

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Дмитриев Николай Николаевич  
Должность: Ректор  
Дата подписания: 25.08.2022 06:46:56  
Уникальный программный ключ:  
f7c6227919e4cdbfb4d7b682891f8553b37cafb0

**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ**

**ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО  
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**Иркутская государственная сельскохозяйственная академия  
Кафедра Технический сервис и общинженерные дисциплины**

**В.А. Беломестных, М.К. Бураев**

**Надежность и ремонт машин**

**Учебно-методическое пособие**

**Иркутск 2018**

УДК 631.3.004.67(075.8)

Б 435

Беломестных В. А. Надежности и ремонт машин : учеб. – метод. пособие для выполнения лабораторных работ / В. А. Беломестных, М. К. Бураев – Иркутск : ИрГСХА, 2014. - 144 с.

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом Иркутской государственной сельскохозяйственной академии (протокол № 10 от 19.06.14)

В учебно-методическом пособии излагаются материалы, поясняющие физические основы, нарушающие работоспособность и снижающие уровень надежности технических систем, приведена методика проведения лабораторно – практических занятий с приведением необходимых исходных данных, примеров и контрольных вопросов.

Пособие подготовлено в соответствии с требованиями государственного образовательного стандарта, программы дисциплины «Надежность технических систем» и предназначено для выполнения лабораторных работ и самостоятельной работы студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению 110800.68 «Агроинженерия».

Рецензенты:

д.т.н., профессор кафедры «Техническое обеспечение АПК» ИрГСХА

Болоев П.А.

к.т.н., доцент кафедры «ЭМТП, БЖД и ПО» ИрГСХА Ильин П.И.

© Беломестных В.А., Бураев М.К.

© Издательство ИрГСХА, 2014

## Содержание

<i>Введение</i> .....	4
<i>Лабораторная работа №1. Испытания материалов и покрытий на износостойкость</i> .....	5
<i>Лабораторная работа №2. Исследование износостойкости материалов рабочих органов почвообрабатывающих машин</i> .....	44
<i>Лабораторная работа №3. Расчет показателей надежности деталей машин по данным исходной опытной информации</i> .....	55
<i>Лабораторная работа №4. Определение полного ресурса и допустимых износов без ремонта размеров соединяемых деталей</i> .....	73
<i>Лабораторная работа №5. Испытание материалов на усталостную прочность</i> .....	80
<i>Лабораторная работа №6. Методика сравнительного исследования коррозионной стойкости деталей машин</i> .....	111
<i>Приложение А. Протокол испытания материалов на изнашивание при фреттинг-коррозии</i> .....	135
<i>Приложение Б. Варианты частичных интервалов к практическому занятию</i> .....	136
<i>Приложение В. Параметры и коэффициенты закона распределения Вейбулла (ЗРВ)</i> .....	137
<i>Приложение Г. Функция плотности вероятности <math>a - f(T)</math> закона распределения Вейбулла</i> .....	139
<i>Приложение Д. Интегральная функция <math>F(T)</math> закона распределения Вейбулла</i> .....	140
<i>Приложение Е. Значения <math>r_1</math> и <math>r_3</math> для доверительных границ по Вейбуллу</i> .....	141
<i>Приложение Ж. Коэффициент Ирвина <math>\lambda</math> т</i> .....	141
<i>Приложение З. Исходные данные для определения полного ресурса соединения и допустимых размеров без ремонта деталей</i> .....	142

## Введение

Повышение надежности и качества выпускаемой сельскохозяйственной техники и эффективное ее использование является основным условием повышения производительности труда в сельском хозяйстве и увеличения объемов сельскохозяйственной продукции.

Ремонтно–обслуживающая база агропромышленного комплекса выполняет большое количество ремонтных работ, направленных на поддержание и восстановление работоспособности сельскохозяйственной техники.

Задача инженерно–технической службы – обеспечить грамотное и эффективное использование техники, реализовать те показатели качества и надежности, которые заложены в конструкции машин при их создании. Знания физических зависимостей, изменения начальных свойств материалов деталей в процессе эксплуатации позволят решить задачу дисциплины «Надежность технических систем» – повышение долговечности, безотказности, ремонтпригодности и сохраняемости технических систем, машин, их агрегатов и узлов. Знания основ теории надежности дают возможность добиться долговечности и безотказности работы сельскохозяйственных машин – неременного условия достижения высоких показателей качества: производительности и экономичности в производстве всех видов сельскохозяйственной продукции.

# *Лабораторная работа №1*

## **Испытания материалов и покрытий на износостойкость**

### **Цели работы**

- 1 Ознакомиться с общими закономерностями изнашивания деталей, сопряжений.
- 2 Изучить устройство и принцип работы машины трения МИ – 1М для испытания материалов на изнашивание. Освоить методику испытаний.
- 3 Провести испытания различных материалов на изнашивание.

### **Теоретические сведения**

Техническая система в процессе эксплуатации, в результате изнашивания отдельных деталей и сборочных единиц, теряет свои служебные свойства – нарушается точность работы, снижается ее производительность, повышается удельный расход топливных и смазочных материалов, возникают значительные стуки и шумы в сопряженных деталях из-за увеличения зазоров в сопряжениях и нарушения геометрической формы.

Трение и изнашивание обуславливается взаимодействием соприкасающихся деталей, которые находятся под действием нагрузки и перемещаются по отношению друг к другу. В практике эксплуатации сельскохозяйственной техники наблюдаются самые разнообразные последствия взаимного перемещения соприкасающихся тел, зависящие от свойств самих тел, от характера их движений и от внешних условий (нагрузка, среда, свойства смазки, температура и т.д.).

Одной из основных причин выхода из строя деталей машин, является износ. На процессы трения и изнашивания существенное влияние оказывает качество поверхности деталей.

Ввиду сложности процессов, протекающих в поверхностных слоях твердых тел при изнашивании, различия условий и режимов работы узлов трения и причин изнашивания невозможно предложить строгие единичные классификационные признаки всего многообразия процессов изнашивания.

Наибольшее распространение получила классификация по ГОСТ 27674-88.

**Триботехника** – наука о контактном взаимодействии твердых тел при их относительном движении, охватывающая весь комплекс вопросов трения, изнашивания и смазки машин.

Термины, относящиеся к триботехнике, стандартизованы. ГОСТ 27674-88 включает 97 терминов, которые расквалицированы по трем видам трения, изнашивания, смазки, методам смазывания и смазочным материалам. К общим понятиям триботехники относятся следующие термины.

**Внешнее трение** – явление сопротивления относительному перемещению, возникающее между двумя твердыми телами в зонах соприкосновения поверхностей по касательным к ним, сопровождаемое диссипацией энергии.

**Трение покоя** – трение двух тел, при микроперемещениях до перехода к относительному движению.

**Трение движения** – трение двух тел, находящихся в относительном движении.

**Трение скольжения** – трение движения двух твердых тел, при котором скорости тел в точках касания различны по величине и направлению, или по величине или направлению.

**Трение качения** – трение движения двух твердых тел, при котором их скорость в точках касания одинакова по величине и направлению.

**Сила трения** – сила сопротивления при относительном перемещении одного тела по поверхности другого под действием внешней силы, направленной по касательной к общей границе между этими телами.

**Поверхность трения** – поверхность тела, участвующая в трении.

**Коэффициент трения** – отношение силы трения двух тел к нормальной силе, прижимающей эти тела друг к другу.

**Трение без смазочного материала.** Реализуется в том случае, когда сопрягаемые поверхности покрыты только оксидными пленками или адсорбированными пленками воды и газа. Имеет место в тормозах, фрикционных передачах и узлах трения, где недопустимо применение смазочных материалов либо их применение невозможно вследствие высокой температуры в зоне контакта. Обычно для узлов трения, работающих без смазочных материалов, одно из тел трения изготавливают из композита, содержащее твердое тело - смазывающее вещество (дисульфид молибдена, диселенид вольфрама, графит) или пластические материалы. Твердые смазочные материалы, обладая слоистой структурой и низким сопротивлением сдвигу, снижают силу трения и интенсивность изнашивания трущихся тел.

**Трение при граничной смазке.** В этом случае поверхности сопряженных тел разделены слоем смазочного материала весьма малой толщины (от толщины одной молекулы до 0,1 мкм). Наличие граничного слоя или граничной пленки снижает силы трения по сравнению с трением без смазочного материала в 2 – 10 раз и уменьшает износ сопряженных поверхностей в сотни раз.

**Жидкостное трение.** Этот вид трения характеризуется тем, что трущиеся поверхности разделены слоем смазки жидкого смазочного материала, находящегося под давлением. Давление смазочного материала уравнивает внешнюю нагрузку. Слой смазочного материала – *несущий слой*. При жидкостной смазке сопротивление движению определяется внутренним трением (вязкостью) жидкости и складывается из сопротивления скольжению масла по толщине смазочной прослойки.

Влияние вида трения на условия взаимодействия микровыступов сопряженных поверхностей схематично показано на рисунке 1.1.

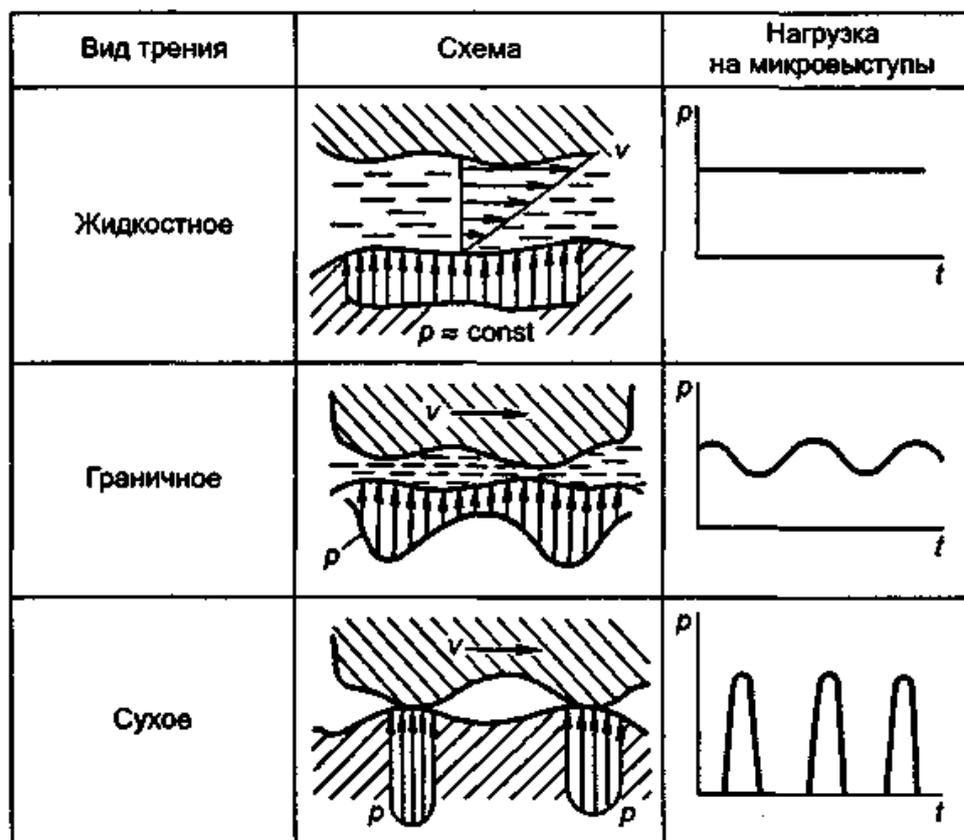


Рисунок 1.1 - Зависимость нагрузки на микровыступы поверхностей от вида трения

При жидкостном трении каждый участок поверхности нагружен постоянным давлением, неизменяющимся при относительном перемещении поверхностей, т.е. статической нагрузкой. Эта нагрузка не в состоянии разрушить микровыступы, так как возникающие напряжения находятся в области больших запасов прочности.

При граничном трении, хоть и происходит перераспределение внешней нагрузки, имеются более нагруженные зоны в месте сближения микро выступов. Поэтому при относительном движении тел возникает колебание напряжений в каждом выступе и создаются условия для их усталостного разрушения.

При сухом трении имеет место непосредственный контакт микро выступов, и нагрузка концентрируется в отдельных зонах. При относительном перемещении напряжение на микро выступах может падать до нуля ( $\delta_{\min} = 0$ ) и коэффициент асимметрии цикла равен нулю или имеет малую величину. Здесь создаются условия для усталостного разрушения или пластической деформации микро выступов, что приводит к усталостному или абразивному, а при наличии оксидных пленок – к окислительному изнашиванию.

**Механизм изнашивания.** Процесс изнашивания может быть разделен на три явления: взаимодействие поверхностей трения; изменения, происходящие в поверхностном слое материала; разрушение поверхностей. Эти явления не последовательны – они непрерывно переплетаются, взаимно влияя друг на друга. Взаимодействие поверхностей может быть механическим и молекулярным.

Механическое взаимодействие выражается во взаимном внедрении, зацеплении неровностей поверхностей в совокупности с их соударением в случае скольжения грубых поверхностей.

Молекулярное взаимодействие проявляется в виде адгезии и схватывания. Схватывание свойственно только металлическим поверхностям и отличается от адгезии более прочными связями.

Изменения на поверхности трения вызваны деформациями, повышением температуры и химическим действием окружающей среды.

Изменения, вызванные деформацией. Многократные упругие деформации из-за несовершенства структуры материала приводят в определенных условиях к усталостному выкрашиванию поверхностей качения, а многократные упругие деформации микронеровностей поверхностей скольжения разрыхляют структуру.

Пластическое деформирование изменяет структуру материала поверхностного слоя. Разрушение структуры – это заключительный этап пластической деформации по мере увеличения силового воздействия при однократном нагружении. Смещение кристаллических зерен сопровождается ча-

стичным нарушением структуры, в результате при возрастании напряжения или многократном его повторении происходит ослабление, разрыхление, а в дальнейшем и разрыв структуры.

Пластическая деформация при температуре ниже температуры рекристаллизации способствует наклепу поверхностного слоя – его упрочнению.

При сильно отличающихся по твердости структурных составляющих материала и многократном воздействии нагрузки происходит вначале интенсивное изнашивание мягкой основы, вследствие этого повышается давление на выступающие твердые составляющие, они вдавливаются в мягкую основу, некоторые из них дробятся и перемещаются дополнительно под действием сил трения. В результате такого избирательного изнашивания поверхность обогащается твердыми структурными составляющими и приобретает строчечную структуру.

Влияние повышения температуры. Если по условиям эксплуатации или в результате трения температура поверхностных слоев выше температуры рекристаллизации металла, то поверхностный слой не наклепывается, а пребывает в состоянии повышенной пластичности.

Высокая температура и пластическая деформация способствуют диффузионным процессам; в итоге возможно обогащение поверхности некоторыми элементами (например, стали углеродом), коагуляция отдельных структурных составляющих, взаимное диффузионное растворение материалов деталей пар трения.

При интенсивном локальном повышении температуры и последующем резком охлаждении окружающей холодной массой металла на поверхности могут образовываться закалочные структуры.

Химическое действие среды. В воздушной среде на обнаженных при изнашивании чистых металлических поверхностях образуются оксидные пленки. Эти пленки предохраняют от схватывания и глубинного вырывания поверхности трения.

Металлические поверхности, взаимодействуя с химически активными присадками в масле, покрываются пленками химических соединений, роль которых аналогична роли оксидных пленок.

Агрессивные жидкости и газовые среды активизируют изнашивание.

**Изнашивание** – процесс разрушения и отделения материала с поверхности трущегося твердого тела и (или) накопления его остаточной деформации при трении, проявляющийся в постепенном изменении размеров и (или) формы тела.

**Износ** – результат изнашивания, определяемый в единицах длины (мм, мкм), массы (мг, г), объема и др.

Формирование изнашиваемой поверхности происходит в результате действия различных по интенсивности и видам внешних факторов: среды, температуры, давления, вида трения, скорости относительного перемещения, характера нагрузки и др.

Важная причина потери работоспособности машин в процессе эксплуатации – механического истирания их составных элементов.

Для объяснения природы трения и изнашивания при механическом истирании существуют три теории, дополняющие и уточняющие друг друга. Их исходные положения сводятся в основном к механическому, молекулярному и молекулярно–механическому взаимодействию между трущимися поверхностями. Изнашивание является сложным физико-химическим процессом. Раскрытию механизма износа материалов и тех закономерностей, которые определяют его протекание, посвящена обширная литература. На разных этапах развития науки и техники ученые выдвигали теоретические основы для объяснения природы трения и создавали гипотезы о протекании этого явления.

Существует атомистическая теория трения, которая объясняет трение как процесс возбуждения атома в поверхностной решетке в результате передачи энергии от одного атома к другому.

Классификация видов изнашивания по ГОСТ 27674-88 представлена на рисунке 1.2.



Рисунок 1.2 - Классификация видов изнашивания деталей машин по ГОСТ 26674-88

**Механическое изнашивание** – в основу её положена теория упругих и неупругих механических взаимодействий элементарных неровностей, возникающих на трущейся поверхности при скольжении одного тела по другому. Это изнашивание в результате механических воздействий. К этому виду изнашивания относят абразивное, эрозионное, усталостное, изнашивание при заедании и схватывании, изнашивание при фреттинге.

**Абразивное изнашивание** – это механическое изнашивание материала в результате режущего или царапающего действия на него твердых частиц,

находящихся в свободном или закрепленном состоянии в жидкости (гидроабразивное) или в газе (газообразованию) это – наиболее распространенный вид изнашивания деталей сельскохозяйственной техники, вызываемый воздействием на них абразивных (твердых) частиц. Последние содержатся в почве и при контакте с поверхностью рабочих органов почвообрабатывающих, посевных и землеройных машин приводят к абразивному изнашиванию.

Твердые (абразивные) частицы могут образовываться и в самой машине в виде закаленных частиц металла – продуктов изнашивания соединенных пар трения.

Интенсивность абразивного изнашивания особенно велика у машин, эксплуатируемых в условиях запыленного воздуха, при недостаточной герметичности уплотнений. Так, двигатель с неисправным воздухоочистителем теряет компрессию и выходит из строя в результате форсированного износа поршневых колец и зеркала цилиндров. Накопление пыли в смазочном материале до 0,25% по массе приводит к отказу подшипников качения за 1000 моточасов при нормальной долговечности, в 10 раз большей.

Абразивные частицы по-разному ведут себя в зависимости от твердости поверхностей соединения деталей. Когда одна из трущихся поверхностей изготовлена из мягкого материала, абразивные частицы поглощаются этой поверхностью, что при малой концентрации абразивных частиц в смазочном материале предохраняет твердую поверхность от изнашивания. С течением времени мягкая поверхность насыщается абразивными частицами и превращается в своеобразный абразивный инструмент, который царапает и изнашивает соединенную деталь.

Если обе соединенных поверхности имеют значительную твердость, то абразивные частицы, попадая в зазор между ними, или царапают их, или разрушают, не повреждая ни ту, ни другую. Все зависит от соотношения твердостей соединенных поверхностей и абразива.

Применительно к деталям и соединениям тракторов и сельскохозяйственных машин абразивное изнашивание, при котором происходит истирание поверхности трения за счет скалывания микронеровностей или режущего воздействия на поверхность абразивных включений, имеет наибольшее распространение. Абразивному изнашиванию подвергаются детали ходовой части машины, рабочие органы почвообрабатывающих машин и т.д.

Наиболее характерным примером гидроабразивного изнашивания является износ плунжерных пар, коренных вкладышей коленчатого вала двигателя, через центральные отверстия которых подается жидкий смазочный материал, засоренный продуктами износа.

**Газоабразивное изнашивание** – происходит в результате воздействия твердых частиц, увлекаемых газовым потоком. Газоабразивное изнашивание типично для газовых турбин, доменного производства, газодобывающего оборудования, различных деталей пневматических устройств и др. Главным фактором влияния в этом случае являются скорость потока абразивных частиц, угол атаки, свойства и концентрация абразива, физико-химические характеристики среды.

Для уменьшения интенсивности абразивного изнашивания необходимо поставить преграду для абразивных частиц на пути к поверхностям трения с помощью уплотнений, воздухоочистителей и маслофильтров. А также тщательной очистки агрегатов, сборочных единиц и деталей при их ремонте. Уплотнения, воздухоочистители и маслофильтры устанавливаются в машине при их изготовлении. Очистку выполняют при очередном техническом обслуживании или ремонте.

Для придания трущимся поверхностям наибольшего сопротивления абразивному изнашиванию применяют специальные виды наплавов и гальванических покрытий, например, хромирование. В этих же целях наряду с известными видами химико-термической и термической обработки, такими как цементация и закалка, в ремонтном производстве применяют термомеханическую обработку (ТМО), электромеханическую обработку (ЭМО) и др.

Новый метод повышения надежности деталей машин, работающих в абразивной среде – облицовывание механических поверхностей пластичными массами и резиной. Пример такой защиты – изготовление поддерживающих роликов с резиновыми бандажами и движителях гусеничных тракторов.

**Эрозионное изнашивание** – механическое изнашивание в результате воздействия потока жидкости или газа. Поток жидкости (газа) разрушает оксидную пленку металла и отделяет с поверхности частицы. Эрозионному изнашиванию подвержены головки поршней, рабочие поверхности выпускных клапанов и их седел и др.

**Кавитационное изнашивание** – гидроэрозионное изнашивание при движении жидкости относительно твердого тела, пузырьки газа

лопаются вблизи поверхности, что создает местное повышение давления или температуры. Этому виду изнашивания подвержены наружные поверхности цилиндров и водяных рубашек охлаждения, детали водяных насосов и др.

**Изнашивание при заедании** – изнашивание в результате схватывания, глубинного вырывания материала, переноса его с одной поверхности трения на другую и воздействия возникаемых неровностей на сопряженную поверхность. Этот вид изнашивания разделяют на изнашивание схватыванием первого и второго рода.

**Схватывание первого рода** – возникает при трении скольжения с малыми скоростями относительного перемещения трущихся поверхностей ( $V < 1$  м/с), граничной смазке и больших нагрузках в местах контакта поверхностей. Под действием большой нагрузки между отдельными выступами трущихся поверхностей возникают металлические связи и упрочнение в месте схватывания. При перемещении происходит вырывание стружки из менее твердой поверхности или царапание ее упрочненным участком.

**Схватывание второго рода, или тепловой износ** – наблюдается при трении скольжения с большими скоростями относительного перемещения

трущихся поверхностей ( $V > 4$  м/с), граничной смазке и значительных удельных нагрузках.

Детали, на трущихся поверхностях которых возникают высокие контактные нагрузки, приводящие к молекулярным сцеплениям, что, в свою очередь, вызывает схватывание и заедание, подвержены молекулярно-механическому изнашиванию (изнашивание при заедании). К таким деталям относятся коренные и шатунные вкладыши коленчатых валов и шейки валов, работающих в подшипниках скольжения (гильзы, поршни, кольца).

***Изнашивание при фреттинге*** – механическое изнашивание соприкасающихся тел при малых относительных колебательных перемещениях.

***Коррозионно-механическое изнашивание*** – изнашивание в результате механического воздействия, сопровождаемого химическим или электрохимическим воздействием материала со средой.

Для коррозионно-механического изнашивания характерно образование на поверхности деталей пленок оксидов, которые при трении разрушаются и снимаются с поверхности и в дальнейшем действуют как абразивные частицы. К деталям, подверженным коррозионно-механическому (окислительному или фреттинг-коррозионному) изнашиванию, относятся шейки валов под подшипники качения и т.п.

***Окислительное изнашивание*** – коррозионно-механическое, при котором основное влияние на изнашивание имеет химическая реакция материала с кислородом или окисляющей окружающей средой. При окислительном изнашивании одновременно протекает три процесса: пластическое деформирование и активирование малых объемов металла поверхностных слоев, окисление поверхностных слоев и проникновение в них кислорода воздуха, разрушение оксидных пленок и вторичных структур.

***Изнашивание при фреттинг-коррозии*** – коррозионно-механическое изнашивание соприкасающихся тел при малых колебательных относительных перемещениях. Фреттинг-коррозия возникает при трении скольжения с очень малыми возвратно-поступательными перемещениями в условиях ди-

намической нагрузки. Такое движение может быть вызвано вибрациями. При трении в этих условиях создаются мелкие оксидные пленки, отделяющиеся с поверхностей, которые не удаляются за пределы контакта и создают условия абразивного изнашивания. Изнашиванию при фреттинг-коррозии подвергаются посадочные поверхности подшипников качения и шестерен, болтовые и заклепочные соединения рам и т.п.

***Водородное изнашивание*** – обусловлено следующими процессами:

- интенсивным выделением водорода при трении в результате трибоденструкции водородосодержащих материалов (смазочного материала, топлива, воды и др.);
- адсорбцией (поглощением) водорода на поверхностях трения;
- диффузией водорода в деформированный слой, что делает поверхностный слой более хрупким;
- особым видом разрушения поверхности, связанного с одновременным развитием большого числа зародышей трещин по всей зоне деформирования и мгновенного образования мелкодисперсного порошка.

***Изнашивание при действии электрического тока*** – электроэрозионное, т.е. эрозионное изнашивание поверхности в результате воздействия разрядов при прохождении электрического тока.

При недостаточно больших напряжениях от отрицательного электрода отрываются электроны и с очень большой скоростью движутся в межэлектродном пространстве в сторону положительного электрода. Достигая твердой металлической поверхности анода, они резко останавливаются и выделяют всю энергию торможения в поверхностных слоях анода, вызывая механическое деформирование его поверхности и разрушение кристаллов металла. Некоторый объем металла анода расплавляется и выбрасывается в межэлектродное пространство. Часть металла может достигать катода и прочно оседать на нем.

Основными показателями изнашивания являются скорость, интенсивность, износостойкость и относительная износостойкость.

**Интенсивность изнашивания** – отношение значения износа к обусловленному пути (наработке), на котором происходило изнашивание.

Износостойкость восстановленных деталей при испытаниях проводимых по средней для испытанных образцов интенсивности изнашивания восстановленных деталей вычисляют по формуле

$$I = \frac{W}{L}, \quad (1.1)$$

где  $W$  – линейный износ образца, м;

$L$  – длина участка трения данного образца, соответствующий линейному износу, м.

Линейный износ  $W$ , м, при определении его взвешиванием вычисляют по формуле

$$W = \frac{\Delta G}{\gamma \cdot A}, \quad (1.2)$$

где  $\Delta G$  – изменение массы образца при испытании, кг;

$\gamma$  – плотность изношенного материала кг/м<sup>3</sup>;

$A$  – контурная площадь контакта образцов, м<sup>2</sup>.

Длину участка трения с учетом размеров образцов вычисляют по формуле

$$L = N \times l, \quad (1.3)$$

где  $l$  – линейный размер поверхности трения сопряженного образца в направлении скольжения, м,

$N$  – число циклов, за каждый из которых поверхности трения образца проходят путь  $l$ .

Для образцов с площадью трения меньше, чем у сопряженного образца, в случае реверсивного относительного движения из значения  $l$  следует вычесть линейный размер образца в направлении трения.

**Скорость изнашивания** – отношение значения износа, к интервалу времени, в течение которого он возник

$$W_{\text{изм}} = \frac{I}{t} \quad (1.4)$$

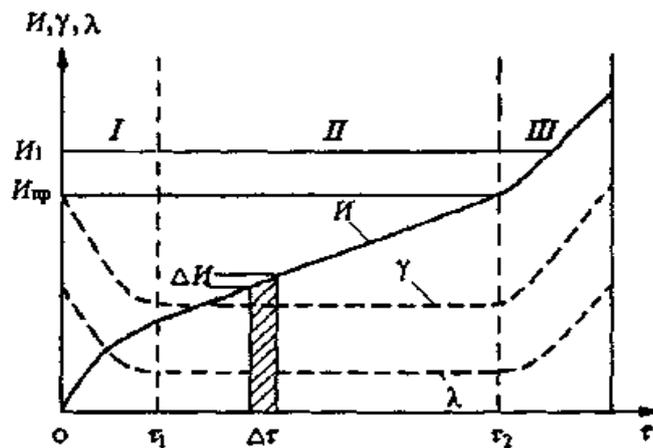
**Износостойкость** – величина, обратная скорости изнашивания. Она характеризует свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях трения

$$E = \frac{1}{W_{\text{изн}}} \quad (1.5)$$

**Относительная износостойкость** – отношение износостойкости испытуемого материала к износостойкости эталонного материала в разных условиях трения

$$K = \frac{E_2}{E_1} \quad (1.6)$$

Скорость изнашивания зависит от многих факторов, основными из которых являются: твердость поверхностей трения, давление на трущиеся поверхности, шероховатость трущихся поверхностей, скорость перемещения одной поверхности относительно другой, характер промежуточной среды – смазка, абразивы.



I - стадия приработки;

II - стадия установившегося изнашивания (нормальная работа);

III - стадия катастрофического изнашивания (аварийная работа)

Рисунок 1.3 - Зависимость износа ( $I$ ) трущихся тел, скорости изнашивания ( $\gamma$ ) и интенсивности отказов ( $\lambda$ ) от продолжительности изнашивания ( $\tau$ ).

**Начальный период** – соответствующий участку I, при котором поверхности трения прирабатываются и переходят от исходного состояния к установившемуся.

**Приработка** – изменение геометрии поверхностей трения и физико-химических свойств поверхностных слоев материала в начальный период трения.

Прирабочное истирание, в отличие от других видов износа, представляет собой процесс, улучшающий состояние сопряженных поверхностей трения и повышающий их работоспособность. При приработке, в результате пластической деформации или отделения, удаляются наиболее выступающие неровности, вследствие чего увеличивается фактическая площадь контакта. Этот процесс заканчивается достижением оптимальной, равновесной шероховатости поверхностей сопряженных деталей, независимо от ее исходного значения.

Начальный период работы узла трения характеризуется нелинейностью изменения износа во времени. При этом происходит изменение параметров как микро, так и макрогеометрии контактирующих поверхностей. Поэтому приработку следует считать состоящих из двух этапов: изменения характеристик микрорельефа контактирующих поверхностей – предмета микроприработки; изменение номинальной площади контакта (макрогеометрии), приводящего к процессу макроприработки.

За время макроприработки поверхности прирабатываются и достигается полная номинальная площадь контакта. На длительность макроприработки существенное влияние оказывает взаимный перекося деталей. При высоких значениях перекося деталей их макроприработка может растянуться на длительное время и деталь выходит из строя со стороны зоны концентрации нагрузки.

**Период установившегося изнашивания** – соответствующий участку II нормальной работы, характеризуется относительным постоянством усло-

вий трения. Значение износа деталей в этот период пропорционально продолжительности их работы.

**Период ускоренного изнашивания** – соответствующий участку III, характеризуется резким ухудшением условий работы поверхностей трения, увеличением зазоров и изменением геометрической формы деталей.

### ***Методы определения износа деталей***

Современные методы определения износа деталей машин в большинстве своем не универсальны и не равноценны у каждого имеется своя область целесообразного использования.

Все методы можно подразделить на две большие группы:

- методы определения интегрального износа;
- методы определения локального (местного) износа.

Первая группа включает в себя такие методы как: определение износа по потере массы (веса); оценка износа по количеству металла в работавшем смазочном масле путем химического, спектрального анализа; оценка износа по интенсивности излучения продуктов изнашивания, отделяющихся от активированных деталей.

**Взвешивание** – определение износа детали путем периодического сравнения ее массы с массой детали до работы. Этот способ не дает возможности выявить изношенные участки детали и характер износа.

**Количество железа в масле** – значение износа определяется путем периодического взятия проб масла из смазочной системы двигателя, корпуса заднего моста или коробки передач и определения количества железа в нем методом спектрографии. Этот метод не дает возможности определить, вследствие износа каких деталей увеличилось количество железа в масле.

