твердость, тем существеннее влияние ударной вязкости. По комплексу этих характеристик можно ранжировать износостойкость сталей, не проводя испытаний на изнашивание.

Аналогичные зависимости получены для характеристик твердость-относительное сужение и твердость-ударная вязкость, которые показывают, что двух механических характеристик недостаточно для достоверной оценки износостойкости сталей.

Между пределом выносливости и износостойкостью стали линейная зависимость существует только до определенного значения ее предела выносливости.

При твердости 50HRC предел выносливости стабилизируется, а затем начинает снижаться, тогда как износостойкость продолжает увеличиваться пропорционально твердости.

В области вязкого разрушения предел выносливости оказывает существенное влияние на износостойкость. В области высокой твердости, для которой характерно хрупкое разрушение, предел выносливости не может служить критерием оценки износостойкости.

Анализ полученных зависимостей износостойкости от основных механических характеристик показывает то, что ни одна стандартизированная механическая характеристика не может служить критерием оценки износостойкости. Этот критерий должен быть комплексным.

## **4.2 Задание**

Провести испытание для определения основных критериев оценки износостойкости стали

## **4.3 Порядок выполнения работы**

### **4.3.1 Приборы, оборудование и принадлежности:**

- образцы из углеродистых сталей 45 с различной твердостью;
- твердомер ТП-2;
- аналитические весы ВЛКТ-3;
- штангенциркуль;
- машина трения СМЦ-2.

### **4.3.2 Проведение испытаний**

4.3.2.1 Ознакомиться со всеми разделами работы.

4.3.2.2 Ответить на контрольные вопросы.

4.3.2.3 Получить у преподавателя образцы из углеродистой стали 45 с твердостью 30, 40, 50HRC.

4.3.2.4 Нанести отпечатки пирамидой с квадратным основанием на плоской поверхности образца и произвести замеры длин диагоналей.

4.3.2.5 Определить точный вес образцов при помощи аналитических весов.

4.3.2.6 Провести испытания при определенной нагрузке в течении 40 минут

4.3.2.7 Определить величину массового износа.

4.3.2.8 Построить график зависимости износостойкости материала от его твердости.

#### **4.4 Содержание отчета**

В отчете должны быть изложены: цель работы, краткие сведения о взаимосвязи износостойкости и механических характеристик стали, основные критерии оценки износостойкости стали, величины линейного и массового износов, график зависимости износостойкости материала от твердости и прочности, выводы о влиянии механических характеристик на износостойкость сталей.

#### **4.5 Контрольные вопросы**

4.5.1 Что является основным критерием при определении износостойкости материала, и от каких факторов зависит износостойкость материала?

4.5.2 Какое влияние оказывает твердость на изнашивание материала?

4.5.3 Как действует пластичность и ударная вязкость на износостойкость материала?

4.5.4 Как влияет прочность на износостойкость материала?

4.5.5 Влияет ли структура стали на износостойкость материала?

4.5.6 Оцените влияние предела прочности, предела текучести, относительного удлинения и сужения, ударной вязкости различных сталей при условии равной твердости на их износостойкость.

## **5 Лабораторная работа № 5. Влияние углерода в сталях на ударно-абразивное изнашивание**

Целью работы является установление влияния содержания углерода в сталях на механизм ударно-абразивного изнашивания

### **5.1 Общие сведения**

#### **5.1.1 Влияние содержания углерода в сталях на ее износостойкость**

Содержание углерода в сталях оказывает существенное влияние на их структуру и механические свойства. При абразивном изнашивании в условиях трения, скольжения, когда динамика процесса проявляется незначительно или не проявляется вовсе, повышение содержания углерода в сталях положительно влияет на их износостойкость. В условиях абразивного изнашивания наибольшую износостойкость имеет структура высокой твердости, включающие твердые карбидные фазы, устойчивые при высоких температурах, обусловленных трением.

При ударно-абразивном изнашивании роль содержания углерода в сталях неоднозначна и существенно зависит от энергии удара и наличия абразива в зоне трения.

С целью изучения содержания углерода в сталях на ее износостойкость в условиях удара по абразиву проводили испытания на изнашивание цилиндрических образцов диаметром 10 мм путем многократных ударов по слою незакрепленного абразива, расположенного в виде слоя толщиной 1 мм на металлической наковальне. Содержание углерода в сталях изменялось от 0,4 % до 1,2 %. Образцы из углеродистых сталей марок 45, У7, У8, У12 подвергли закалке при оптимальных температурах и отпуску от 100 °С до 500 °С: были испытаны закаленные образцы без отпуска. В качестве абразивного материала применяли карбид кремния КЧ-63; работа единичного удара образца по абразиву была 5 Дж и 20 Дж.

При низкой энергии удара стали с различным содержанием углерода показали практически одинаковую износостойкость (рисунок 5.1). Повышение энергии удара до 20 Дж вызвало общее снижение износостойкости всех сталей, но уровень износостойкости сталей с различным содержанием углерода был различен. Лучшие результаты показали стали, близкие по содержанию углерода к эвтектоидным; стали марки У7 и У8 имели максимальную и практически равную износостойкость. Износостойкость доэвтектоидной стали 45 и заэвтектоидной стали У12 ниже износостойкости стали У8, что связано с интенсивной пластической деформацией в рельефе изнашивания; для стали У12 характерно хрупкое изнашивание.

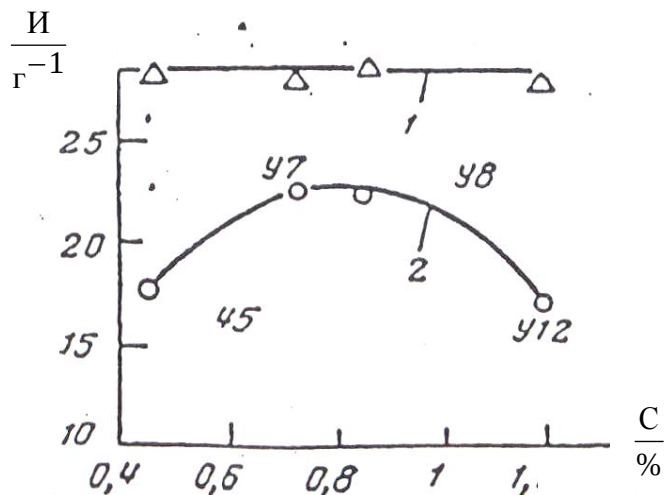


Рисунок 5.1 – Зависимость износостойкости И углеродистых сталей от содержания в них углерода С (абразив КЧ-63) при энергии удара  $W_{уд}$ : 1 - 3 Дж, 2 - 20 Дж.

Структурное состояние закаленной стали, связанное с температурой отпуска, обуславливает своеобразный характер изнашивания сталей с различным содержанием в них углерода (рисунок 5.2). При энергии удара 5 Дж наибольшее различие по износостойкости сталей с разным содержанием углерода зафиксировано в области низких температур отпуска. Повышение температуры до  $160^{\circ}C$  вызвало увеличение износостойкости всех сталей; при повышении температуры отпуска до  $200^{\circ}C$  тенденция изменения износостойкости сталей с различным содержанием углерода была различна: для сталей У7, У10, У12 она продолжала увеличиваться, для стали 45 – начала уменьшаться. Дальнейшее повышение температуры отпуска сокращало различие износостойкостей сталей с разным содержанием углерода; при температуре отпуска  $400^{\circ}C$  все стали имели практически одинаковую износостойкость.

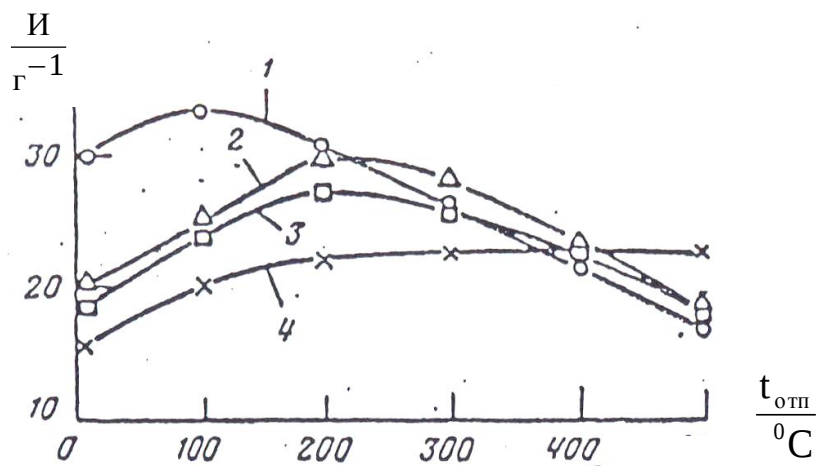


Рисунок 5.2 – Зависимость износостойкости И углеродистых сталей от температуры отпуска  $t_{отп}$  при энергии удара 5 Дж с различным содержанием в них углерода С: 1 - 0,5%; 2 - 0,7%; 3 - 1%; 4 - 1,2%

Тенденции изменения износостойкости испытываемых сталей при повышении температуры отпуска от 200 °С до 500 °С были различны: для сталей 45, У7, У10 она снижалась, для стали У12 практически не изменялась.

Повышение энергии удара до 20 Дж вызвало смещение этих зависимостей (рисунок 5.3). Одинаковую износостойкость все стали обнаружили вблизи границы хрупко-вязкого перехода, т.е. при температуре от 160 °С до 180 °С. Кроме того, различие износостойкостей сталей при низком отпуске и без отпуска сократилось, а при высоких температурах отпуска порядковое положение сталей по их износостойкости изменилось: более высокую износостойкость в интервале температур отпуска от 200 °С до 500 °С показали стали У8 и У12; износостойкость сталей 45 и У7 были ниже. В свою очередь, различие износостойкостей сталей У8, У12 и сталей 45, У7 было весьма незначительным.

Повышение энергии удара выявило еще одну весьма любопытную особенность в динамике изнашивания углеродистых сталей при разных температурах отпуска. Она состоит в том, что максимальная износостойкость получена для эвтектоидных сталей при температуре отпуска 300 °С. В области низких температур отпуска и без отпуска увеличение содержания углерода в стали снижает износостойкость. При температурах отпуска 200 °С, 300 °С, 400 °С и 500 °С увеличение содержания углерода при отпуске в интервале этих температур увеличения износостойкости не вызывает. Сталь У12 при разных температурах отпуска имеет разную износостойкость, но во всех случаях она или ниже, чем у стали У8, или такого же порядка.

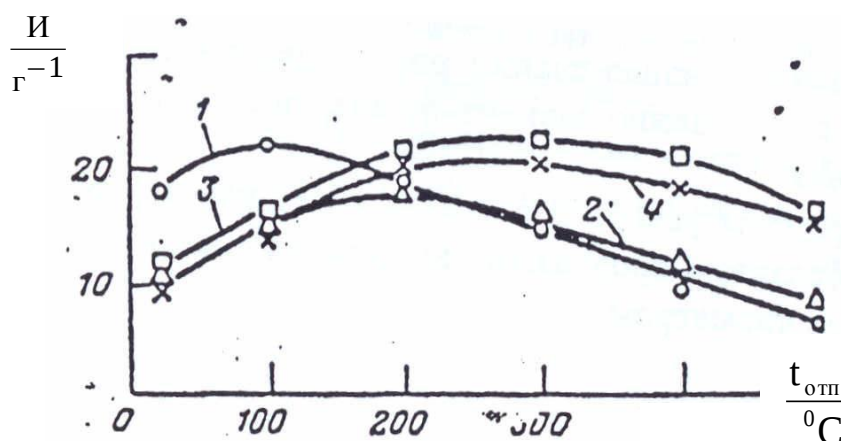


Рисунок 5.3 – Зависимость износостойкости И углеродистых сталей от температуры отпуска  $t_{отп}$  при энергии удара 20 Дж с различным содержанием в них углерода С: 1 - 0,5%; 2 - 0,7%; 3 - 1%; 4 - 1,2%

Анализ износостойкости стали проводился с учетом хрупкого и вязкого разрушения. Количественную картину разрушения составила по виду излома при испытании на срез цилиндрических образцов с надрезом. Кроме того, учитывали, что максимальное значение предела прочности и сопротивления стали сразу лежит на границе хрупкого перехода.

Полученные данные позволяют заключить, что в области хрупкого разрушения стали увеличение содержания в ней углерода при низкой энергии удара нежелательно, так как это не только не способствует повышению износостойкости, но и снижает ее. Выгоднее обрабатывать доэвтектоидные стали с низким содержанием углерода, подвергая их после закалки низкому отпуску (рисунок 5.4). В области низких температур отпуска и без отпуска износостойкость стали 45 была выше, чем у стали У7. По мере повышения температур отпуска износостойкость стали 45 снижается; износостойкость стали У7 в области высоких температур отпуска очень близка к износостойкости стали 45. При высокой энергии удара максимальную износостойкость можно получить на закаленной стали с эвтектоидным содержанием углерода после среднего отпуска.

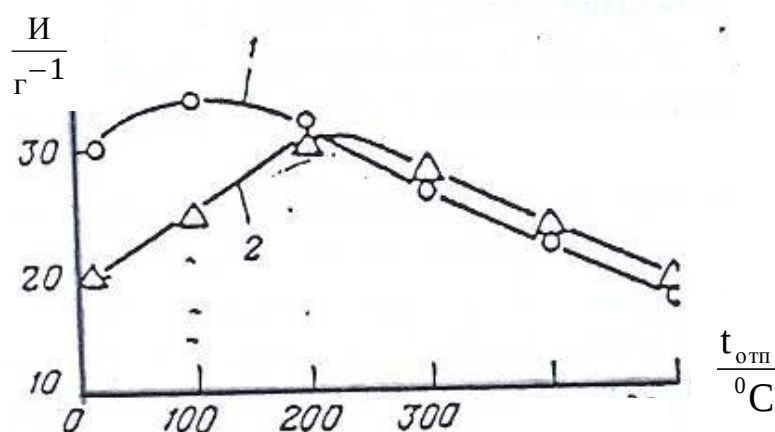


Рисунок 5.4 – Зависимость износостойкости  $И$  сталей 45 (кривая 1) и У7 (кривая 2) от температуры отпуска  $t_{отп}$  при энергии 5 Дж

Объяснение полученных закономерностей следует связать с природой ударно-абразивного изнашивания. Было показано, что образование частиц изнашивания вызвано срезом или сдвигом микрообъемов металла в момент динамического внедрения твердых абразивных частиц в поверхность трения. Сопротивление стали срезу в условиях ударно-абразивного изнашивания является основным критерием оценки ее износостойкости. С позиций этих представлений объяснима природа влияния содержания углерода на износостойкость стали в условиях ударно-абразивного изнашивания. Действительно, влияние содержания углерода и температуры отпуска на сопротивление стали срезу и ее износостойкость в основе своей аналогично.

Таким образом, увеличение содержания углерода в стали применительно к условиям ударно-абразивного изнашивания целесообразно в той мере, в какой оно способствует главным образом повышению стали срезу.

5.1.2 Методы и конструкции машин для изучения изнашивания при ударе

Принципиальные схемы испытаний на изнашивание при ударе охватывают все наиболее распространенные условия изнашивания деталей машин и инструмента при прямом внедрении абразивных частиц, а также при соударении металлических поверхностей без абразива между ними. Эти принципиальные схемы были приняты за основу при проектировании специальных лабораторных установок, предназначенных для изучения изнашивания при ударе в лабораторных условиях.

В настоящее время для изучения изнашивания нет экспериментально обоснованной формы и размеров образцов не только различных схем испытаний, но и для изучений одного вида изнашивания, поэтому многие результаты испытаний оказываются несопоставимыми. При выборе формы и размеров образца для изучения изнашивания при ударе учитывали его технологичность, возможность термической и химико-термической обработки, размеры поверхности соударения и удобства исследования ее макро- и микрогеометрии и микроструктуры. Для всех методов испытаний на изнашивание при ударе был выбран цилиндрический образец диаметром 10 мм и длиной 35 мм.