**Метод определения износа радиоактивными изотопами** – заключается в том, что при изготовлении в деталь вводится радиоактивный материал. В процессе работы в пробах масла периодически определяют счетчиком количество радиоактивных частиц.

Ко второй группе принадлежат методы: микрометрирование; профилографирование; измерение местной поверхности активности (радиоактивные индикаторы); метод искусственных базы (способы вырезанных лунок, калиброванных канавок).

**Микрометрирование** – периодические замеры деталей в местах предположительного износа с помощью измерительных инструментов. Этот способ позволяет определять динамику и характер износа исследуемых деталей. Недостатки этого способа: трудно определить одни и те же точки в измеряемых деталях, трудно обеспечить одинаковое давление измерительных стержней на деталь, необходимость разборки агрегата.

**Профилографирование** – проводят специальными профилографами, и заключается в снятии профилограмм поверхности участков детали.

Профилографы основаны на принципе ощупывания поверхности алмазной иглой. Эти приборы являются оптико-механическими. При помощи оптического устройства профиль поверхности записывается на фотографической ленте в увеличенном виде.

Широкое распространение нашел метод оценки износа круглых деталей и отверстий по наложению профилограмм. Для правильного совмещения профилограмм, снятых с новой и изношенной детали, на испытываемой поверхности новой детали предварительно наносятся отпечатки, по которым производится последующее совмещение профилограмм. Расстояние между профилограммами показывает значение износа деталей.

Размеры деталей в соединении выражаются в линейной мере. Прямым и самым точным методом измерения износа деталей следует считать потерю линейных размеров деталей, увеличивающих зазоры в соединениях. При современных форсированных скоростях износ приводит к заметным отклонениям от нормальной работы (шум, вибрация, удар), а при больших зазорах – к авариям.

Все методы определения интегрального износа являются косвенными, так как для выявления потери в размерах деталей в результате изнашивания

используется не непосредственное измерение линейного износа, а перерасчет, например, потери массы (веса) на некоторую среднюю линейную величину. То же относится и к остальным интегральным методам, перечисленным выше. В ряде случаев при сравнительных испытаниях можно ограничиться и косвенными интегральными методами измерения износа.

Из методов определения местного износа метод поверхностной активации следует считать косвенным, так как линейное значение износа находят путем перерасчета потери активности. Другие методы определения местного износа, кроме метода искусственных баз, имеют существенные ограничения, например, при микрометрировании выявляют износ в разных местах поверхности, например, цилиндрической втулки, потери размера по диаметру (диаметральный износ). Остается невыясненным вопрос о потере размера в результате износа в наиболее напряженных точках зеркала втулки. Это весьма важно, так как изнашивание в силу механических, тепловых и силовых неравномерностей протекает неодинаково на поверхностях трения. При повторном микрометрировании трудно добиться совпадения заданных точек измерения с уже измеренными точками износа; то же наблюдается и при профилографировании.

*Измерение износа методом искусственных баз* – сущность метода заключается в том, что до изнашивания, в намеченном месте поверхности трения детали алмазный трехгранный резец 1, вращаясь в направлении, показанном стрелкой, вырезает лунку 3 на поверхности трения 2, дно которой очерчено по радиусу, описываемому вершиной резца в соответствии с рисунком 1.4. измерив длину лунки, подсчитывают расстояние от поверхности до ее дна. При износе длина лунки уменьшается и по уменьшению ее длины определяют линейный износ (нормально к поверхности) в данном месте в соответствии с рисунком 1.5.

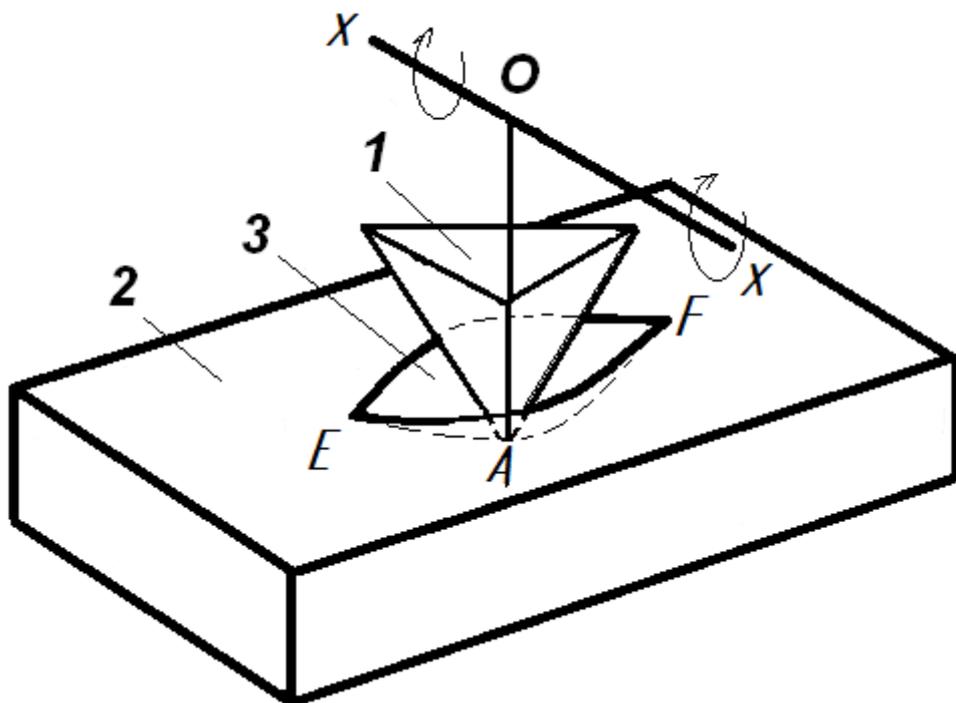
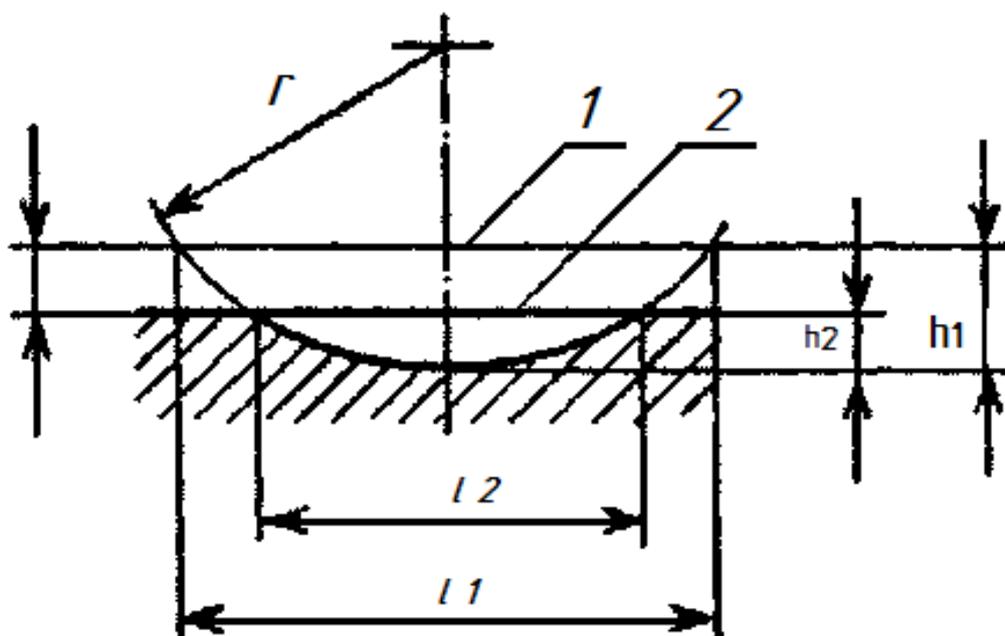


Рисунок 1.4 - Схема вырезания лунки:

1-трехгранный алмазный резец; 2 - поверхность трения детали; 3-лунка;  
 XX - ось вращения резца; EF - длина лунки; OA - радиус вращения  
 вершины резца



1 -поверхность трения до изнашивания;  
 2 - поверхность трения после изнашивания

Рисунок 1.5 - Схема измерения износа

Глубину лунки до изнашивания  $h_1$  мм, вычисляют по формуле

$$h_1 = l_1^2 / r, \quad (1.7)$$

где  $r$  - радиус вращения вершины резца, мм.

Глубину той же лунки  $h_2$  после изнашивания, для вновь образованной поверхности 2 вычисляют аналогично по формуле

Износ  $\Delta h$ , мм, определяют как разность глубин лунки и вычисляют по формулам:

$$\Delta h = h_1 - h_2, \quad (1.8)$$

$$\Delta h = (l_1^2 - l_2^2) / r \quad (1.9)$$

Износ  $\Delta h$ , мм, для цилиндрических поверхностей с учетом радиуса кривизны поверхности вычисляют по формуле:

$$\Delta h = h_1 - h_2 = (l_1^2 - l_2^2) / r \pm l/R, \quad (1.10)$$

где  $R$  - радиуса кривизны поверхности, мм. При этом, плюс - для выпуклых поверхностей, например поршневого кольца, а минус - для вогнутых, например цилиндров двигателей.

**Способ калиброванных канавок.** Одной из причин, вызывающих недостаточный срок службы зубчатых колес, является постепенное изнашивание рабочей боковой поверхности зубьев, вызываемое в одних случаях абразивными частицами, загрязняющими смазочное масло, в других случаях - коррозионно-механическими факторами, связанными с влиянием химически активных присадок в смазочном масле или окислением металла, а также усталостью микрообъемов поверхностных слоев.

Поэтому измерение местного износа зубьев и получение картины распределения износа по поверхности зуба с большей точностью - весьма актуальная задача.

С другой стороны, точное выяснение распределения износа по поверхности трения зубьев, особенно выявляемое за короткие периоды времени работы, и сравнение этого распределения у разных зубьев одного колеса могут дать количественную оценку качества работы зацепления, распределения нагрузки по длине зубьев, точности обработки зубьев, биения началь-

ной окружности. Наличие такого способа важно в деле повышения качества машиностроительной продукции. Для точного определения износа зубьев наиболее подходит метод искусственных баз, осуществляемый нанесением на рабочую поверхность зуба продольных и поперечных калиброванных неглубоких канавок в соответствии с рисунком 1.6 с помощью алмазного резца специального прибора, описанного ниже.

Канавки наносятся как вдоль длины зуба, так и по высоте профиля. Алмазный резец представляет собой трехгранную пирамиду с углом при вершине между ребром и гранью около  $142^\circ$ .

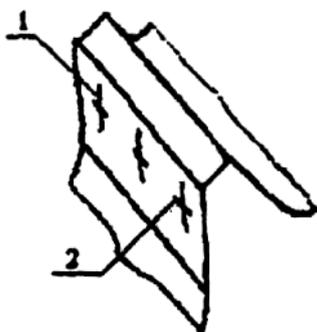


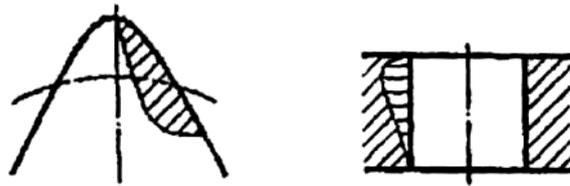
Рисунок. 1.6 - Схема нанесения калиброванных канавок на зубе шестерни:

1 - поперечная; 2 - продольная

Глубина канавки составляет обычно 50...75 мкм. Измерение глубины канавок производится на двойном микроскопе Линника (МИС-11) на оттисках, снятых с поверхности зуба. По разнице глубин канавок в одних и тех же местах определяют местный износ и строят эпюру распределения износа.

### **Эпюры износа и конструктивные методы его снижения**

Картина распределения износа по поверхности трения называется эпюрой износа и в основном зависит от таких факторов, как скорости качения и скольжения, температуры в зоне контакта, распределения нагрузки и условий смазки.



а б  
Рисунок. 1.7- Эпюры износа:

а - рабочего профиля зуба; б - осевой износ зеркала цилиндра ДВС

### **Метод испытания материалов на изнашивание при фреттинге и фреттинг-коррозии**

Сущность метода состоит в том, что цилиндрический подвижный образец (контробразец), соприкасающийся торцом с неподвижным цилиндрическим образцом из исследуемого материала при заданном давлении, приводится в возвратно вращательное движение с заданными амплитудой и частотой, измеряется износ неподвижного образца за заданное количество циклов, по значению которого определяется износостойкость исследуемого материала.

Испытания проводятся при стандартных значениях давления, амплитуды, частоты, длительности испытаний и материале контробразца - сталь 45 по ГОСТ 1050—88, твердостью 550—600 НV.

#### **1 Приборы и материалы**

Установка для проведения испытания должна обеспечивать:

- нагружение образцов в осевом направлении силами от 200 до 3000 Н с погрешностью не более 25 Н в диапазоне нагрузок от 200 до 1000 Н и погрешностью не более 50 Н в диапазоне свыше 1000 Н;

- возвратно-вращательное движение контробразца относительно неподвижного образца с частотой от 10 до 30 Гц с погрешностью не более 10 % и амплитудой от 10 до 1000 мкм с погрешностью не более 2 мкм в диапа-

зоне от 10 до 30 мкм, не более 5 мкм в диапазоне свыше 30 до 100 мкм и не более 10 мкм в диапазоне свыше 100 мкм;

- испытания образцов в жидких смазочных материалах.

Измерительная система установки должна обеспечивать в процессе испытания непрерывную регистрацию количества циклов возвратно-вращательного движения контрообразца с погрешностью не более 50 циклов.

Для проведения испытания рекомендуется установка МФК-1.

Образцы для испытаний изготавливают в соответствии с чертежами 1 и 2, показанными на рисунке 1.8.

В качестве прибора для измерения износа рекомендуется использовать профилограф-профилометр по ГОСТ 19300-86 или аналогичный, действующий в режиме профилографа.

Для подготовки деталей используют промывочные жидкости: бензин или ацетон по ГОСТ 2603-79.

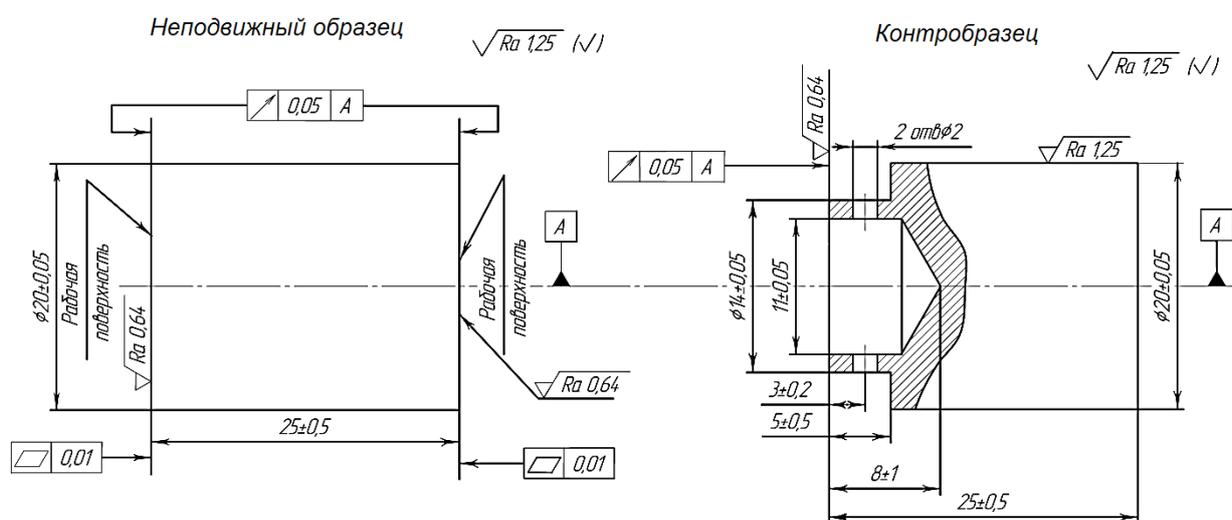


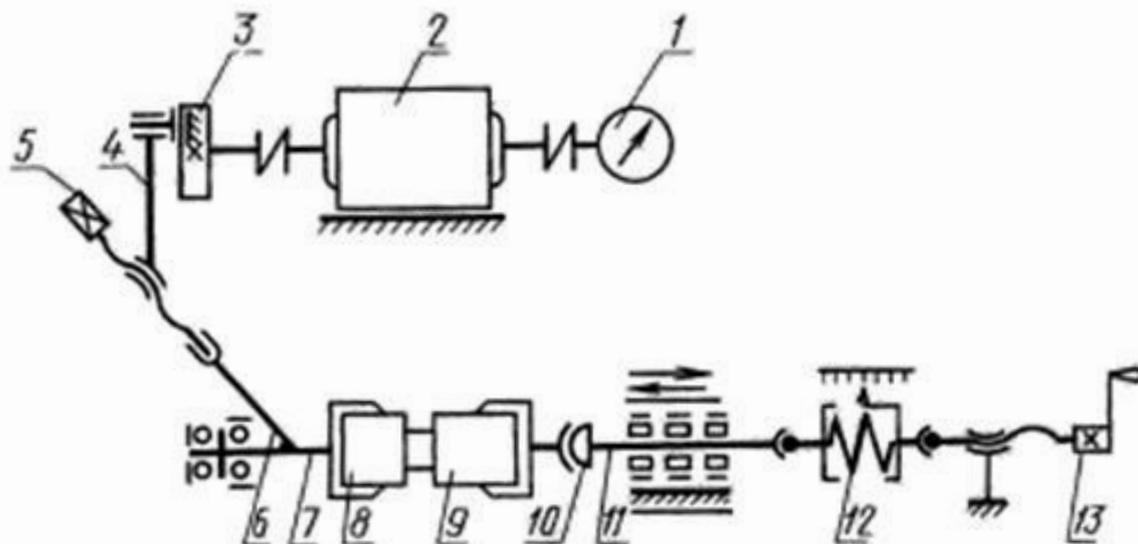
Рисунок 1.8 – Образцы для испытания материалов при фреттинг-коррозии

## Подготовка и проведение испытаний

2.1 Образцы промывают последовательно в жидкостях, указанных в разделе 1 и высушивают на воздухе.

2.2. Образец и контрообразец закрепляют в шиповых зажимах испытательной установки.

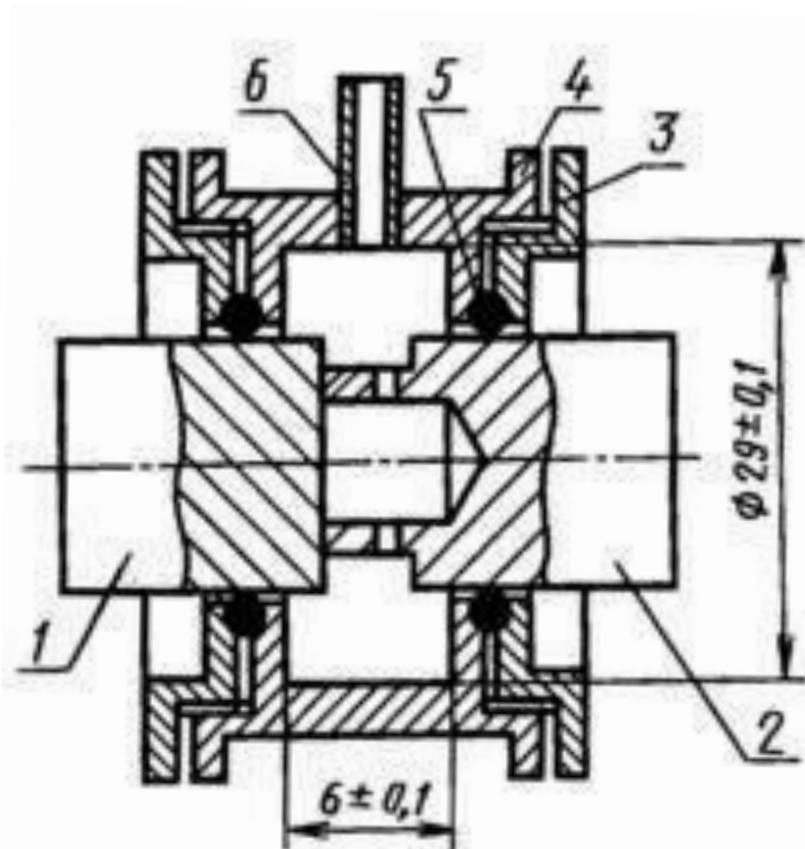
2.2.1 Образец и контрообразец прижимают друг к другу рабочими поверхностями с усилием не менее 200 Н, обеспечивая их взаимное прилегание с помощью самоориентирующейся цанги образца (рисунок 1.9) после чего жестко фиксируют положение цанги образца.



1 - прибор для регистрации частоты вращения и числа циклов; 2 - электродвигатель; 3 - эксцентрик; 4 - шатун; 5 - подстроечное устройство; 6 - кулиса; 7 - вал; 8 - контрообразец; 9 - неподвижный образец; 10 - самоориентирующаяся цанга; 11 - подвижная бабка; 12 - нагружающее устройство; 13 - рычаг регулировки усилия нажима.

Рисунок 1.9 – Схема установки МФК-1.

2.2.2 При испытаниях в жидких смазочных материалах после выполнения п. 2.2.1 снимают нагрузку, отводят образцы, устанавливают камеру (рисунок 1.10) и заполняют ее смазочным материалом. Корпус камеры изготовляют из стали 12Х18Н10Т по ГОСТ 5949-75.



1, 2 - испытуемые образцы; 3 - крышка; 4 - корпус; 5 - уплотнения;  
6 - трубка для заливки смазочных материалов

Рисунок 1.10 - Схема камеры для испытаний в жидких смазочных материалах.

2.2.3. При испытаниях в пластичных смазочных материалах последний наносят после отведения образцов сплошным слоем на рабочие поверхности с помощью шпателя. Толщина слоя смазочного материала должна быть достаточной для его визуального обнаружения на всей рабочей поверхности образца.

2.3 Образцы приводят в соприкосновение и прикладывают сжимающую нагрузку при испытаниях –  $(500 \pm 25 \text{Н})$ .

2.4 Включают привод установки. Во время испытаний поддерживают амплитуду  $(50 \pm 5)$  мкм, частоту  $(30 \pm 3)$  Ги.

2.5 После достижения заданного количества циклов испытаний, равною  $5 \cdot 10^5 \pm 50$  циклов, выключают привод установки, снимают нагрузку,

освобождают образцы из цанговых зажимов, промывают последовательно в жидкостях, указанных в разделе 1, и высушивают на воздухе.

2.6. Испытания по пп. 2.1 —2.5 повторяют не менее чем на пяти парах образцов.

### **Описание установки МФК-1**

Установка работает следующим образом. Электродвигатель 2 передает вращательное движение эксцентрику 3 с регулируемым эксцентриситетом. Частота вращения и количество оборотов регистрируются прибором 1. Эксцентрик 3 через шатун 4 связан с кулисой 6 вала 7 привода возвратно-вращательного движения контрообразца 8. Амплитуда перемещения контрообразца 8 регулируется эксцентриком 3 и подстроечным устройством 5. Неподвижный образец 9 закрепляется в самоориентирующейся цанге 10, установленной на валу подвижной бабки 11. Нагружение образцов осуществляется нагружающим устройством 12, 13.

### **3 Обработка результатов испытаний**

3.1 Снимают профилограммы с восьми равноотстающих участков рабочей поверхности образца в радиальном направлении согласно рисунка 1.11.

3.2 Для участков каждой из восьми профилограмм, соответствующих неизношенной поверхности и рабочей поверхности трения образца, проводят средние линии профиля согласно ГОСТ 2789-73 и определяют расстояние  $h_i$  между ними с погрешностью  $\pm 5$  мкм (рисунок 1.12).

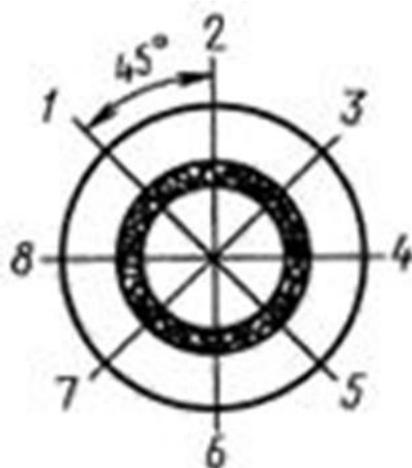


Рисунок 1.11 - Порядок определения шероховатости с восьми участков образца в радиальном направлении

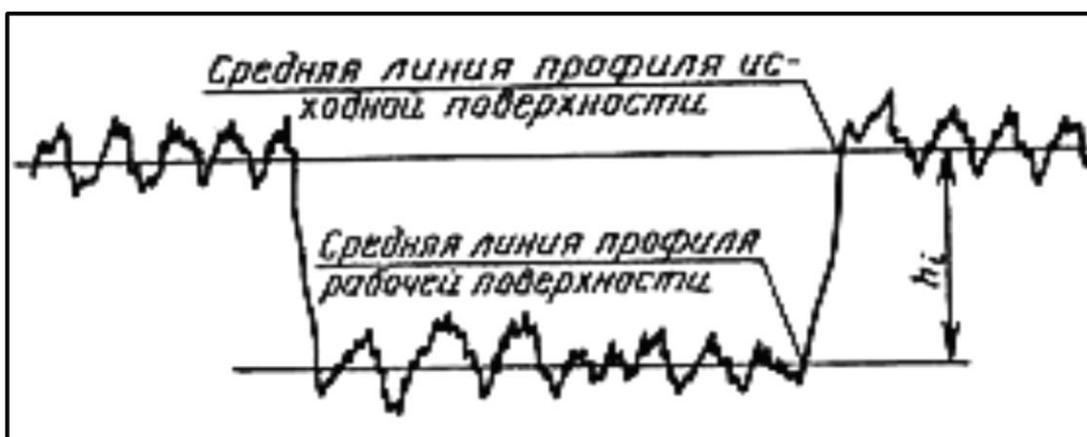


Рисунок 1.12 – Профилограммы исходной и рабочей поверхностей

3.3 Вычисляют средний износ  $i$ -го образца ( $h_i$ ), мкм, по формуле

$$h_i = \frac{\sum_1^8 h}{8}.$$

3.4 Вычисляют интенсивность изнашивания испытуемого материала по формуле

$$I_h = \frac{\sum_1^h h_i}{2ANk},$$

где  $A$  – амплитуда, мкм;

$N$  – количество циклов испытаний;

$k$  – количество испытанных образцов материала.

Результаты расчетов заносят в протокол испытаний (приложение А).

## Устройство и принцип работы машины трения МИ – 1М

Существуют различные модели машин трения, предназначенных для испытания материалов на изнашивание. Машина МИ – 1М предназначена для испытания материалов на износ и определения их антифрикционных свойств при трении скольжения и трения качения. Испытания могут проводиться при наличии смазки и без нее.

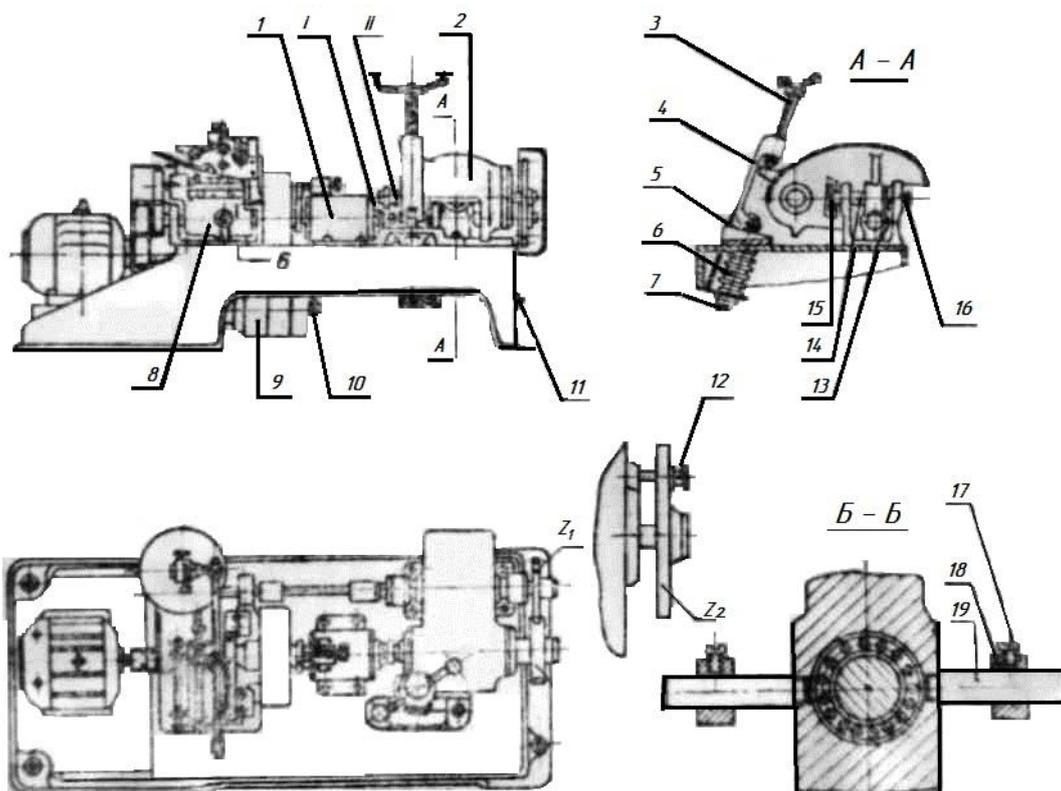
### Техническая характеристика машины МИ – 1М

1 Диаметры испытываемых образцов -----	30 - 50 мм
2 Ширина испытываемых образцов-----	10 мм
3 Число оборотов образцов-----	425 об/мин
4 Наибольшая нагрузка на образец-----	200 кгс
5 Диапазон регулирования нагрузки-----	50 - 200 кгс
6 Цена деления шкалы нагрузок-----	5 кгс
7 Погрешность показаний шкалы нагрузок предельного значения шкалы-----	$\pm 2,5 \%$
8 Предел измерения момента трения-----	0 - 150 кгс/см
9 Число ступеней измерения момента трения-----	4
	0 – 10 кгс/см
	0 – 50 кгс/см
	0 – 100 кгс/см
	0 – 150 кгс/см
10 Погрешность показателей шкал моментов от предельного значения каждой шкалы-----	$\pm 2,5 \%$
11 Продольное перемещение верхнего образца-----	1,25 мм
12 Скорость движения ленты:	
наибольшая-----	0,6 м/час
наименьшая-----	0,18 м/час
13 Габаритные размеры:	
длина-----	1150 мм
ширина-----	510 мм
высота -----	600 мм
14 Масса машины-----	235 кг

Установка МИ-1М (рисунок 1.13, 1.14) предназначена для испытания на изнашивание материалов и деталей при возвратно – поступательном относительном движении.



Рисунок 1.13 - Машина трения МИ-1М



I – вал нижнего образца, II – вал верхнего образца, 1 – корпус нижнего образца, 2 – каретка верхнего образца, 3 – нагрузочный винт, 4 – тяга, 5 – шкала нагрузок, 6 – пружина, 7 – поджимная гайка, 8 – маятник, 9 – грузы, 10 – чека, 11 – ручка выключателя, 12 – стопорный винт, 13 – кулачковая муфта, 14 – эксцентриковый вал, 15 – обойма, 16 – ручка, 17 – стопорный винт, 18 – противовес,  $Z_1$ ,  $Z_2$  – сменные шестерни, 19 – палец.

Рисунок 1.14 – Общий вид машины трения МИ-1М.

Настоящая машина состоит из станины, на которой располагаются все узлы, а именно:

- корпус нижнего образца.
- каретка верхнего образца.
- механизм нагружения.
- механизм привода.
- регистрирующий механизм.
- электрическая часть машины.