Энергия удара значительно влияет на износ и характер изнашивания при ударе образца об абразивные частицы и при соударении поверхностей без абразива. При выборе значения единичного удара учитывали фактические условия, в которых работают реальные детали машин и инструмент при ударном взаимодействии поверхностей. В частности, учитывали фактическую энергию удара рабочих элементов породоразрушающего и бурильного инструмента, применяемого при бурении нефтяных и газовых скважин.

Исследования бурильных долот показали, что взаимодействие зубьев шарошек с забоем скважины происходит при большой энергии единичного удара. Энергия единичного зуба о забой может увеличиваться от 2 до 50 Дж. Удельная энергия единичного удара может достигать от 50-60 Дж/см. На основании этих и других данных было решено создать ряд машин с максимальной энергией единичного удара образца от 2 до 50 Дж.

В основу проектирования всех испытательных машин был положен единый принцип: испытуемый образец должен каждый удар производить по новому абразиву. С учетом этого принципа разрабатывались кинематические схемы лабораторных испытательных машин. Все машины имеют два различных принципа действия – свободное падение бойка ударника с одинаковой высоты, завершающееся ударом, и принудительное соударение. Из всех известных методов оценки износа наиболее распространены весовой и линейный, как наиболее точные и достаточно надежные. С учетом сложного рельефа поверхности соударения образца был принят весовой метод оценки износа, как наиболее целесообразный.

Для сравнительной оценки износостойкости различных сталей выбран абсолютный показатель – величина, обратная износу. Такой показатель износостойкости в наших условиях наиболее приемлем, так как выбор эталона износостойкости материалов при ударе является сам по себе предметом исследований. В ряде экспериментов для оценки результатов испытаний на из-

нашивание применяли показатель скорости изнашивания – изменение износа в единицу времени.

Метод исследования изнашивания при ударе по незакрепленному абразиву основан на испытании на изнашивание цилиндрических образцов путем последовательных многократных ударов по слою незакрепленного абразива определенной толщины, расположенного на плоской наковальне.

Этот метод реализуется на специальной лабораторной установке У-1-АС (рисунок 5.5). На сварной раме 1 укреплен электродвигатель 2, вращение от которого передается через упругую муфту двухступенчатому редуктору 3 с набором сменных зубчатых колес. На выходном валу редуктора укреплен ведущий шкив 4 клиноременной передачи. Ведомый шкив 5 насажен на кулачковый вал, смонтированный на двух опорах качения. При вращении вала закрепленный на нем кулачок 6 с помощью ролика 7 поднимает шпindel-боек 8 на заданную высоту, а затем освобождает его. На нижнем торце бойка в оправке закреплен испытуемый образец 16.

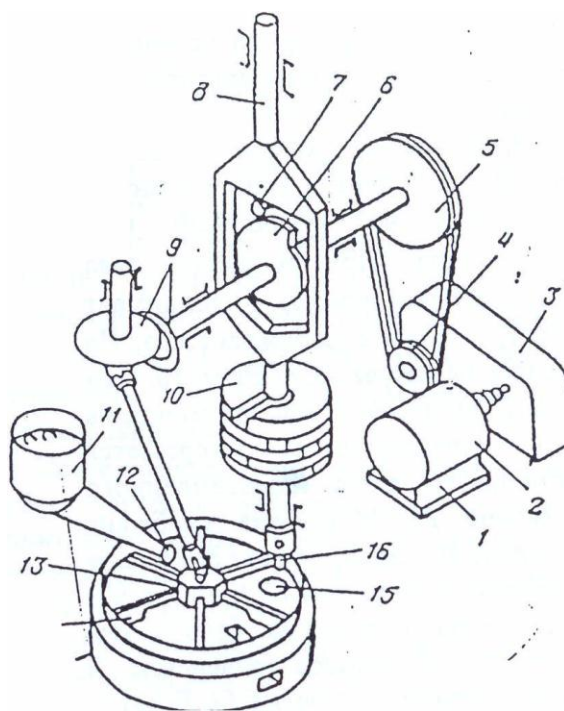


Рисунок 5.5 – Установка У-1-АС для испытания на изнашивание при ударе по слою абразива

Под действием собственного веса и грузов 10 шпindel-боек, перемещаясь в направляющих, совершает свободное падение, которое завершается ударом торцевой поверхности образца по слою незакрепленного абразива, размещенного на наковальне 15. Установка снабжена дозатором, обеспечивающим дозирование абразива, подачу его в зону удара и очистку забоя. Устройство состоит из дозатора 12, бункера 11 и поворотного диска 13. Диск получает вращение от кулачкового валика через коническую зубчатую передачу 9 и шарнирное сочленение. В пазах диска установлены и неподвижно закреплены щетки 14. Дозатор за время одного удара совершает: подачу из

бункера отмеренной очередной порции абразива на дно чаши; выравнивание подвижными ножами этой порции абразива в слой заданной толщины; очистку наковальни щетками от абразивных частиц предыдущей партии и дозировку очередной порции абразива. Установка снабжена приспособлением, позволяющим регулировать толщину абразивного слоя на наковальне, и устройством для перемещения наковальни после каждого цикла испытаний.

Энергия единичного удара определяется как произведение веса бойка и размещенных на нем грузов на высоту свободного падения. В нашем варианте испытаний высота падения была постоянна (50 мм), изменение энергии удара от 2,5 до 30 Дж осуществлялось с помощью закрепленных на шпинделе грузов различного веса. Частоту ударов 60, 75, 92, 100 и 120 мин<sup>-1</sup> регулировали подбором сменных зубчатых колес. На установке можно проводить одновременно испытания на ударно-абразивное изнашивание образца и наковальни, что позволяет подбирать износостойкую пару для определенных условий соударения.

Для изучения влияния продолжительности испытания на изнашивание при ударе по слою незакрепленного абразива были проведены эксперименты большой длительности при различных режимах.

Характер изнашивания во времени имеет два периода: приработки и установившегося изнашивания. Каждый период характеризует определенную стадию изнашивания и имеет свои особенности. Период приработки характеризуется нарастанием скорости изнашивания во времени. Здесь зарождаются первоначальные очаги соударения. По мере увеличения частоты ударов образца о слой абразива на его поверхности начинает образовываться специфический рельеф, представляющий собой сочетание лунок и выступов.

## **5.2 Задание**

Выявить зависимость износостойкости материала от химического состава стали и ее твердости.

## **5.3 Порядок выполнения работы**

### **5.3.1 Приборы, оборудование и принадлежности:**

- образцы из углеродистых сталей марок 45, У7, У8, У12;
- муфельная или электрическая печь;
- установка У-1-АС.

### **5.3.2 Проведение испытаний**

#### **5.3.2.1 Ознакомиться со всеми разделами работы;**

#### **5.3.2.2 Ответить на контрольные вопросы;**

#### **5.3.2.3 Получить у преподавателя образцы из углеродистой стали У5, У7, У8 и У12;**

- 5.3.2.4 Произвести закалку данных образцов при оптимальных температурах;
- 5.3.2.5 Произвести три вида отпуска – низкий, средний, высокий;
- 5.3.2.6 Определить твердость полученных образцов;
- 5.3.2.7 Изучить конструкцию и принцип работы установки У-1-АС для испытания на изнашивание при ударе по слою абразива;
- 5.3.2.8 Определить точный вес образцов при помощи аналитических весов;
- 5.3.2.9 Провести испытания при определенной нагрузке в течении 40 минут;
- 5.3.2.10 Построить график зависимости износостойкости материала от химического состава стали и ее твердости;
- 5.3.2.11 Сделать выводы зависимости износостойкости от твердости стали.

## **5.4 Содержание отчета**

В отчете должны быть изложены: цель работы, краткие сведения о значении твердости при ударно-абразивном изнашивании, указать влияние различных режимов термообработки на износостойкость материалов, конструкция и принцип работы установки У-1-АС, график зависимости износостойкости материала от химического состава стали и ее твердости.

## **5.5 Контрольные вопросы**

- 5.5.1 Какое влияние оказывает углерод на изнашивание материала?
- 5.5.2 Какова роль углерода при ударно-абразивном изнашивании?
- 5.5.3 Какая зависимость износостойкости от энергии удара?
- 5.5.4 Объясните влияние термообработки на износостойкость стали.
- 5.5.5 Влияние углерода на характер разрушения стали?
- 5.5.6 Что является основным критерием оценки стали ее износостойкости?
- 5.5.7 Какие существуют принципиальные схемы испытаний на изнашивание при ударе?
- 5.5.8 Как определяется энергия единичного удара на специальной лабораторной установке У-1-АС?
- 5.5.9 На какие периоды делится характер изнашивания при абразивном ударе?

## **6 Лабораторная работа № 6. Паспортизация деталей и узлов эксплуатационных машин**

Целью работы является приобретение навыков выявлять вид износа, особенности и механизм развития ведущего вида износа и составление паспорта на изношенную деталь.

### **6.1 Общие сведения**

Классификация видов изнашивания по процессам создает условия:

- 1) направленной разработки методики исследований процесса трения и износа, создания необходимых для этого испытательных машин и приборов;
- 2) направленного проведения большого круга исследовательских работ в области трения и износа;
- 3) обоснования существующих и разработки новых мероприятий по борьбе с износом в машинах.

На вид изнашивания существенное влияние оказывают:

- а) внешние механические воздействия;
- б) среда;
- в) материал и способы его обработки.

Поэтому для активного изучения видов изнашивания в реальных деталях машин необходимо исследования их проводить с учетом всех указанных групп факторов, влияющих на износ.

В результате такого исследования выясняются основные характеристики основных факторов, определяющих вид износа, и выявляются во всех деталях процесс, происходящий при изнашивании. Структурная картина выявленного процесса, его количественные характеристики позволяют совершенно определенно решить вопрос о виде изнашивания, об особенностях его протекания и о предпосылках его устранения или уменьшения. Наиболее обоснованным, надежным и активным методом определения вида изнашивания является паспортизация узлов и деталей машин, подлежащих исследованию.

Основная цель составления паспорта исследуемых узлов и деталей заключается в том, чтобы выявить ведущий вид изнашивания, выяснить особенности и механизм его развития. В основу составления паспорта положено детальное изучение трех основных групп факторов, определяющих качественные и количественные показатели износа.

В первом разделе паспорта помещены данные о характеристиках материала и поверхностей контакта исследуемых деталей после их изготовления или ремонта.

Основными из них являются:

- весьма краткие сведения о технологии изготовления детали;
- общая характеристика металла, его физические и механические свойства;
- геометрические характеристики деталей;

- характеристики поверхностей трения.

Второй раздел паспорта содержит данные о внешних причинах, влияющих на вид изнашивания. В этот раздел включены группы факторов внешних механических воздействий, температуры и факторов среды. Эти факторы в значительной степени определяют количественную и качественную стороны развития процесса изнашивания.

К их числу относят:

- условия работы деталей (скорость скольжения, удельное давление);
- температура в зоне трения;
- среда, в которой работают детали и смазка (газовая среда, абразивная среда).

Третий раздел паспорта содержит важнейшие характеристики развития процесса изнашивания исследуемых деталей:

- время работы деталей;
- скорость износа;
- геометрические характеристики износа, т.е. измерения размеров и форм деталей в процессе изнашивания;
- микрорельеф и характер изношенной поверхности;
- характер поверхностного слоя изношенной детали;
- остаточные напряжения в поверхностном слое;
- установленный вид износа.

По материалам паспортизации можно составить полное представление о влиянии материала деталей, способов его обработки, внешних механических воздействий и факторов среды на качественные и количественные характеристики изнашивания исследуемых деталей и определить ведущий вид изнашивания.

Форма разработанного паспорта и пример применения системы паспортизации представлены в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Паспорт уплотнительного кольца неподвижной шестерни редуктора

| 1 Характеристика новой детали   |                                                                                                                           |                                                                                                 |
|---------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Краткая технология изготовления |                                                                                                                           | Литье, отжиг 450 °С                                                                             |
| 1                               | 2                                                                                                                         | 3                                                                                               |
| Общая характеристика сплава     | а) марка сплава                                                                                                           | Бронза БрОС 16-5                                                                                |
|                                 | б) химический состав, %                                                                                                   | Al – 0,02; Zn – 0,20; Sn – 15-17; Fe – 0,30; Si – 0,02; Pl – 4-6; P – 0,20; Sb – 0,30, Cu – 79. |
| Механические свойства           | Предел прочности<br>Предел текучести<br>Относительное удлинение<br>Относительное сужение<br>Ударная вязкость<br>Твердость | $\sigma_B = 250$ МПа<br>-<br>$\delta = 0,5$ %<br>-<br>-<br>HB = 100                             |

Продолжение таблицы 6.1

| 1 Характеристика новой детали                                   |                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                        |                                       |
|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Краткая технология изготовления                                 |                                                                                                                                                                                                                | Литье, отжиг 450 °С                                                                                                    |                                       |
| 1                                                               | 2                                                                                                                                                                                                              | 3                                                                                                                      |                                       |
| Физические свойства                                             | Теплопроводность<br>Линейный коэффициент расширения<br>Удельный вес                                                                                                                                            | $\lambda = 0,80 \text{ Вт/(м}\cdot\text{град)}$<br>$\alpha = 19,42 \cdot 10^6$<br>$\gamma = 9,0$                       |                                       |
| Геометрическая характеристика                                   | Размер изнашиваемой поверхности<br>Класс точности<br>Конус<br>Овал<br>Гипербола<br>Зазор в паре                                                                                                                | d = 122 мм, h = 2.5 мм<br>12<br>0,02 мм<br>0,02 мм<br>-<br>нет                                                         |                                       |
| Качество поверхности трения                                     | Класс шероховатости<br>Структура поверхностных слоев в сечении<br>Микротвердость                                                                                                                               | -<br>-<br>-                                                                                                            |                                       |
| 2 Характеристика работы детали                                  |                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                        |                                       |
| Условия работы детали                                           | Скорость относительного перемещения                                                                                                                                                                            | Номинальная<br>Максимальная<br>Минимальная                                                                             | 9,24 м/с<br>10,0 м/с<br>0,0 м/с       |
|                                                                 | Удельное давление<br>Температура поверхностных слоев трущихся пар<br>Характер нагрузки (постоянная или знакопеременная, пульсирующая)                                                                          |                                                                                                                        | 0,60-42 МПа<br>80-90 °С<br>переменная |
| Условия смазки                                                  | Коэффициент трения<br>Материал смазки<br>Давление смазочного материала<br>Температура смазки<br>Способ фильтрации смазочного материала<br>Вид трения (жидкостные, граничное или сухое)<br>Схема подвода смазки | 0,13-0,15<br>МС-20, МК-22<br>5-12 МПа<br>40-115 °С<br>Сетчатые и щелевые фильтры<br>Граничное и сухое<br>Под давлением |                                       |
| Существующий межремонтный ресурс<br>Амортизационный срок службы |                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                        | 380 ч<br>2800 ч                       |

## Продолжение таблицы 6.1

| 3 Характеристика износа детали            |                                                   |
|-------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| 1 Время работы детали                     | 400 ч                                             |
| 2 Число пусков и остановок                | 300-350                                           |
| 3 Средний темп износа                     | 0,08 мкм/ч                                        |
| 4 Геометрическая характеристика износа    | -                                                 |
| 5 Микрорельеф поверхности                 | -                                                 |
| 6 Структура поверхности в плане           | -                                                 |
| 7 Структура поверхностных слоев в сечении | -                                                 |
| 8 Макрофотография изношенной поверхности  | -                                                 |
| 9 Вид износа                              | Ведущий абразивный, сопутствующий – окислительный |

### 6.2 Задание

Составить паспорта изношенных деталей и установить ведущий вид износа.

### 6.3 Порядок выполнения работы

6.3.1 Приборы, оборудование и принадлежности:

Образцы деталей, изношенных различными способами.

6.3.2 Проведение испытаний

6.3.1 Получить у преподавателя одну или две изношенные детали.

6.3.2 Составить паспорта и эскизы изношенных деталей.

6.3.3 Установить ведущий вид износа.

6.3.4 Выяснить особенности и механизм развития ведущего вида износа.