В корпусе 1 нижнего образца (рисунок 1.14) размещается вал I, на котором устанавливается образец, и привод счетчика.

Каретка 2 верхнего образца смонтирована на игольчатых подшипниках и имеет возможность поворачиваться на угол  $100^\circ$  из рабочего положения в нерабочее и обратно.

В каретке смонтирован вал II, на котором устанавливается верхний образец.

Минимальное давление на образцы равно части веса каретки 2, что составляет около 15 кг. Большая нагрузка создается специальным механизмом, состоящим из нагрузочного винта 3, тяги 4, шкалы 5, пружины 6, поджимной гайки 7. В рабочем положении винт 3 опирается в специальный выступ каретки 2. Вращением винта через каретку осуществляется нагружение образцов.

Величина нагрузки определяется по шкале 5.

Привод машины осуществляется от одного электродвигателя. Привод нижнего образца представляет собой дифференциальный механизм, водило второго оформлено в виде маятника 8, с грузами 9 и чекой 10.

Под кареткой 2 (рисунок 1.14) расположен механизм возвратно-поступательного движения каретки, который состоит из червячной передачи 11- 12, кулачковой муфты 13 и эксцентричного вала 14 с обоймой 15. Движение от эксцентрикового вала передается каретке 2 от обоймы 15.

Наиболее характерным типом соединения, моделирование которого возможно на данной машине, является «вал-подшипник».

Образцы (рисунок 1.15) испытываются под нагрузкой и работают в паре следующим образом: при трении качения один образец обкатывается по другому с определенным проскальзыванием (рисунок 1.15 - а), при трении скольжения диск вращается, а колодочка неподвижна (рисунок 1.15 - б).

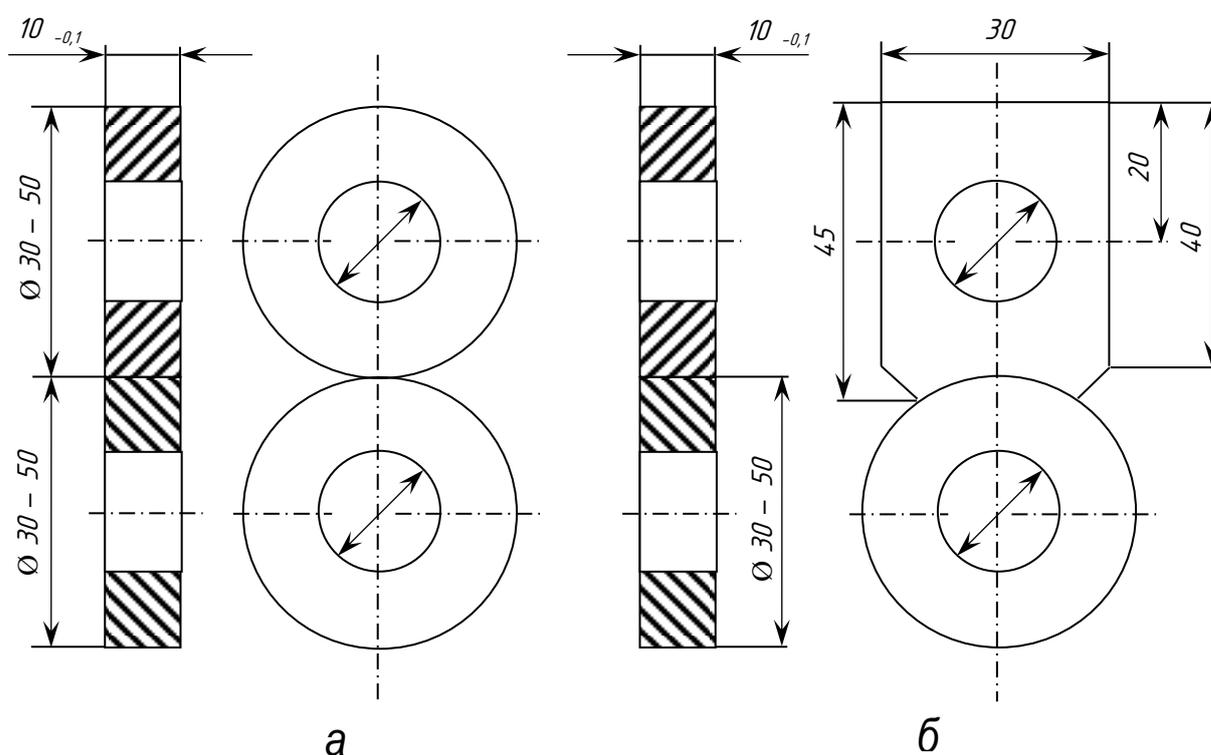


Рисунок 1.15 – а) образцы – диск по диску для трения качения;

б) образцы – диск-колодочка для трения скольжения

В машине предусмотрен механизм возвратно-поступательного движения верхнего образца. Для испытаний в различных средах имеется специальная камера.

Средства замера износа образцов в машине не предусмотрены. Это делают общепринятыми методами измерением образцов до и после испытания, взвешиванием или методом вырезания лунок.

## Подготовка машины к работе

1 В зависимости от вида испытаний (при трении качения или при трении скольжения) устанавливаются образцы.

Один образец устанавливается и закрепляется (рисунок 1.14) на валу I, другой на валу II. Верхний образец устанавливается и закрепляется на валу II при откинутой в нерабочее положение каретке 2.

Закрепляя образцы, помнить, что резьба у нижнего вала левая, у верхнего – правая. Затяжка образцов должна быть достаточной, чтобы не было проскальзывания по их посадочному месту. Надежное крепление образцов осуществляется двумя ключами: одним ключом вал удерживается за лыски, имеющиеся на его конусной части, другим затягивается гайка образца.

**Запрещается опускать каретку с ударом одного образца о другой, невыполнение этого условия приведет к биению валов образцов.**

2 При испытаниях на трение скольжения (образцы диск-колодочка) диск всегда ставится на нижний вал I, а колодочка на верхний вал II. По условиям испытания колодочка неподвижна, следовательно, вал II должен быть тоже неподвижен. Для этого одна из сменных шестерен  $Z_1$  снимается с вала II, разъединяя этим кинематическую связь между валами I и II, а через другую сменную шестерню  $Z_2$ , вал II стопорится штифтом 12 (ограждение сменных шестерен снимается). Колодочка устанавливается на валу и закрепляется при соприкосновении образцов и только после того, как вал II будет разъединен кинематически и застопорен.

**Ни в коем случае не стопорить вал II, не разъединив кинематически сменные шестерни  $Z_1$ - $Z_2$ , в противном случае при включении машины возможна поломка механизма привода или сгорит обмотка электродвигателя.**

3 При работе с камерой применяются образцы размерами по диаметру 50 мм каждый, допустимый суммарный износ образцов 1,5 мм. Устанавливается камера с образцами следующим образом: нижняя часть ее ставится на станину своим отверстием на вал нижнего образца. Одновремен-

но с этим через верхнее отверстие вводится образец, а затем гайка, закрепление осуществляется ключом через верхнее отверстие: верхняя часть камеры надевается на вал II при откинутаом положении каретки, после ввода в камеру и закрепления образца каретка опускается. Обе части камеры должны соприкасаться по их плоскостям разъема и запираются пружинными замками.

Испытуемая среда, подаваемая насосом или самотеком, может поступать в камеру по шлангам через штуцеры, расположенные в ее верхней и нижней части (делается потребителем).

4 После установки образцов выбирается шкала моментов трения. На линейке расположены все четыре шкалы: две с одной стороны и две с другой. Линейка снимается со штифтов и устанавливается снова той шкалой, по которой будет отсчитываться момент трения. Шкалу нужно брать по максимальному ожидаемому моменту трения, который возможен на образцах по условиям испытаний. Выбрав и установив шкалу, на маятник надевают груз, соответствующий этой шкале согласно следующей таблицы:

Таблица 1.1 - Шкала моментов трения

Шкала моментов	Груз на маятнике	Примечание
0 – 10 кгс/см	Без грузов	Измерение момента трения по шкале 0-10 кгс/см не рекомендуется. Она служит для сравнительной оценки измеряемой величины
0 – 50 кгс/см	50 кгс/см	
0 – 100 кгс/см	50 кгс/см + 100 кгс/см	
0 – 150 кгс/см	50 кгс/см + 100 кгс/см	

После установки грузов при работе с любой шкалой необходимо всегда ставить чеку 10, ввиду возможности соскакивания грузов.

5 Для записи диаграммы самопишущее устройство заряжается диаграммной лентой, устанавливается одна из скоростей движения ленты, пишущие перья заполняются чернилами, специальными или для авторучек.

6 Показания счетчиков сбрасываются до нулевых значений.

Подготовив таким образом машину к работе, приступают к испытаниям образцов.

### **Работа на машине**

1 Машина включается следующим образом (рисунок 1.14):

**Сначала отключить левой рукой маятник за его верхнюю часть на себя до упора, а затем, держа его в этом положении, правой рукой поворотом ручки пакетного выключателя пустить мотор.**

**Невыполнение этого условия вызывает сильный толчок и удар маятника о станину, что может вызвать поломку интегрирующего механизма.**

Поле пуска мотора маятник освобождается.

2 Включение и выключение возвратно-поступательного движения верхнего образца осуществляется ручкой 16. При включении ручка оттягивается и поворачивается на угол  $90^0$ . Если ручка не выходит на столько, чтобы осуществить ее поворот значит, зубья фиксирующей муфты 13 не вошли в свои пазы на стойке каретки 2, нужно более точно вручную установить образцы в одной плоскости вращением за шестерню (с внутренним зацеплением).

3 Нагружать образцы необходимо после пуска машины. При работе с возвратно-поступательным движением нагружение лучше производить вращением поджимной гайки 7, нагрузочный винт 3 при этом должен быть вывернут до предела, опираясь в выступ каретки почти заподлицо с тягой 4. Такой способ нагружения сводит до минимума колебания нагрузки при возвратно-поступательном движении каретки.

**Во избежание перегрузки машины и ее преждевременного выхода из строя, не рекомендуется создавать большое давление между образцами из материалов с большим коэффициентом трения**

4 Момент трения на образцах отмечается визуально по одной из шкал (рисунок 1.14) линейки 5, и при работе самописца записывается на диаграмме пишущими перьями. Перо чертит кривую изменения момента трения. Наибольшее отклонение маятника соответствует наибольшему моменту трения и ходу штанги, равное 80 мм. Таким образом, наибольшая ордината на диаграмме равна 80 мм.

Масштаб для подсчета величины момента на диаграмме определяется по масштабу той шкалы, показания которой соответствуют моментам на маятнике.

5 Работу трения можно определить по показаниям счетчика нижнего образца и счетчика интегратора.

Счетчик нижнего образца регистрирует полное число оборотов (рисунок 1.14) вала I за все время испытания.

Счетчик интегратора регистрирует число оборотов ролика. Число оборотов ролика непостоянно и зависит от его положения на диске интегратора.

При отклонении штанги соответственно величине момента ролик переместится вдоль радиуса диска на ту же величину. Число оборотов ролика при этом возрастает пропорционально приращению радиуса диска, следовательно, и величине момента.

Число оборотов ролика, пропорциональное величине момента трения и работе трения, подсчитывается по формуле:

$$n_p = \frac{\pi D_i}{\pi d_p} \times n_i \frac{n_0}{100}, \quad (1.11)$$

где  $n_p$  – число оборотов ролика 18;

$D_i$  – диаметр диска интегратора 17, по которым катится ролик 18

$$D_{i\max} = 2R_{i\max} = 2 \cdot 80 = 160 \text{ мм.}$$

$d_p$  – диаметр ролика 18, он равен 41.3 мм;

$n_i$  – число оборотов диска интегратора 17 за 100 оборотов нижнего образца  $n_i = 0/81$  об;

$n_0$  – принятое число оборотов нижнего образца.

Подставляя в формулу значения известных величин, получим:

$$n_p = \frac{160}{41.3} \times 0.81 \times \frac{n_0}{100} = 3.14 \frac{n_0}{100} = \pi \times \frac{n_0}{100}$$

Если  $D_i$  соответствует любому другому моменту “ $m$ ”, то число оборотов ролика будет равно:

$$n_p = \pi \times \frac{n_0}{100} \times \frac{m}{M}, \quad (1.12)$$

где  $m$  – любой момент трения по измеряемой шкале;

$M$  – наибольший момент трения по измеряемой шкале.

Работа трения за полное число оборотов нижнего образца “ $n_0$ ” выражается

$$Q = 2\pi \times rF \times n_0 = 2\pi \times m \times n_0, \quad (1.13)$$

где  $r$  – радиус нижнего образца;

$F$  – сила трения;

$rF = m$  – момент трения на образце.

Выражаем из уравнения (3) момент трения “ $m$ ”.

$$m = \frac{Q}{2\pi \times n_0}$$

И подставим в формулу (1.12)

$$n_p = \pi \times \frac{n_0}{100} \times \frac{Q}{2\pi \times n_0 \times M} = \frac{Q}{200M} \quad (1.14)$$

Работа трения тогда определяется:

$$Q = 200M \times n_p \times \text{кгс} \cdot \text{см} = 2M \times n_p \text{ кгс} \cdot \text{м}$$

При отклонении маятника на некоторую величину момента трения “ $m$ ” ролик интегратора должен сделать за каждые 100 оборотов нижнего образца следующее число оборотов:

$$n_p = \frac{m}{M} \pi$$

Так определяется работа трения и момент трения при испытании образцов.

**Порядок выполнения работы:**

- 1 Определить первоначальную массу предварительно приработанных подвижного и неподвижного образцов на аналитических весах, предварительно их необходимо обезжирить ацетоном.
- 2 Закрепить подвижный образец на шпиндель машины трения.
- 3 Закрепить неподвижный образец в державке нагружающего устройства машины трения.
- 4 Установить массу грузов в державке нагружающего устройства, проверить правильность установки образцов по площади контакта.
- 5 Запустить машину соблюдая правила по технике безопасности.
- 6 В процессе цикла испытания необходимо производить регистрацию частоты вращения образца, температуры, коэффициента трения, момента трения и времени испытания.
- 7 После каждого цикла испытаний необходимо остановить машину, снять образцы, обезжирить, просушить и взвесить на аналитических весах (повторность испытания 3-х кратная).
- 8 Полученные результаты испытаний занести в таблицу 1.2 и по результатам испытаний построить график износа образцов рисунок 1.16.
- 9 Оформить полученные результаты в виде отчета.

Таблица 1.2 - Результаты испытаний на износ

№ п/п	Масса образца – ролик, г				Масса образца – контртела, г			
	Начальная масса, г	После 1го испытания, г	После 2-го испытания, г	После 3-го испытания, г	Начальная масса, г	После 1-го испытания, г	После 2-го испытания, г	После 3-го испытания, г
1								
2								
3								

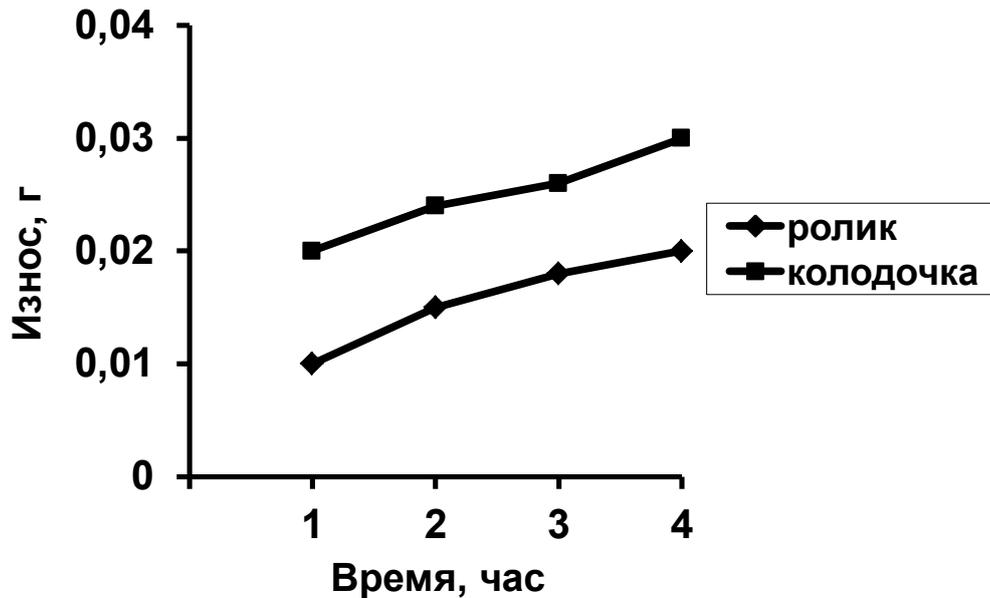


Рисунок 1.16 - График износа образцов

10 Произвести расчет относительной износостойкости образцов, определить силу трения, коэффициент трения. Определить вид изнашивания образцов.

### Контрольные вопросы

- 1 Что такое классическая кривая износа?
- 2 Что такое приработка?
- 3 Какие существуют методы определения износа?
- 4 Назовите виды изнашивания?
- 5 От каких параметров зависит скорость изнашивания деталей?
- 6 Как провести оценку износостойкости при испытаниях?
- 7 Мероприятия по уменьшению интенсивности изнашивания деталей машин?

### Литература

- 1 Гаркунов Д.Н. Триботехника (износ и безизносность) : Учебник . - 4-е изд., перераб. и доп. - М. : Издательство МСХА, 2001. - 616 с.
- 2 Чичинадзе А. В. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) - М. : Машиностроение, 2003. - 286 с.

## ***Лабораторная работа № 2***

### **Исследование износостойкости материалов рабочих органов почвообрабатывающих машин**

#### **Цели работы**

- 1 Ознакомиться с общими закономерностями абразивного изнашивания.
- 2 Изучить устройство и принципы работы стенда «вращающаяся чаша» на абразивное изнашивание. Освоить методику испытаний.
- 3 Провести испытания различных металлических образцов на абразивное изнашивание.

#### **Теоретические сведения**

Среди многообразия факторов, сокращающих срок службы деталей сельскохозяйственной техники, наибольшую агрессивность проявляет абразивный износ. Типичными представителями деталей, подвергающихся интенсивному износу в почвенной среде, являются лемеха и отвалы плугов, лапы культиваторов, диски луцильников, зубья борон, плоскорезы, сошники, ножи уборочных машин, траки. Пальцы гусениц и многие другие детали. Ежегодный ущерб вследствие абразивного износа исчисляется миллиардами рублей.

Быстрое изнашивание деталей сельскохозяйственной техники свидетельствует о том, что применяемые материалы и методы их упрочнения не обеспечивают высокой износостойкости поверхностей трения. Поэтому проблема увеличения срока службы и безотказности сельскохозяйственной техники весьма актуальна.

Для эффективного решения задачи повышения долговечности быстроизнашивающихся деталей сельскохозяйственных машин необходимо осуществить:

- систематизированные исследования интенсивности и характера износа деталей в эксплуатации;
- лабораторные исследования механизма износа и износостойкости конструкционных материалов и упрочняющих покрытий;
- разработку и внедрение новых технологических процессов и улучшенных материалов.

В настоящей работе излагаются методические рекомендации по методике проведения экспериментальных исследований абразивного износа конструкционных материалов на лабораторной установке “вращающаяся чаша”, поэтому методика экспериментальных исследований должна быть тщательно отработана, при этом необходимо воспроизвести реальный механизм изнашивания, наблюдаемый в эксплуатационных условиях.

При движении рабочих органов в абразивной почвенной среде происходит интенсивное изнашивание металла, сопровождающееся быстрым изменением размеров деталей.

Причина высокой агрессивности этого вида износа – специфическое взаимодействие металла с абразивными частицами, которые обычно с большой скоростью скользят по поверхности детали и с определенной силой, зависящей от состава и плотности абразивной массы и размеров частиц, вдавливаются в металл. Каждая частица, пришедшая в данный момент в соприкосновение с поверхностью, оставляет на металле след в виде царапины, длина которой, как правило, не превышает нескольких миллиметров. Поверхность металла оказывается покрытой множеством таких царапин, имеющих одинаковое направление и сливающихся по длине. Механизм их образования существенно различается в зависимости от условий взаимодействия металла с абразивными частицами.

Интенсивность абразивного изнашивания зависит от типа обрабатываемой почвы, ее механического состава, влажности и других показателей. Например, наибольшая интенсивность изнашивания лемеха плуга наблюдается при вспашке песчаных почв с повышенной (более 20%) влажностью. Каждая почва имеет определенный механический и фракционный состав. В состав почвы входят – пылевидная супесь, средний суглинок, тяжелый суглинок, тяжелая супесь и другие. Основные составляющие компоненты почвы – кварц (диоксид кремния  $\text{SiO}_2$ ); окись железа  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ; соединения Al, Ca, Mg, Na и другие элементов. Частицы обладают высокой твердостью, так твердость  $\text{SiO}_2$  составляет 10780 – 11700 МПа, а  $\text{Al}_2\text{O}_3$  20900 – 22900 МПа, что превышает твердость рабочих поверхностей деталей сельскохозяйственных машин. Более крупные частицы состоят из обломков почвообразующих пород и минералов. Твердость минералов пород указана в таблице 2.1.

Таблица 2.1 - Твердость минералов, входящих в состав почв

<i>Горная порода или минерал</i>	<i>Твердость по шкале Мооса</i>	<i>Микротвердость, кг/мм<sup>2</sup></i>
Кварц	7	1050 – 1130
Полевые шпаты	6,0 – 6,5	695 – 720
Гранит	6 – 7	820
Гранаты	6,5 – 7,5	750 – 900
Эпидот	6,5	720
Роговая обманка	5,5 – 6,0	650
Мусковит	2 – 3	–
Биотит	2,5 – 3,0	–
Глинистые минералы	1,0 – 2,5	–

Анализ минералогического состава почв позволяет заключить, что наиболее распространенным минералом является кварц, составляющий

примерно 75-85% почвы. Затем идут полевые шпаты, роговые обманки, слюды, рудные минералы, граниты.

Для установления влияния размера частиц и интенсивности изнашивания выделено 6 размеров фракций – 0,12-0,35; 0,35-0,50; 0,50-1,0; 1,0-1,8; 1,8-2,2; и 2,2-3,0 мм. Почву рассматриваем как твердое тело с шероховатой поверхностью и подвижным активным слоем. Классификация почв по их абразивной (изнашивающей) способности и характеру приведена на рисунке 2.1.

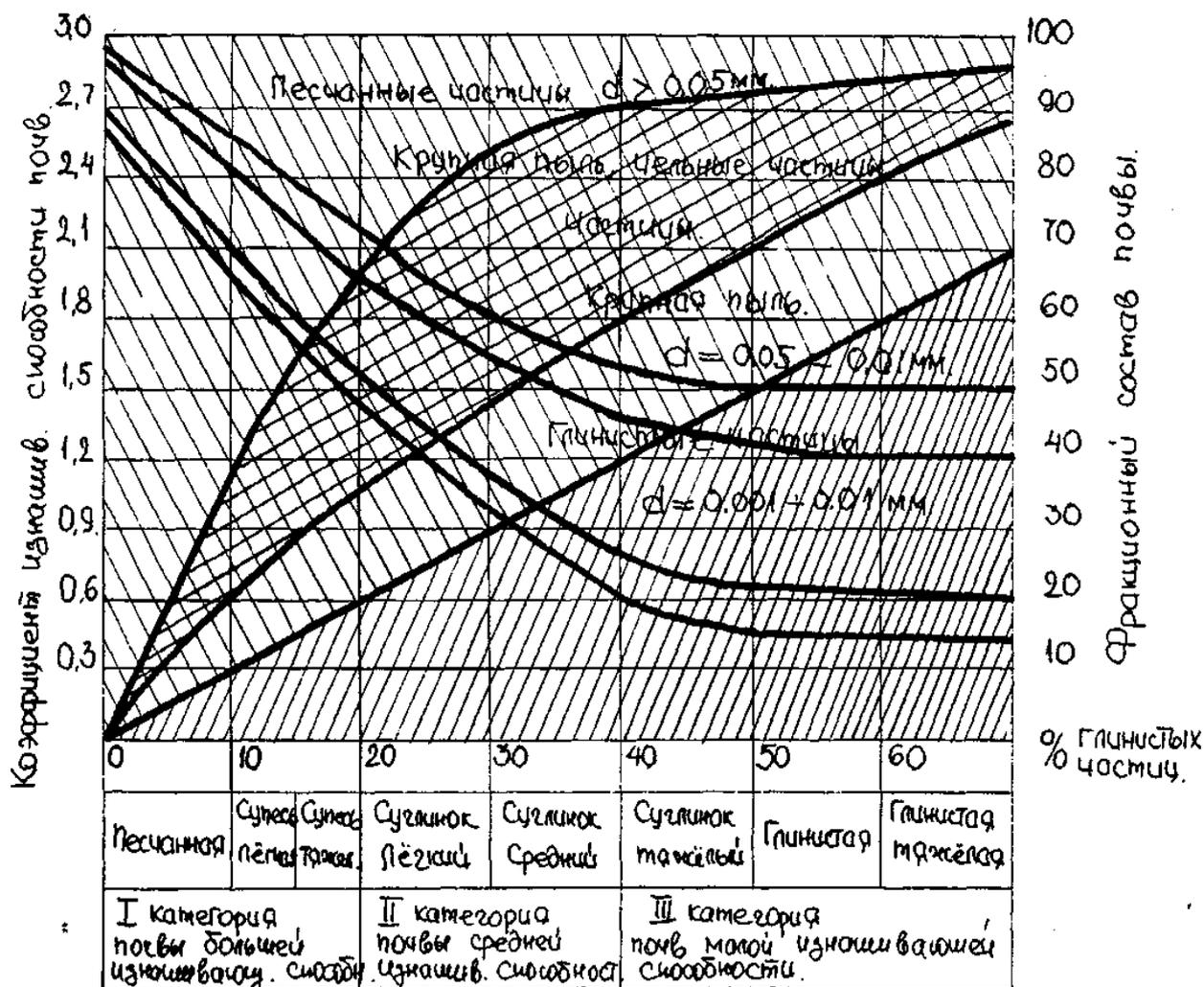


Рисунок 2.1 - Классификация почв по абразивной изнашиваемости

Следовательно, интенсивность изнашивания деталей зависит от интенсивности воздействия на металл абразивных частиц. Эта закономерность

наблюдается во всем интервале значений твердости наиболее агрессивных абразивных частиц, входящих в состав реальной почвы.

На основании выше изложенного можно выделить три основных вида разрушения поверхности металла рабочих органов при взаимодействии с абразивными частицами (рисунок 2.2): микрорезание; многократное передеформирование; механохимическое истирание.

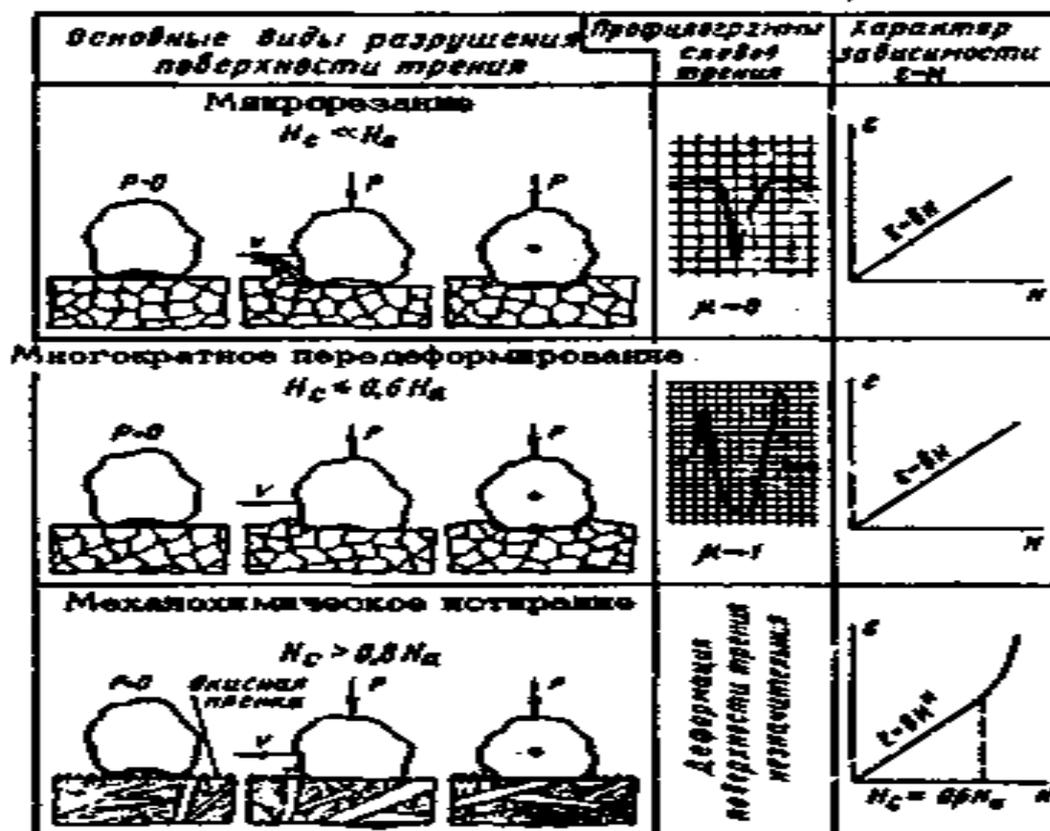


Рисунок 2.2 - Схема разрушения поверхности трения при различном соотношении твердости сплавов  $H_c$  и абразивных частиц  $H_a$ :  $\mu$  - соотношение объемов выдавленного металла и впадины

В реальных условиях работы деталей машин все виды изнашивания проявляются одновременно.

Увеличение ресурса плужных лемехов остается проблемой, требующей своего решения – наработка до отказа лемехов составляет всего 8 – 10 га. Достичь необходимой долговечности можно за счет применения износостойких материалов, упрочнения на стадии производства, изменения конструкции, восстановления, за счет использования упрочняющих технологий.

Результаты испытаний сталей в зависимости от химического состава и твердости представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 - Зависимость относительной износостойкости сталей от химического состава и твердости (абразив-кварц 0,16...0,32 мм, давление-0,33 МПа)

Марка стали	Химический состав %					Твердость, HRC	Относительная износостойкость
	C	Si	Mn	Cr	прочие		
Сталь 45 (Эталон)	0,45	0,25	0,67	0,14		90 HRB	1,0
Сталь 45	0,45	0,25	0,67	0,14		45	1,4
Л53	0,47	0,25	0,67	0,14		47	1,6
65Г	0,65	0,25	1	0,14	Ni-0,20 Cu-0,18	52	1,92
40X	0,40	0,27	0,65	1,0	Ni-0,21	55	2,7
X12	2,12	0,38	0,37	11,8	W-0,04	60	4,6
30XГСА	0,30	1,0	1,0	1,0		52	2,5
ШХ15	1,05	0,28	0,30	1,43	W-1,38	55	3,1
4X5B2ФС	0,4	1,0	0,35	5,5	W-1,9 V-0,7 Cu-0,25	52	2,5
X12МФ	1,5	0,25	0,3	12,0	Mo-0,5 V-0,2 Cu-0,25	56	3,3
XГ	1,51	0,27	0,53	1,45		50	2,7
XВГ	1,06	0,28	0,85	1,02	W-1,3	55	3,0

Результаты испытаний на износостойкость различных наплавочных материалов показаны в таблице 2.3.

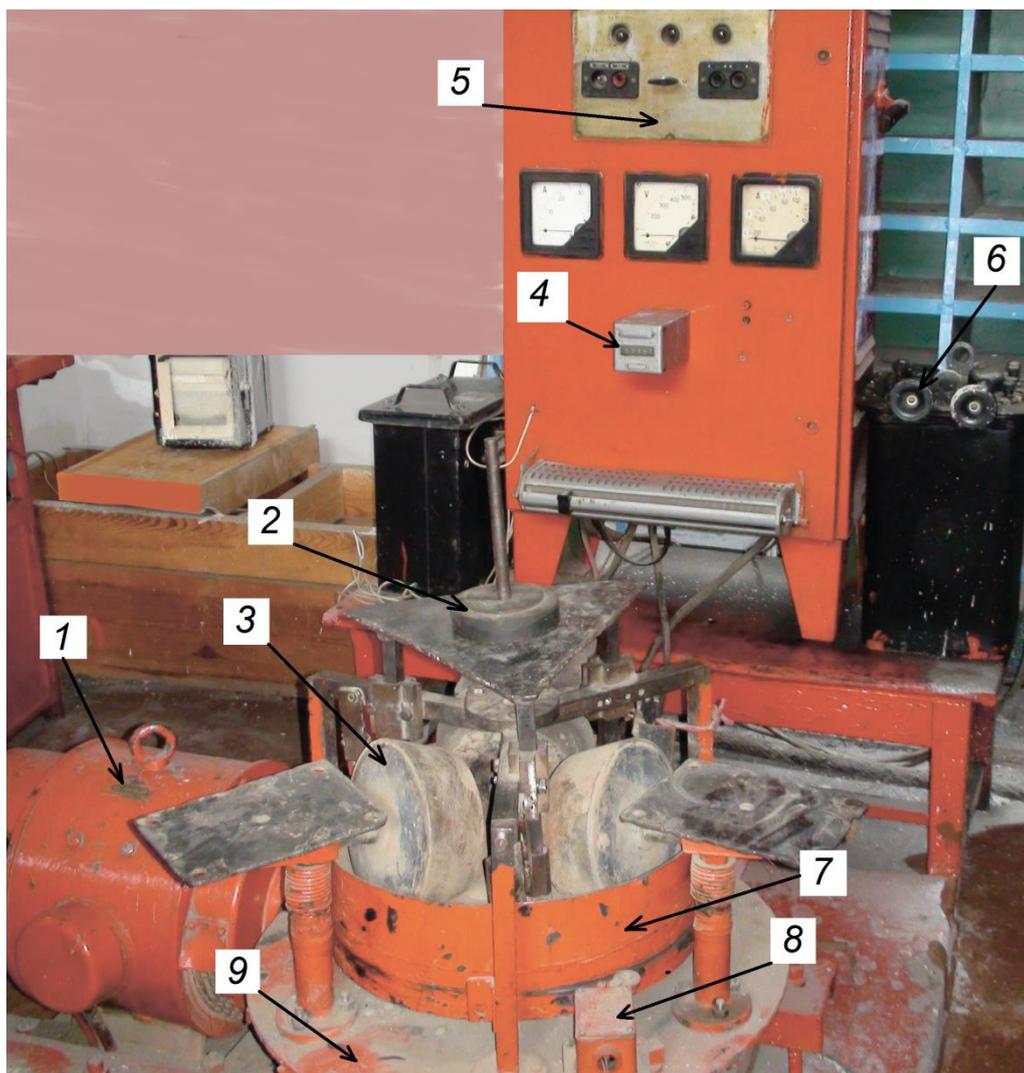
Таблица 2.3 - Результаты испытаний наплавочных материалов  
(абразив-кварц, давление-0,33 МПа)

Марка материала	Вид нанесения наплавки	Химический состав %									Твердость НРС	Относительная износостойкость
		C	Cr	Si	Mn	Ni	B	Mo	W	Прочие		
Сталь 45												1
ЦН-12М	дуговая	0,13	16,3	4,1	4,0	7,9	-	-	-	Nb-0,8	47	2,5
ОЗН-6	-----	1,0	4,4	3,7	2,6	-	0,9	-	-	-	48	2,4
ОЗШ-3	-----	0,4	9,9	1,9	0,5	-	0	-	-	-	50	2,9
T-590	-----	3,2	25,0	2,2	1,2	-	1,0	-	-	-	57	4,1
ОЗИ-3	-----	0,8	3,6	0,4	0,5	-	-	4,0	1,4	V-1,0	50	3,3
ОЗН-7М	-----	0,7	4,1	1,4	0,4	2,0	0,5	-	-	V-0,6	51	3,0
ОЗИ-6	-----	1,1	4,3	1,5	0,6	-	-	7,5	2,2	V-1,3 Ti-0,2 Al-0,25	58	6,3
ЭН-60М	-----	0,8	2,7	1,0	0,9	-	-	0,9	-	Ti-0,1	53	3,6
ОЗН-400М	-----	0,13	-	1,7	3,5	-	-	-	-	-	44	1,7
ФБХ-6-2	Плазменная	4,5	35,0	2,1	2,5	-	1,7	-	-	-	57	4,9
ПГ УСЧ 30	Индукционная	3,9	48,0	3,3	1,5	3,0	-	0,2	-	-	54	3,6
ПГ УСЧ 31	-----	4,7	41,0	2,2	-	1,3	-	1,5	-	-	52	3,3

Как видно из данных таблицы 2.3, относительная износостойкость наплавочных материалов изменяется в пределах от 1,7 (ОЗН-400М) до 6.3 (ОЗИ-6). Достаточно высокую износостойкость имеет твердый сплав ФБХ-6-2 наплавленный на металлическую основу плазмой ( $\epsilon = 4,9$ ).

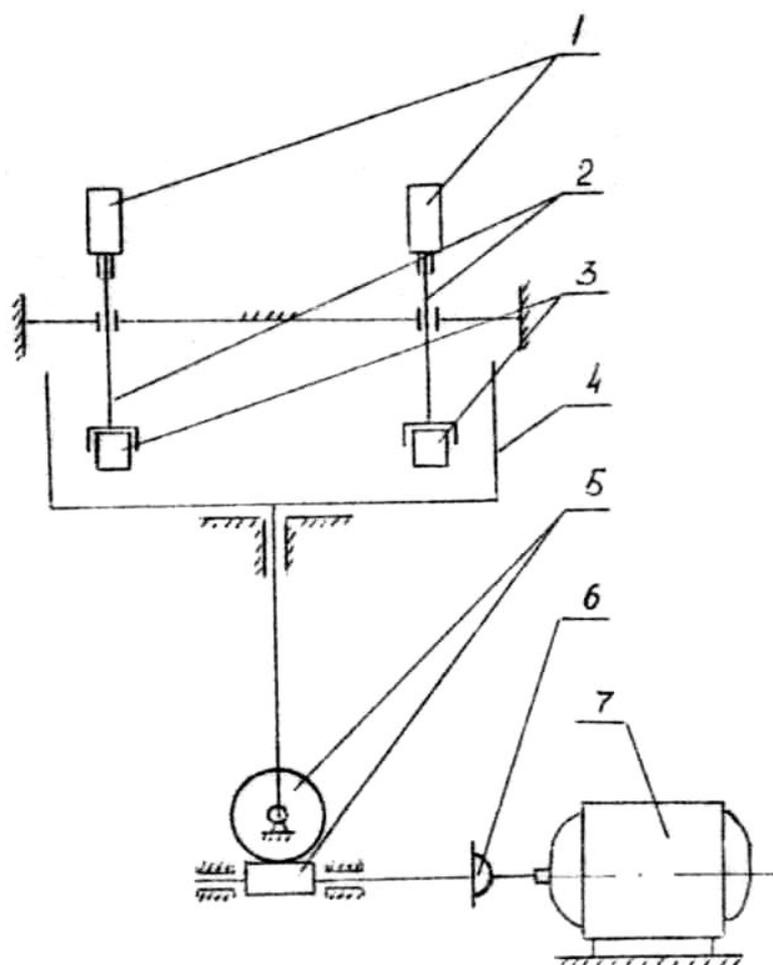
## Испытание образцов на абразивное изнашивание

Существуют различные модели машин трения, предназначенных для испытания материалов на абразивное изнашивание. Испытание образцов на износостойкость в условиях абразивной среды проводится на установке «вращающаяся чаша», общий вид которой представлен на рисунке 2.3, кинематическая схема представлена на рисунке 2.4.



1 – электродвигатель; 2 – грузила; 3 – катки уплотняющую почву; 4 – счетчик оборотов чаши; 5 – щит управления установкой; 6 – регулятор оборотов электродвигателя; 7 – вращающаяся чаша; 8 – концевой выключатель; 9 – рама (остов) установки

Рисунок 2.3 – Общий вид установки для испытания образцов на абразивное изнашивание «вращающаяся чаша»



1 – груз; 2 – стойки; 3 – образцы; 4 – вращающаяся чаша; 5 – червячный редуктор; 6 – муфта; 7 – электродвигатель

Рисунок 2.4 – Кинематическая схема установки «вращающаяся чаша», для испытания образцов на абразивное изнашивание

Установка состоит из вращающейся чаши 4, приводимой червячным редуктором 5 от электродвигателя 7 через муфту 6.

Испытуемые образцы 3 крепятся к стойкам 2 подвижно соединенным к неподвижному остову. Для создания постоянного давления образцов на почву предусмотрен груз 1.

Электросхемой предусмотрены питание электродвигателя постоянным током, регулирование частоты вращения двигателя и автоматический отсчет оборотов по счетчику.

При испытании образцов используется почва по механическому составу, состоящая из песка крупного и почвы. Содержание почвы по фракционному составу: 1-0,25; 0,25-0,05; 0,05-0,01; 0,01-0,005; меньше 0,005 мм. Влажность почвы составляет 3 – 5 %.

### Порядок выполнения работы

1 Ознакомиться с техникой безопасности при работе на стенде трения “вращающаяся чаша ”

2 Определить первоначальную массу образцов на аналитических весах АДВ – 200, предварительно их необходимо обезжирить ацетоном.

3 Определить твердость поверхности образцов на твердомере ТК-2М.

4 Закрепить образцы на стойках.

5 Установить скорость вращения чаши, при которой линейная скорость движения образцов относительно чаши соответствует:

$$0,3 \text{ м/сек.} \quad V = \frac{2\pi R n_t}{60}, \quad (2.1)$$

где  $R$  – радиус нахождения образца относительно центра чаши, м;

$n_t$  – частота вращения чаши, об/мин.

0,5 м/сек

6 Запустить установку; проверить скорость вращения чаши, при необходимости отрегулировать с помощью реостата.

7 Провести испытания образцов. После испытания необходимо взвешивать образцы на аналитических весах, предварительно обезжирив их.

8 По показаниям счетчика  $n_\phi$  определить фактический путь  $S_m$  изнашивания и определить фактическую скорость  $V_\phi$  трения, м/с:

$$S_u = 2\pi R n_\phi; V_\phi = \frac{S_u}{60t}, \quad (2.2)$$

где  $n_\phi$  – частота вращения чаши по счетчику;

$t$  – время работы установки, мин:

9 Рассчитать интенсивность изнашивания, определить износостойкость и сделать выводы об износостойкости различных образцов.

10 Результаты испытания занести в таблицу 2.4

Таблица 2.4 - Результаты испытания образцов на абразивную износостойкость

Материал образцов	Площадь трения, образцов на см <sup>2</sup>	Удельная нагрузка на образец кгс/см <sup>2</sup>	Частота вращения чаши, об/мин	Фактическая скорость, м/сек	Масса образца, г		Износ, г	Скорость изнашивания, г/сек	Интенсивность изнашивания, г/м	Относительная износостойкость
					до испытания	после испытания				

### Контрольные вопросы

1 Виды изнашивания деталей. Факторы, влияющие на изнашивание, сущность этого влияния.

2 Абразивное изнашивание деталей. Меры борьбы с этим видом изнашивания.

3 Основные показатели изнашивания.

### Литература

1 Курчаткин В. В., Тельнов Н. Ф., Ачкасов К. А., Башишев А. Н. и др. Надежность и ремонт машин / В. В. Курчаткин и [и др.]. – М. : Колос, 2000. – 776 с.

2 Гаркунов Д.Н. Триботехника (износ и безизносность) : Учебник . - 4-е изд., перераб. и доп. - М. : Издательство МСХА, 2001. - 616 с.

## ***Лабораторная работа № 3***

### **Расчет показателей надежности деталей машин по данным исходной опытной информации**

#### **Цель работы**

Изучить методику обработки показателей надежности машин по данным опытной информации вероятностно-статистическим методом.

#### **Теоретические сведения**

Оценка надежности машин при помощи математических методов на основании накопленной статистической информации об их работе в реальных условиях эксплуатации позволяет выявить вероятностные закономерности и соотношения между случайными факторами, в различной мере влияющими на работоспособность, безотказность, долговечность и сохранность машин.

Система сбора и обработки информации о надежности сельскохозяйственной техники представляет собой совокупность мероприятий по получению достоверных сведений о надежности машин.

Опытная информация о количественных показателях надежности машин должна быть достоверной, полной, однородной, дискретной, своевременной.

Обработка и анализ опытной информации связаны с необходимостью изучения случайных событий, которые рассчитываются методами теории вероятности и математической статистики.

Цель сбора и обработки информации – совершенствование конструкции, технологии изготовления, сборки и испытания машин; разработка мероприятий по совершенствованию технического обслуживания и текущих

ремонт; повышения качества капитальных ремонтов и снижения затрат на их проведение; оптимизация норм расхода запасных частей.

Основные задачи системы сбора и вероятностно-статистической обработки опытной информации:

- определение количественной оценки показателей надежности машин;
- выявление конструктивных и технологических недоработок машин;
- выявление деталей, сопряжений, узлов, агрегатов лимитирующих надежность машин в целом;
- изучение закономерностей отказов;
- установление влияния условий и режимов эксплуатации на надежность машин;
- установление нормируемых показателей надежности машин;
- разработка мероприятий по повышению надежности машин.

Статистическую оценку количественных показателей надежности дают совокупности объектов, объединенных единым признаком или свойством. Различают статистическую, генеральную и выборочную совокупность.

Если во время испытаний у машин будет зафиксирован показатель надежности, такая информация называется полной. Если же испытания ограничивают по времени или наработке машин и за это время не у всех машин зафиксирован показатель надежности, такую информацию называют усеченной.

При эксплуатации сельскохозяйственной техники трудно получить полную информацию о показателях надежности машин. В этом случае приходится иметь дело с усеченными или многократно усеченными выборками. Усеченную выборку можно представить следующим образом. Например, в эксплуатации находятся  $N$  объектов, из них за время  $t$  отказало  $n$  объектов при наработке  $T_1, T_2, \dots, T_n$ ; а для остальных  $N_i$  объектов известно лишь то, что наработка их больше чем  $T_n$ . Усеченную информацию получают, когда испытания объектов проводятся по плану NUT. При этом наблюдения ве-

дуются за  $N$  объектами до наперед заданной наработки  $T_n$ , независимо от того, у скольких объектов из числа  $N$  будут зафиксированы показатели надежности.

**Задание.** Определить средний доремонтный ресурс  $T_{др}$  гильзы цилиндров двигателя ЯМЗ-238 и его доверительные границы при доверительной вероятности  $\alpha_1 = 0,80$  и  $\alpha_2 = 0,95$ , восьмидесяти процентный гамма ресурс и вероятность доремонтной наработки от 2 до 3 тыс. мото-часов.

Пример вероятностно-статистической обработки опытной информации проводилось по плану NUT за двигателями ЯМЗ-238. Имеется исходная опытная информация по доремонтным ресурсам 70 гильз цилиндров в виде вариационного ряда (таблица 3.1).

Таблица 3.1 - Ресурс гильз цилиндров двигателя ЯМЗ-238  $T_{др}$ , мото-ч

950	1750	2020	2400	2750	3300	3750
1300	1850	2020	2420	2780	3310	3840
1320	1850	2070	2420	2820	3380	3900
1410	1900	2150	2450	2870	3420	4100
1410	1940	2180	2500	2900	3500	4450
1520	1950	2200	2520	2910	3520	4600
1600	1960	2200	2540	3000	3580	4700
1710	1980	2260	2570	3150	3600	5020
1730	2000	2280	2650	3220	3650	5250
1730	2000	2290	2700	3250	3680	5500

### Последовательность выполнения задания

1 Составить статистический ряд распределения ресурса  $T_{др}$  гильзы с указанием частоты  $m_i$ , опытной вероятности (частоты)  $P_{oni} = \frac{m_i}{N}$  и накопленной опытной вероятности  $\sum P_{oni} = \sum \frac{m_i}{N}$  по  $i$ -м частичным интервалам ряда.

2 Построить в масштабе гистограмму, полигон и график эмпирической интегральной функции распределения доремонтного ресурса (кривую накопленных опытных вероятностей).

3 Определить среднее значение ресурса  $\bar{T}_{др}$ , среднее квадратическое отклонение  $\sigma$  и коэффициент вариации  $v$  ряда значений ресурса.

4 Подобрать теоретический закон распределения ресурса, определить его параметры и значения (для частичных интервалов) дифференциальной  $f(T)$  и интегральной  $F(T)$  функций теоретического распределения, занести их в таблицу.

5 Построить графики функций  $f(T)$  и  $F(T)$  и сопоставить их с полигоном распределения и с кривой накопленных опытных вероятностей; по графику  $F(T)$  установить 80 %  $\gamma$  ресурс гильзы и вероятность доремонтной наработки от 2 до 3 тыс. мото-часов.

6 Определить доверительные границы среднего ресурса  $T_{др}^в$  и  $T_{др}^н$  при доверительной вероятности при  $\alpha_1 = 0,80$  и  $\alpha_2 = 0,95$ , а также наибольшую возможную относительную погрешность расчета  $\pm \epsilon_a$ .

### **Пример выполнения расчетов показателей надежности**

1 Полученные в результате наблюдений значения случайной величины – это доремонтный ресурс гильзы цилиндров  $T_{др}$  – в упорядоченном виде, представляют собой вариационный ряд. Примером вариационного ряда служит упорядоченный ряд значений  $T_{др}$  от 950 до 5500 мото-часов и представляет собой исходную опытную информацию по результатам наблюдений за двигателями в эксплуатационных условиях.

Вариационный ряд – первый этап статистической обработки результатов наблюдений. Здесь мы получаем первое представление о границах изменения случайной величины.

Ряд распределения включает в себя всю информацию о значениях показателей надежности изучаемых машин. При этом содержание опытной информации позволяет даже для очень многочисленной совокупности достаточно легко определить наиболее типичные значения отказа, измерить его вариацию, сделать предварительное заключение о форме распределения частот. Построение ряда распределения сводится к упорядочению исходных данных, которые представляют набор чисел наработки или величины износ до отказа. Основными этапами построения ряда распределения является определение числа интервалов (групп) и подсчет частот. Число интервалов зависит от объема опытной информации и величины вариации отказов машин. Чем больше опытных данных, тем большее количество групп должно быть в ряду распределения. Обычно правильно составленный ряд содержит, в инженерных расчетах, от 5-15 интервалов. Нужное число интервалов может быть ориентировочно вычислено по формулам Штюргеса [4]:

$$K \approx 1 + 3,32 \times \lg n \quad (3.1)$$

Брукса и Каррузера: 
$$K \approx 5 \times \lg n \quad (3.2)$$

и другими авторами: 
$$K \approx \sqrt{n} \quad (3.3)$$

где  $K$  – число интервалов ряда распределения,

$n$  – объем опытной информации.

Интервалы должны быть одинаковыми и удобными по величине, иметь верхнюю и нижнюю границы, прилегать друг к другу и не иметь разрывов.

Ряд распределения может быть в виде таблицы, графика или в аналитической форме.

При составлении интервального ряда распределения область возможных значений случайной величины разбивается на отдельные частичные интервалы, каждый из которых имеет верхнюю и нижнюю границы. Далее определяют, какое число значений (из общего количества  $N$ ) попадает в от-

дельные интервалы, то есть устанавливают частоты  $m_i$  по отдельным  $i$  – м интервалам, а затем и частоты  $\frac{m_i}{N}$  тоже по интервалам.

Статистический ряд составляют в виде таблицы, состоящей из пяти строк: интервалы, середины интервалов, частота, опытная вероятность (частость) и накопленная опытная вероятность (таблица 3.2).

Таблица 3.2 - Статистический ряд распределения доремонтного ресурса гильзы цилиндров двигателя ЯМЗ-238

Частичные интервалы, тыс. мото-ч	0,5÷1,5	1,5÷2,5	2,5÷3,5	3,5÷4,5	4,5÷5,5
Середина интервалов $T_{ci}$ , тыс. мото-ч	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
Частоты $m_i$	5	30	20	9	6
Частоты $P_{on} = \frac{m_i}{N}$	0,0715	0,4285	0,2858	0,1285	0,857
Накопленные частоты $\sum P_{on} = \sum \frac{m_i}{N}$	0,0715	0,5000	0,7858	0,9143	1,0000

В приложении Б приведены варианты задания и указаны границы частичных интервалов. Всего в каждом варианте 5 или 6 интервалов.

При определении частоты  $m_i$  по интервалам нужно иметь в виду, что в интервал включают те значения, которые численно больше нижней границы, но меньше или равны верхней границы интервала.

При составлении таблицы необходимо учитывать, что сумма частот по интервалам должна быть равна 70, т.е.  $\sum m_i = N$ , и сумма частостей должна быть равна единице, т.е.  $\sum \frac{m_i}{N} = 1,000$  Расчет частостей обычно производят с точностью до четвертого десятичного знака.

Проверку информации на наличие выпадающих точек осуществляют по критерию Ирвина, опытное значение которого определяется по формуле:

$$\lambda_{04} = \frac{T_i - T_{i-1}}{\lambda}, \quad (3.4)$$

где  $T_i$  и  $T_{i-1}$  – смежные (крайние) точки в сводной ведомости информации (таблице 3.1).

Полученные значения  $\lambda_{04}$  сравнивают с табличными значениями критерия Ирвина (приложение Ж). Если  $\lambda_{04} < \lambda_r$ , то такие точки «выпадают», т.е. должны быть исключены из информации как недостоверные. В этом случае необходимо перестроить статистический ряд с учетом уменьшения количества информации за счет выпавших точек, вновь рассчитав  $\bar{T}_{\partial p}$ ,  $\sigma$  и  $\nu$ .

### Графическое построение опытного распределения

Таблица 3.2 содержит данные, необходимые для более наглядного, графического представления ряда распределения. Из графиков, характеризующих распределение случайных величины, по данным исходной опытной информации строят гистограмму и полигон, кривой накопленных (опытных) вероятностей.

При построении гистограммы на горизонтальной оси графика откладывают значения, соответствующие границам частичных интервалов, а на вертикальной – частоты или частости, также по отдельным интервалам. Масштаб ординат следует выбирать, придерживаясь, правила «золотого сечения»:

$$Y = 5 / 8 \cdot X ,$$

где  $Y$  – наибольшая ордината;

$X$  – абсцисса, соответствующая наибольшему значению наработки.

Далее строят прямоугольники, основания которых лежат на горизонтальной оси координат и равны величине частичных интервалов, а высоты равны частотам или частостям соответствующих интервалов. В результате получается ступенчатый многоугольник, или гистограмма рисунок 3.1.

Если теперь соединить прямыми линиями середины верхних (горизонтальных) сторон прямоугольников гистограммы, то получим полигон распределения в виде ломаной.

Примеры построения гистограммы и полигона распределения  $T_{др}$  приведены на рисунках 3.1 и 3.2.

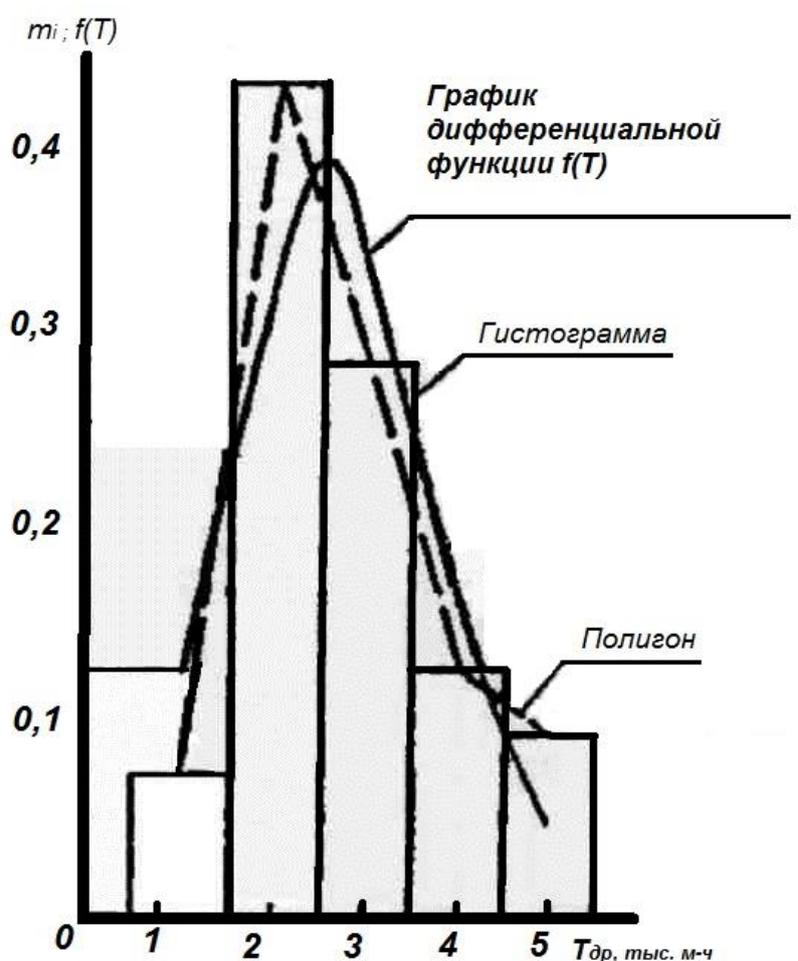


Рисунок 3.1 – Гистограмма и полигон распределения по доремонтным ресурсам  $T_{др}$

Наиболее общей характеристикой распределения случайных величин является интегральная функция распределения  $F(T)$ , которая определяет вероятность того события, что случайная величина  $T$  будет меньше или равна наперед заданному  $t$ , то есть  $F(T) = P(T \leq t)$ . Эмпирическая интегральная

функция распределения определяет частоту (опытную вероятность) события  $T \leq t$ , а теоретическая интегральная функция распределения - вероятность данного события. Функция распределения  $F(T)$  может быть задана аналитически или представлена в виде графика (рисунок 3.2).

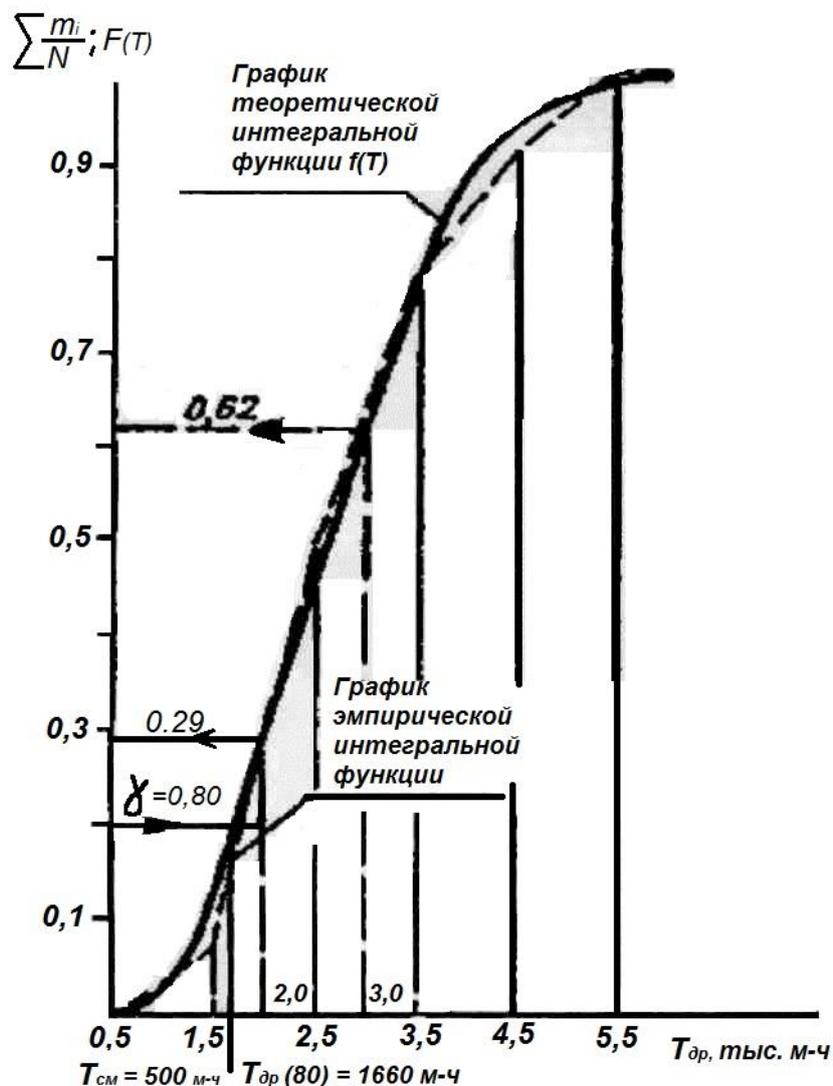


Рисунок 3.2 – Эмпирическая интегральная функция и кривая накопленных опытных вероятностей (частостей)

В примере (таблица 3.1) 1.  $\frac{m_i}{N} = 0$  для  $T_{др} \leq 0,5$  тыс. мото-ч. Таким образом, начальная точка ломаной линии лежит на оси абсцисс и соответствует значению  $T_{др} = 0,5$  тыс. мото-ч. Частность  $\frac{m_i}{N} = 0,0715$  для значений  $T_{др} \leq 1,5$  тыс. мото-ч – в результате определяется вторая точка ломаной линии,

которую отрезками прямой соединяют с начальной точкой, соответствующей верхней границе интервала ( $\sum \frac{m_i}{N} = 0,0715 + 0,04285 = 0,5000$  для  $T_{\partial p} \leq 2,5$  тыс. мото-ч). Так, переходя последовательно от одного интервала к другому, постепенно строят график эмпирической функции распределения  $T_{\partial p}$ , последняя точка которого соответствует  $\sum \frac{m_i}{N} = 1,000$  для  $T_{\partial p} \leq 5,5$  тыс. мото-ч.

### Определение числовых характеристик

На следующем этапе статистической обработки результатов наблюдений получают числовые характеристики распределения. Это, прежде всего среднее арифметическое значение ресурса гильзы, или просто средний ресурс  $\bar{T}_{\partial p}$  - он представляет центр рассеивания значения случайной величины, вокруг которого группируются отдельные значения.

$\bar{T}_{\partial p}$  подсчитывают по следующей формуле

$$\bar{T}_{\partial p} = \sum T_{ci} \times \frac{m_i}{N}, \quad (3.6)$$

где  $T_{ci}$  - значение ресурса, соответствующего середине  $i$ -го интервала.

Степень рассеивания значений ресурса относительно  $\bar{T}_{\partial p}$  оценивается - средним квадратическим отклонением  $\sigma$ , которое подсчитывается по формуле

$$\sigma = \sqrt{\sum (T_{ci} - \bar{T}_{\partial p})^2 \times \frac{m_i}{N}} \quad (3.7)$$

Или с использованием упрощенного метода сумм.

Степень рассеивания случайной величины определяется безразмерной числовой характеристикой - коэффициентом вариации

$$\vartheta = \frac{\sigma}{T_{\partial p} - t_{cm}}, \quad (3.8)$$

где  $t_{см}$  – величина смещения зоны рассеивания  $\bar{T}_{ор}$  относительно нулевого значения.

Смещение нужно принимать численно равным нижней границе первого частичного интервала из таблицы ряда распределения случайной величины.