### 6.4 Содержание отчета

В отчете должны быть изложены: цель работы, краткие сведения о значении паспортизации деталей и узлов эксплуатируемых машин, эскизы и паспорта изношенных деталей.

### 6.5 Контрольные вопросы

6.5.1 Для чего осуществляют классификацию видов изнашивания?

6.5.2 Как определить ведущий вид износа?

6.5.3 Какую основную цель преследует составление паспорта деталей и узлов?

6.5.4 Из каких разделов состоит паспорт деталей и узлов?

6.5.5 Какие вопросы рассматривают в каждом из разделов паспорта?

6.5.6 Что можно составить по материалам паспортизации?

## **7 Лабораторная работа № 7. Методы измерения износа**

Целью работы является ознакомление с методами измерения износа и определение износа одним из предложенных методов, что позволит применять методы контроля качества изделий и объектов в сфере профессиональной деятельности и проводить анализ причин нарушений технологических процессов в машиностроении и разрабатывать мероприятия по их предупреждению.

### **7.1 Общие сведения**

#### **7.1.1 Классификация методов оценки величины износа**

При изучении процессов изнашивания, а также для изыскания методов повышения износостойкости необходимо применять соответствующие методы и средства для количественной оценки износа.

Наиболее распространены следующие методы оценки величины износа:

- 1) определение измененных эксплуатационных характеристик детали;
- 2) выявление микрометрическими измерениями суммарного линейного износа;
- 3) взвешивание;
- 4) определение обогащения продуктами износа смазочного масла;
- 5) выявление изменения топографии поверхности методом радиоактивных индикаторов;
- 6) определение величины местного износа методом искусственных баз;
- 7) методы отпечатков;
- 8) метод вырезанных лунок.

#### **7.1.2 Метод оценки величины износа по изменению эксплуатационных свойств деталей**

Метод оценки величины изнашивания по изменению эксплуатационных характеристик деталей (например, нарушения герметичности) не учитывает распределение износа в разных участках поверхностей деталей, т.е. является интегральным методом. Изменение размеров влияет на эксплуатационные свойства, по которым и оценивается износ.

#### **7.1.3 Оценка величины изнашивания методом микрометража**

Наиболее доступным и распространенным способом оценивания износа является метод микрометрических измерений, опирающийся на осуществлении измерений размеров детали до и после изнашивания.

Преимущества метода:

- возможность дифференциации износа по разным точкам поверхности;

- доступность;
- простота.

Однако, при оценке величины износа неизбежны погрешности, причины которых заключаются в следующем:

- при определении износа по изменению размера в эту величину включается и изменение размера вследствие деформации детали. Если изменение диаметра цилиндрической детали является только признаком изнашивания, то с помощью микрометрических измерений нельзя установить, как распределяется этот износ по различным участкам детали;
- возможные погрешности вследствие непостоянства температуры, при которой производятся измерения, и различия температур измеряемого объекта и инструмента;
- относительно большая погрешность приборов, которая, если величина износа невелика, может оказаться соизмеримой с величиной износа;
- необходимость разборки сопряжения для каждого измерения.

#### 7.1.4 Метод определения износа поверхности детали путем взвешивания

В лабораторной практике определение величины износа, а также определение износа поверхностей небольших деталей часто оцениваются по убыли веса путем взвешивания на аналитических весах. Этим методом измеряют суммарный износ (суммарную потерю массы) по поверхности трения.

Преимущества метода: относительно высокая точность, доступность, простота.

Недостатки метода:

- невозможность раздельного измерения износа в разных точках поверхности;
- разборка сопряжения для каждого измерения;
- неприменимость данного метода к материалам, шаржируемым посторонними частицами или продуктами износа, и материалам, поглощающим смазочный материал или влагу.

#### 7.1.5 Метод обнаружения продуктов износа в масле

Данный метод применяется тогда, когда для оценки износа деталей разборка машины нежелательна. Суть его заключается в том, что периодически отбирают пробы масла и по количеству находящихся в нем продуктов износа судят о степени износа. Мелкие частицы продуктов износа деталей находятся во взвешенном состоянии в смазочном масле. От этого масла отбирается проба, которую затем сжигают. Далее из получившегося остатка химическим или спектральным анализом определяют содержание металла в воде.

Преимущества этого метода:

- высокая чувствительность;

- возможность измерения износа без разборки сопряжения.

Недостатки метода:

- невозможность определения износа каждой детали в отдельности (метод позволяет измерить суммарный износ всего сопряжения);

- сложность (анализ отобранного масла занимает много времени).

Этот метод нашел применение при исследованиях влияния массы на износ деталей цилиндро-поршневой группы двигателей внутреннего сгорания.

#### 7.1.6 Метод радиоактивных индикаторов

Этим методом определяют износ детали по интенсивности радиоактивного излучения изотопов, удаляемых с поверхности трения вместе с продуктами износа. Материал изнашиваемых деталей предварительно активируется, т.е. в него вводится определенный радиоактивный изотоп одним из следующих методов:

- 1) введение радиоактивного изотопа в металл при плавке;
- 2) нанесение радиоактивного электролитического покрытия;
- 3) введение радиоактивного изотопа методом диффузии;
- 4) установка радиоактивных вставок;
- 5) облучение детали нейтронами.

По мере изнашивания детали вместе с продуктами износа в масло попадает пропорциональное им количество атомов радиоактивного изотопа. По интенсивности излучения этого изотопа в пробах масла можно судить о величине износа.

Преимущества этого метода:

- возможность измерения износа без разборки сопряжения;
- непрерывное и периодическое измерение износа;
- раздельное (дифференцируемое) измерение износа деталей сопряжения.

Недостатки метода:

- сложность;
- необходимость специального оборудования, помещения;
- необходимость защитных и очистных устройств.

#### 7.1.7 Метод встроенных датчиков

Этот метод определяет износ детали по изменению линейных размеров (или положения) этой детали фиксируемым датчиком, встроенным в сопряжение. В качестве датчиков применяют различные датчики перемещений (индукционные, пневматические, тензометрические и др.), сигнал от которых записывают при помощи самописца, осциллографа и т.д.

Преимущества метода:

- относительно высокая точность;
- возможность измерения износа без разборки сопряжения;

- непрерывность или периодичность измерения износа.

Недостатки:

- сложность метода;

- потребность в специальном оборудовании;

- затруднительное раздельное измерение износа деталей сопряжения.

#### 7.1.8 Метод искусственных баз

Этим методом величину износа определяют по изменению разрывов суживающегося углубления (профиль которого известен), выполненного на изнашивающейся поверхности. Такими углублениями могут быть высверленное коническое отверстие, отпечатки в форме пирамиды, вырезанная лунка.

Величину линейного износа при использовании отпечатка квадратной пирамиды на плоской поверхности вычисляют по формуле

$$\Delta h = h - h_1 = \frac{1}{m}(d_1 - d_2), \quad (7.1)$$

где  $\Delta h$  – линейный износ в месте отпечатка;

$h, h_1$  – глубина отпечатка до и после изнашивания;

$m$  – коэффициент пропорциональности (при угле пирамиды  $\alpha = 136^\circ$ ,  $m=7$ ).

Величину износа плоской поверхности методом врезанных лунок (рисунок 7.1) определяют по формуле

$$\Delta h = h - h_1 = \frac{l^2 - l_1^2}{8r}, \quad (7.2)$$

где  $l$  и  $l_1$  – длина лунки до и после изнашивания;

$r$  – радиус, описываемый вершиной резца.

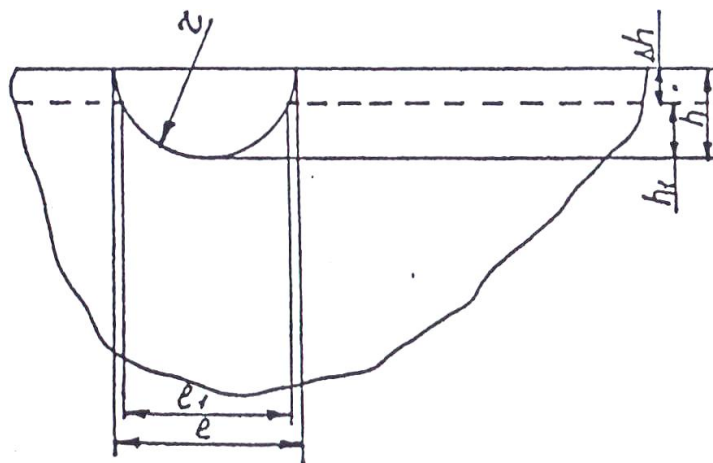


Рисунок 7.1 – Схема изменения износа методом вырезанных лунок

Износ лунки, находящейся на поверхности цилиндрической образующей, вычисляют по формуле

$$\Delta h = h - h_1 = 0.1259(l - l_1^2) \left( \frac{1}{2} \pm \frac{1}{R} \right), \quad (7.3)$$

где  $R$  – радиус кривизны поверхности в месте нанесения лунки; плюс – для выпуклых, минус – для вогнутых поверхностей.

Преимущества метода:

- возможность дифференцирования износа в разных точках;
- высокая точность.

Недостатки метода:

- высокая трудоемкость;
- потребность оборудования для нанесения отпечатков и измерения их величины;
- искажение формы и местное вспучивание лунок;
- необходимость разборки сопряжения.

## 7.2 Задание

Определить при помощи машины трения основные характеристики работы подшипникового узла

## 7.3 Порядок выполнения работы

### 7.3.1 Приборы, оборудование и принадлежности:

- образцы деталей, с нанесенными на них отпечатками пирамиды и вырезанными лунками;
- машина трения (СМЦ-2), позволяющая нагружать узел трения.

### 7.3.2 Проведение испытаний

7.3.2.1 Получить у преподавателя образцы с нанесенными на них отпечатками в виде квадратной пирамиды на плоской поверхности.

7.3.2.2 По заданию преподавателя провести испытания на узле трения на машине трения при различных нагрузках.

7.3.2.3 Подсчитать величину линейного износа по формуле (7.1).

7.3.2.4 Получить у преподавателя образцы с нанесенными на них углублениями, выполненными методами вырезания лунок на плоской цилиндрической поверхности.

7.3.2.5 По заданию преподавателя провести испытания на узле трения на машине трения при различных нагрузках.

7.3.2.6 Подсчитать величину линейного износа по формулам (7.2) и (7.3).

## **7.4 Содержание отчета**

В отчете должны быть изложены: цель работы, краткие сведения о методах измерения износа, схема измерения износа методом вырезанных лунок, результаты расчетов по предложенным формулам и выводы.

## **7.5 Контрольные вопросы**

7.5.1 Перечислите наиболее распространенные методы оценки величины износа.

7.5.2 Опишите сущность метода оценки величины износа по изменению эксплуатационных свойств.

7.5.3 Какие преимущества и недостатки метода микрометрических измерений?

7.5.4 В чем заключается сущность метода оценки по убыли веса? Перечислите его преимущества и недостатки.

7.5.5 Как определяется износ методом обнаружения продуктов износа в масле?

7.5.6 Опишите сущность метода радиоактивных индикаторов.

7.5.7 Как определяется износ деталей методом встроенных датчиков?

7.5.8 Дайте характеристику измерению износа методом искусственных баз.

## 8 Лабораторная работа №8. Исследование зависимости абразивной износостойкости сталей при трении о закреплённые абразивные частицы

Целью работы является изучение метода испытания металлов на абразивное изнашивание при трении о закреплённые абразивные частицы и оценки относительной износостойкости исследуемого материала.

### 8.1 Общие сведения

Применение данного метода регламентировано ГОСТ 17367-71 и предусматривается в стандартах и технических условиях, устанавливающих технические требования на продукцию.

Сущность метода состоит в том, что производят трение испытуемого и эталонного металлических образцов о поверхность с закреплёнными на ней абразивными частицами (например, поверхность абразивной шкурки) при статической нагрузке и отсутствии нагрева, после чего сравнивают полученные результаты и вычисляют относительную износостойкость исследуемого материала.

Схема испытания представлена на рисунке 8.1, где испытуемый цилиндрический (пальчиковый) образец 1 прижимается своим торцом к вращающемуся диску 2 с закреплённой на ней абразивной шкуркой 3 и совершает поступательное движение от центра к периферии, оставляя след истирания 4 в виде спирали Архимеда. Скорость трения образцов на абразивной шкурке должна быть такой, чтобы нагрев материала в процессе испытаний не влиял на его свойства.

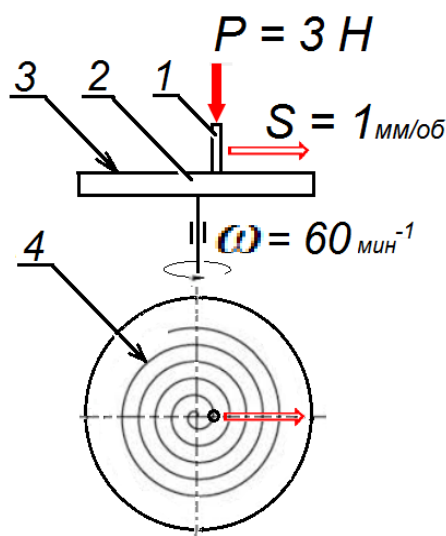


Рисунок 8.1 – Схема испытания металлов на абразивное изнашивание при трении о закреплённые абразивные частицы

Тип абразива абразивной шкурки выбирают следующим образом:

- для выявления связи относительной износостойкости испытуемого материала с его физическими свойствами твёрдость абразивных частиц должна превышать твёрдость испытуемого материала не менее чем в 1,6 раза;

- при определении относительной износостойкости испытуемого материала при действии кварцевого песка применяют тканевую шлифовальную шкурку ГОСТ 5009-82 со шлифматериалом (монокорундом) зернистости 6 по ГОСТ 3647-80.

Твёрдость абразивных зёрен, а также структурных элементов испытуемых материалов определяют методом испытания на микротвёрдость вдавливанием алмазной пирамиды по ГОСТ 9450-76.

В качестве материала эталонного образца принимают:

- технически чистый алюминий по ГОСТ 11069-2001 в отожжённом состоянии – при испытании металлов твёрдостью менее 150 HV;

технически чистое железо в отожжённом состоянии – при испытании металлов твёрдостью не менее 150 HV.

Перед испытанием эталонные и испытуемые образцы должны подвергаться приработке для достижения полного их прилегания к шкурке в условиях, идентичных условиям испытаний. Износ испытуемого и эталонного образцов должен быть получен при одинаковых условиях: образцы должны пройти один и тот же путь трения в пределах всей серии испытаний. изнашивание указанных образцов проводят на одном и том же листе абразивной шкурки (как правило, из одного рулона), при этом на каждом листе абразивной шкурки испытания проводят только один раз.

Опыты проводят на двух листах абразивной шкурки в следующем порядке: на одном листе на первой его половине испытывают эталонный образец, на второй – испытуемый образец; на другом листе порядок испытания должен быть обратный.

Линейный износ измеряют микрометром с ценой деления 0,01 мм, а износ по массе – аналитическими или электронными весами с ценой деления 0,1 мг.

Условия проведения испытаний приведены ниже:

|                                                       |       |
|-------------------------------------------------------|-------|
| Радиальная подача образцов на каждый оборот диска, мм | 1     |
| Статическая нагрузка на образец диаметром 2 мм, Н     | 3     |
| Относительная погрешность нагрузки, %                 | ±1    |
| Контактное давление образца на абразивную шкурку, МПа | 0,955 |

Минимальный абсолютный износ, подлежащий измерению:

|               |     |
|---------------|-----|
| линейный, мкм | 200 |
| по массе, мг  | 5   |

Размеры гладких цилиндрических образцов, мм:

|                                                                  |       |
|------------------------------------------------------------------|-------|
| диаметр                                                          | 2±0,1 |
| длина                                                            | 15–20 |
| Шероховатость рабочей и боковой поверхностей образцов $Ra$ , мкм | ≤1,25 |

Все образцы одной серии испытывают на одной и той же машине трения. Указанным выше условиям проведения испытаний удовлетворяет машина Х4-Б, разработанная М. М. Хрущовым и М. А. Бабичевым в Институте машиноведения ИМАШ АН СССР (рисунок 8.2).