### **Выбор теоретического закона распределения**

Опытная исходная информация об изменениях случайной величины обычно представляет собой некоторую выборку из всей генеральной совокупности возможных значений случайной величины. Поэтому ряд распределения и эмпирическая интегральная функция, наряду с числовыми характеристиками распределения, содержат ошибки исходной информации. К тому же на них отражается некоторый произвол в выборе количества и границ частичных интервалов при статистической обработке опытных данных.

Однако эти ошибки можно аннулировать, если подобрать и использовать при определении показателей надежности деталей теоретический закон распределения.

Теоретический закон распределения выражает общий характер изменения показателей надежности машин и исключает частные отклонения, связанные с недостатками первичной информации. По опытному распределению вычисляют различные показатели, которые будут характеризовать среднее значение признака и его рассеяние. Затем на основе всестороннего анализа этих данных, общих теоретических предпосылок и особенностей теоретических распределений подбирают то распределение, которое ближе всего аппроксимирует опытное распределение случайной величины. Такой процесс замены опытных закономерностей теоретическими в теории вероятностей и математической статистики называют процессом выравнивания, или сглаживания, статистической информации.

Применительно к надежности сельскохозяйственной техники используются в основном закон нормального распределения и закон распределе-

ния Вейбулла. Предварительно выбор теоретического закона распределения осуществляется по величине коэффициента вариации  $v$ .

Действительно теоретический закон распределения случайной величины может быть точно установлен лишь по данным наблюдений, включающим несколько тысяч значений исследуемой случайной величины. Однако при практических инженерных расчетах надежности изделий в большинстве случаев уже примерно известны возможные теоретические законы распределения, а окончательный выбор одного из них проводится с использованием предварительно обоснованных научными исследованиями критериями. Так, в практических заданиях выбор теоретического закона распределения ресурса гильзы может проводиться по значению коэффициента вариации:

если  $v \leq 0,33$  выбирается нормальный закон распределения;

если  $v \geq 0,33$  выбирается закон распределения Вейбулла.

Плотность распределения при нормальном законе распределения задают формулой

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\bar{t})^2}{2\sigma^2}}, \quad (3.9)$$

где  $t$  – параметр надежности (является случайной величиной);

$\bar{t}$  – среднее значение (математическое ожидание);

$\sigma$  – среднеквадратическое отклонение;

$\pi$  – постоянное число, равно 3,14;

$e$  – натуральное число,  $e = 2,71828$ .

Интегральная функция распределения  $F(t)$  определяется интегрированием функции плотности вероятности  $f(t)$

$$F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} e^{-\frac{(t-\bar{t})^2}{2\sigma^2}} dt \quad (3.10)$$

Поскольку в примере  $\nu = 0,472$ , что больше  $0,33$ , то принимаем теоретический закон распределения Вейбулла.

Дифференциальная функция и интегральная функция определяются

$$f(t) = \frac{b}{a} \left( \frac{t}{a} \right)^{b-1} \times e^{-\left( \frac{t}{a} \right)^b} \quad (3.11)$$

$$F(t) = 1 - e^{-\left( \frac{t}{a} \right)^b}, \quad (3.12)$$

где  $a$  и  $b$  – коэффициенты закона распределения Вейбулла;

$e$  – натуральное число,  $e = 2,71828$ ;

$t$  – показатель надежности.

Коэффициенты  $a$  и  $b$  для закона распределения Вейбулла находятся по таблице приложения В соответственно значению коэффициента вариации  $\nu$  (метод моментов). Таким образом,  $b = 2,24$ ,  $K_b = 0,886$ ,  $C_b = 0,418$ .

Определяем коэффициент  $a$ :  $a = \frac{\sigma}{C_b} = \frac{1,055}{0,418} = 2,52$  тыс. мото-ч.

Значения  $f(t)$  и соответственно  $T_{ci}$  (середина частичного интервала) и  $F(t)$  соответственно  $T_i^b$  (верхняя граница частичного  $i$ -го интервала) определяются из таблиц в приложении Г и Д. Определяем значения  $f(t)$  и  $F(t)$ .

Результаты определения значений  $f(t)$  и  $F(t)$  представляют в виде таблицы 3.3.

Таблица 3.3 - Определение значений  $f(t)$  и  $F(t)$  по частичным интервалам

Частичные интервалы, тыс. мото-ч	0 – 1	1 – 2	2 – 3	3 – 4	4 – 5
$T_{ci}$	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5
$T_{ci}/a$	0,198	0,595	0,995	1,390	1,786
$a \times f(t)$	0,318	0,815	0,828	0,388	0,122
$f(t)$	0,126	0,335	0,328	0,151	0,048
$T_i^b$	1	2	3	4	5
$T_i^b/a$	0,397	0,793	1,190	1,587	1,984
$F(t)$	0,122	0,455	0,773	0,942	0,990

Значения  $f(t)$  и  $F(t)$  из таблиц в приложениях Г и Д используются для построения графиков соответствующих функций в тех же осях координат, что и эмпирическая интегральная функция распределения. Дифференциальная функция  $f(t)$  строится на рисунке 3.1, причем расчетные значения  $f(t)$  соответствуют серединам частичных интервалов, а теоретическая интегральная функция – на рисунке 3.2, где расчетные значения  $F(t)$  соответствуют верхним границам частичных интервалов.

По графику теоретической интегральной функции распределения можно установить  $\gamma$  – процентный ресурс гильзы и определить вероятность такого события, что ресурс гильзы будет находиться в некоторых пределах. Например, 80 % гамма ресурс (рисунок 3.2) для гильзы цилиндров двигателя ЯМЗ-238 в условиях наблюдения составил 1660 мото-ч. Это означает, что 20 % гильз к моменту достижения наработки 1660 мото-ч исчерпают свой ресурс, а 80 % гильз останутся работоспособными и их  $T_{др}$  превысит 1660 мото-ч.

По графику  $F(t)$  (рисунок 3.2) можно определить вероятность события, что гильза до ремонта наработает не менее 2000 мото-ч, но не более 3000 мото-ч, т.е., что  $T_{др}$  гильзы будет находиться в пределах от 2000 до 3000 мото-ч. Из рисунка 3.2 видно, что для примера  $P(2000 \leq T_{др} \leq 3000) = 0,62 - 0,29 = 0,33$ . следовательно, треть гильз будет нуждаться в ремонте после наработки от 2000 до 3000 мото-ч.

Окончательный выбор теоретического закона распределения по доремонтным ресурсам гильз цилиндров двигателя ЯМЗ-238 выполняют с помощью критерия согласия. Применительно к показателям надежности сельскохозяйственной техники чаще всего используют критерий Пирсона  $\chi^2$  и критерий Колмогорова  $\lambda$ . По величине критерия согласия можно определить вероятность совпадения опытных и теоретических законов и на этом основании принять или отбросить выбранный теоретический закон из двух или нескольких. Следует помнить, что критической вероятностью совпадения принято считать  $P = 0,1$ . Если  $P < 0,1$ , то выбранный для выравнивания

опытной информации теоретический закон распределения следует считать недействительным.

Критерий Пирсона дает более точную вероятность совпадения опытного и теоретического законов распределения, но он и сложен в расчетах. Критерий Колмогорова прост в определении, но дает, как правило, завышенную вероятность совпадения. Однако при выборе одного закона из двух или нескольких, когда важно оценить какой из них лучше выравнивает опытную информацию, можно пользоваться критерием Колмогорова. Критерий согласия Колмогорова определяют по формуле:

$$\lambda = D_{\max} \sqrt{N}, \quad (3.13)$$

где  $D_{\max}$  – максимальная абсолютная разность между накопленной опытной вероятностью и теоретической интегральной функцией распределения, то есть

$$D_{\max} = \max \left| \sum_{i=1}^n P_i - F(T_{gi}) \right| \quad (3.14)$$

Разницу между опытным и теоретическим значениями функций определяют для каждого интервала. Выбрав окончательно теоретический закон распределения, наносим его на график (рисунок 3.2).

### **Определение доверительных границ рассеяния**

Нахождение среднего ресурса гильзы заключается в отыскании центра рассеивания распределения, относительно которого группируются отдельные значения ресурса, установленные за 70-ю гильзами цилиндров двигателя ЯМЗ-238. Центр рассеивания может быть определен некоторым числом – средним арифметическим значением, которое уже известно (это является точечной оценкой среднего ресурса гильзы), или может быть указан интервал значений ресурса (верхняя и нижняя границы), который с некоторой доверительной вероятностью, или достоверностью, включает в себя

центр рассеивания ресурса как случайной величины – последнее является интервальной оценкой  $T_{\partial p}$ .

### Определение относительной ошибки расчета

Преимущество интервальной оценки состоит в том, что получают результат с наперед заданной достоверностью. В расчетах достаточно провести оценку с доверительной вероятностью  $\alpha = 0,80$ . При необходимости получить результат с большей достоверностью принимают  $\alpha = 0,90 \dots 0,95$ .

Второе преимущество интервальной оценки – возможность определения наибольшей относительной погрешности расчета  $\pm e_\alpha$ , которая подсчитывается по формулам:

$$+ e_\alpha = \frac{\overline{T}_{\partial p}^\epsilon - \overline{T}_{\partial p}}{\overline{T}_{\partial p}}, \quad (3.15)$$

$$- e_\alpha = \frac{\overline{T}_{\partial p}^H - \overline{T}_{\partial p}}{\overline{T}_{\partial p}}, \quad (3.16)$$

где  $\overline{T}_{\partial p}^\epsilon$  и  $\overline{T}_{\partial p}^H$  – верхняя и нижняя границы доверительного интервала среднего значения ресурса.

В соответствии с законом распределения Вейбулла доверительные границы среднего значения определяют следующим образом:

$$\overline{T}_{\partial p}^\epsilon = \overline{T}_{\partial p} \sqrt[\epsilon]{r_1}; \quad \overline{T}_{\partial p}^H = \overline{T}_{\partial p} \sqrt[\epsilon]{r_3}, \quad (3.17)$$

где  $\epsilon$  – параметр распределения Вейбулла;

$r_1$  и  $r_3$  – коэффициенты, устанавливаемые по таблице (приложение Е) соответственно объему наблюдений  $N$  и принятой доверительной вероятности.

Для рассматриваемого примера  $N = 70$ , при  $\alpha_1 = 0,80$  коэффициенты  $r_1 = 1,11$  и  $r_3 = 0,905$ ; а при  $\alpha_2 = 0,95$  коэффициенты  $r_1 = 1,23$  и  $r_3 = 0,83$ . Тогда  $\overline{T_{оп\alpha=0,80}^g} = 2,74^{2,24}\sqrt[24]{1,11} = 2,74 \times 1,048 = 2,87$  тыс. мото-ч.

$$\text{и } \overline{T_{оп\alpha=0,80}^H} = 2,74^{2,24}\sqrt[24]{0,905} = 2,74 \times 0,9554 = 2,62 \text{ тыс. мото-ч.}$$

При  $\alpha_2 = 0,95$  верхняя граница доверительного интервала  $\overline{T_{оп\alpha=0,95}^g} = 2,74^{2,24}\sqrt[24]{1,23} = 2,74 \times 1,096 = 3,00$  тыс. мото-ч и нижняя граница доверительного интервала  $\overline{T_{оп\alpha=0,95}^H} = 2,74^{2,24}\sqrt[24]{0,83} = 2,74 \times 0,9202 = 2,52$  тыс. мото-ч.

Таким образом, с доверительной вероятностью  $\alpha = 0,80$  можно утверждать, что  $\overline{T_{оп}}$  заключен в интервале от 2,62 до 2,87 тыс. мото-ч. При повышении достоверности результатов расчета среднего значения случайной величины границы доверительного интервала расширяются. При  $\alpha = 0,95$  средний ресурс  $\overline{T_{оп}}$  заключен в интервале от 2,52 до 3,00 тыс. мото-ч.

В заключении расчета определяется наибольшая возможная относительная погрешность среднего значения ресурса:

$$\begin{aligned} +e_{\alpha=0,80} &= \frac{2,87 - 2,74}{2,74} = 0,0486; \\ -e_{\alpha=0,80} &= \frac{2,62 - 2,74}{2,74} = -0,0437; \\ +e_{\alpha=0,95} &= \frac{3,00 - 2,74}{2,74} = 0,0948; \\ -e_{\alpha=0,95} &= \frac{2,52 - 2,74}{2,74} = -0,0803. \end{aligned}$$

Следовательно, проводя интегральную оценку среднего значения ресурса с большей достоверностью, получают результат с меньшей точностью, т.е. с большей относительной погрешностью.

Для удобства расчета относительную ошибку  $\delta$  определяют в процентах от среднего значения показателя надежности независимо от закона распределения:

$$\delta = \frac{\bar{T}_{\partial p \alpha} - \bar{T}_{\partial p}}{\bar{T}_{\partial p} - t_{cm}} \times 100\%$$

где  $t_{cm}$  – смещение статистического ряда.

### **Контрольные вопросы**

- 1 Составление статистического ряда.
- 2 Как определить протяженность интервала статистического ряда.
- 3 Определить числовые характеристики опытной информации.
- 4 Проверка информации на наличие выпадающих точек.
- 5 Выбор теоретического закона распределения показателей надежности по данным опытной информации.
- 6 Определить доверительные границы рассеяния опытной информации.

### **Литература**

- 1 Пучин Е.А. и др. Надежность технических систем – М : УМЦ «Три-ада». 2005. – 353 с.
- 2 Курчаткин В. В. и др. Надежность и ремонт машин – М. : Колос, 2000. - 776 с.
- 3 Шишкин Г. М. Теоретические основы надежности и ремонта сельскохозяйственной техники / Г. М. Шишкин. – Иркутск : ИрГСХА, 2005. - 1060 с.

## ***Лабораторная работа № 4***

### **Определение полного ресурса соединения и допустимых износов без ремонта размеров соединяемых деталей**

#### **Цели работы**

- 1 Изучить теоретические основы проведения дефектации деталей и соединений.
- 2 Ознакомиться со схемой расчета ресурсов, предельных и допустимых износов деталей соединения.
- 3 Приобрести навыки определения полного ресурса деталей и допустимых размеров соединяемых деталей.

#### **Теоретические сведения**

Полный ресурс детали или соединения – наработка от начала эксплуатации и до списания. Полный ресурс деталей или соединений ограничивается предельным состоянием.

Предельное состояние – состояние машины или ее элемента, при котором дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление ее работоспособности невозможно или нецелесообразно в результате достижения предельного состояния эксплуатации машины, нарушения безопасности, или её неустранимого изменения заданных параметров, обуславливающих экономичную целесообразность списания детали.

Дефектация – контроль технического состояния деталей и узлов при ремонте машин – является одним из важнейших этапов технологического процесса. Производится на специальных рабочих местах, оснащенных необходимыми комплектами приборов и инструментов.

Контроль деталей проводится на основании “технических требований на капитальный ремонт” обязательных для ремонтных предприятий.

Среднюю скорость изнашивания детали по данным проведенных измерений вычисляют по формуле

$$\overline{W}_I = \frac{U_{изм}}{T_{изм}}, \quad (4.1)$$

где  $U_{изм}$  - износ детали на момент измерения, мм;

$T_{изм}$  - ресурс детали на момент измерения, мото-ч.

Среднюю скорость изнашивания соединения вычисляют по формуле:

$$\overline{W}_c = \frac{S_{изм} - S_{н. max}}{T_{изм}}, \quad (4.2)$$

где  $S_{изм}$  – измеренная величина зазора в соединении, мм вычисляют по формуле

$$S_{изм} = D_{изм} - d_{изм} \quad (4.3)$$

$S_{н. max}$  – начальный зазор в соединении из технических требований на ремонт соединения в соответствии с таблицей 4.1, мм.

Таблица 4.1 - Данные из технических требований на ремонт соединения “поршневой палец – втулка шатуна”

Соединяемые детали	Размеры деталей, мм	Зазор в соединении, мм		
	Начальный диаметр	Начальный $S_n$	Допустимый $S_{др}$	Предельный $S_{пр.}$
Втулка	$42^{+0.038}_{+0.023}$	От 0,022 До 0,047	0,15	0,25
Поршневой палец	$42^{+0.001}_{-0.009}$			

Средний остаточный ресурс соединения вычисляют по формуле:

$$\bar{T}_{co} = \frac{S_{np} - S_{изм}}{W_C}, \quad (4.4)$$

где  $S_{np}$  – предельный зазор в соединении из технических условий на дефектацию соединения в соответствии с таблицей 4.1, мм.

Доверительные границы среднего остаточного ресурса ( $T_{co}$ ) соединения вычисляют по формулам:

$$T_{oc}^H = 0,70 T_{co}; \quad (4.5)$$

$$T_{oc}^B = 1,35 T_{co} \quad (4.6)$$

По данным технической документации, полный средний ресурс детали соединения в соответствии с рисунком 4.1 вычисляют по формулам:

$$\bar{T}_{он} = \frac{I_{np}}{I_{np} - I_{др}} \bar{T}_{mp} \quad (4.7)$$

$$\bar{T}_{сн} = \frac{S_{np} - S_{H \max}}{S_{np} - S_{др}} \bar{T}_{mp} \quad (4.8)$$

где  $I_{np}$  и  $I_{др}$  - соответственно предельный и допустимый износы, мм;  
 $S_{H \max}$ ,  $S_{np}$  и  $S_{др}$  - соответственно начальный максимальный, предельный и допустимый зазоры из технических требований на ремонт соединения в соответствии с рисунком мм;

$T_{mp}$  - установленная величина межремонтного ресурса, мото-ч. Предельный износ вычисляют по формуле:

$$I_{np} = I_{др} \frac{S_{np} - S_{H \max}}{S_{np} - S_{др}} \quad (4.9)$$

Предельные размеры втулки и поршневого пальца вычисляют по формулам:

$$\text{втулка } D_{np} = D_{н. \max} + I_{np}, \quad (4.10)$$

$$\text{поршневой палец } d_{np} = d_{н. \min} - I_{np} \quad (4.11)$$

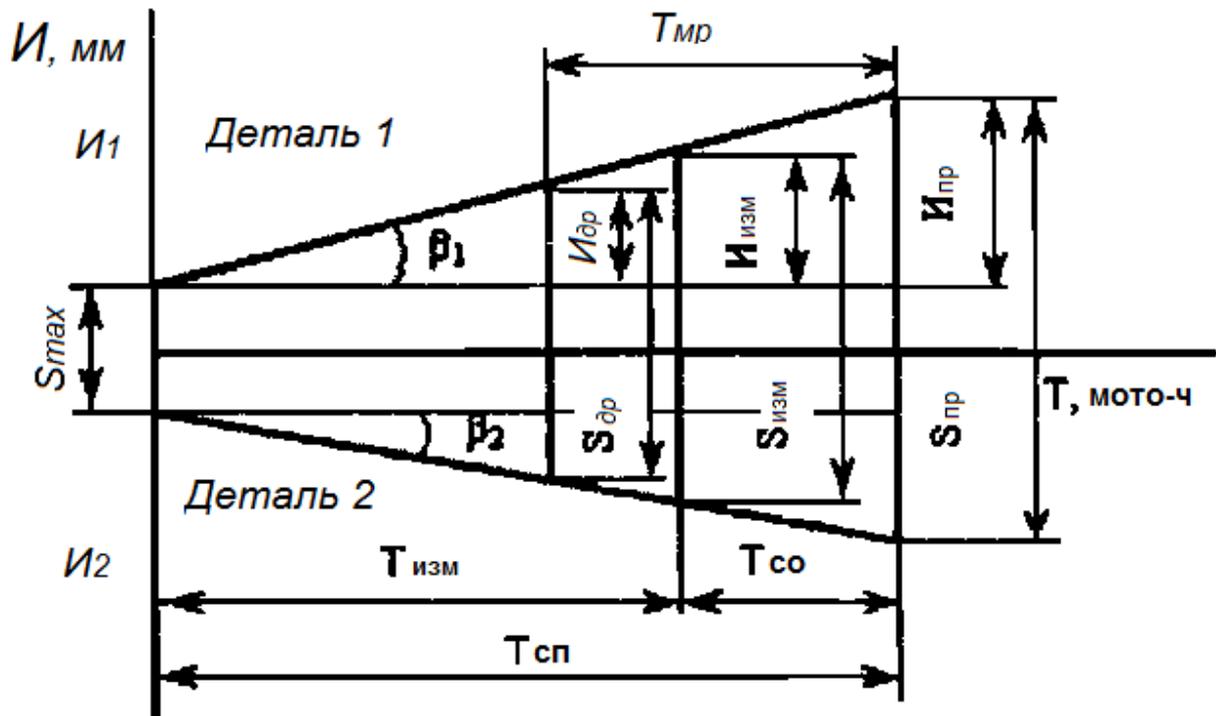


Рисунок 4.1 - Схема расчета среднего полного ресурса соединения, предельных и допустимых износов деталей

Допустимые без ремонта размеры втулки и поршневого пальца, вычисляют по формулам:

$$\text{втулка} \quad D_{др} = D_{\max} + T_{мр} \times W_{вт}, \quad (4.12)$$

$$\text{поршневой палец} \quad d_{др} = d_{\min} - T_{мр} \times W_{пш}. \quad (4.13)$$

Допустимые износы втулки и поршневого пальца вычисляют по формулам:

$$\text{втулка} \quad I_{др} = D_{др} - D_{н.\max}, \quad (4.14)$$

$$\text{поршневой палец} \quad I_{др} = d_{н.\min} - d_{др}. \quad (4.15)$$

## Пример расчета полного ресурса соединения

Измерением соединения “поршневой палец-втулка шатуна”, проведенным через заданную наработку  $T_{\text{изм}} = 2420$  мото-ч. двигателя СМД-14, определены диаметры втулки верхней головки шатуна и поршневого пальца в местах их наибольшего износа:  $D_{\text{изм}} = 42,05$  мм;  $d_{\text{изм}} = 41,95$  мм.

Межремонтный ресурс  $T_{\text{мр}} = 4800$  мото-ч.

Требуется определить остаточный ресурс соединения, доверительные границы при  $\beta = 0,80$ , предельные и допустимые при ремонте размеры втулки и поршневого пальца.

1 Среднюю скорость изнашивания соединения вычисляют по формуле

$$\overline{W}_c = \frac{(42,05 - 41,95) - 0,047}{2420} = 2 \times 10^{-5} \text{ мм/мото-ч}$$

2 Средний остаточный ресурс соединения вычисляют по формуле

$$\overline{T}_{CO} = \frac{0,25 - 0,1}{2 \times 10^{-5}} = 7500 \text{ мото-ч}$$

3 Доверительные границы остаточного ресурса соединения вычисляют по формулам (4.5) и (4.6)

$$T_{CO}^H = 0,70 \times 7500 = 5250 \text{ мото-ч}$$

$$T_{CO}^B = 1,35 \times 7500 = 10125 \text{ мото-ч}$$

4 Полный ресурс соединения в соответствии с техническими требованиями (табл. 4.1) вычисляют по формуле (4.8):

$$\overline{T}_{Cn} = \frac{4800(0,25 - 0,047)}{0,25 - 0,15} = 9744 \text{ мото-ч}$$

5 Среднюю скорость изнашивания втулки и поршневого пальца вычисляют по формуле (4.1):

втулка: 
$$\overline{W_{вт}} = \frac{42.05 - 42.038}{2420} = 0,5 \times 10^{-5} \frac{\text{мм}}{\text{мото-ч}}$$

поршневой палец: 
$$\overline{W_{пн}} = \frac{41,991 - 41,95}{2420} = 1,7 \times 10^{-5} \frac{\text{мм}}{\text{мото-ч}}$$

6 Допустимые без ремонта размеры деталей соединения вычисляют по формулам (4.10) и (4.11):

втулка: 
$$D_{др} = 42,038 + 4800 \times 0,5 \times 10^{-5} = 42,06 \text{ мм}$$

поршневой палец: 
$$d_{др} = 41,991 - 4800 \times 1,7 \times 10^{-5} = 41,91 \text{ мм}$$

7 Допустимые износы втулки и поршневого пальца по техническим условиям вычисляют по формулам:

втулка: 
$$I_{др} = 42,06 - 42,038 = 0,02 \text{ мм}$$

поршневой палец: 
$$I_{др} = 41,991 - 41,91 = 0,08 \text{ мм}$$

8 Предельные износы втулки и поршневого пальца в соответствии с таблицей 4.1 вычисляют по формуле (4.9):

втулка 
$$I_{пр} = 0,02 \frac{0,25 - 0,047}{0,25 - 0,1} = 0,4 \text{ мм}$$

поршневой палец 
$$I_{пр} = 0,08 \frac{0,25 - 0,047}{0,25 - 0,10} = 0,16 \text{ мм}$$

9 Предельные размеры втулки и поршневого пальца вычисляются по формулам (4.10) и (4.11):

втулка 
$$D_{пр} = 42,038 + 0,04 = 42,078 \text{ мм}$$

поршневой палец 
$$d_{пр} = 41,991 - 0,16 = 41,831 \text{ мм}$$

Значения измерений для выполнения расчетов полного ресурса соединения и допустимых без ремонта размеров, соединяемых деталей приведены в приложении 3.

## **Порядок выполнения работы**

- 1 Получить детали соединения.
- 2 Из технических требований на ремонт определить:
  - размер детали по чертежу
  - начальный зазор;
  - допустимый зазор;
  - предельный зазор.
- 3 Установить наработку соединения на момент измерения деталей.
- 4 Выполнить расчеты.
- 5 Вычертить расчетную схему изнашивания деталей соединения.
- 6 Оформить отчет по работе.

## **Контрольные вопросы**

- 1 Что такое технический ресурс изделия?
- 2 Что такое предельное состояние детали?
- 3 Что такое дефектация?
- 4 Как определить полный ресурс соединения.
- 5 Методика определения допустимых без ремонта размеров деталей соединения?

## **Литература**

- 1 Курчаткин В. В, Тельнов Н. Ф., Ачкасов , Башишев А.Н. и др. Надежность и ремонт машин – М : Колос, 2000. – 776 с.
- 2 Варнаков В.В., Стрельцов В.В., Попов В.Н., Карпенков В.Ф. Технический сервис машин с/х назначения – М. : Колос, 2003. – 292 с.

## *Лабораторная работа № 5*

### **Испытание материалов на усталостную прочность**

#### **Цели работы**

- 1 Ознакомиться с методикой получения критерия прочности стальных и чугунных деталей машин при динамическом нагружении и особенностями применения этого критерия в инженерной практике;
- 2 Изучить методику и оборудование, практические навыки проведения испытаний на усталостную прочность образцов.

#### **Теоретические сведения**

Одной из основных проблем в науке о механической прочности сталей является изучение циклической прочности и создание практических методов повышения этой прочности.

Проблема усталости, т.е. разрушение металлов под действием циклически изменяющихся напряжений, более низких, чем предел выносливости, возникла более ста лет назад и с тех пор интерес к ней все увеличивается. Это связано с тем, что многие ответственные детали машин работают в условиях повторных, знакопеременных нагрузок и их ресурс целиком определяется циклической прочностью металлов, из которых они изготовлены.

Усталость металла – процесс постепенного возникновения и развития трещин под влиянием многократных повторных силовых воздействий.

Место, где зародилась трещина усталости, называется фокусом излома. Под действием переменной нагрузки трещина медленно распространяется в глубь тела детали, образуется зона усталостного развития излома. На изломе эта зона имеет ступеньки, рубцы. Когда уцелевшее сечение тела становится меньше допустимого, деталь разрушается.

Характер усталостного разрушения зависит от вида напряженного состояния, в связи с чем различают усталость при растяжении – сжатии, изгибе, кручении и контактную усталость.

Наиболее характерными деталями, подверженными усталостному разрушению, являются коленчатые валы, шатуны, шатунные болты, зубья шестерен, кольца подшипников, пружины, торсионные валы.

Все инженерные теории прочности, классические и энергетические, за основной критерий прочности принимают предел прочности металла при простом растяжении – сжатии, так как эта величина наиболее просто и сравнительно точно определяется экспериментально. Наиболее используемые в расчетно-конструкторской практике являются следующие теории прочности – теория наибольших нормальных напряжений; теория наибольших линейных деформаций; теория наибольших касательных напряжений; энергетическая теория; дислокационная теория и другие.

С кинематической точки зрения можно указать на различные случаи изменения нагрузки во времени периодической закономерности (рисунок 5.1.)

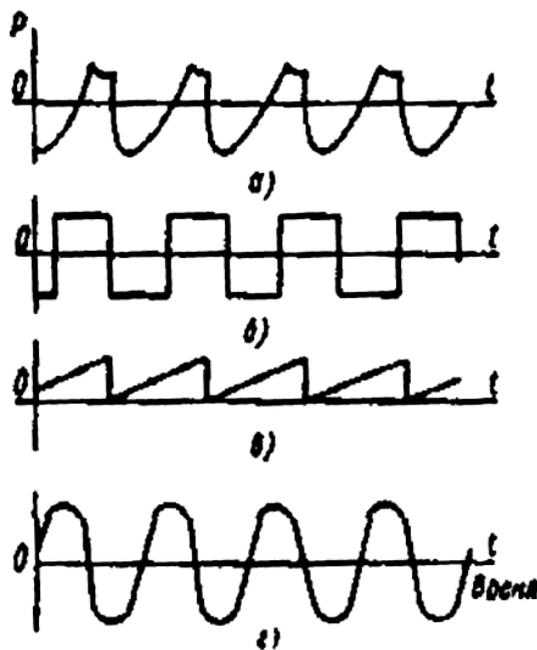


Рисунок 5.1 - Изменение циклических нагрузок, наиболее часто встречающихся в практике эксплуатации деталей машин

Чаще всего напряжения в деталях изменяются во времени по синусоидальному закону или могут быть представлены в виде суммы синусоидальных гармоник, что значительно облегчает расчеты.

Для общего случая синусоидальные циклы изменения напряжений  $\sigma$  во времени  $t$  в виде графиков приведены на рисунке 5.2.

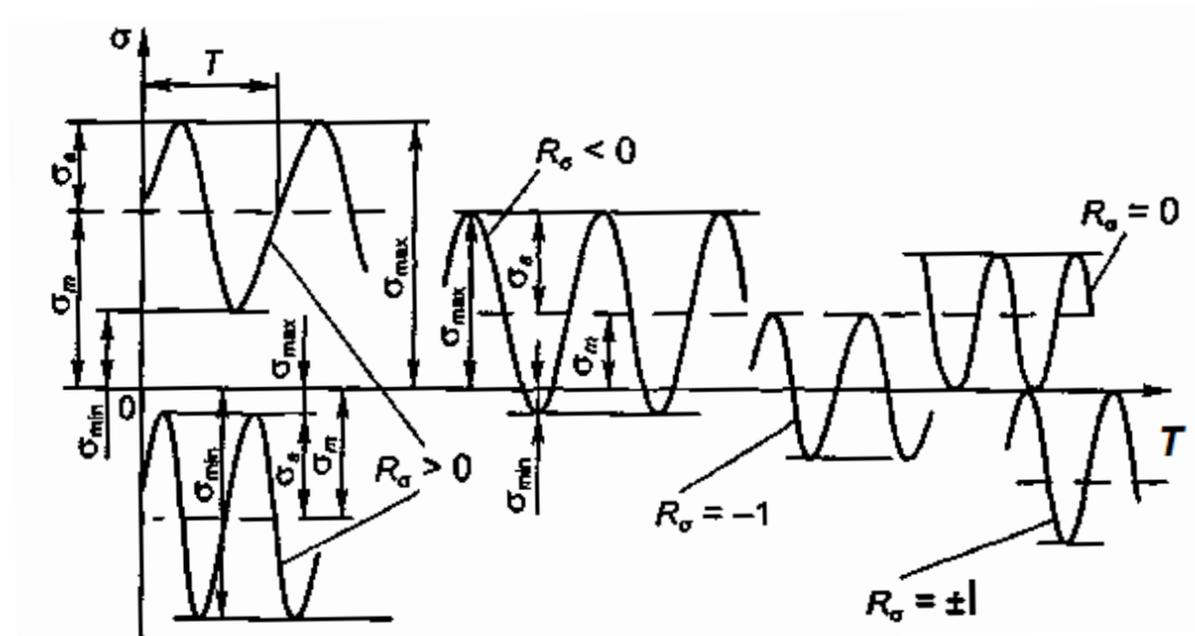


Рисунок 5.2 - Циклы изменения напряжений

Основными характеристиками цикла являются (ГОСТ 23207-78):  $\sigma_{\max}$  - максимальное напряжение цикла;  $\sigma_{\min}$  - минимальное напряжение цикла;  $a_a$  - амплитуда напряжений цикла;  $R_\sigma = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$  - коэффициент асимметрии цикла напряжений;  $\sigma_m$  - среднее напряжение цикла напряжений;  $T$  - период цикла (время, в течение которого напряжение дважды принимает одно из предельных значений). Характерными для деталей машин являются циклы асимметричные знакопостоянные ( $R_\sigma > 0$ ) и знакопеременные ( $R_\sigma < 0$ ), симметричные ( $R_\sigma = -1$ ) и отнулевые ( $R_\sigma = 0$  и  $R_\sigma = \pm \infty$ ).