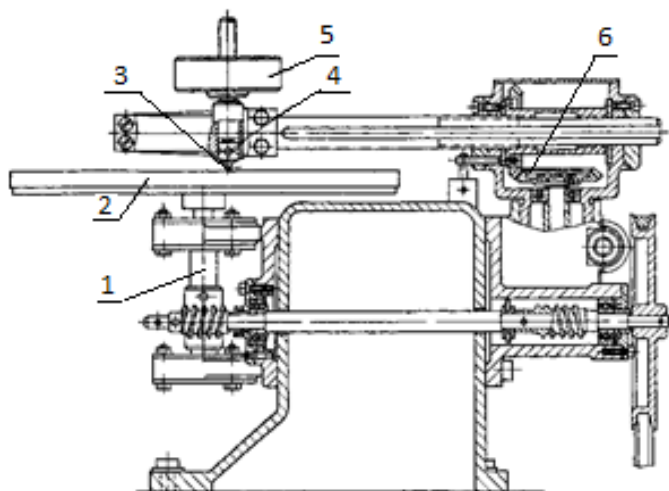


Рисунок 8.2 – Схема машины трения Х4-Б

На плоской стороне вращающегося (с частотой  $60 \text{ мин}^{-1}$ ) вокруг оси 1 металлического диска 2 диаметром 250 мм закрепляется абразивная шкурка. Цилиндрический образец 3 помещается в державку 4 и прижимается своим торцом к поверхности шкурки грузом 5. Механизм 6 позволяет производить испытание по одному следу либо по свежей поверхности при радиальном перемещении образца.

В рассматриваемом методе испытания на абразивное изнашивание при трении о закреплённые абразивные частицы при вращении диска образец перемещается в радиальном направлении от центра диска к периферии с подачей 1 мм на каждый оборот диска; путь трения представляет собой спираль Архимеда (рисунок 8.1). При этом поверхность шкурки разделена на зоны с равной длиной пути трения. В этих зонах и ведётся испытание исследуемого и эталонного образцов. Износ определяется по уменьшению длины или массы образцов.

Результаты испытаний выражаются в виде относительной износостойкости  $\varepsilon$ , которую вычисляют по формуле.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l_{\text{э}}}{\Delta l_{\text{и}}} \left( \frac{d_{\text{э}}}{d_{\text{и}}} \right)^2, \quad (8.1)$$

где  $\Delta l_{\text{э}}$ ,  $\Delta l_{\text{и}}$  – абсолютный линейный износ соответственно эталонного и испытуемого образца, мм;

$d_{\text{э}}$ ,  $d_{\text{и}}$  – фактический диаметр соответственно эталонного и испытуемого образца, мм.

При равенстве плотностей материалов эталонного и испытываемого образцов отношение  $\frac{\Delta l_{\text{э}}}{\Delta l_{\text{и}}}$  в формуле 8.1) допускается заменять отношением износ по массе.

Допускается пересчитывать износы по массе на линейные с учётом плотностей материалов образцов, когда невозможно точно измерить абсолютные линейные износы, а также при различных плотностях эталонного и испытываемого образцов.

За результат испытания материала принимают относительную износостойкость  $\varepsilon$ , вычисленную как среднее арифметическое результатов двух идентичных опытов.

## **8.2 Задание**

8.2.1 Изучить метод испытания металлов на абразивное изнашивание при трении о закреплённые абразивные частицы.

8.2.2 На машине трения Х4-Б провести испытание на абразивное изнашивание согласно ГОСТ 17367-71:

## **8.3 Порядок выполнения работы**

8.3.1 Убедиться в том, что на отобранных образцах нет следов коррозии, окалины, цветов побежалости.

8.3.2 Измерить твёрдость испытываемого материала по Виккерсу и убедиться в правильности выбора марки материала для изготовления эталонных образцов.

8.3.3 Все образцы подвергнуть приработке для достижения полного прилегания к абразивной шкурке.

8.3.4 Убедиться, что шероховатость рабочей и боковой поверхностей образцов не более  $R_a 1,25$  мкм.

8.3.5 Измерить длину и диаметр каждого образца и убедиться в том, что размеры образца соответствуют стандартным значениям; результаты измерений занести в протокол.

8.3.6 Подобрать соответствующий тип абразивной шкурки и провести испытание образцов на абразивное изнашивание, используя методику, изложенную в ГОСТ 17367-71.

8.3.7 Измерить длину каждого образца после изнашивания, вычислить линейный износ и относительную износостойкость, результаты занести в протокол.

8.3.8 Составить отчёт.

## **8.4 Содержание отчёта**

В отчете должны быть изложены: цель работы, основные положения, относящихся к рассматриваемому методу и рассмотренных в 8.1 (с приведе-

нием формул и рисунков), краткое описание проведённого испытания на изнашивание с указанием использованного лабораторного оборудования, таблица результатов измерений и расчётов

## **8.5 Контрольные вопросы**

8.5.1 В чём состоит сущность метода испытания металлов на абразивное изнашивание при трении о закреплённые абразивные частицы?

8.5.2 Из какого материала изготавливают эталонные образцы и каков принцип его выбора?

8.5.3 Укажите цену деления микрометра для измерения линейного износа и цену деления лабораторных весов для измерения износа по массе.

8.5.4 Каков минимальный абсолютный износ, подлежащий измерению, в линейных единицах и в единицах массы?

8.5.5 Укажите стандартные размеры испытываемых образцов и требования к шероховатости их рабочих и боковых поверхностей.

8.5.6 С какой целью перед испытанием эталонные и испытываемые образцы подвергают приработке?

8.5.7 Перечислите условия проведения испытаний на машине трения Х4-Б.

8.5.8 Приведите формулу для расчёта относительной износостойкости.

## 9 Лабораторная работа №9. Исследование зависимости абразивной износостойкости сталей при трении о нежёстко закреплённые абразивные частицы

Целью работы является изучение метода испытания металлических материалов и металлических покрытий на абразивное изнашивание при трении о нежёстко закреплённые абразивные частицы и оценки относительной износостойкости исследуемого материала.

### 9.1 Общие сведения

Применение данного метода регламентировано ГОСТ 23.208-79 и предусматривается в стандартах и технических условиях, устанавливающих технические требования на продукцию.

Сущность метода состоит в том, что при одинаковых условиях образцы из исследуемого и эталонного материалов изнашивают абразивными частицами, подаваемыми в зону трения и прижимаемыми к образцу вращающимся резиновым роликом; измеряют и затем сравнивают износ образцов испытуемого и эталонного материалов, при этом вычисляют относительную износостойкость испытуемого материала.

Испытуемый образец 1, закреплённый в образце держателе 2, прижимается к вращающемуся резиновому ролику 6 рычагом 3 (рисунок 9.1).

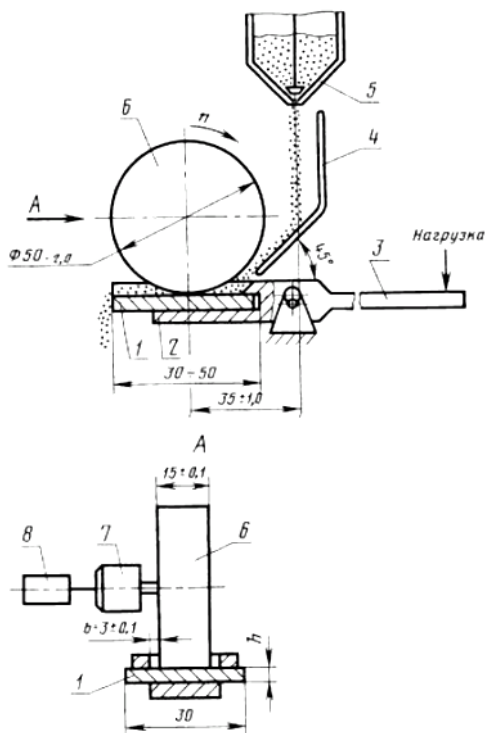


Рисунок 9.1 – Схема испытательной установки для исследования материалов на изнашивание при трении о нежёстко закреплённые абразивные частицы

Из дозатора 5 по направляющему лотку 4 в зону трения подаются абразивные частицы. Вращение резинового ролика обеспечивается приводом 7, а контроль суммарного количества оборотов ролика в процессе испытания – счётчиком 8.

Повторное использование абразивного материала не допускается, а повторное использование испытанных образцов в виде пластин допускается на тех участках, которые не подвергались изнашиванию, или на участках со следами изнашивания от предыдущего испытания, но после их удаления механической либо иной обработкой.

Условия проведения испытаний приведены ниже:

Сила прижатия образца рычагом к ролику, Н . . . . . 44,1±0,25

Частота вращения ролика, мин<sup>-1</sup> . . . . . 60±2

Продолжительность испытания (т.е. количество оборотов ролика от момента начала подачи абразивного материала до остановки привода вращения):

эталонного образца . . . . . 600

образца из исследуемого материала твёрдостью HV:

до 400 . . . . . 600

св. 400 до 800 . . . . . 1800

» 800 . . . . . 3600

Применяемый стандартный абразивный материал:

электрокорунд зернистостью . . . . . 16-П ГОСТ 3647–80

относительное содержание влаги, %, не более . . . . . 0,15

Размеры образцов-пластин, мм, исследуемых и эталонных материалов:

ширина . . . . . 30

длина . . . . . 30–50

толщина, не менее . . . . . 1

Шероховатость рабочей поверхности образцов *Ra*, мкм. . . . . ≤1,25

Количество образцов, шт., в зависимости от вида исследуемого материала\*:

металлический непористый однородный материал . . . . . 3

пористый неоднородный сплав . . . . . 5

спечённый материал и неоднородная наплавка . . . . . 5

Эталонный образец:

материал . . . . . сталь 45 ГОСТ 1050–2013

твёрдость стали (в отожжённом состоянии) . . . . . 190–200 HV

количество образцов, шт., для оценки потерь массы . . . . . 3

Размеры резинового ролика . . . . . См. на рисунке 2.3.1

\* Данный стандартный метод испытания не распространяется на материалы и покрытия твёрдостью более 1400HV и на пористые материалы со средним размером пор более 0,1 мм, а также на материалы и покрытия с твёрдостью, изменяющейся на глубине 0,3 мм более чем на 10 %.

Износ испытуемых и эталонных образцов определяют путём взвешивания до и после испытаний с погрешностью не более 0,1 мг. Потеря массы образца вследствие изнашивания при испытаниях должна составлять не менее 5 мг.

По результатам взвешивания образцов до и после испытаний определяют с погрешностью не более 0,0001 г среднеарифметическое значение потерь массы соответственно эталонных образцов  $g_{\text{э}}$  и образцов исследуемого материала  $g_{\text{и}}$  по формулам

$$\overline{g}_{\text{э}} = \frac{\sum_{i=1}^3 g_{\text{э}i}}{3}, \quad (9.1)$$

$$\overline{g}_{\text{и}} = \frac{\sum_{i=1}^m g_{\text{и}i}}{m}, \quad (9.2)$$

где  $g_{\text{э}i}$ ,  $g_{\text{и}i}$  – значение потерь массы при испытаниях эталонных образцов и образцов исследуемого материала, г;

$m$  – количество образцов исследуемого материала.

Относительную износостойкость  $K_{\text{и}}$  исследуемого материала вычисляют по формуле

$$K_{\text{и}} = \frac{\overline{g}_{\text{э}} \rho_{\text{и}} N_{\text{и}}}{\overline{g}_{\text{и}} \rho_{\text{э}} N_{\text{э}}}, \quad (9.3)$$

где  $\rho_{\text{э}}$ ,  $\rho_{\text{и}}$  – плотности соответственно эталонного и исследуемого материалов, г/см<sup>3</sup>;

$N_{\text{э}}$ ,  $N_{\text{и}}$  – количество оборотов ролика при испытаниях эталонного и исследуемого материалов.

## 9.2 Задание

Изучить метод испытания металлических материалов и металлических покрытий на абразивное изнашивание при трении о нежёстко закреплённые абразивные частицы.

## 9.3 Порядок выполнения работы

### 9.3.1 Подготовка к испытаниям

а) измерить твёрдость каждого образца по ГОСТ 2999-75 и отобранные образцы маркировать клеймением на нерабочих поверхностях;

б) перед испытаниями провести приработку ролика трением его о поверхность бумажной шлифовальной шкурки типа 2 по ГОСТ 3647-82 зерни-

стостью 8-П по ГОСТ 3647-80, закреплённой в образцедержателе на плоской стальной пластине; приработку провести при нагрузке на ролик  $(22 \pm 1)$  Н до полного прилегания к поверхности по всей длине образующей ролика;

в) после приработки ролик промыть в ацетоне ГОСТ 2768-84 и убедиться, что на рабочей поверхности ролика отсутствуют отличимые невооружённым глазом риски;

г) проверить влажность абразивного материала по ГОСТ 5382-91 и при необходимости довести её до значения  $\leq 0,15$  %;

д) образцы последовательно промыть бензином и ацетоном, просушить на воздухе и взвесить с погрешностью не более 0,0001 г.

### 9.3.2 Проведение испытаний

а) образец исследуемого материала установить в образцедержателе 2 испытательной установки и прижать рычагом 3 к ролику 6 (см. рисунок 9.1) с усилием  $(44,1 \pm 0,25)$  Н;

б) включить привод 7, обеспечивающий вращение ролика в направлении, указанном на рисунке 9.1, с частотой  $(60 \pm 2)$  мин<sup>-1</sup>;

в) включить дозатор 5, обеспечивающий непрерывную подачу абразивного материала в зону трения; непрерывность подачи абразивного материала в процессе испытаний контролировать по наличию абразивного материала по всей ширине ролика;

г) убедиться в том, что от момента начала подачи абразивного материала счётчик 8 начал отсчёт оборотов ролика; испытание образца из исследуемого материала продолжить в течение времени, соответствующего количеству оборотов ролика, указанному в условиях проведения испытаний (см. 9.1) – соответственно 600, 1800 или 3600;

д) по окончании испытания остановить привод, снять нагрузку, освободить образец и, промыв его последовательно в бензине и ацетоне, взвесить.

Если износ образца окажется менее 5 мг, то установить новый образец и провести испытание в соответствии с пп. 9.3.2 а-д в течение времени, соответствующего удвоенному количеству оборотов ролика. При установке и съёме образцов не допускается повреждение их поверхностей;

е) испытание образца из эталонного материала провести в соответствии с пп. 9.3.2 а-д;

ж) результаты взвешивания образцов до и после испытаний внести в протокол;

и) испытания повторить для 3 испытуемых и 3 эталонных образцов; испытания пористых неоднородных сплавов, спечённых материалов и неоднородных наплавов провести на 5 испытуемых и 3 эталонных образцах;

к) среднеарифметическое значение потери массы эталонных образцов по результатам испытаний в соответствии с пп. 9.3.2 а-и должно находиться в пределах  $(67 \pm 6,1)$  мг.

Если среднеарифметическое значение потери массы выходит за эти пределы, то проверяют правильность выполнения условий испытаний и по-

сле приведения их в соответствие с указанными требованиями повторяют испытания;

л) после каждых 12 испытаний необходимо проверять наружный диаметр ролика и при диаметре менее 48 мм его следует заменить; для нового ролика необходимо произвести приработку в соответствии с пп. 9.3.2 б.

м) Провести обработку результатов испытаний: по формулам (9.1) и (9.2) определить среднеарифметическое значение потерь массы соответственно эталонных образцов  $g_{\text{э}}$  и образцов исследуемого материала  $g_{\text{И}}$ ; по формуле (9.3) вычислить относительную износостойкость  $K_{\text{И}}$  исследуемого материала; результаты расчётов занести в протокол; составить отчёт.

## **9.4 Содержание отчёта**

В отчете должны быть изложены: цель работы, основные положения, относящихся к данному методу и рассмотренных в 9.1 (с приведением формул и рисунка), краткое описание проведённого испытания на изнашивание и особенностей устройства и работы испытательной установки, таблица результатов измерений и расчётов.

## **9.5 Контрольные вопросы**

9.5.1 В чём состоит сущность метода испытания металлических материалов и металлических покрытий на абразивное изнашивание при трении о нежёстко закреплённые абразивные частицы?

9.5.2 Опишите схему и работу испытательной установки.

9.5.3 Из какого материала изготавливают ролик и каковы его размеры, частота вращения?

9.5.4 С какой целью перед испытанием проводят приработку резинового ролика? Опишите методику приработки, перечислите необходимые материалы.

9.5.5 Какой абразивный материал используют при общей сравнительной оценке износостойкости? Приведите название, зернистость, предельное значение относительного содержания влаги.

9.5.6 Перечислите требования к размерам и шероховатости поверхности образцов исследуемых и эталонных материалов.

9.5.7 Из какого материала изготавливают эталонные образцы? Приведите марку стали, её состояние и твёрдость.

9.5.8 Какова должна быть минимальная потеря массы образца вследствие изнашивания при испытаниях?

9.5.9 Изложите методику проведения испытаний образцов.

9.5.10 Как определяют необходимую длительность проведения испытаний образцов?

9.5.11 Приведите формулу для расчёта относительной износостойкости исследуемого материала.

## 10 Лабораторная работа №10. Испытание машиностроительных материалов на ударно-абразивное изнашивание

Целью работы является изучение метода испытания машиностроительных материалов на ударно-абразивное изнашивание, вызванное многократными прямыми ударами изнашивающейся поверхности об абразивную прослойку.

### 10.1 Общие сведения

Применение данного метода регламентировано ГОСТ 23.207-79 и предусматривается в стандартах и технических условиях, устанавливающих технические требования на продукцию.

Сущность метода состоит в том, что образцом из исследуемого и эталонного материалов осуществляют повторные удары через слой твёрдых абразивных частиц по неподвижной наковальне с заданными энергией удара, скоростью и частотой соударений, после чего оценивают относительную износостойкость исследуемого материала путём сравнения износа испытуемых и эталонных образцов.

Испытательная установка для реализации ударно-абразивного изнашивания состоит из привода, ударного механизма, неподвижной наковальни и бункера с направляющим каналом.

Схема испытательной установки приведена на рисунке 10.1. Образец 6, закреплённый на ударнике 7, наносит удары по сменному вкладышу 2 неподвижной наковальни 1 через слой абразивных частиц, подаваемых в зону удара по направляющему каналу 5 прямоугольного сечения из бункера 3, снабжённого заслонкой 4.

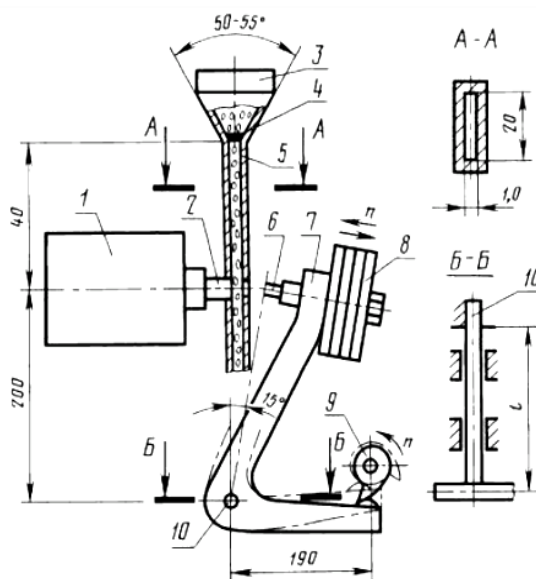


Рисунок 10.1 – Испытательная установка для ударно-абразивного изнашивания

Съёмные грузы 8 позволяют регулировать в заданном диапазоне скорость удара образца о сменный вкладыш наковальни. Сменные торсионы 10 при их закручивании на определённый угол обеспечивают задание необходимой энергии удара, регулируемой в установленном диапазоне. Закручивание и закрепление торсиона производят при положении кулачка 9, соответствующем максимальному удалению образца от сменного вкладыша. Привод испытательной установки обеспечивает регулирование в заданном диапазоне частоты соударений образца и сменного вкладыша наковальни.

Условия проведения испытаний приведены ниже:

Энергия удара  $E$ , Дж:

при стандартных режимах испытаний .....4,9  
при испытаниях в конкретных условиях изнашивания .....2,94-29,4

Частота соударений  $n$  образца и вкладыша наковальни, мин<sup>-1</sup>:

при стандартных режимах испытаний .....100  
при испытаниях в конкретных условиях изнашивания .....20-400

Скорость удара  $v$  образца о сменный вкладыш наковальни, м/с:

при стандартных режимах испытаний .....1  
при испытаниях в конкретных условиях изнашивания .....0,5-5

Сменные торсионы:

угол закручивания торсиона, °, не менее .....15

крутящий момент торсиона  $M_{кр}$ , Н·м:

при стандартных режимах испытаний .....39,258  
при испытаниях в конкретных условиях изнашивания .....см. ф-лу (10.1)

Общая масса  $m$  съёмных грузов, кг:

при стандартных режимах испытаний .....6,68  
при испытаниях в конкретных условиях изнашивания .....см. ф-лу (10.2)

Масса неподвижной наковальни, кг, не менее .....50

Момент инерции ударника  $I_{уд}$ , Н·м<sup>2</sup>.....17,87·10<sup>-7</sup>

3

Размеры направляющего канала для подачи абразивных частиц, мм:

прямоугольное сечение .....20x1  
длина .....40

Применяемый стандартный абразивный материал:

карбид кремния чёрный зернистостью 0,63 мм .....ГОСТ 3647-80  
относительное содержание влаги, %, не более .....0,15

Эталонный образец:

материал .....сталь 45 ГОСТ 1050-2013  
твёрдость стали (после закалки и отпуска) .....598-622HV

количество образцов, шт., для оценки потерь массы .....3

Размеры цилиндрических образцов, мм, из исследуемых и эталонных материалов:

диаметр .....10h8  
длина .....35±0,05

Шероховатость рабочей (торцевой) поверхности образцов из исследуемого и эталонного материалов,  $Ra$ , мкм. ....≤2,5

Сменный вкладыш наковальни:

диаметр, мм .....15h8  
длина, мм .....35±0,05

материал .....сталь 45 ГОСТ 1050-2013

твёрдость стали (после закалки и отпуска) .....640-675 HV

Стандартный абразивный материал используют для общей сравнительной оценки износостойкости материалов при стандартных режимах испытаний (см. выше  $E = 4,9$  Дж,  $v = 1$  м/с,  $n = 100$  мин<sup>-1</sup>,  $M_{кр} = 39,258$  Н·м,  $m = 6,68$  кг);

Для оценки износостойкости применительно к конкретным условиям изнашивания применяют иной режим испытаний, при этом допускается использовать абразивный материал, соответствующий воздействию материалу при эксплуатации, но с размером частиц не более 0,8 мм. В этом случае характеристики абразивного материала приводят в протоколах испытаний.

Повторное использование абразивного материала допускается, но не более трёх раз.

При иных режимах испытаний значения параметров отличаются от стандартных, приведённых выше:

$E = 2,94-29,4$  Дж,  $v = 0,5-5$  м/с,  $n = 20-400$  мин<sup>-1</sup>,  $M_{кр} \neq 39,258$  Н·м, его вычисляют по формуле (10.1);  $m \neq 6,68$  кг, его вычисляют по формуле (10.2);

Значения крутящего момента торсиона  $M_{кр}$ , Н·м, вычисляют по формуле

$$M_{кр} = 3,82E + 0,13C, \quad (10.1)$$

а значения общей массы  $m$  съёмных грузов, кг, вычисляют по формуле

$$m = \frac{1}{r^2} \left( 0,08 \frac{E}{v^2} - I_{уд} \right), \quad (10.2)$$

где  $C$  – характеристика жёсткости торсиона, Н·м, которая должна отвечать условию  $C \leq 7,63M_{кр}$ ;

$r$  – расстояние от оси вращения ударника до центра тяжести съёмных грузов, м;

$I_{уд}$  – момент инерции ударника, Н·м<sup>2</sup>.

Износ испытуемых и эталонных образцов определяют путём взвешивания до и после испытаний с погрешностью не более 0,0002 г. Потеря массы образца из-за изнашивания при испытаниях должна составлять не менее 0,005 г.

По результатам взвешивания образцов до и после испытаний (с заданными значениями энергии удара, скорости и частоты соударения) находят среднюю потерю массы образцов  $g_{э}$ ,  $g_{и}$  соответственно из эталонного и исследуемого материалов по формулам

$$g_{э} = \frac{\sum_{i=1}^3 g_{эi}}{3}, \quad (10.3)$$

$$g_{\text{и}} = \frac{\sum_{i=1}^3 g_{\text{и}i}}{3}, \quad (10.4)$$

где  $g_{\text{э}i}$ ,  $g_{\text{и}i}$  – соответственно потеря массы для отдельных испытанных эталонных и исследуемых образцов, г.

Относительную износостойкость  $U$  исследуемого материала определяют по формуле

$$U = \frac{g_{\text{э}} \rho_{\text{и}}}{g_{\text{и}} \rho_{\text{э}}}, \quad (10.5)$$

где  $\rho_{\text{э}}$ ,  $\rho_{\text{и}}$  – плотность соответственно эталонного и исследуемого материалов, г/см<sup>3</sup>.

## 10.2 Задание

Изучить метод испытания машиностроительных материалов на ударно-абразивное изнашивание.

## 10.3 Порядок выполнения работы

### 10.3.1 Подготовка к испытаниям:

а) измерить твёрдость образцов из испытываемого и эталонного материалов по ГОСТ 2999-75; полученные данные об образцах из испытываемого материала занести в протокол испытаний; убедиться, что твёрдость эталонных образцов соответствует требованиям, указанным в условиях испытания в пп. 10.1; отобранные образцы маркировать клеймением на нерабочих поверхностях;

б) проверить влажность абразивного материала по ГОСТ 5382-91 и при необходимости довести её до значения  $\leq 0,15$  %;

в) образцы последовательно промыть бензином и ацетоном, просушить на воздухе и взвесить;

г) установить сменный вкладыш 2 наковальни 1; в ударный механизм вставить образец 6 из испытываемого или эталонного материала (см. рисунок 10.1), при этом во время установки и съёма образца не допускается повреждение его поверхности; испытанию подвергают по три образца из эталонного и исследуемого материалов;

д) при положении кулачка 9, соответствующем максимальному давлению образца 6 от сменного вкладыша 2 наковальни 1 (см. рисунок 10.1), произвести закручивание торсиона 10 до значения момента  $M_{\text{кр}}=39,258$  Н·м и закрепить торсион;

е) на ударный механизм установить съёмные грузы 8 общей массой 6,68 кг;

ж) открыть заслонку 4 бункера 3 и включить привод испытательной установки;

и) произвести приработку образца, осуществляя  $(500 \pm 1)$  ударов образца о сменный вкладыш наковальни; приработке подвергают последовательно все образцы из испытуемого и эталонного материалов;

к) после окончания приработки все образцы промыть бензином и ацетоном, просушить на воздухе и взвесить; если при этом потеря массы образца окажется менее 0,005 г, то продолжительность приработки увеличить в два раза; но если после такого увеличения продолжительности приработки в два раза указанное требование вновь не будет выполнено, то дальнейшие испытания данного материала при выбранном режиме проводить нецелесообразно

### 10.3.2 Проведение испытаний:

а) выбрать режим испытаний, который может быть:

- стандартным режимом – при общей сравнительной оценке износостойкости испытуемого материала (при этом используют стандартный абразивный материал, указанный в пп. 10.1);

- иным режимом – при оценке износостойкости материала применительно к конкретным условиям изнашивания (тогда используют такой абразивный материал, который соответствует воздействию материалу при эксплуатации);

б) стандартный режим испытаний обеспечивается углом закручивания торсиона согласно пп. 10.3.1 д и массой съёмных грузов, указанной в пп. 10.3.1 е; в этом случае гарантируются следующие параметры стандартного режима (см. условия испытаний в пп. 10.1):  $E = 4,9$  Дж,  $v = 1$  м/с,  $n = 100$  мин<sup>-1</sup>;

в) при оценке износостойкости материала применительно к конкретным условиям изнашивания иной режим испытания отличается от стандартного следующим:

- закручивание торсиона 10 (см. рисунок 10.1) при положении кулачка 9, соответствующем максимальному удалению образца 6 от сменного вкладыша 2 наковальни 1, производят до значения момента  $M_{кр}$ , рассчитанного по формуле (10.1) и зависящего от необходимого значения энергии удара  $E$  и характеристики жёсткости торсиона  $C$ , которая должна отвечать условию  $C \leq 7,63 M_{кр}$ ; при этом допускается плавное регулирование жёсткости торсиона 10 путём изменения его длины  $l$  (см. разрез Б - Б на рисунке 10.1);

- на ударный механизм устанавливают съёмные грузы общей массой  $m$ , рассчитанной по формуле (10.2) и зависящей от необходимого значения скорости соударения  $v$ ;

г) после выбора соответствующего режима испытаний установить необходимую частоту  $n$  соударений равной частоте вращения кулачка 9, открыть заслонку бункера для подачи абразивного материала в зону соударения и включить привод кулачка;

д) провести испытания эталонных и испытуемых образцов в соответствии с пп. 10.3.2 б или 10.3.2 в, осуществляя  $(1000 \pm 1)$  ударов, что и определяет продолжительность испытания. После окончания испытаний образцы промыть, осушить на воздухе и взвесить с погрешностью не более 0,0002 г; полученные результаты занести в протокол;

е) если отклонение значения потери массы одного из образцов в процессе испытания превысит 40 % средней потери массы всех испытуемых образцов, то испытания повторить на трёх новых образцах в соответствии с пп. 10.3.2 б - д;

ж) после 2000 ударов произвести замену сменных вкладышей накопальни.

### 10.3.3 Обработка результатов испытаний:

- по формулам (10.3) и (10.4) определить среднюю потерю массы образцов соответственно из эталонного и исследуемого материалов;

- по формуле (10.5) вычислить относительную износостойкость исследуемого материала.

Примечание – При записи результатов испытаний, проведённых с целью оценки износостойкости материала применительно к конкретным условиям изнашивания (пп. 10.3.2 в), необходимо указывать параметры иного режима испытаний образцов (характеристика абразивного материала, толщина его слоя, энергия удара  $E$ , скорость соударения  $v$ , частота соударения  $n$ ), к которым относится данное значение износостойкости.

## 10.4 Содержание отчёта

В отчете должны быть изложены: цель работы, основные положения, относящихся к данному методу и рассмотренных в 10.1 (с приведением формул и рисунка), краткое описание проведённого испытания на изнашивание и особенностей устройства и работы испытательной установки, протокол результатов измерений, расчётов и испытаний, приведенный в приложении Б.

## 10.5 Контрольные вопросы

10.5.1 В чём состоит сущность метода испытаний машиностроительных материалов на ударно-абразивное изнашивание?

10.5.2 Опишите схему и работу испытательной установки.

10.5.3 Из каких материалов изготавливают сменный вкладыш накопальни и эталонные образцы?

10.5.4 Какой абразивный материал используют при общей сравнительной оценке износостойкости материалов при стандартных режимах испытаний?

10.5.5 Приведите название, зернистость, предельное значение относительного содержания влаги.

10.5.6 Допускается ли повторное использование абразивного материала?

10.5.7 Перечислите требования к размерам и шероховатости поверхности сменного вкладыша наковальни и образцов исследуемых и эталонных материалов.

10.5.8 Какова погрешность определения износа образцов по массе?

10.5.9 Какова должна быть минимальная потеря массы образца вследствие изнашивания при испытаниях?

10.5.10 Какие промывочные жидкости используют для обработки образцов перед испытаниями и взвешиванием?

10.5.11 Изложите методику проведения испытаний образцов.

10.5.12 Укажите числовые значения параметров стандартного режима испытаний.

10.5.13 Как оценивают длительность проведения испытаний образцов?

10.5.14 Приведите формулу для расчёта относительной износостойкости исследуемого материала.