Приблизительные количества циклов напряжений, которые приходится им испытывать в течение нормального срока службы, которые дают суждения о долговечности элементов машин:

Число циклов

Вагонные оси.....	$50 \cdot 10^6$
Коленчатые валы авиационных двигателей .....	$18 \cdot 10^6$
Коленчатые валы автомобильных двигателей .....	$120 \cdot 10^6$
Железнодорожные рельсы .....	$15 \cdot 10^6$
Оси железнодорожных локомотивов .....	$400 \cdot 10^6$
Поршневые штоки, шатуны.....	$1000 \cdot 10^6$
Валы паровых турбин.....	$15000 \cdot 10^6$

Экспериментально установлено, что с увеличением напряжений число циклов, которое может выдержать образец до разрушения, постепенно уменьшается и для большинства черных металлов существует такое максимальное по абсолютному значению напряжение цикла  $\delta_{\max}$ , при котором материал не разрушается при любом числе циклов. Такое напряжение называется пределом выносливости  $\delta_R$  и обозначается: для симметричного цикла ( $\delta_R = -1$ ) –  $\delta_{-1}$ ; а для отнулевого ( $R_\delta = 0$ ) –  $\delta_0$ .

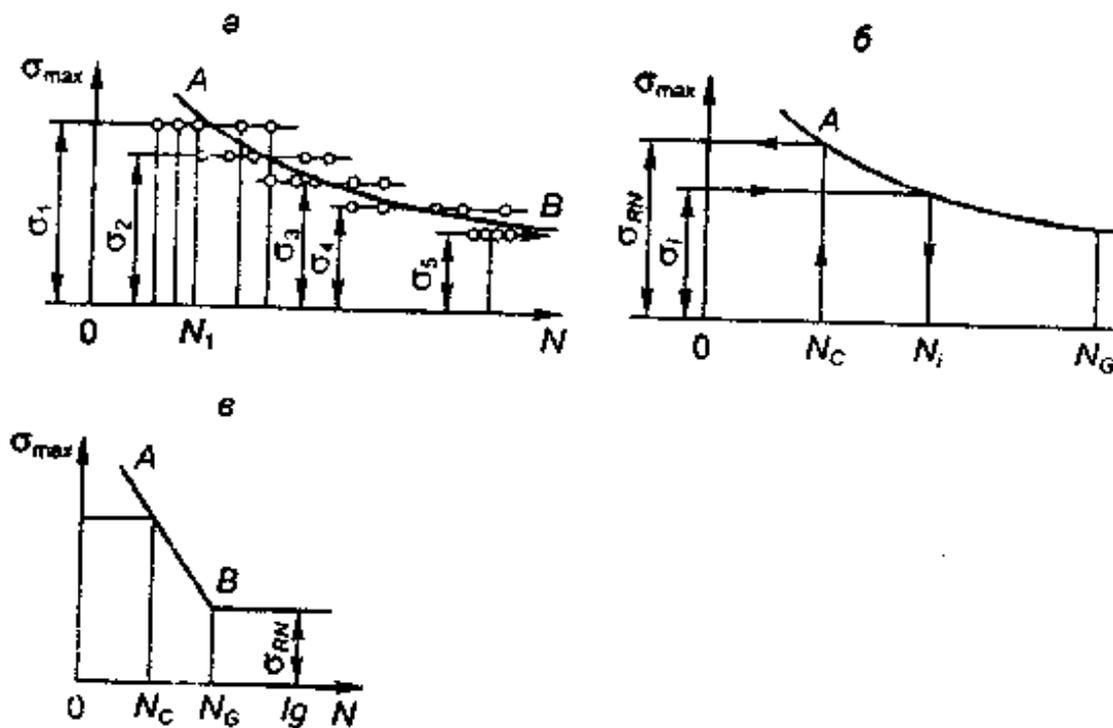


Рисунок 5.3 – Кривые усталости металлов

На рисунке 5.3а, б, в системе координат  $\delta_{\max} - N$  нанесены экспериментальные точки, соответствующие предельным числам циклов напряжений  $N$ , выдержанных образцами до усталостного разрушения при различных уровнях напряжений ( $\delta_1 - \delta_4$ ). Величину  $N$  называют циклической долговечностью. При напряжении  $\delta_5$  разрушение не возникло (отмечено стрелкой).

На основании результатов усталостных испытаний строят кривую усталости. Кривая усталости – график, характеризующий зависимость между максимальными напряжениями (деформациями), или амплитудами цикла, и циклической долговечностью одинаковых образцов, построенный либо при равных для всех образцов средних напряжениях (деформациях, амплитудах) цикла, либо при одинаковом для всех образцов коэффициенте асимметрии цикла.

Результаты исследований показывают, что с ростом  $N \cdot d\delta/dN$  уменьшается по абсолютной величине и обычно кривая усталости имеет горизонтальную асимптоту. Значение  $N$ , соответствующие точке перелома кривой усталости, представленной двумя прямыми линиями (точка В на рисунке 5.3,б) обозначают  $N\delta$  и принимают обычно за базу испытаний на усталость. База – это условное количество циклов, которое выдерживает образец до разрушения. Если при базовом количестве образец не разрушается, то принято считать, что разрушение не произойдет при любом количестве циклов. Для черных металлов за базу принимают  $N = 3 \cdot 10^6 - 10 \cdot 10^6$ , для цветных –  $N = 5 \cdot 10^7$ . При испытаниях также различают малоцикловую  $N \leq 10^6$  и многоцикловую  $N > 10^6$  усталость.

Максимальное по абсолютному значению напряжение цикла, соответствующее задаваемой циклической долговечности  $N_C < N_G$  называется пределом ограниченной выносливости и обозначается  $\delta_{RN}$  (рисунки 5.3, в).

С удовлетворительной точностью участок АВ кривой усталости аппроксимируется зависимостью

$$\delta_{RN}^m \cdot N_C = \text{const}, \quad (5.1)$$

$$\delta_i^m N_i = \text{const}, \quad (5.2)$$

где  $\delta$  – заданный уровень напряжения;

$m$  – показатель степени.

По кривой усталости при заданном значении  $N_C$  определяют  $\delta_{NR}$ , а при заданном уровне напряжения  $\delta_i - N_i$  (рисунок 5.3,б). Поэтому наклонный участок АВ представляют уравнением (5.1) или (5.2).

Показатель степени  $m$  зависит от вида напряженного состояния, формы детали, механических характеристик материала, способа термической обработки и равен обычно 6-9. При таких значениях  $m$  снижение  $\delta_i$  при испытаниях связано с резким увеличением  $N_i$ . Для получения компактного графика используют логарифмическую шкалу по оси абсцисс. Широко применяют логарифмические шкалы и по обеим осям ординат, при этом наклонный участок кривой усталости является прямой линией (рисунок 5.3, в). Изломы представляют собой непосредственный результат.

Нарушения стойкости материала и являются своеобразной фотографией истории разрушения. Особую актуальность фактографические исследования приобретают при анализе усталостных изломов вследствие особенностей поверхностей разрушения.

Строение усталостных изломов зависит в основном от: вида нагружения в процессе зарождения и развития усталостной трещины; сопротивления разрушенной детали, определяемого ее геометрической формой, свойствами материала и состоянием поверхности; воздействием внешней среды.

Характер линий фронта трещины дают ценные сведения об условиях роста трещины. Как правило, они расходятся от очага разрушения и их называют концентрическими кольцами усталости.

На рисунке 5.4 представлена схема типичных усталостных изломов, возникающих при различном уровне номинального напряжения для случая двухстороннего изгиба с вращением и растяжения – сжатия.



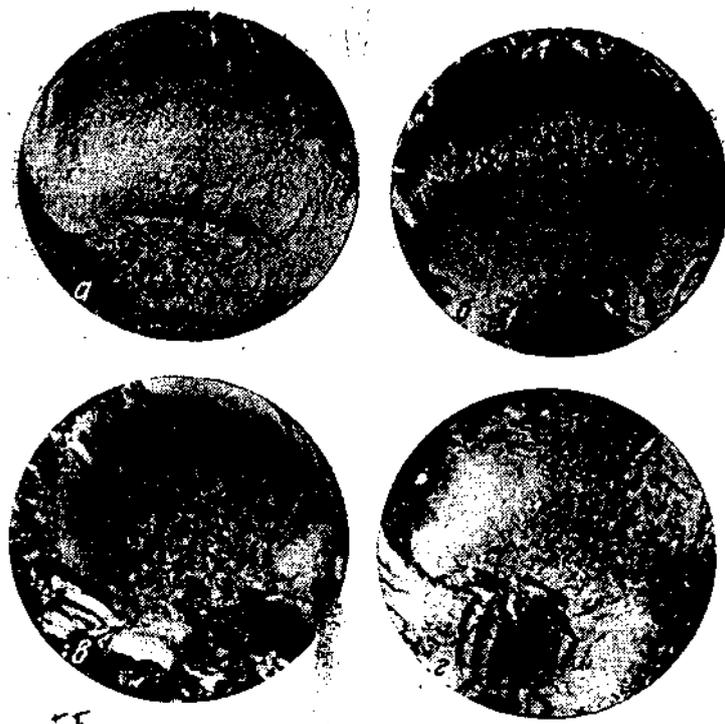


Рисунок 5.5 - Изломы образцов испытанных на выносливость (образцы выдержали  $1 \cdot 10^6$  и более циклов)  $\times 2,5$

В настоящее время отсутствует единая теория, объясняющая явление усталостного разрушения металла. Существует несколько гипотез: упрочнения и рузупрочнения (И.А. Одингга), статистическая теория прочности Вейбулла и Н.Н. Афанасьева, эффект Ребиндера и др.

Усталостная прочность зависит от различных факторов.

Концентрация напряжений вызывается следующими группами параметров:

- геометрическими (надрезы, отверстия, выточки, канавки, резьба, места сопряжения галтелями, в которых резко изменяется поперечное сечение детали, и др.);

- технологическими (наличие дефектов на поверхности детали, вызванных механической обработкой);

- металлургическими (присутствие в металле вторичных фаз, включений внутренних дефектов, пор, трещин и т.д.);

- эксплуатационными (приложение сосредоточенных сил, например контактные напряжения в зубьях зубчатых колес, подшипниках и т.д.);

В местах наличия концентратора напряжений появляются значительные по величине напряжения (рисунок 5.6), район распространения этих напряжений невелик, поэтому они называются местными.

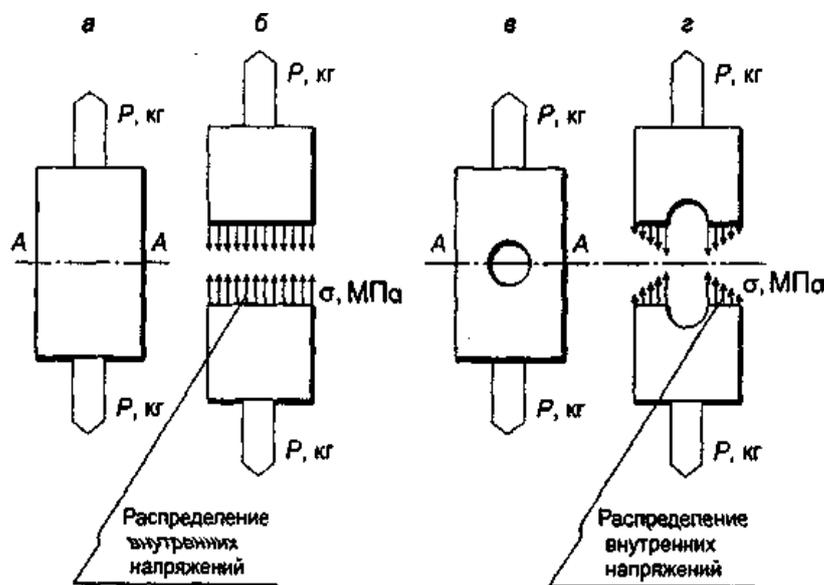


Рисунок 5.6 - Влияние концентратора напряжений на изменение эпюры напряжений:

а, б – без концентратора напряжений;

в, г – с концентратором

Закономерность появления и распределения местных напряжений объясняются сгущением траекторий напряжений при их дифракции в районе концентратора.

Место концентрации напряжений наибольшей величины зависит от конфигурации концентратора, способа приложения внешней нагрузки и других условий, влияющих на распределение напряжений. Местные напряжения меняют эпюру распределения напряжений в местах наличия концентраторов (рисунок 5.6).

Отношение наибольшего напряжения в районе концентрации ( $\delta_{\max}$  или  $T_{\max}$ ) к среднему номинальному напряжению ( $\delta_H$  или  $T_H$ ) называется коэффициентом концентрации напряжений тем меньше, чем лучше обтекаемость концентратора, и наоборот.

Различные материалы по разному чувствительны к концентраторам напряжений.

Различают теоретический ( $\alpha_k$ ) и действительный ( $\beta_k$ ). Коэффициенты концентрации напряжений.

Теоретический коэффициент концентрации напряжений учитывает зависимость величины местных напряжений от геометрических форм и размеров концентратора. Вычисляется  $\alpha_k$  методом теории упругости.

Действительный коэффициент концентрации напряжений учитывает влияние на величину местных напряжений и свойств самого материала.

Различие между коэффициентами концентрации характеризуется показателем чувствительности материала к надрезам ( $g$ )

$$G = (\beta_k - 1) / (\alpha_k - 1) \quad (5.3)$$

Тогда,

$$\beta_k = 1 + g (\alpha_k - 1) \quad (5.4)$$

При проектировании стальных конструкций, работающих в условиях циклических нагрузок, необходимо стремиться к исключению концентраторов напряжений в конструкциях. Если по конструктивным соображениям этого избежать нельзя, то необходимо по возможности снизить коэффициент концентрации. Для этого изменяют форму концентратора в сторону его лучшей обтекаемости: сглаживают углы, увеличивают радиусы закруглений, предусматривают более плавные переходы сечений, улучшают качество обрабатываемой поверхности, избегают внутренних дефектов материала и т.п.

Следует обратить внимание на явление наложения концентраторов напряжений (царапины, риски на поверхности галтелей, шеек валов, канавок; резьба с грубо шероховатой поверхностью и т.п.), одновременно наличие в одном месте нескольких концентраторов напряжений значительно повышает коэффициент их концентрации и, следовательно, снижает циклическую прочность деталей.

## **Частота напряжения**

Зависимость усталостной прочности от частоты нагружения обуславливается действием двух факторов: времени действия нагрузки в течении цикла; повышение температуры металла при увеличении частоты нагружения.

При увеличении частоты нагружения усталостная прочность повышается, так как сокращается продолжительность действия нагрузки и уменьшается относительная повреждаемость металла. Одновременно увеличение частоты нагружения приводит к повышению температуры материала детали, причем тем в большей степени, чем ниже теплопроводность данного материала. При росте температуры усталостная прочность снижается.

Критическая частота нагружения при достижении которой температурный фактор преобладает над временным, зависит от физических свойств материала и прежде всего от его теплопроводности.

## **Химический состав материала**

Усталостная прочность, так же как и статическая, зависит от химического состава данного материала. Легирование, приводящее к увеличению предела прочности, способствует и росту циклической прочности. При легировании низко- и среднеуглеродистых сталей. Повышение содержания углерода в углеродистых сталях приводит к снижению усталостной прочности. Так, предел выносливости стали У7 ниже, чем у стали 45, а у стали У12 меньше, чем у стали У8. У высоколегированных сталей также наблюдается снижение предела выносливости с увеличением содержания углерода.

## **Масштабный фактор**

Под масштабным фактором понимают влияние на механические свойства и прочность деталей изменения только размеров при соблюдении подобия всех остальных факторов (химического состава и структуры материала, качества поверхности, концентратов напряжений и т. д.).

С увеличением размеров образцов или деталей происходит снижение их усталостной прочности. Снижение предела выносливости с ростом раз-

меров носит затухающий характер. Влияние масштабного фактора на предел выносливости усиливается с повышением прочностных характеристик и ростом структурной неоднородности материала детали.

Влияние размера образца (детали) на величину предела выносливости характеризуется коэффициентом  $\psi$ :

$$\psi = \frac{\sigma_{-1}}{(\sigma_{-1})_0}, \quad (5.5)$$

где  $\sigma_{-1}$  – предел выносливости конструкции действительных размеров;

$(\sigma_{-1})_0$  – предел выносливости геометрически подобного ей лабораторного образца из того же материала.

$$\text{тогда} \quad \sigma_{-1} = \psi \times (\sigma_{-1})_0 \quad (5.6)$$

Величина масштабного фактора всегда меньше единицы. Для конструкции из одного и того же материала она не является постоянной и изменяется в зависимости от формы конструкции, вида напряженного состояния, качества поверхности детали или элемента конструкции и т.д.

Для объяснения влияния масштабного фактора выдвинуто ряд гипотез и теорий. В частности, в соответствии со статической теорией, вероятность наличия максимально слабых неоднородностей в микрообъемах материала и особенно на поверхности образцов с увеличением их размеров возрастает. Особенно интенсивно эта вероятность растет при увеличении размеров до 30-60мм, затем интенсивно падает, и если исходные размеры превышают 100-200мм, то начинается асимптотически приближаться к максимально вероятной неоднородности для данного материала. В соответствии с этим в случае деталей малых размеров наблюдается существенное влияние масштабного фактора на снижение их механических свойств и прочности. Интенсивность действия данного фактора на детали больших размеров снижается, приближаясь к некоторой определенной величине.

## Жидкие среды

На усталостную прочность деталей и элементов конструкции машин существенное влияние оказывает среда, в которой они работают. Наиболее часто возникает адсорбционная и коррозионная усталость.

В случае адсорбционной усталости все явления проходят в микрообъемах, меньше зерна материала, а в случае коррозионной усталости эти явления на последнем этапе своего развития носят микроскопический характер, подобно явлениям, происходящим при наличии концентрации напряжений.

### Порядок выполнения лабораторной работы

- 1 Используя литературу [1], уточнить представления о критериях прочности деталей машин в условиях статического и динамического нагружения. В отчете привести кривые напряжения - относительное удлинение и напряжение – число циклов испытаний с обозначением соответствующих критериев прочности.
- 2 Ознакомиться с основными элементами методики проведения испытаний на усталостную прочность [2]
- 3 Изучить устройство машины МУИ – 6000, используя натуральный экземпляр машины данной марки, представленной в лаборатории.
- 4 Составить принципиальную схему приложения нагрузки к испытуемым образцам и построить эпюру изгибающих моментов.

На основании эпюры изгибающих моментов необходимо решить задачу по определению необходимого уровня нагружения испытуемых образцов.

Исходной зависимостью для расчета необходимых нагрузок  $Q$  при изгибе образца:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\text{изг}}}{W_x}, \quad (5.5)$$

где  $\sigma_{\max}$  – максимальное напряжение цикла, Н/м;  
 $M_{\text{изг}}$  – изгибающий момент в расчетном сечении образца, Н/м;  
 $W_x$  – момент сопротивления расчетного сечения при изгибе,  
Н/м.

Изгибающий момент равен:  $M_{\text{изг}} = \frac{Ql}{2}$ ,

где  $l$  – плечо приложения нагрузки  $\frac{Q}{2}$ .

Подставляя значения изгибающего момента в формулу, определяющую максимальное напряжение цикла получим:

$$\sigma_{\max} = \frac{Ql}{2W_x}, \text{ откуда } Q = 2W_x \sigma_{\max1}.$$

В дальнейшем, используя эту зависимость для расчета значения нагрузки  $Q$  для образцов на всех режимах испытаний. При этом необходимо помнить, что первую экспериментальную точку кривой усталости получают, задавшись напряжением в образце  $\sigma_{\max1} = 0,9\sigma_B$ , а последнюю, ориентируясь на уровень  $\sigma_{\max10} = 0,4\sigma_B$ .

Числовые значения  $\sigma_B$  для выбранных марок сталей опытных образцов и формулу для расчета момента сопротивления в расчетном сечении  $W_x$  смотри в источниках [3], [2, С. 145].

Расчетные значения максимального напряжения и прилагаемой нагрузки для каждого опыта представить в виде таблицы 5.1.

Таблица 5.1 - Расчетные значения максимального напряжения и прилагаемой нагрузки

Номер образца	Уровень задаваемого максимального напряжения, $\sigma_{\max}$ , Н/м <sup>2</sup>	Расчетное значение максимального напряжения, $\sigma_{\max}$ , Н/м <sup>2</sup>	Расчетное значение Нагрузки Q, Н
Опытные образцы: сталь 45; $\sigma_B =$			
1	$\sigma_{\max 1} = 0,9 \sigma_B$	$\sigma_{\max 1} =$	$Q_1 =$
2	$\sigma_{\max 2} = 0,7 \sigma_B$	$\sigma_{\max 2} =$	$Q_2 =$
10	$\sigma_{\max 10} = 0,4 \sigma_B$	$\sigma_{\max 10} =$	$Q_{10} =$
Эталонные образцы: сталь ; $\sigma_B =$			
1	$\sigma_{\max 1} = 0,9 \sigma_B$	$\sigma_{\max 1} =$	$Q_1 =$
2	$\sigma_{\max 2} = 0,7 \sigma_B$	$\sigma_{\max 2} =$	$Q_2 =$
10	$\sigma_{\max 10} = 0,4 \sigma_B$	$\sigma_{\max 10} =$	$Q_{10} =$

5 Установить и закрепить первый образец в цанговых зажимах шпиндельных узлов машины МУИ-6000. Осуществить нагружение образца приложением расчетной нагрузки  $Q_1$ . Включить машину. Время испытаний контролировать секундомером и по счетчику машины.

6 Произвести испытания последующих образцов. В отчете записать время и расчетное число циклов до разрушения  $N_2 \dots\dots\dots N_{10}$ .

7 Выполнить прямоугольную систему координат а - N, отобразить в этой системе координат экспериментальные точки.

Техника определения этой зависимости не содержит принципиальных трудностей, но сам процесс оказывается достаточно длительным. Поэтому испытание ведется, как правило, одновременно на нескольких машинах.

Примерно половина образцов испытывается сначала при относительно высоких напряжениях, имеющих уровень 0,1- 0,5 от предела прочности. При большем напряжении образец выдерживает меньшее число циклов. Так как с

уменьшением напряжения число циклов  $N$  растет очень быстро, то полученные точки зависимости  $N=f(\sigma)$  удобно откладывать в полулогарифмической шкале см. рисунок 5.7.

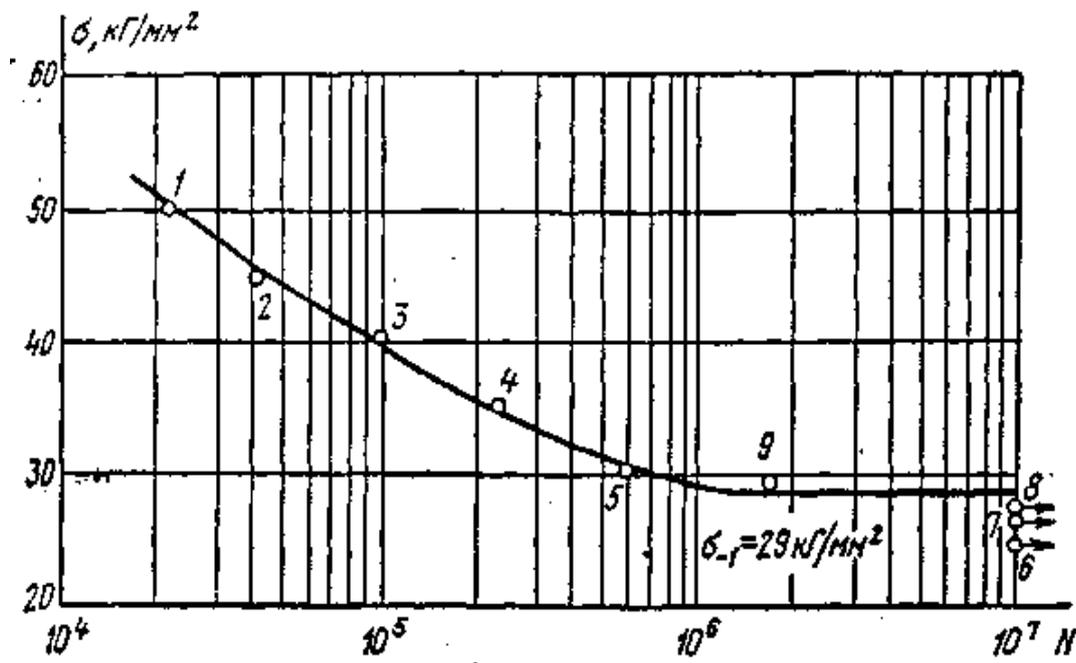


Рисунок 5.7 - Результаты испытаний образцов на усталостную прочность

8 На основе современных представлений о природе и особенностях процесса усталостного разрушения [1, С. 130, 132, 133] провести фрактальный анализ поверхности излома усталостного разрушения образца.

В отчете выполнить эскиз модельного представления поверхности излома усталостного происхождения [1, С. 130] с указанием и кратким описанием характерных зон.

#### **Машина для испытания на усталостную прочность МУИ-6000**

Машина МУИ-6000 предназначена для испытания образцов из металлов и их сплавов, нагруженных на усталостную прочность при чистом изгибе под действием повторно-переменных нагрузок.



Рисунок 5.8 - Общий вид машины типа МУИ-6000

### ОСНОВНЫЕ ДАННЫЕ

Нагрузка на образец, кгс .....	10 - 100
Наибольший изгибающий момент, кгс·см .....	500
Наибольшая величина напряжения, создаваемого в образце $\varnothing 10$ мм, кгс/мм <sup>2</sup> .....	61,5
Суммарная погрешность при нагружении образцов, % от величины задаваемых напряжений.....	$\leq (\pm 2)$
Частота изменения испытательной нагрузки, об/мин.....	6000
Число одновременно испытываемых образцов...	1
Наибольшее биение образца при испытании, мм.....	0,03
Напряжение сети, в .....	220/380
Мощность электродвигателя трехфазного тока (220/380 в, 2800 об/мин), кВт .....	0,6
Габаритные размеры, мм:	
длина.....	810
ширина .....	385
высота.....	1280
Вес, кг.....	260

## ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ

По способу нагружения МУИ-6000 относится к испытательным машинам, осуществляющим принцип постоянства заданной величины нагружения образца в течение всего времени испытания. При этом режим изменения напряжения в испытываемом образце происходит по симметричному циклу.

По способу и характеру возбуждения сил, деформирующих образец, машина относится к типу испытательных с рычажной системой нагружения (отношение плеч 1:14,4).

Принцип работы машины сводится к следующему:

испытываемый образец, закрепленный в шпинделях, приводится во вращение с помощью электродвигателя, при этом нагруженный образец испытывает повторно-переменное напряжение изгиба, постоянное по всей испытываемой длине образца.

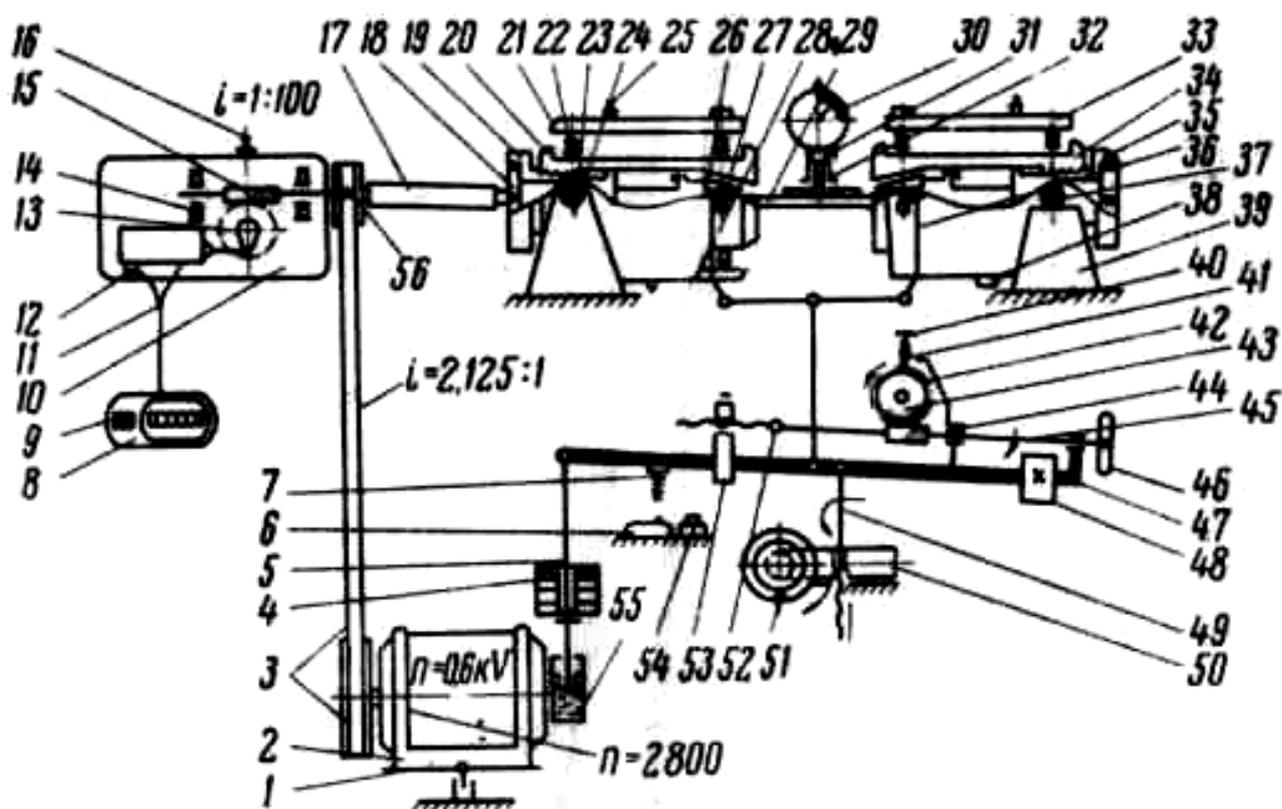
Все механизмы машины смонтированы на литой чугунной станине, состоящей из двух частей: верхней - корпуса и нижней - цоколя.

Машина включает следующие основные узлы:

- шпиндельные бабки с приводом и счетчиком циклов;
- механизмы нагружения;
- шпиндельные бабки с проводом и счетчиком циклов.

Шпиндельные бабки служат для закрепления и передачи испытательной нагрузки на образец (рисунок 5.9). На корпусах левой 21 и правой 33 шпиндельных бабок находятся цапфы 27, через которые передается нагрузка от механизма нагружения, а также опорные шарикоподшипники 23 и 37, которые устанавливаются в гнездах стоек 24 и на плоскостях стоек 39.

В корпус каждой бабки соответственно смонтированы шпиндели 20 и 34, имеющие внутри по конусной цанге 26, в которых закрепляются цилиндрические головки испытываемого образца.



1 - шарнирная плита 2 - электродвигатель; 3 - клиноременная передача; 4 - сменные грузы; 5 - подвеска; 6 - микропереключатель; 7, 52 - упор; 8 - счетчик циклов; 9 - ручка сброса; 10 - редуктор; 11 - электропровод; 12 - датчик импульсов; 13 - червячное колесо; 14, 22, 23 и 37 - шарико-подшипники; 15 - червяк; 16, 25 - пробка; 17 - гибкий валик; 18 - вал; 19, 35 - зажим; 20, 34 - шпиндель; 21 - шпиндельная левая бабка; 24, 39 - стойка; 26 - цанга; 27 - цапфа; 28, 36 - серьга; 29 - образец; 30 - индикатор; 31 - зажимный винт; 32 - кронштейн индикатора; 33 - шпиндельная правая бабка; 34 - штуцер; 40 - таблетка; 41 - указатель; 42 - червячная пара (к шкале нагрузок); 43 - шкала нагрузок; 44 - подшипник скольжения; 45, 49 - винт; 46, 51 - маховик; 47 - рычаг механизма нагружения; 48 - противовес; 50 - червячная пара; 53 - подвижной груз; 54 - амортизатор; 55 - успокоитель; 56 - шкив

Рисунок 5.9 - Кинематическая схема машины МУИ-6000

Вращение шпинделя 20, а следовательно, и испытываемого образца осуществляется электродвигателем с числом оборотов 2800 через клиноременную передачу 3 (с передаточным отношением 2,125:1) и гибкий валик 17.

При указанных параметрах передачи испытываемый образец вращается со скоростью 6000 об/мин.

Число циклов фиксируется счетчиком 8, на который с помощью ротора датчика импульсов 12 подается электрический сигнал.

Ротор датчика импульсов соединен одним валом с червячным колесом и закреплен на валу жестко, передаточное отношение червяк - шестерня 100:1.

Счетчик шестизрядный. Он может фиксировать до 100 млн. циклов.

Для сбрасывания показаний счетчика имеется ручка 9.

#### Механизм нагружения

Механизм нагружения обеспечивает создание необходимого изгибающего момента на испытываемом образце.

Механизм нагружения состоит из рычага 47, шарнирно связанного с серьгами 28 и 36, через которые передается нагрузка на шпиндельные бабки.

На рычаге 47 закреплены два подшипника скольжения 44, в которых вращается гладкий конец винта 45. При вращении винта 45 маховиком 46 груз 53 перемещается по рычагу и одновременно через червячную пару 42 обеспечивается поворот шкалы нагрузок 43, указывающей величину нагрузки, создаваемой подвижным грузом в пределах 10-20 кгс. Цена деления шкалы равна 0,1 кгс.

Создание испытательных нагрузок, превышающих 20 кгс, достигается установкой дополнительных сменных грузов 4 на подвеске 5.

Набор сменных грузов состоит из пяти гирь (трех гирь с условным весом по 20 кгс и двух - по 10 кгс).

Противовесом 48 достигается балансировка системы нагружения. При крайнем правом положении подвижного груза (до упора 52) нагрузка должна быть равной 10 кгс.

Приложение испытательной нагрузки производится с помощью маховика 51, при вращении которого против часовой стрелки червячная пара 50 опускает винт 49, на котором в двух шарикоподшипниках установлена ось грузового рычага машины.

Нормальное положение рычага при испытании достигается в том случае, когда указатель. 41 совпадает с риской на табличке 40.

В конце испытания, при разрушении образца, рычаг опускается на амортизатор 54 и одновременно, воздействуя упором 7 на микропереключатель 6, выключает электродвигатель машины.

Успокоитель 55 служит для поглощения вибрации грузового рычага при работе машины.

Электрооборудование (выключатель машины, предохранители, магнитный пускатель) расположено внутри цоколя на специальной панели.

## **УСТАНОВКА И МОНТАЖ**

Доставленная на место машина освобождается от упаковки. При этом в первую очередь снимается крышка ящика, затем боковые щиты. При вскрытии ящика следует соблюдать все меры предосторожности по сохранению от повреждений окраски и узлов машины.

Освобожденная от упаковочной тары машина устанавливается в помещении на жесткое основание (фундамент, цементный пол) и крепится фундаментными болтами. Желательно между фундаментом (полом) и машиной проложить резиновый коврик толщиной 10 - 20 мм. Резиновый коврик позволит изолировать машину от посторонних вибраций, а также будет поглощать вибрацию и шум собственно самой машины, что намного улучшит условия работы машины.

После установки машины на основание с нее необходимо удалить консервационное покрытие и излишнюю смазку. Консервационное покрытие следует снимать мягкой ветошью, смоченной в бензине.

При подключении машины к электросети напряжением 380/220 В необходимо соблюдать все правила и нормы, предусмотренные техникой безопасности при электромонтаже.

Перед пробным пуском машины необходимо проверить наличие контрольного валика в шпindelных бабках и надежность его крепления.

### **ЗАПРЕЩАЕТСЯ ПУСКАТЬ МАШИНУ БЕЗ КОНТРОЛЬНОГО ВАЛИКА, ОПРАВКИ ИЛИ ОБРАЗЦА**

При пробном пуске машины проверяется надежность работы электродвигателей, четкость и безотказность работы системы автоматического отключения двигателя, правильность работы счетчика циклов.

Перед пробным пуском следует залить масло в редуктор 10 (рисунок 5.9) счетчика через верхнее отверстие 16 в редукторе до уровня верхнего контрольного болта, находящегося сбоку. Нижний болт служит для слива масла из редуктора. Масло также заливается в амортизатор и шпindelные бабки. Уровень масла в шпindelных бабках поддерживается автоматически, излишки масла выливаются через нижний штуцер.

Масло следует применять марки "Индустриальное 20" (веретенное 3), вязкостью 17-23/ 2,2-2,6 при 50°С.

Смазать необходимо следующие трущиеся поверхности машины: шарнирные соединения механизма нагружения, червячную пару 50, подшипники скольжения 44 и гайку подвижного груза 53.

После установки, обкатки на холостых ходах машину следует проверить по нагрузкам на точность показаний.



5 Наложить на поддон гиредержателя 2 (рисунок 5.10) тарировочного приспособления гири массой 2 кг и добиться совмещения указателя 41 (рисунок 5.9) машины со штрихом на лимбе шкалы нагрузок 43 против цифры "10" (кг) и на табличке 40, вращая маховик 46 против часовой стрелки и перемещая подвижный груз 53 в крайнее правое положение.

Если состояния равновесия при этом не наблюдается, то следует открыть малую левую крышку на задней стороне машины, ослабить два винта противовеса 48 и, перемещая его по рычагу механизма нагружения 47 в нужную сторону, добиться совмещения стрелки 4 (рисунок 5.10) тарировочного приспособления с риской на рычаге 3, одновременно указатель 41 (рисунок 5.9) должен совпадать с риской на станине. После этого противовес закрепить винтами.

6 Вращая маховик 46 по часовой стрелке, перевести подвижной груз 53 в такое положение, чтобы отметка шкалы нагрузок 43, равная "20", совпадала с указателем 41.

На поддон гиредержателя тарировочного приспособления добавить гирю массой 2 кг. Вращением маховика 51 добиться одновременного совпадения стрелки указателя 41 с риской на табличке 40 и стрелки 4 (рисунок 5.10) тарировочного приспособления с риской на рычаге 3.

Если совпадение стрелки указателя 41 (рисунок 5.9) с риской на табличке 40 не соответствует равновесию тарировочного приспособления, то на поддон гиредержателя 2 (рисунок 5.10) кладется или с него снимается гиря "допуск", которая определит погрешность нагружающего механизма.

7 Последовательно накладывая на подвеску 5 (рисунок 5.9) машины специальные гири условного веса 10 или 20 кг и одновременно увеличивая массу гирь на поддоне гиредержателя 2 (рисунок 5.10) приспособления, можно определить погрешность нагрузочно-отсчетного устройства машины по всему диапазону до 100 кг.

8 Проверить биение шпинделей. Биение зажатого в них контрольного валика при медленном вращении от руки за шкив 56 (рисунок 5.9) не должно превышать 0,03 мм.

9 Убедиться в работоспособности автоматики электродвигателя. При отсутствии образца в шпинделях машину не включать. При наличии образца в шпиндельных бабках без нагрузки электродвигатель должен работать только тогда, когда нажата кнопка "Пуск".

Во время нагружения образца электродвигатель работает при нажатой кнопке "Пуск", которая опускается, когда указатель 41 начнет приближаться к риску таблички 40.

### **Работа на установке**

При проведении испытания соблюдать следующий порядок :

1 Снять правую шпиндельную бабку, вставить образец до упора. Другой конец образца вставить до упора в левую шпиндельную бабку.

Придерживая одним ключом шпиндель 20 (рисунок 5.9) и поворачивая другим ключом зажим 19, закрепить образец.

Аналогичным порядком закрепить образец в другой шпиндельной бабке.

Образцы изготавливаются по 7 качеству. Поверхность рабочей части гладких образцов должна соответствовать параметру шероховатости Ra 0,4-0,8 и не иметь следов коррозии, цветов побежалости и т.д.

2 Установить индикатор 30 для контроля биения образца и закрепить винтом 31 в кронштейне 32.

Вращая шпиндели с образцом от руки, проверить биение образца по индикатору.

Если биение превышает 0,03 мм, то, последовательно освобождая и закрепляя зажимы 19 и 35, поворачивают образец в шпинделях, добиваясь положения, при котором будет достигнуто меньшее биение.

Если биение при всех положениях образца превышает 0,03 мм, освободить шпиндельные бабки, вывернуть из каждой шток с цангой и повернуть цангу относительно штока. Тщательно протереть цангу и конус шпинделя. Собрать шпиндельные бабки, закрепить образец, вновь проверить биение.

3 Отвести индикатор от шпиндельных бабок.

4 Накинуть серьги 28 и 36 на цапфы шпиндельных бабок. Вращая маховик против часовой стрелки, добиться наименьшего люфта серег.

5 Сбросить на нуль показания счетчика, следить чтобы при сбрасывании показаний рычаг счетчика не находился в крайнем верхнем положении. Положение рычага изменить кратковременным включением электродвигателя.

**Примечание - Сбрасывать положение счетчика на нуль при включенном электродвигателе ЗАПРЕЩАЕТСЯ !**

6 Установить необходимую испытательную нагрузку. Пример: Установить испытательную нагрузку в 48,5 кгс. Нагрузку в 30 кгс получают накладыванием сменных грузов на подвеску, а остальные 18,5 кгс устанавливаются вращением маховика 46 по шкале.

7 Повернуть ручку пакетного выключателя, находящегося сзади машины, на положение "Вкл".

8 Нажать кнопку "Пуск", маховиком 51 наложить нагрузку на образец и добиться точного совпадения стрелок указателя с нужной цифрой шкалы и риской таблички. Указанное положение механизма нагружения необходимо соблюдать в процессе всего испытания,

9 Испытание образца производить, используя нижеприведенные формулы.

а) Предел выносливости  $\sigma_a$  (кг/мм<sup>2</sup>) круглого гладкого образца определяется по формуле (рисунок 5.12)

$$\sigma_a = M/W = 32Pl / \pi d^3 ; \quad P = l / Q,$$

где  $M$  - изгибающий момент, постоянный по всей рабочей части образца, между шпindelными бабками, кг·мм;

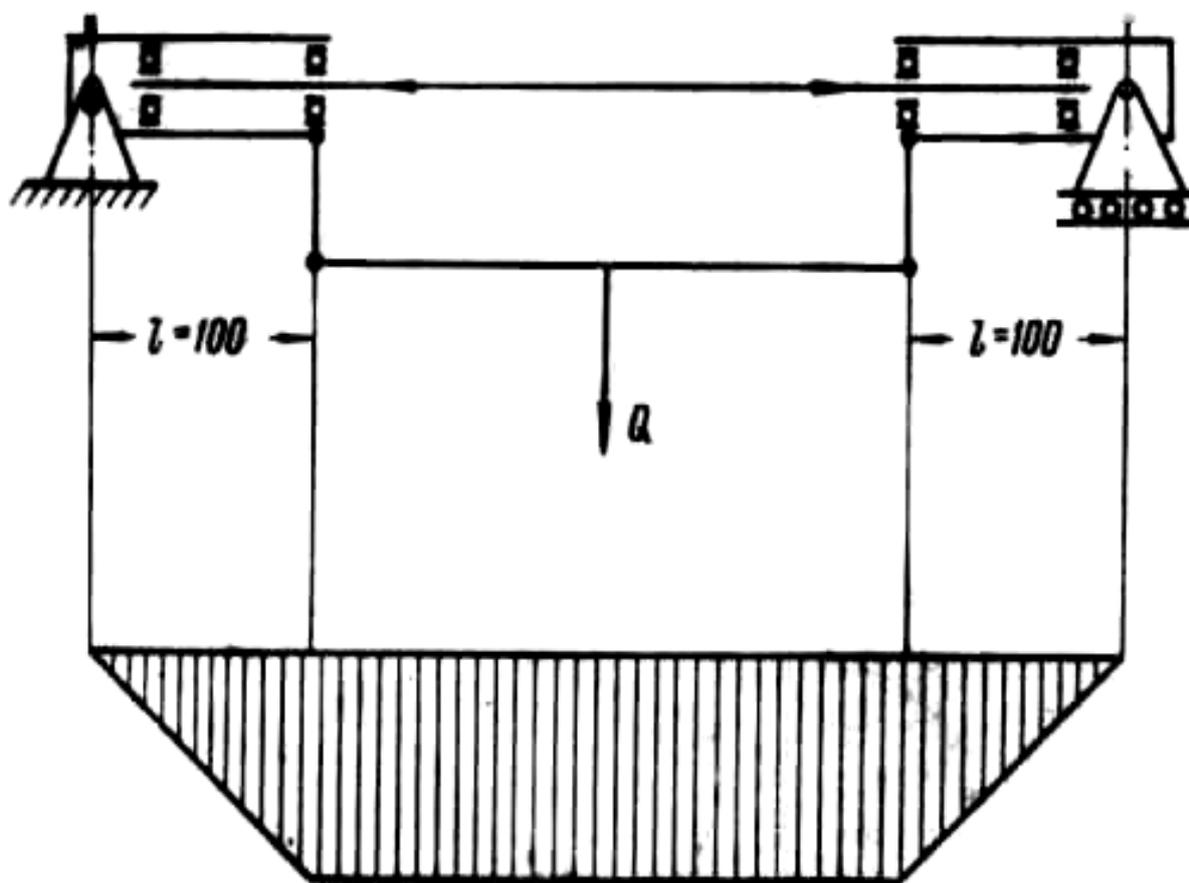
$W$  - момент сопротивления изгибу сечения образца, мм<sup>3</sup>

$P$ - нагрузка (сила), приложенная к образцу, кг;

$Q$  - общая нагрузка на образец, кг;

$l$  - расстояние (мм) от точки приложения силы до ближайшей опоры;

$d$  - диаметр образца, мм.



$Q$  - общая нагрузка на образец;  $l$ - расстояние (мм) от точки приложения сил до ближайшей опоры

Рисунок 5.12 - Эпюра изгибающих моментов

б) База испытаний (число циклов N), при которой определяется предел выносливости, рассчитывается по формуле:

$$N = t \cdot n \cdot 60$$

где t - продолжительность испытания в часах с момента нагружения до момента разрушения или до момента прекращения испытания;

n - номинальное число оборотов в минуту испытываемого образца.

10 По окончании испытания по заданному числу циклов необходимо:

остановить электродвигатель быстрым вращением маховика 51 (рисунок 5.9) по часовой стрелке;

повернуть ручку пакетного выключателя на положение "Выкл.";

освободить образец из шпиндельных бабок.

## **ПРАВИЛА ЭКСПЛУАТАЦИИ, УХОДА И ХРАНЕНИЯ**

Для правильной и бесперебойной работы машины необходимо соблюдать следующие основные правила:

1 Перед началом каждого испытания проверять надежность работы машины на холостом ходу.

2 Регулярно проверять наличие качественной смазки, чистоту захватов шпинделя и всей машины в целом.

При запуске электродвигателя с закрепленным образцом без нагрузки привод должен работать без шума.

Примечание - Для полного спуска масла необходимо вывернуть нижний болт редуктора или штуцер шпиндельной бабки.

3 Проверить автоматику отключения электродвигателя и работу счетчика.

4 Периодически (не реже 1 раза в 3 месяца) проверять правильность показаний механизма нагружения.

5 Периодически очищать цанги и внутренний конус шпинделя от следов контактной коррозии тряпочкой, слегка смоченной в бензине.

6 Периодически (не реже 1 раза в месяц) менять масло в шпиндельных бабках и 1 раз в 3 месяца - в редукторе и успокоителе.

Регулярно производить смазку всех трущихся поверхностей машины. В шпиндельные бабки заливать только тщательно отфильтрованное масло.

7 При постановке машины на длительное хранение необходимо все металлические части ее, не имеющие антикоррозионного покрытия, предохранять путем нанесения тонкого слоя бескислотной смазки.

Машину хранить под чехлом. В помещении, где хранится машина, не должно быть большой влажности и резких перепадов температуры.

8 Перед длительным испытанием на подшипники наносить универсальную среднетемпературную смазку УС-1 (солидол жировой).

## **ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ**

При подключении машины к сети переменного тока она должна быть заземлена, а направление вращения мотора должно совпадать со стрелкой, нанесенной на ограждении шкива и гибкого валика.

Нельзя проверять направление вращения образца рукой.

При работе на машине нужно следить за тем, чтобы на поверхности корпуса не оставалась ветошь, которая может наматываться на образец, шпиндель и т.д. - это приводит к травмам.

Приступая к работе, нужно следить, чтобы шкив на редукторе счетчика и гибкий валик, а также гайка на правой шпиндельной бабке были закрыты кожухами. Нельзя запускать машину в работу без наличия в шпин-

дельных бабках контрольного валика, оправки или образца. Нельзя применять погнутых образцов или оправок, это приводит к поломкам и травмам.

Образцы для испытаний на усталость по ГОСТ 2860-85.

Каждая серия образцов, подвергнутых усталостным испытаниям, включала 8-9 образцов.

Образцы 9 вариантов обрабатывались с припуском 0,2 мм на диаметр, затем подвергались закалке с нагрева токами высокой частоты с последующей доводкой до окончательного размера.

Все заготовки образцов подвергались нормализации по следующему режиму: нагрев в течение 3,5 часов до температуры 850 – 870 °С, выдержка при этой температуре в течение 30 минут и охлаждение на воздухе.

В виду того, что усталостная прочность значительно зависит от состояния поверхности, поэтому при изготовлении образцов особое внимание было уделено механической обработке. Механическая обработка образцов производилась на одних и тех же режимах резания, при этом конечной операцией являлось шлифование. Шлифование образцов производилось на кругло-шлифовальном станке кругом СМ-2, зернистостью 80 при следующем режиме: поперечная подача круга 0,01 мм/дв.ход, продольная подача круга – 34 м/сек.; подача охлаждающей жидкости 25-30 л/мин.

## **Контрольные вопросы**

- 1 Что называется выносливостью металла?
- 2 Как характеризуется предел выносливости металла?
- 3 Сколько образцов принимается в соответствии с ГОСТом при испытании на усталостную прочность?
- 4 Формула выносливости образцов?
- 5 Факторы, влияющие на снижение усталостной прочности?

- 6 Что принимают за базу испытания на усталостную прочность?
- 7 Характер кривой усталостной прочности?
- 8 Теории о прочности деталей машин?
- 9 Влияние концентраторов на прочность деталей машин?
- 10 Фактографические особенности усталостного разрушения узлов?
- 11 Конструкции машин на испытание усталостной прочности?
- 12 Методика определения предела усталости металлов.
- 13 Поясните термины, относящиеся к свойствам надежности технического объекта: безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость?
- 14 Планы испытаний используемые при оценке сохраняемости?
- 15 Коррозионная прочность основных элементов технических систем?
- 16 Оценочные параметры коррозионной прочности деталей сельскохозяйственной техники?

### **Литература**

- 1 Материаловедение : учеб. для вузов / Под общей редакцией Ржевской С.В. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 2003. – 384 с.
- 2 Конструкционные материалы: справочник / Б. Н. Арзамасова – М. : Машиностроение, 1990 - 688 с.
- 3 Терентьев В. Ф. Усталостная прочность металлов и сплавов – М. : Машиностроение, 2002. – 346 с.
- 4 Соппротивление материалов / Павлов П. А., Паршин Л. К., Мельников Б.Е. и др. / Под ред. П. А. Павлова - СПб.: Лань, 2007. - 560 с.

## ***Лабораторная работа № 6***

### **Методика сравнительного исследования коррозионной стойкости деталей сельскохозяйственной техники**

#### **Цели работы**

- 1 Ознакомиться с общими закономерностями коррозионных процессов металлов.
- 2 Изучить устройство и принцип работы приборов для испытания на коррозионную стойкость материалов. Освоить методику испытаний.
- 3 Провести испытание различных материалов на коррозионную стойкость.

#### **Теоретические сведения**

Общий физический износ за срок службы машин – непрерывный процесс, вызываемый действием нагрузок и внешней среды на отдельные конструктивные элементы машины, как при работе, так и при хранении.

Износ деталей машин за период хранения может достигнуть значительной величины. Вопросы хранения особенно важны, если учесть, что большинство сельскохозяйственных машин, в силу специфических особенностей сельского хозяйства, занято в производстве небольшую часть года, а большую часть времени находится на хранении. Рабочее время в процентном соотношении к длительности календарного года составляет для плуга – 20-30 %, сеялки – 6-10 %, комбайна – 8-10 %. Значительно больше времени работает трактор, однако и он в течение года имеет длительные нерабочие периоды.

Атмосферная коррозия является основным видом разрушения деталей машин при хранении, поэтому необходимость изучения процессов поверхностного разрушения металлов и выбор рациональных методов защиты возникает в связи с огромными ежегодными потерями металлов. По литературным данным [1], [2], [3], потери железа вследствие коррозии составляют около 10 % от его ежегодной выплавки. Этот факт указывает на огромное

народнохозяйственное значение борьбы с коррозией металлов. Улучшение хранения сельскохозяйственной техники имеет большое значение для эффективного использования машин.

Процесс коррозии – это разрушение металлов вследствие их химического или электрохимического взаимодействия с окружающей средой. Причина коррозии заключается в термодинамической неустойчивости металлов в окружающей среде. Коррозия приводит к значительным убыткам металлического фонда – деталей машин, приборов, сооружений, средств транспорта и т.д. Поэтому требования к коррозионной стойкости металлических деталей, предъявляемые современной техникой, становятся все более высокими. Необходимы новые достижения в области коррозионной защиты металлов, включая разработку коррозионно-стойких конструкционных сплавов, упрочнение поверхностных слоев металлических деталей, применение и подбор эффективных ингибиторов, разработку коррозионно-стойких защитных покрытий.

Процессы атмосферной коррозии развиваются преимущественно под адсорбционными слоями газов (паров) или тонкими пленками воды. В естественных условиях толщина пленки воды на металлах может изменяться от нескольких молекулярных слоев до десятков и сотен микрометров. Это явилось основой для классификации атмосферной коррозии на сухую, влажную и мокрую [3, 4]. Следует, однако, отметить, что в процессе временных изменений физико-химических параметров окружающей атмосферы коррозия металлов может периодически протекать по одному из механизмов, свойственных этим видам атмосферной коррозии. Например, после увлажнения поверхности металла атмосферной влагой и активации коррозионного процесса последующее высыхание поверхности приводит к повторному возникновению оксидной пленки, разрушенной в период существования слоя электролита. Вместе с тем свойства воздушно-оксидных пленок на металлах, как и структура образующихся продуктов коррозии, в атмосферных

условиях, более чем в других коррозионных средах, предопределяет коррозионную устойчивость металлических систем.

Основным фактором, определяющим механизм и скорость атмосферной коррозии, является степень увлажненности поверхности корродирующих металлов. По степени увлажненности корродирующей поверхности металлов различают следующие типы атмосферной коррозии металлов:

- мокрую атмосферную коррозию - коррозию при наличии на поверхности металла видимой пленки влаги. Атмосферная коррозия этого типа наблюдается при относительной влажности воздуха около 100%, когда имеется капельная конденсация влаги на поверхности металла, а также при непосредственном попадании влаги на металл (дождь, обливание конструкции водой и т.п.);

- влажную атмосферную коррозию - коррозию при наличии на поверхности металла тончайшей, невидимой пленки влаги, которая образуется в результате капиллярной, адсорбционной или химической конденсации при относительной влажности воздуха ниже 100%;

- сухую атмосферную коррозию – коррозию при полном отсутствии пленки влаги на поверхности металла.

Деление это условное, так как в практических условиях возможны взаимные переходы одного типа коррозии в другой. На рисунке 6.1 приведена качественная зависимость скорости атмосферной коррозии металлов от толщины слоя влаги на поверхности корродирующего металла.

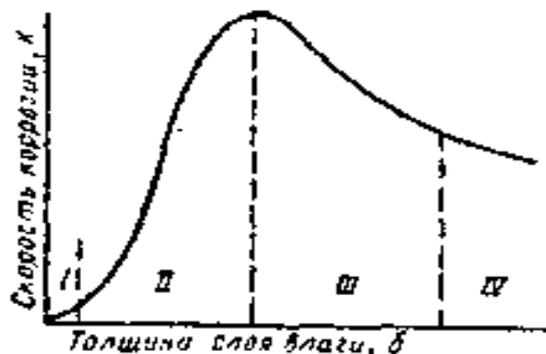


Рисунок 6.1 - Характер зависимости скорости атмосферной коррозии металла от толщины слоя влаги на поверхности металла

Поверхность корродирующего металла представляет собой обычно много-электродный, т.е. состоящий из отличающихся друг от друга электродов, гальванический элемент (рисунок 6.2).



Рисунок 6.2 - Схема гальванического элемента

К химической коррозии относятся процессы непосредственно химического взаимодействия между металлом и средой, например окисление металлов на воздухе при высокой температуре.

Процесс электрической коррозии связан как со строением металла, так и со строением раствора - электролита.

Все металлы в твердом состоянии представляют собой кристаллические твердые тела, обладающие электропроводностью во много раз больше, чем неметаллические вещества. Электропроводность металлов обусловлена наличием в металле свободных электронов, с помощью которых и осуществляется перенос электричества. Таким образом, металлы представляют собой типичные вещества с электронной проводимостью.

Металлическое состояние можно представить в виде  $M^+Q$ , где  $M^+$  - это ион металла, а  $Q$  - электрон.

Водный раствор электролита состоит из гидратированных ионов в среде полярных молекул воды. Гидратация ионов (присоединением молекул к катионам раствора) происходит за счет электростатического взаимодействия между заряженными ионами и полярными молекулами воды.

Гидратированный катион можно представить в виде  $K^+ m + H_2O$ , а гидратированный анион  $A^- + H_2O$ . Схема строения гидратированных ионов приве-

дена на рисунке 6.3. Электролиты обладают высокой ионной проводимостью.

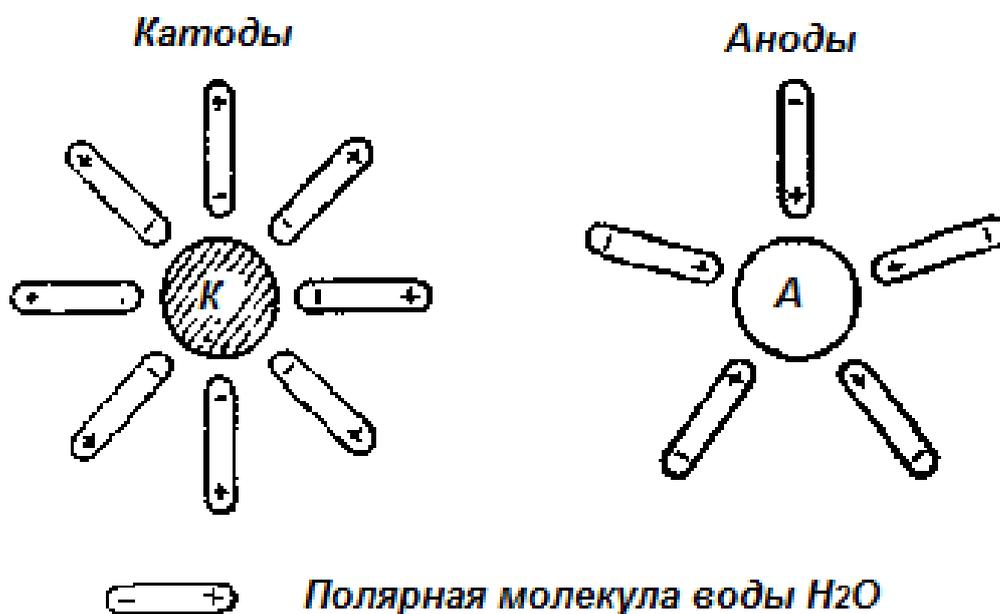


Рисунок 6.3 - Схема строения гидратированных ионов [4]

Обычно поверхность металлов неоднородна и при взаимодействии с электролитом можно рассматривать состоящей из множества короткозамкнутых гальванических элементов микро размеров. При действии электролита на поверхность металла ионы атомы металла в виде гидратированных ионов  $M^+ - H_2O$ , переходят в раствор на анодных участках. Электроны не могут быть гидратированными и не могут перейти в раствор. Они остаются в металле, перетекают к катодным участкам и принимают участие в сопряженной катодной реакции.

Таким образом, поверхность металла представляет собой множество гальванических элементов, за счет которых и происходит коррозионное разрушение металла, при этом коррозионному разрушению подвергаются лишь анодные участки поверхности металла. Электрохимическая коррозия на неоднородной поверхности металла аналогична работе короткозамкнутого гальванического элемента (рисунок 6.4).

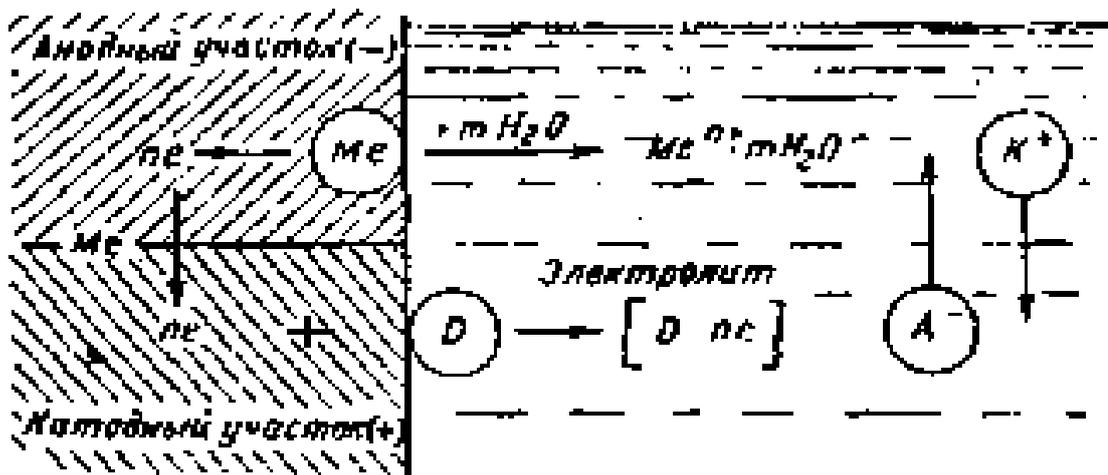


Рисунок 6.4 - Схема электрохимического коррозионного процесса

Известно [3], что при погружении в электролит двух электродов из разных металлов последние приобретают разные по величине потенциалы. Возникающая при замыкании этих электродов разность потенциалов и является первоисточником электрического тока, протекание которого обуславливает растворение электрода с более электроотрицательным потенциалом - анода.