## Список использованных источников

- 1 Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин / В. Д. Зозуля, Е. Л. Шведков, Д. Я. Ровинский, Э. Д. Браун ; отв. Ред. И. М. Федорченко. – 2-е изд., перераб. И доп. – Киев : Наук. Думка, 1990. – 264 с. – ISBN5-12-001395-3.
- 2 Справочник по триботехнике. В 3 т. Т.3. Триботехника антифрикционных, фрикционных и сцепных устройств. Методы и средства триботехнических испытаний / под общ. Ред. М. Хебды, А. В. Чичинадзе. – Москва : Машиностроение, 1992. – 730 с. – ISBN 5-217-01919-0.
- 3 Икрамов, У. А. Основы трибоники : учеб. Пособие для вузов / У. А. Икрамов, М. А. Левин. – Ташкент : Укитувчи, 1984. – 184 с.
- 4 Справочник по конструкционным материалам : справочник / Б. Н. Арзамасов [и др.] ; под ред. Б. Н. Арзамасова, Т. В. Соловьёвой. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – 640 с. – ISBN5-7038-2651-9.
- 5 Комбалов, В. С. Методы и средства испытаний на трение и износ конструкционных и смазочных материалов : справочник / В. С. Комбалов; под ред. К. В. Фролова, Е. А. Марченко. – Москва : Машиностроение, 2008. – 384 с. – ISBN 978-5-217-03370-6.
- 6 Методы испытаний на трение и износ : справочное изд./ Л. И. Куксенова, В. Г. Лаптева, А. Г. Колмаков, Л. М. Рыбакова. – Москва : Интермет инжиниринг, 2001. – 152 с. – ISBN5-89594-059-5.
- 7 Гаркунов, Д. Н. Триботехника (износ и безызносность) : учебник для вузов / Д. Н. Гаркунов. – 4-е изд., перераб. И доп. – М. : Изд-во МСХА, 2001. – 616 с.
- 8 Гаркунов, Д. Н. Триботехника : учебник для вузов / Д. Н. Гаркунов. – 2-е изд., перераб. И доп. – М. : Машиностроение, 1989. – 328 с.
- 9 Основы трибологии (трение, износ, смазка) : учебник для вузов / Э. Д. Браун [и др.] ; под ред. А.В.Чичинадзе. – М. : Центр «Наука и техника», 1995. – 778 с.
- 10 Крагельский, И. В. Основы расчётов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. – М. : Машиностроение, 1977. – 526 с.
- 11 Мур, Д. Ф. Основы и применения трибоники / Д. Ф. Мур. – М. : Мир, 1978. – 487 с.
- 12 Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А. В. Чичинадзе [и др.] ; под общ. Ред. А. В. Чичинадзе. – М. : Машиностроение, 2003. – 576 с. . – ISBN 5-217-03193-X.
- 13 ГОСТ 27860-88 Детали трущихся сопряжений. Методы измерения износа. – Взамен ГОСТ 23.206-79, ГОСТ 23.209-79, ГОСТ 23.217-84, ГОСТ 17534-72 ; введ. 1990-01-01. – Москва : Изд-во стандартов, 1989. – 31 с.
- 14 ГОСТ 23.301-78 Обеспечение износостойкости изделий. Приборы для измерения износа методом вырезанных лунок. Технические требования. – Введ. 1980-01-01. – Москва : Стандартинформ, 2005. – 7 с.
- 15 ГОСТ 2999-75 Металлы и сплавы. Метод измерения твёрдости по

Виккерсу. – Введ. 1976-07-01. – Москва : Изд-во стандартов, 1987. – 31 с.

16 ГОСТ 9450-76 Измерение микротвёрдости вдавливанием алмазных наконечников. – Введ. 1977-01-01. – Москва : Изд-во стандартов, 1993. – 35 с.

17 ГОСТ 17367-71 Металлы. Метод испытания на абразивное изнашивание при трении о закреплённые абразивные частицы. – Введ. 1973-01-01. – Москва : Изд-во стандартов, 1972. – 7 с.

18 ГОСТ 23.208-79 Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытания материалов на износостойкость при трении о нежёстко закреплённые абразивные частицы. – Введ. 1981-03-01. – Москва : Стандартиформ, 2005. – 4 с.

19 ГОСТ 23.207-79 Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытания машиностроительных материалов на ударно-абразивное изнашивание. – Введ. 1981-01-01. – Москва : Стандартиформ, 2005. – 5 с.

20 ГОСТ 27674-88 Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения. – Взамен ГОСТ 23.002-78 ; введ. 1989-01-01. – Москва : Изд-во стандартов, 1992. – 21 с.

21 ГОСТ 23.001-2004 Обеспечение износостойкости изделий. Основные положения. – Введ. 2006-01-01. – Москва : Стандартиформ, 2005. – 8 с.

22 ГОСТ 23.211-80 Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытаний материалов на изнашивание при фреттинге и фреттинг-коррозии. – Введ. 1982-01-01. – Москва : Стандартиформ, 2005. – 5 с.

23 ГОСТ 30480-97 Обеспечение износостойкости изделий. Методы испытаний на износостойкость. Общие требования. – Введ. 1998-07-01. – Москва : ИПК Изд-во стандартов, 1988. – 15 с.

24 ГОСТ 23.213-83 Обеспечение износостойкости изделий. Метод оценки противозадирных свойств машиностроительных материалов. – Введ. 1984-07-01. – Москва : Стандартиформ, 2005. – 10 с.

25 РД 50-662-88 Методические указания. Методы экспериментальной оценки фрикционной совместимости материалов трущихся сопряжений. – Взамен ГОСТ 23.210-80, ГОСТ 23.215-84, ГОСТ 23.222-84; введ. 1989-01-01. – Москва : Изд-во стандартов, 1988. – 30 с.

26 ГОСТ 23.204-78 Обеспечение износостойкости изделий. Метод оценки истирающей способности поверхностей при трении. – Введ. 1980-01-01. – Москва : Стандартиформ, 2005. – 3 с.

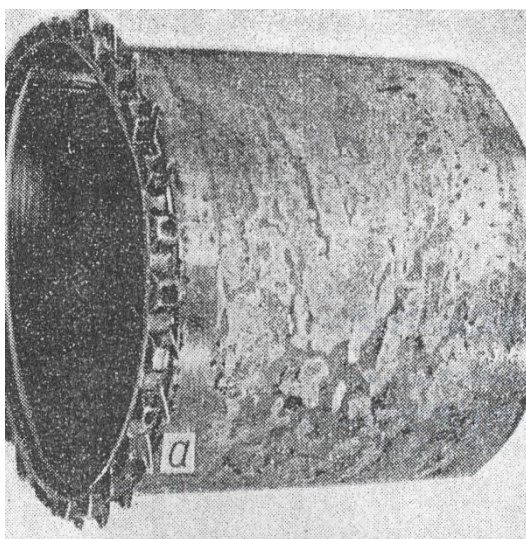
27 ГОСТ 23.220-84 Обеспечение износостойкости изделий. Метод оценки истирающей способности поверхностей восстановленных валов. – Введ. 1985-07-01. – Москва : Стандартиформ, 2005. – 6 с.

28 ГОСТ 23.224-86 Обеспечение износостойкости изделий. Методы оценки износостойкости восстановленных деталей. – Введ. 1987-01-01. – Москва : Стандартиформ, 2005. – 20 с.

## Приложение А

(рекомендуемое)

### Атлас изношенных деталей



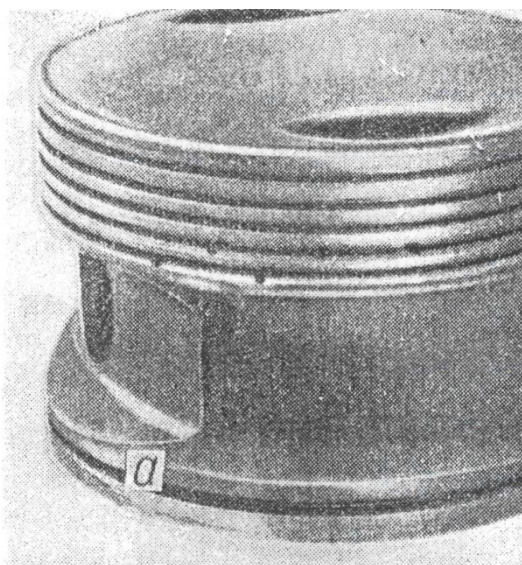
а)



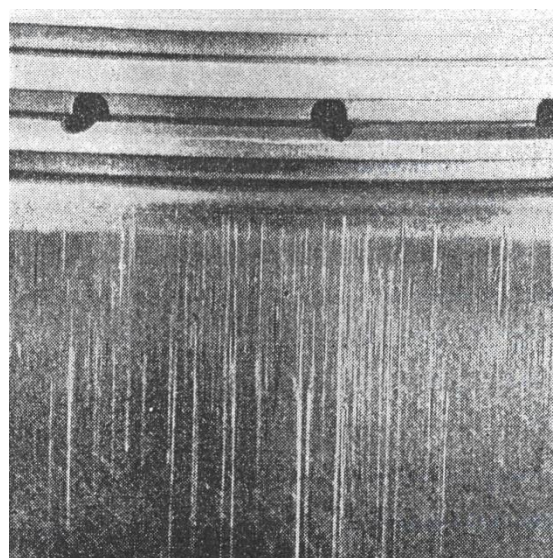
б)

а – втулка шатуна авиадвигателя; б – поверхность ( $\times 5$ ).

Рисунок А.1 – Схватывание 1-го рода



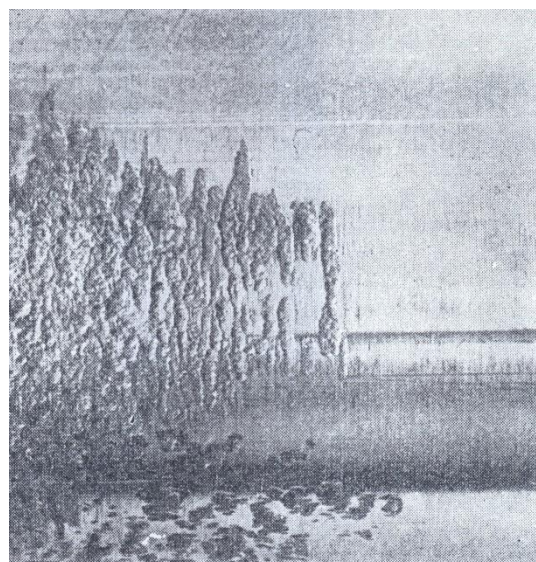
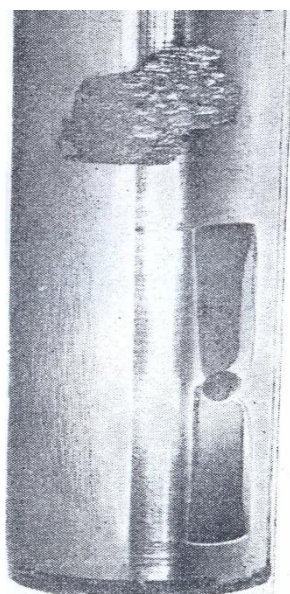
а)



б)

а – поршень авиадвигателя; б – поверхность поршня ( $\times 1$ ).

Рисунок А.2 – Схватывание 1-го рода

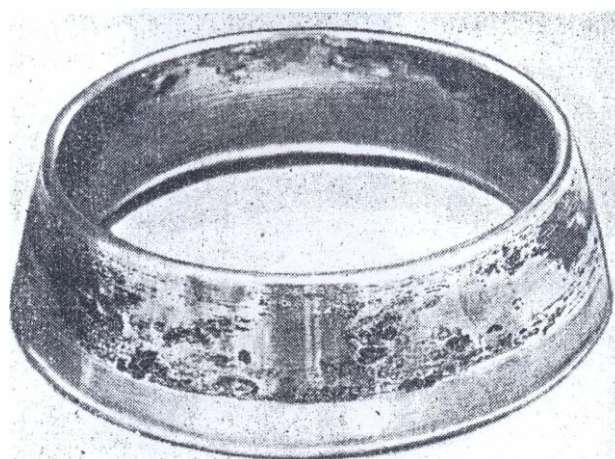


а)

б)

а – ось двойной шестерни нагнетания авиадвигателя ( $\times 1$ );  
б – поверхность ( $\times 5$ ).

Рисунок А.3 – Схватывание 1-го рода

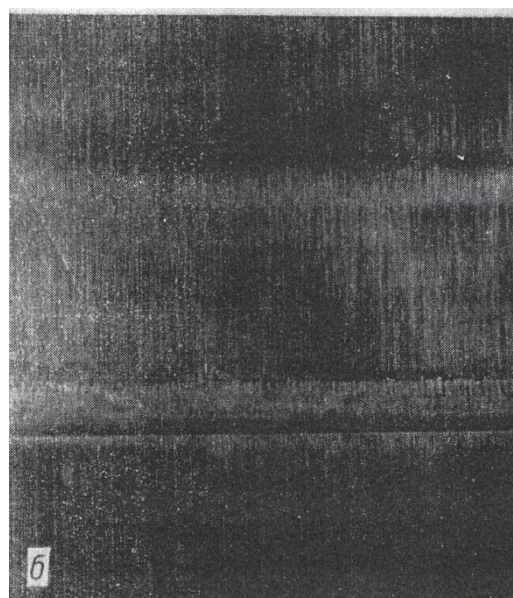
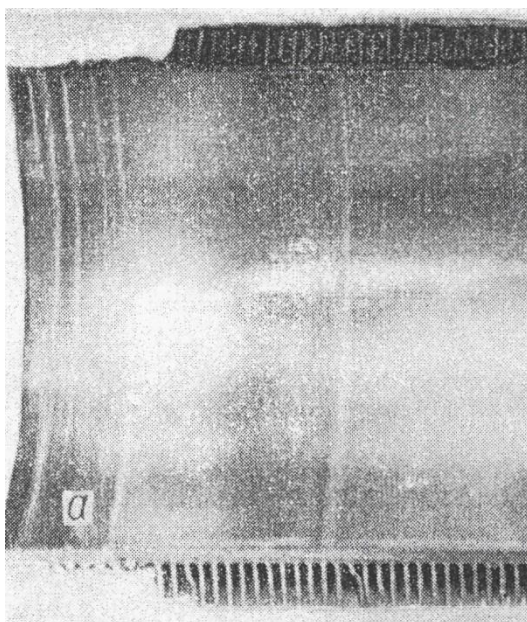


а)

б)

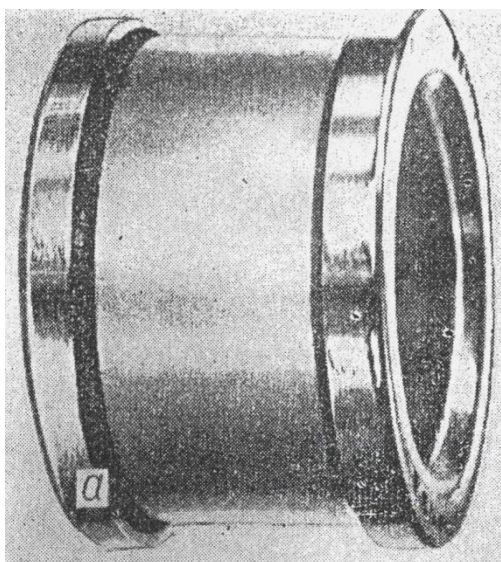
а – червяк редуктора ( $\times 5$ );  
б – конус авиационного воздушного винта ( $\times 0,5$ ).

Рисунок А.4 – Схватывание 1-го рода



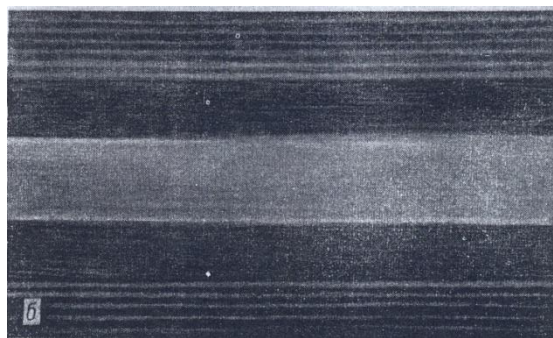
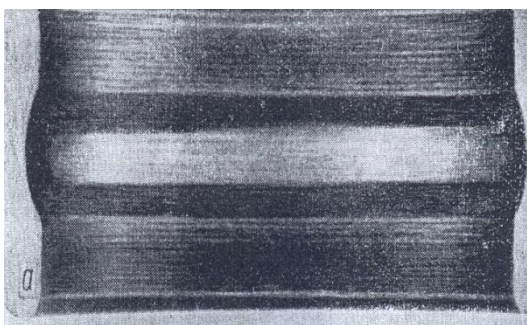
а – цилиндр авиадвигателя ( $\times 62$ ); б – поверхность в ВМТ ( $\times 5$ ).

Рисунок А.5 – Окислительный износ



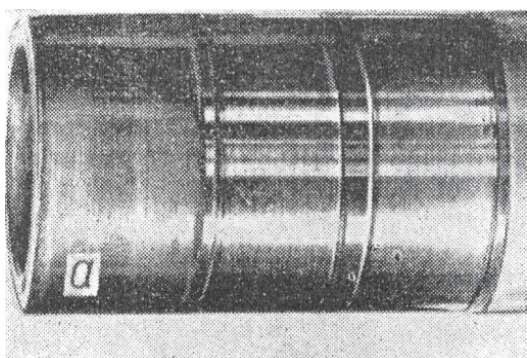
а – внутреннее кольцо роликоподшипника ( $\times 1$ );  
б – макрофотография изношенной поверхности ( $\times 5$ ).

Рисунок А.6 – Окислительный износ



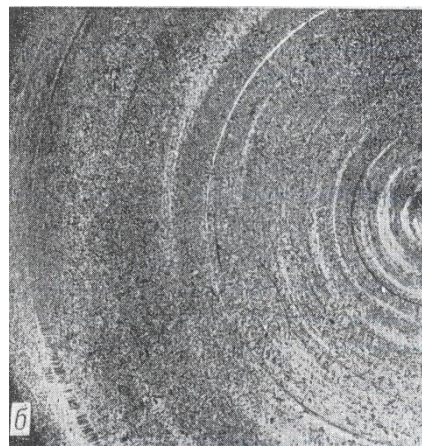
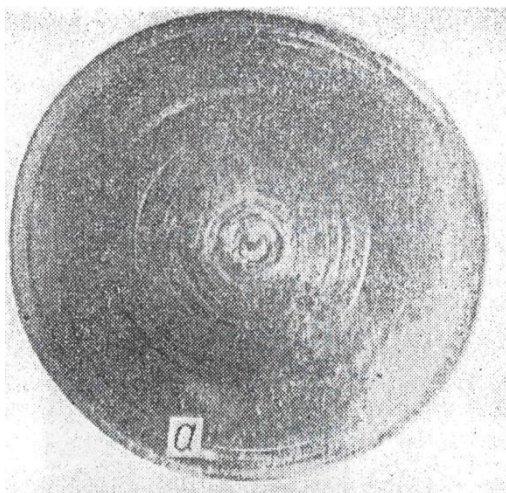
а – наружное кольцо шарикоподшипника ( $\times 2$ );  
 б – поверхность ( $\times 5$ ).

Рисунок А.7 – Окислительный износ.



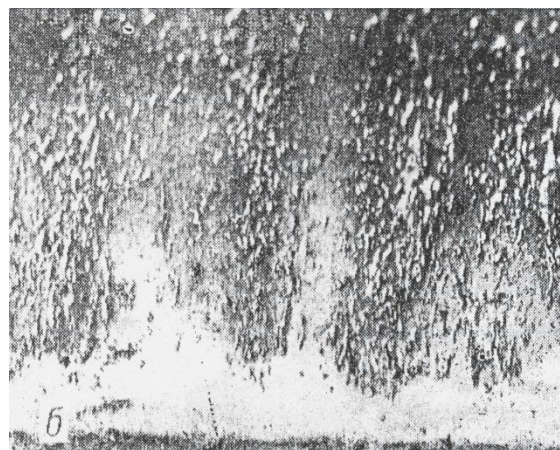
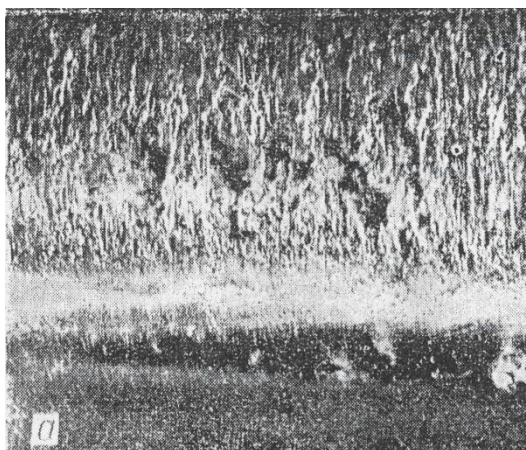
а – поршневой палец автомобильного двигателя;  
 б – поверхность ( $\times 20$ ).

Рисунок А.8 – Окислительный износ



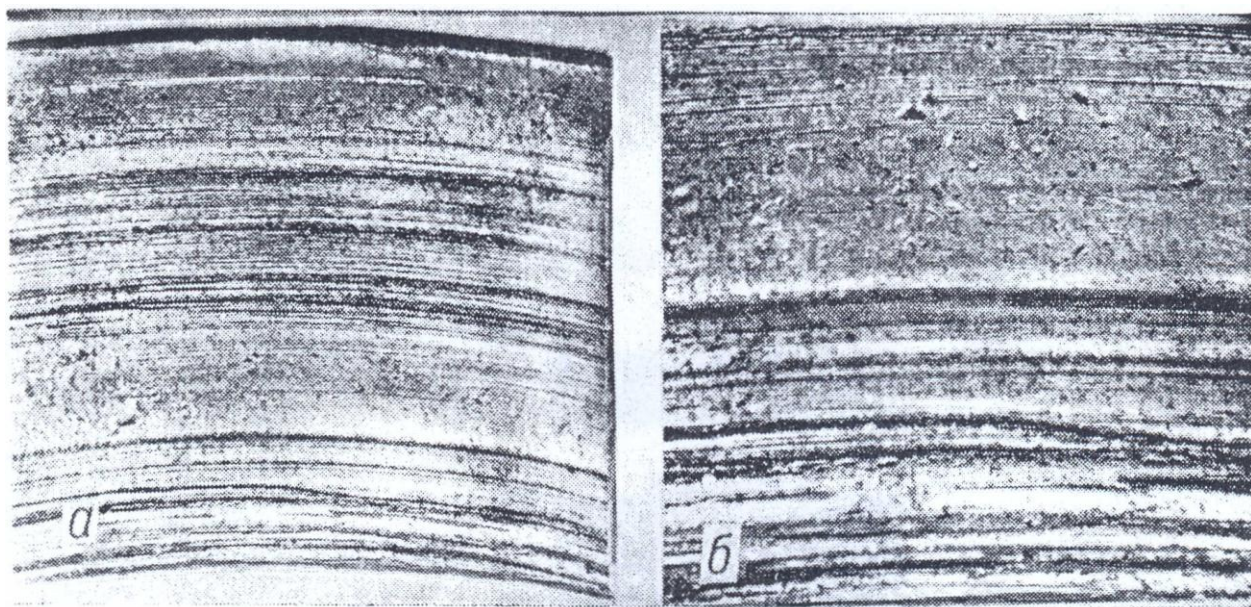
а – тарелка толкательного клапана автомобильного двигателя;  
б – поверхность ( $\times 20$ ).

Рисунок А.9 – Окислительный износ



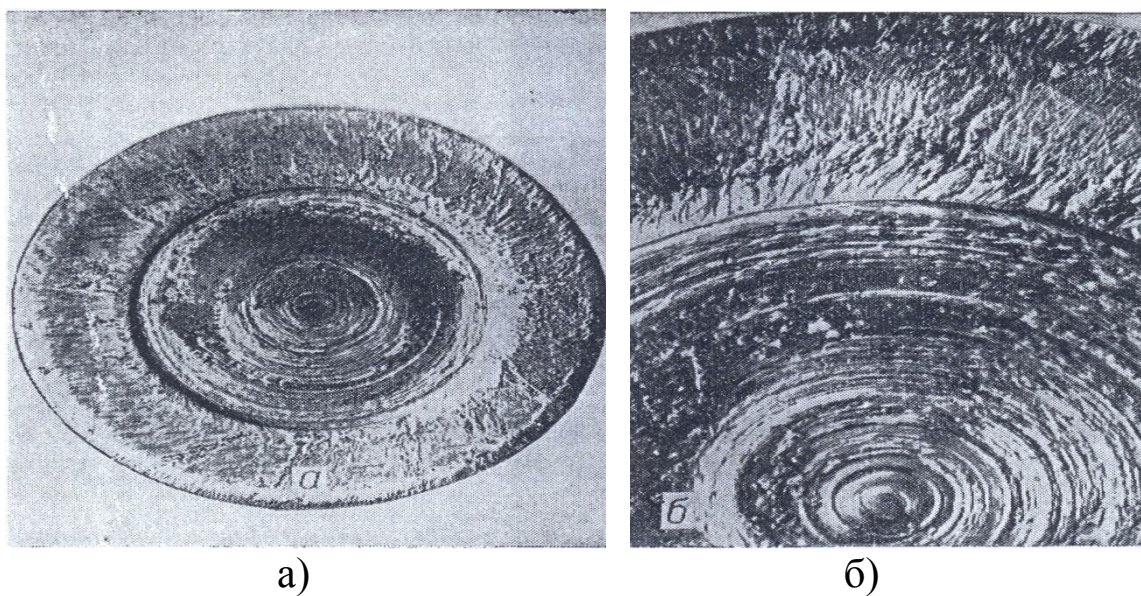
а – зубец шестерни ( $\times 3$ );  
б – макрофотография изношенной поверхности ( $\times 10$ ).

Рисунок А.10 – Окислительный износ



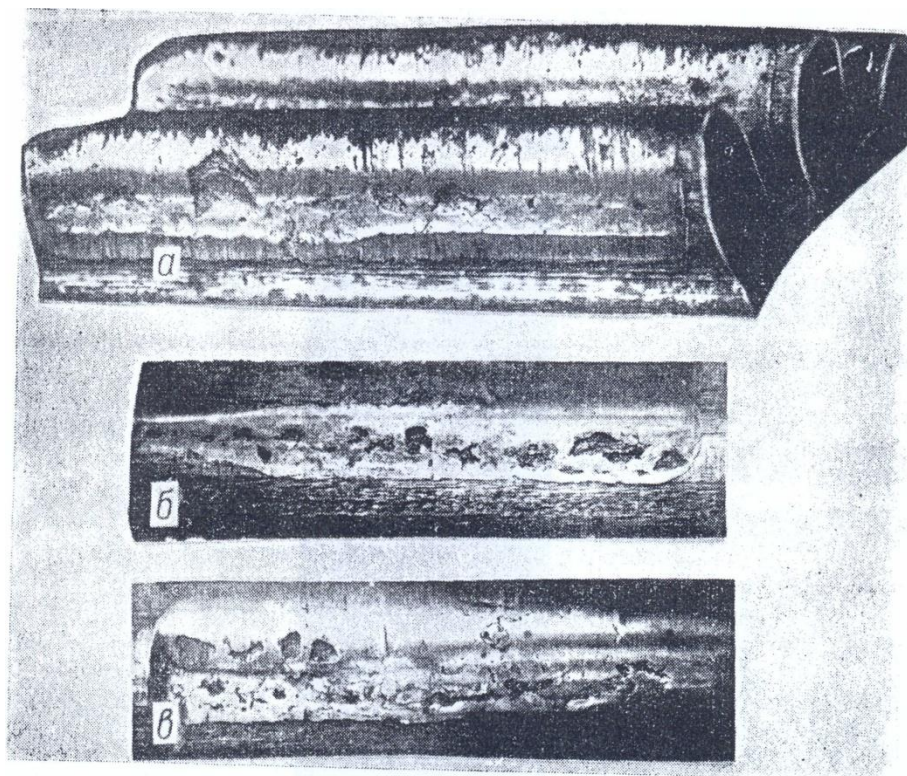
а – износ внутренней цилиндрической поверхности сателлита дифференциала заднего моста автомобиля ( $\times 10$ ); б – поверхность ( $\times 50$ ).

Рисунок А.11 – Схватывание 2-го рода



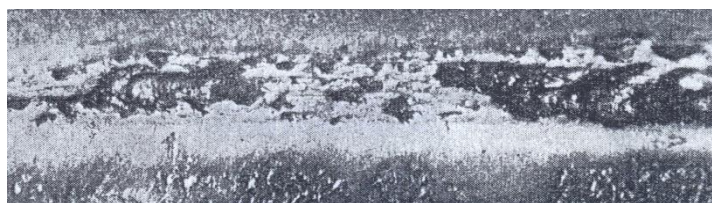
а – тарелка толкателя клапана автомобильного двигателя;  
б – поверхность ( $\times 5$ ).

Рисунок А.12 – Схватывание 2-го рода



а, б, в – зубцы шестерен редуктора.

Рисунок А.13 – Осповидный износ



а)



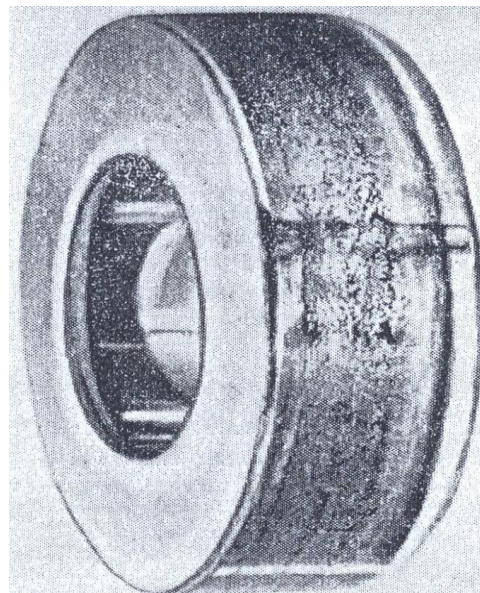
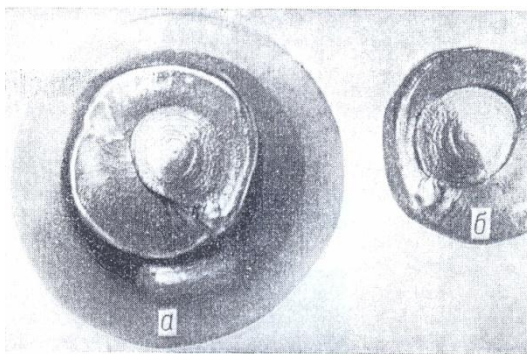
б)



в)

а, б, в – макрофотографии изношенных поверхностей зубцов ( $\times 20$ ).

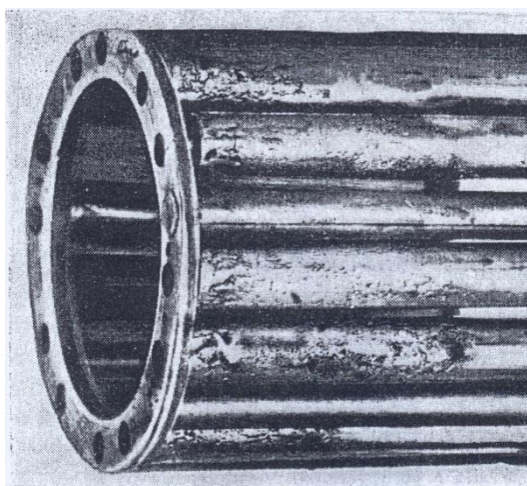
Рисунок А.14 – Осповидный износ



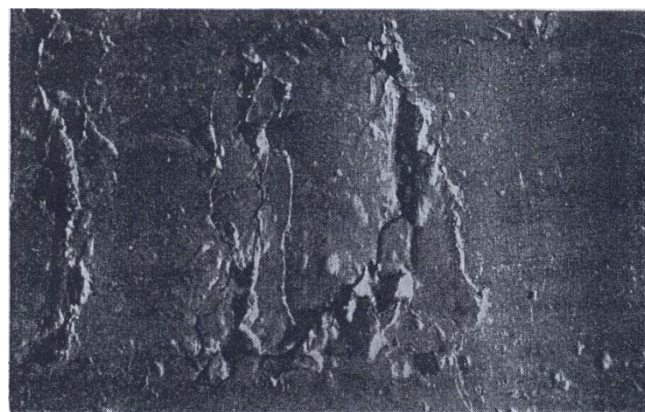
в)

- а – усталостное разрушение шарика шарикоподшипника ( $\times 5$ );  
 б – отделившаяся частица;  
 в – ролик толкателя газораспределения авиадвигателя АШ – 62 ИР ( $\times 2$ ).

Рисунок А.15 – Осповидный износ



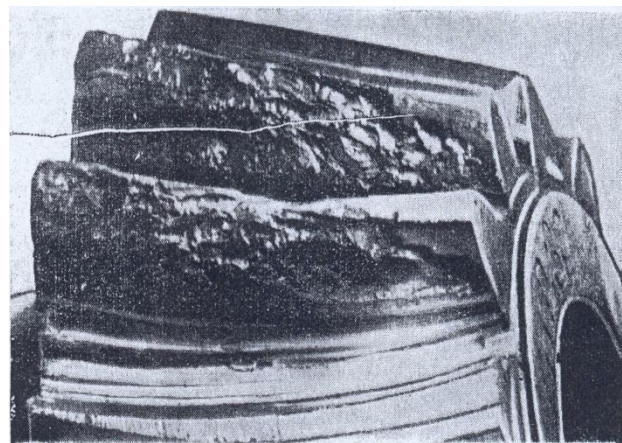
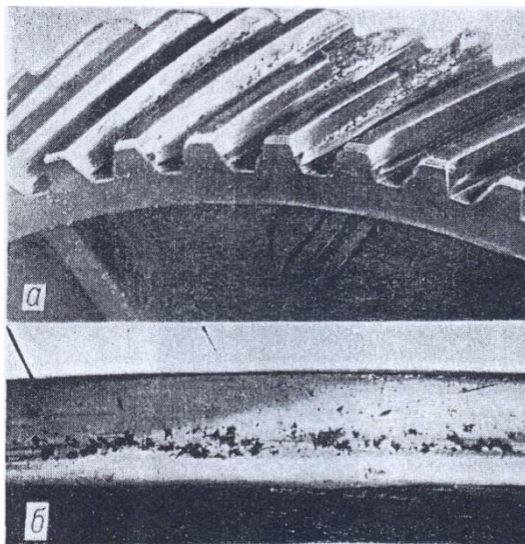
а)



б)

- а – ролик удлиненного роликоподшипника;  
 б – поверхность внутреннего кольца роликоподшипника ( $\times 20$ ).

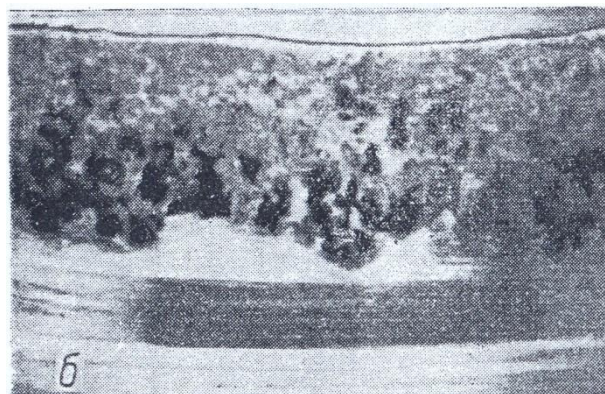
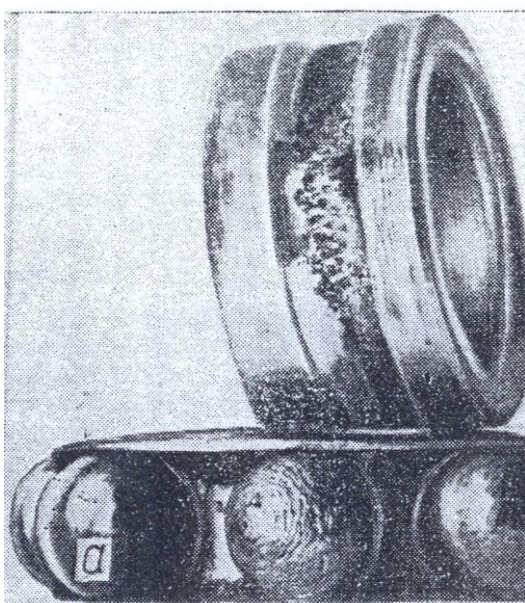
Рисунок А.16 – Осповидный износ



в)

а – чугунная шестерня двигателя автомобиля;  
б – зубец шестерни ( $\times 5$ ); в – коническая шестерня.

Рисунок А.17 – Осповидный износ



а – шарики и внутреннее кольцо шарикоподшипника прибора ( $\times 5$ );  
б – кольцо ( $\times 20$ ).

Рисунок А.18 – Осповидный износ

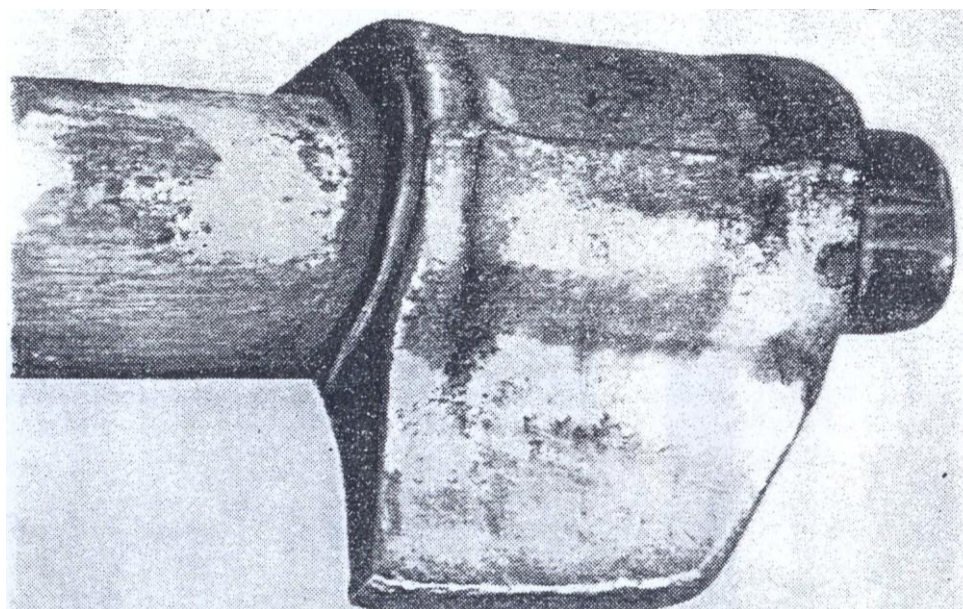
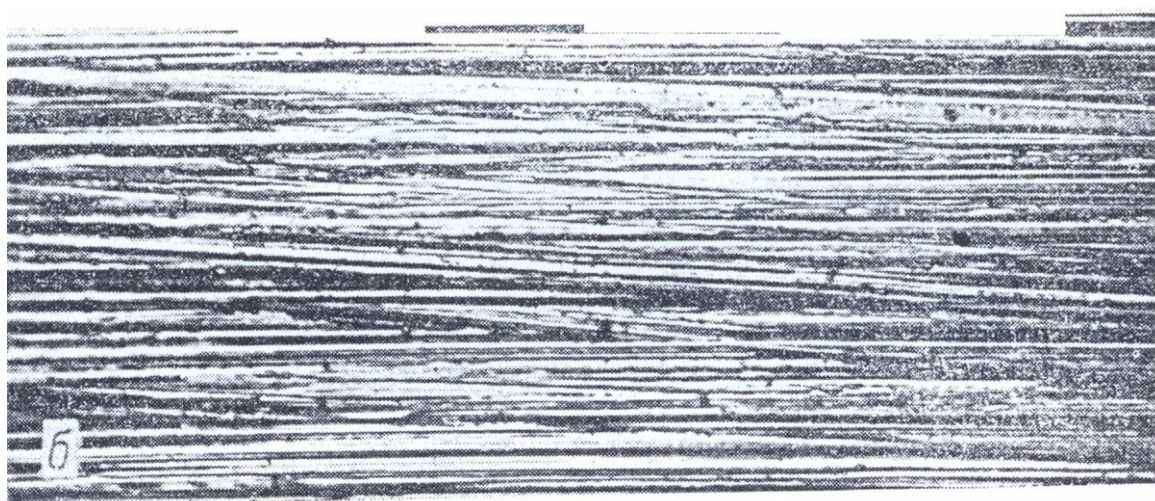
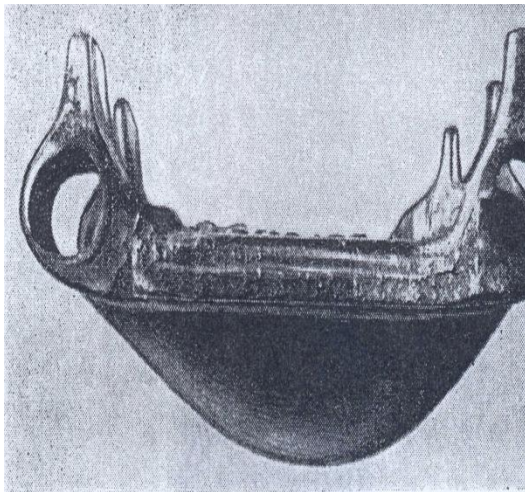


Рисунок А.19 – Абразивный износ пальца с траком гусеничной передачи

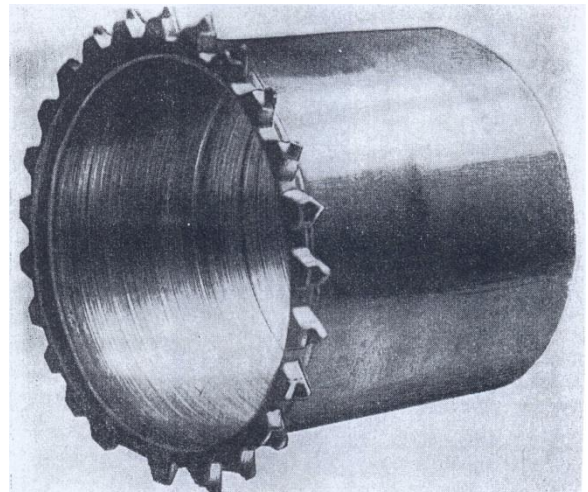


а – палец трака гусеничной передачи ( $\times 0,5$ );  
б – поверхность изношенной части пальца ( $\times 100$ ).

Рисунок А.20 – Абразивный износ



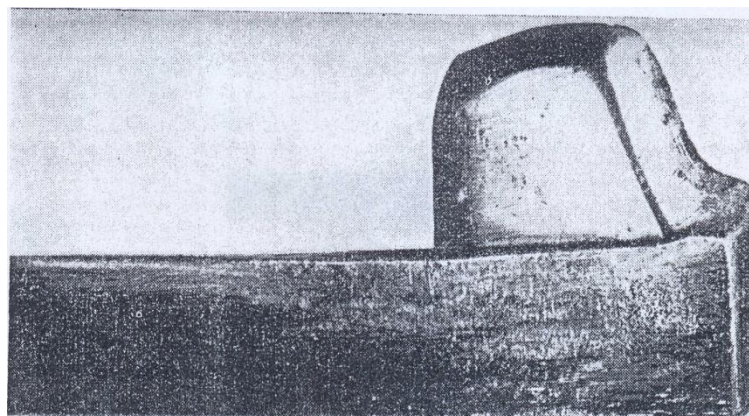
а)



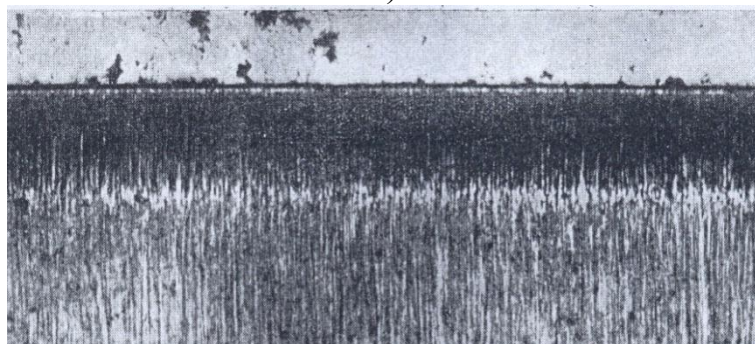
б)

а – трак гусеничной передачи ( $\times 0,5$ );  
б – втулка главного шатуна авиадвигателя.

Рисунок А.21 – Абразивный износ



а)



б)

а – нож форпресса маслозавода ( $\times 5$ );  
б – износ цилиндра (чугун) тракторного двигателя, работавшего в запыленной местности ( $\times 20$ ).

Рисунок А.22 – Абразивный износ

## Приложение Б

(рекомендуемое)

### Образец протокола

#### ПРОТОКОЛ

испытаний на ударно-абразивное изнашивание по ГОСТ 23.207-79

Дата

Исполнитель

#### Характеристики материалов

| Материал    | Наименование, ГОСТ                                 | Термообработка                     | Твёрдость<br>HV | Плотность,<br>г/см <sup>3</sup> | Размер<br>частиц,<br>мм |
|-------------|----------------------------------------------------|------------------------------------|-----------------|---------------------------------|-------------------------|
| Эталонный   | Сталь 45<br>ГОСТ 1050-2013                         | Зак. 840 °С в воду;<br>отп. 200 °С | 598-622         | 7,85                            | —                       |
| Исследуемый | Сталь У10А<br>ГОСТ 1435-99                         | Зак. 740 °С в воду;<br>отп. 180 °С | 775-810         | 7,85                            | —                       |
| Абразивный  | Карбид кремния чёр-<br>ный (КЧ-63) ГОСТ<br>3647-80 | —                                  | 2900-3500       | —                               | 0,63                    |

#### Режим испытаний

| Энергия удара E, Дж | Скорость<br>соударения, м/с | Частота<br>соударения, мин <sup>-1</sup> | Продолжительность<br>испытаний<br>(количество ударов) |
|---------------------|-----------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| 4,9                 | 1                           | 100                                      | 1000                                                  |

#### Результаты испытаний

| Материал    | Номер<br>образца | Начальная<br>масса | Масса после<br>испытаний | Потеря<br>массы | Средняя потеря<br>массы |
|-------------|------------------|--------------------|--------------------------|-----------------|-------------------------|
|             |                  | г                  |                          |                 |                         |
| Эталонный   | 1                | 30,3477            | 30,3137                  | 0,0340          | 0,0352                  |
|             | 2                | 30,2406            | 30,2050                  | 0,0356          |                         |
|             | 3                | 30,4147            | 30,3786                  | 0,0361          |                         |
| Исследуемый | 1                | 30,9048            | 30,8723                  | 0,0325          | 0,0328                  |
|             | 2                | 30,8008            | 30,7680                  | 0,0328          |                         |
|             | 3                | 30,7086            | 30,6755                  | 0,0331          |                         |

#### Результаты вычислений

$$g_{\text{э}} = \frac{\sum_{i=1}^3 g_{\text{э}i}}{3} = \frac{0,0340+0,0356+0,0361}{3} = 0,0352 ,$$

$$g_{II} = \frac{\sum_{i=1}^3 g_{IIi}}{3} = \frac{0,0325+0,0328+0,0331}{3} = 0,0328;$$

$$U = \frac{g_{\text{Э}} \rho_{II}}{g_{II} \rho_{\text{Э}}} = \frac{0,0352 \cdot 7,85}{0,0328 \cdot 7,85} = 1,073.$$

Подпись \_\_\_\_\_