Величины стандартных потенциалов различных металлов по отношению к водородной шкале приведены в таблице 6.1 [1].

Таблица 6.1 - Стандартные потенциалы материалов

<i>Металлы</i>	<i>Стандартный потенциал, В</i>
Медь	+0,34
Свинец	-0,12
Олово	-0,14
Железо	-0,44
Цинк	-0,76
Алюминий	-1,34

Поверхность металла, подвергаемую коррозионному разрушению, можно рассматривать как двух электродную систему, т. е. состоящую из участков двух видов - анодных и катодных.

Следовательно, электрохимическая гетерогенность поверхности корродирующего металла приводит к дифференциации последней на анодные  $V_a$  и катодные  $V_k$  участки. Степень гетерогенности этой поверхности характеризуется разностью электродных потенциалов анодных и катодных участков, т.е.  $V_k - V_a$ .

Электрохимическое растворение металла - сложный процесс, состоящий из трех основных процессов (рисунок 6.5):

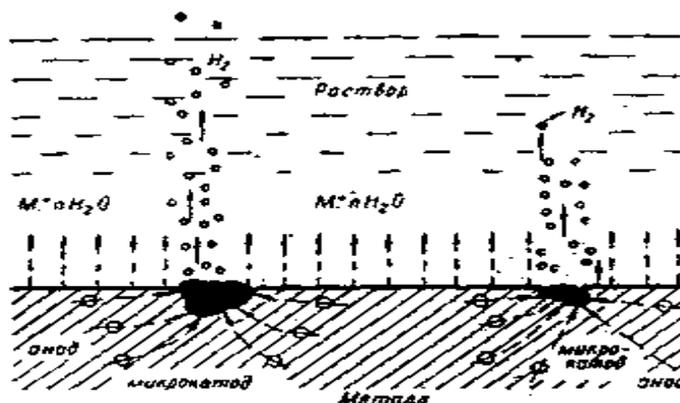


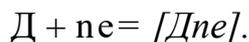
Рисунок 6.5 - Схема электрохимического коррозионного процесса

1) анодного процесса - образования гидратированных ионов металла в электролите и некомпенсированных электронов на анодных участках по реакции

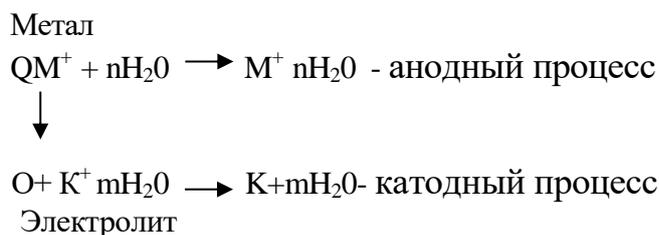


2) процесса перетекания электронов по металлу от анодных участков к катодным и соответствующего перемещения катионов и анионов в растворе;

3) катодного процесса - ассимиляции электронов каким-либо ионами или молекулами раствора (деполяризаторами), способными к восстановлению на катодных участках по реакции



Растворение металла может быть представлено в виде двух сопряженных процессов и потока электронов к катодным участкам металла:



В процессах коррозии большое значение имеют следующие катодные реакции, протекающие в несколько стадий:

1) катодная реакция восстановления иона водорода в газообразный водород (водородная деполяризация):



2) катодная реакция восстановления кислорода с образованием иона гидроксила  $OH^-$  (кислородная деполяризация):



Следует отметить, что подавляющее число коррозионных процессов связано с восстановлением кислорода.

Итак, процесс электрохимической коррозии металлов состоит из трех сопряженных звеньев.

1 Анодного процесса - переход ион - атомов металла в раствор в виде гидротированных ионов с освобождением электронов.

2 Потока избыточных электронов к катодным участкам поверхности металла



3 Катодного процесса разряда катионов раствора избыточными электронами.

Таким образом, электрохимическая коррозия на неоднородной (гетерогенной) поверхности металла аналогична работе короткозамкнутого гальванического элемента.

### **Методика сравнительных испытаний образцов в условиях атмосферной коррозии**

Одной из основных задач, стоящих перед исследователями, является развитие научных исследований процессов коррозии и разработка на их основе более эффективных способов антикоррозионной защиты деталей ма-

шин при хранении. Для этого необходимо использование современных достижений в области экспериментальной техники, в частности более точных и удобных ускоренных методов оценки коррозионной стойкости с материалами деталей машин.

Практической целью коррозионных испытаний является определение долговечности материала и защитных покрытий в атмосферных условиях. Более детально цели и задачи исследований сформулированы следующим образом [4]:

- раскрытие механизма коррозионного процесса, который может быть химическим, электрическим или химико-электрохимическим;
- установление агрессивного компонента атмосферы ( $O_2$ ;  $CO_2$ ; пары  $H_2O$  и др.), вызывающего химическое разрушение металла, или деполяризатора ( $O_2$ ;  $H^+$ ;  $H_2O$ ;  $HSO_3$  и др.), ответственного за электрохимическую коррозию металла;
- установление влияния основных внутренних (состава, структуры, состояния поверхности сплава, наличия напряжений и др.) и внешних факторов на коррозионную стойкость металла или сплава;
- выбор наилучшего металла или защищенного покрытия для применения в эксплуатационных условиях;
- проверка методов защиты от коррозии, проверка надежности защитных покрытий.

Для исследования кинетики поверхностного разрушения применяются различные методы испытаний [4]:

- лабораторные испытания, т.е. испытания образцов в лабораторных, искусственно создаваемых при помощи аппаратуры условиях;
- полевые испытания, т.е. испытания образцов в естественных, эксплуатационных условиях;
- натурные испытания, т.е. испытания машин в сложных условиях их эксплуатации.

В настоящее время разработаны новые типы защитных средств, антикоррозийные свойства и долговечность которых мало изучены. Если производить их оценку путем длительного испытания в естественных условиях, то это затормозит их внедрение в производство, вследствие этого значительно возросла роль лабораторных испытаний на образцах.

Для лабораторных коррозионных испытаний исследователями разработаны различные типы экспериментальных установок [5]. Одной из современных и наиболее целесообразных установок для оценки кинетики коррозии в условиях, имеющих место при хранении машин, является везерометр АВК-2. В камере везерометра возможно имитировать естественные условия погоды в более концентрированном виде. Ускорение процесса в везерометре создается за счет энергичного подвода кислорода через пленку влаги во время пребывания образца на воздухе, а также за счет разрушения этой пленки при многократном высушивании и смачивании образцов. При выборе методики испытаний, которые давали бы за короткое время характеристику явлений поведения деталей машин в период хранения, пригодную для оценки их стойкости, основное внимание уделяли вопросу воспроизведения климатических факторов, чтобы в наибольшей степени приблизиться к условиям атмосферной коррозии.

Факторы, определяющие воспроизводимость экспериментов, в основном можно разделить на две группы: связанные с состоянием поверхности образцов и связанные с эксплуатационными условиями. Первую группу факторов составляют: состояние шероховатости поверхности металла, виды защитных покрытий, химический состав металла. Вторую группу факторов составляют: климатические факторы, определяющие состав среды, степень загрязненности и другие.

Исходя из этого, при лабораторных испытаниях основное внимание обращено на выбор таких режимов испытаний, чтобы развивающиеся коррозионные процессы соответствовали реальным условиям хранения сельскохозяйственной техники.

В соответствии с характеристикой зоны Восточной Сибири при испытании применяли два режима:

- 1) туманно-дождевой с относительной влажностью воздуха 90-95 %;
- 2) туманно-дождевой с вводом в камеру сернистого газа 0,01 % по объему с относительной влажностью 90-95 %.

Первый режим имитировал атмосферу сельской местности районов Восточной Сибири, характеризующуюся повышенной влажностью; второй атмосферу районов, прилегающих к промышленным предприятиям, загрязненную и влажную.

Испытания проводились в везерометре АВК-2, принцип работы которого основан на дифференцировании атмосферных условий при контроле режима испытаний [5].

Камера везерометра давала возможность создавать следующие климатические факторы:

- постоянно действующие – ветер, ультрафиолетовое излучение;
- периодически действующие – термоизлучение, теплый ветер, дождь;
- возникающие в зависимости от других климатических факторов – влажность воздуха, температура.

Все указанные факторы регулируются по своей интенсивности климатических факторов (таблица 6.2).

В качестве загрязнителей атмосферы использовали наиболее коррозионно-активный газ  $SO_2$ , который выбрасывается в атмосферу при сжигании низкосортных каменных углей [3, 4].

Таблица 6.2 - Характеристика климатических факторов в везерометре  
АВК-2

Климатические факторы	Источник	Регулировка продолжительности периодов в цикле, мин			Регулирование интенсивности	
		10	20	30	плавное	ступенчатые
Искусственный дождь	Разбрызгиватель воды	0-5	0-10	0-15	0-10 л/мин	
Термоизлучение	Лампы термоизлучителя	35-7	7-14	10,5-21		2 лампы 4 лампы 6 ламп
Теплый ветер	Нагревательный элемент, вентилятор	0,5	1,0	1,5	до 50м <sup>3</sup>	
Ветер	Вентилятор				до 50м <sup>3</sup>	
Ультрафиолетовое излучение	Ртутно-кварцевые лампы					2 лампы ПРК – 2 1 лампа ДРШ-1000

Для создания начальной концентрации сернистого газа 0,01 % по объему камеры сжигалась навеска серы. Для расчета количества серы использовали уравнение Клайперона – Менделеева [4], которая позволяет установить связь между параметрами, определяющими состояние года:

$$pV = nRT,$$

где  $p$  – давление газа, атм;

$V$  – объем газа, л;

$n$  – число молей газа;

$R$  – газовая постоянная;

$T$  – абсолютная температура, К<sup>0</sup>.

С целью выбора продолжительности цикла, при котором атмосферная коррозия становится заметной для количественной оценки с помощью аналитических весов, были проведены предварительные эксперименты. Для

эксперимента были изготовлены образцы в виде платин из материалов, используемых в сельскохозяйственном машиностроении, имеющие размеры 60×90×2мм. Образцы закреплялись в кассете, которая помещалась на роторе везерометра с внутренней стороны. При вращении ротора образцы подвергались воздействию искусственных климатических факторов продолжительностью действия – 10, 20 и 30 минут.

Таким образом, изменяя длительность воздействия влаги, света, тепла в камере, образцы подвергались различным циклам испытания. На основании предварительных данных было выявлено, что 10-ти минутный цикл дает более ощутимые результаты. Диаграмма 10-ти минутного цикла приведена на рисунке 6.6. Сущность действия этого цикла состоит в следующем:

Образцы в начале проходят под мелким дождем, который производится распыливающим приспособлением везерометра, длительность этого периода 3 минуты, расход воды 120 л/час.

Затем образцы проходят сквозь свет 6-ти 500 ваттных ламп, производящих высушивание и дополнительное воздействие света в течение 4 мин.

Постоянное воздействие света, искусственного ветра, со скоростью 10-15 м/сек, ультрафиолетовых лучей от ртутно-кварцевых ламп с образованием озона, который ускоряет разрушающее действие защитных покрытий.

Средняя температура в камере везерометра составляет 20-30 °С. Везерометр работает 10 часов в сутки, общее время работы камеры с образцами в период испытания - составляет 30 суток.

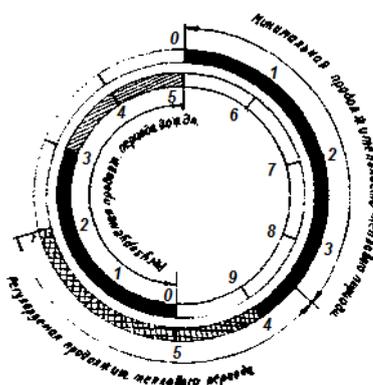
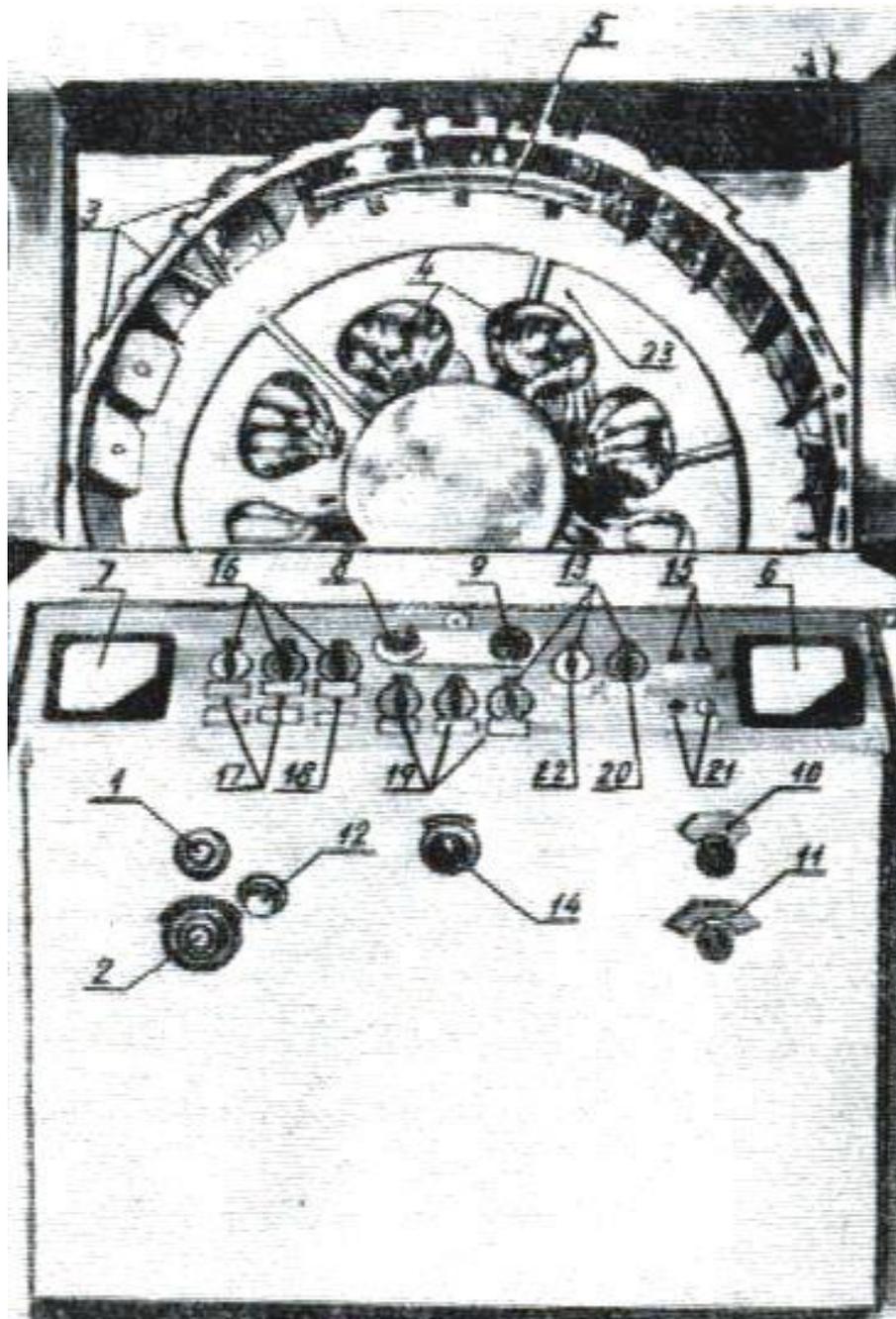


Рисунок 6.6 - Диаграмма 10-ти часового цикла в везерометре

## Экспериментальная установка

Везерометр АВК-2 представляет собой шкаф, в верхней части которого находится испытательная камера, с двумя дверцами в лицевой стенке (рисунок 6.7). В нижней части шкафа размещено оборудование, необходимое для работы везерометра.



1 - регулятор продолжительности теплового периода; 2 - регулятор продолжительности периода искусственного дождя; 3 - кассеты; 4 - лампы-термоизлучатели; 5 - предохранитель ламп; 6 - вольтметр; 7 - амперметр;

8 - часы; 9 - манометр водяного давления; 10 - регулятор циркуляции;  
 11 - регулятор свежего воздуха; 12 - регулятор продолжительности циклов;  
 13 - сигнальные лампы; 14 - регулятор количества воды; 15 - главный выключатель; 16 - выключатели кварцевых ламп; 17 - кнопки зажигания кварцевых ламп; 18 - кнопка пуска кварцевой лампы высокого давления;  
 19 - выключатели ламп-термоизлучателей; 20 - выключатель нагревательного элемента; 21 - выключатель электродвигателя; 22 - выключатель разбрызгивателя воды; 23 - психрометр типа Августа

Рисунок 6.7 - Вид везерометра АВК-2 с открытой камерой

В камере везерометра помещается вращающийся ротор, на котором установлены 24 кассеты. Образцы устанавливаются в кассеты по два с внутренней стороны ротора. Ротор вращается со скоростью 1 оборот в минуту. При вращении на образцы воздействуют климатические факторы в зависимости от угла поворота ротора. Зоны влияния искусственных погодных условий на образцы приведены на рисунке 6.8.

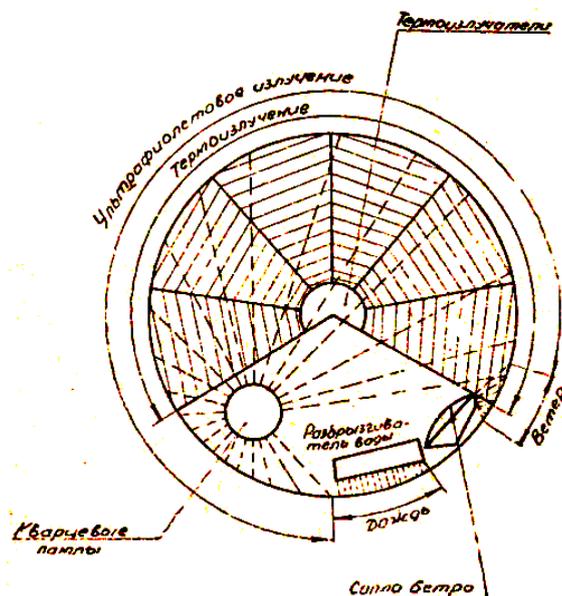


Рисунок 6.8 - Зоны влияния климатических факторов на образцы при вращении ротора везерометра

Для регистрации температуры образцов к ротору прикреплена хромелькапелевая термопара. Самопишущий потенциометр соединен с термопарой посредством коллектора, укрепленного на валу ротора. Показания температуры регистрируются потенциометром ПСР1-02, установленным в нижней части везерометра. Для поддержания заданной температуры в камере имеется автоматический термовыключатель.

Для измерения влажности воздуха на задней стенке камеры установлен психрометр типа Августа. Для автоматической записи влажности воздуха камеры используются гигрограф.

На панели управления везерометра размещены регуляторы, кнопки управления, сигнальные лампочки и измерительные приборы.

Для создания искусственных климатических условий экспериментальная установка состоит из следующих основных устройств:

1 Устройство для создания искусственного ветра. Ветер создается вентилятором, расположенным вместе с электродвигателем в центре нижней части везерометра. Струя воздуха от вентилятора направляется через трубку и сопло в испытательную камеру. Интенсивность циркуляции воздуха регулируется клапаном, расположенным в вытяжной трубе, а приток свежего воздуха вторым клапаном. Скорость ветра достигает 10-15 м/сек. Для вытяжки воздуха в потолке камеры имеется отверстие, которое посредством трубы подключено в общую вентиляционную систему.

2 Устройство для разбрызгивания воды. Устройство для разбрызгивания воды служит для создания в испытательной камере искусственного дождя. Питание водой осуществляется от водопроводной сети через магнитный умягчитель в отстойный бак. Из бака через электромагнитный клапан вода поступает в разбрызгивающее устройство. Разбрызгиватель состоит из 3-х параллельных труб  $\varnothing$  20 мм с отверстиями диаметром 0,6 мм в нижней стороне. Расстояние между разбрызгивателем и образцами составляет 120 мм. Через разбрызгиватель вода подается на образцы, а затем стекает на дно камеры везерометра и по сливной трубе отводится в канализационные сети.

3 Облучательное устройство. Для создания спектра облучения, близкого к солнечному, камера оборудована облучательным устройством. Устройство состоит из тепловых и ртутно-кварцевых ламп. Тепловое излучение осуществляется лампами - термоизлучения типа ЗС-3, мощностью 500ватт каждая. Лампы в камере расположены полукругом.

В целях создания ультрафиолетового излучения в камере установлены ртутно-кварцевые лампы двух типов:

- две лампы типа ПРК-2;
- одна лампа сверхвысокого давления типа ДРШ-1000.

Совместное излучение термоизлучателей и ртутно-кварцевых ламп создает искусственный спектр, близкий к солнечному свету.

4 Устройство для автоматического управления климатическими факторами. Для установления повторных испытаний в везеромере служит устройство автоматического управления. Посредством этого устройства по заданной программе производится включение и выключение устройств, создающего искусственные климатические условия.

Везеромер работает автоматически по заданной программе, поэтому периодически действующие факторы оказывают влияние на образцы в определенные периоды времени цикла. Вся работа везеромера подразделяется на комплекс повторно- действующих явлений – циклов.

### **Подготовка образцов к испытанию**

Изготовленные образцы перед взвешиванием тщательно промывались бензином, затем протирались фильтровальной бумагой и вновь промывались этиловым спиртом и протирались фильтрованной бумагой, затем образцы помещали в эликсир, где они выдерживались 24 часа. После выдержки образцы взвешивались. Взвешивание производилось на аналитических весах АДВ-200М.

Затем образцы укрепили в кассеты и устанавливали на роторе везерометра.

Величину, по которой судят о скорости коррозионного разрушения металла, называют показателем коррозии. Показатели коррозии могут быть количественными и качественными.

Качественные показатели коррозии: наблюдение внешнего вида образцов; микроисследование для установки характера коррозии; применение цветных индикаторов для обнаружения анодных и катодных участков корродирующей поверхности металла.

К количественным показателям коррозии относятся: склонность к коррозии  $K_T$ ; очагового показателя коррозии  $K_n$ ; глубинного показателя коррозии  $K_n$ ; показателя изменения массы  $K_m$ ; объемного показателя коррозии  $K_o$ ; токового показателя коррозии  $i$  (плотность коррозионного тока); механического показателя коррозии  $K_T$ ; показателя изменения электрического сопротивления  $K_R$ .

Исследование коррозионной стойкости защитных покрытий проводилось по гравиметрическому методу. Показателем коррозии является потеря образца в весе. Разность массы до и после испытания, отнесенная к  $1 \text{ дм}^2$  за период испытания и являлась оценкой при данном методе испытаний. За результат испытания принималось среднее арифметическое значение из 5-8 образцов.

Относительная потеря массы металла определялась по следующей зависимости:

$$K = \frac{P - P_1}{F_t},$$

где  $K$  – потеря металла за счет коррозии,  $\text{г/дм}^2\text{час}$ ;

$P$  – начальная масса образца,  $\text{г}$ ;

$P_1$  – масса образца после удаления продуктов коррозии,  $\text{г}$ ;

$F$  – площадь образца,  $\text{дм}^2$ ;

$t$  – время работы камеры, час.

Удаление продуктов коррозии с образцов после испытания проводилось химическим способом. Образцы погружались в 10% раствор лимоннокислого аммония  $\text{NH}_4\text{OH}$  в дистиллированной воде при температуре 50-70 °С, где выдерживались 10-15 минут.

После удаления продуктов коррозии определялась глубина поражений на поверхности образцов. Глубина определялась индикатором со стойкой.

Второй характеристикой защитной способности покрытий был принят коэффициент защитной способности покрытий, который выражается следующей зависимостью:

$$K_{\text{защ}} = \frac{K_1 - K_2}{K_1},$$

где  $K_1$  – относительная потеря массы образца, не защищенного покрытием за цикл испытаний в камере везерометра, г/дм<sup>2</sup>;

$K_2$  – относительная потеря массы образца, защищенного покрытием за цикл испытаний в камере везерометра, г/дм<sup>2</sup>.

При эффективной защите металла от коррозии коэффициент защитной способности близок к единице, при снижении антикоррозионных свойств коэффициент достигает очень малых величин, порядка  $K_{\text{защ}} = 0,15 - 0,30$ .

### **Коррозионная стойкость основных материалов сельскохозяйственной техники**

Большинство деталей сельскохозяйственной техники изготовлены из железоуглеродистых сплавов – сталь, чугун, удельный вес которых составляет 90-95 % от массы машин. В период открытого хранения детали подвергаются действию влажного воздуха, осадков и т.п., в силу чего они выходят из строя, вследствие разрушающего действия атмосферной коррозии. В связи с этим изучали влияние климатических факторов на интенсивность корродирования деталей, изготовленных из наиболее распространенных конструкционных материалов.

Химическое взаимодействие железа, кислорода и воды протекает по зависимости:



Коррозионная стойкость образцов без защитных покрытий оценивалась на основании ускоренных испытаний в везерометре. Результаты испытаний приведены в таблице 6.3.

Таблица 6.3 - Интенсивность коррозии металлов в везерометре

Наименование материалов	Коррозионный износ, г/Дм <sup>2</sup> через		
	240 час	480 час	720 час
Сталь Ст 3	0,3178	0,5493	0,7521
Сталь 10	0,2000	0,4112	0,5145
Сталь 45	0,2312	0,4570	0,6170
Чугун СЧ 15	0,1651	0,2253	0,2815
Чугун СЧ 21	0,1579	0,3000	0,3820

На поверхности образцов видны неглубокие язвы коррозии, глубина которых в среднем составляет 0,08 - 0,1мм. При металлографическом исследовании поверхностных слоев образцов стали и чугуна обнаруживается сильно шероховатая поверхность, вследствие неравномерного разрушения металла коррозии. Гладкая исходная шлифованная поверхность образцов становится грубой, шероховатой. Большую роль на коррозионную стойкость оказывает структура металла. Основной причиной недостаточной стойкости железоуглеродистых сплавов против коррозии заключается в большом различии электрохимических потенциалов составляющих фаз. Чистые однофазные металлы более стойкие, чем многофазные сплавы. Скорость коррозии металлов зависит от наличия анодных и катодных участков, величины структурных составляющих [3].

Основными структурными составляющими железоуглеродистых сплавов являются – феррит, перлит, цементит Fe<sub>3</sub>C, аустенит (твердый раствор углерода в γ-железе). Последняя структурная составляющая в углеродистых сталях при низких температурах обычно неустойчива [1; 2].

По данным [2; 3] наименее устойчивой структурой является феррит, его стационарный электрохимический потенциал равен  $-0,44$  В. Наиболее положительной структурой является графит, имеющий потенциал около  $+0,37$  В. Промежуточное значение занимает цементит. Следовательно, структурная гетерогенность сплавов после термической обработки вызывает эффективную работу коррозионных элементов в условиях влажной атмосферы. Материальный эффект разрушения сосредоточен на анодных участках металла, такими участками для железоуглеродистых сплавов является феррит.

Чугун отличается от стали более высоким содержанием углерода. Структура чугуна состоит из металлической основы и графита. В зависимости от условий литья и химического состава чугуна его металлическая основа имеет различную структуру – перлитоцементитную, перлитоферритную и ферритную [4]. Эти структуры имеют различный электрический потенциал, вследствие чего в самой металлической основе чугуна образуются локальные элементы, которые могут существенным образом изменить характер и скорость коррозии.

Основные структурные составляющие чугуна можно разложить по степени возрастания положительного значения электрического потенциала в следующем порядке – феррит, перлит, цементит, графит. Графит имеет положительный потенциал  $+0,378$ В, чем металлическая основа, поэтому по отношению к графиту выполняет роль анода и будет разрушаться в условиях атмосферной коррозии [3].

Е.Н. Митрофанов считает [4], что в атмосферных условиях важным и основным фактором, влияющим на коррозию чугуна, является структурный фактор. Однако А.И. Голубев показывает, что сплавы, несмотря на структурные различия, практически работают на одном потенциале [3]. Различные скорости растворения структурных составляющих является величина плотности анодного тока.

В таблице 6.3 приведены результаты ускоренных испытаний образцов в камере с различными воздействиями среды [5].

Таблица 6.4 - Коррозионный износ при испытании образцов в камере везерометра

Наименование материала образца		Коррозионный износ, г/Дм <sup>2</sup>	
		Среда туманно-дождевая	Среда туманно-дождевая с вводом SO <sub>2</sub>
Сталь 10	грубая поверхность	0,7549	1,2638
	шлифованная поверхность	0,5145	0,9066
Чугун 15	шлифованная поверхность	0,2815	0,8000
	грубая поверхность	0,4400	0,8700

Из данных таблицы вытекает, что в условиях открытого хранения детали машин не защищенные покрытиями подвержены разрушающему действию атмосферной коррозии.

Сопоставляя результаты испытаний видно, что коррозионный износ чугунных образцов значительно меньше, чем стальных. Это обстоятельство объясняется защитными свойствами продуктов коррозии: слой продуктов коррозии на стальных образцах пористый, имеет трещины, что способствует проникновению влаги и кислорода воздуха, на чугунных образцах слой коррозии был более плотным.

Большое количество элементов сельскохозяйственных машин работает при одновременном воздействии на них циклических нагрузок и коррозионной среды. В этих случаях сопротивляемость металлов действию нагрузок заметно снижается; поэтому изучение влияния коррозии на усталостную прочность является важной проблемой.

Большой интерес представляет механизм разрушения металлов. Согласно теории [2], причиной всех коррозионно-усталостных разрушений металлов является возникновение и прогрессивное развитие сравнительно глубоких и узких клинообразных поражений транскристаллитного характера, названных коррозионно-усталостными трещинами; в зоне наибольших напряжений таких трещин появляется, как правило, целое семейство; наиболее развитые из них в течение циклического процесса объединяются в одну трещину, дающую место излома металла.

Разработанная и экспериментально проверенная методика сравнительного исследования поверхностного разрушения образцов в везерометре АВК-2 позволяет с достаточной точностью судить о влиянии климатических факторов на износ деталей машин, имеющих место при хранении машин.

Везерометр АВК-2 позволяет создавать любые климатические условия в более концентрированном виде, ускоряя коррозионные процессы на поверхности образцов, избегая при этом искажения механизма атмосферной коррозии.

Предлагаемая методика может служить для определения защитных свойств антикоррозионных покрытий.

#### Контрольные вопросы

1 Поясните термины, относящиеся к свойствам надежности технического объекта: безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость.

2 Планы испытаний используемые при оценке сохраняемости.

3 Коррозионная стойкость основных элементов технических систем.

4 Основные параметры коррозионной стойкости деталей сельскохозяйственной техники.

#### Литература

1 Гаркунов Д.Н. Триботехника (износ и безизносность) : Учебник . - 4-е изд., перераб. и доп. - М. : Издательство МСХА, 2001. - 616 с.

**ПРОТОКОЛ**  
**испытании материалов на изнашивание при фреттинг-коррозии**  
**(фреттинге)**

**Характеристики материалов**

Материал	Наименование	ГОСТ, ТУ	Термообработка	Шероховатость поверхности $Ra$ , мкм	HV
Образец	Сплав МЛ5	ГОСТ 2856-79	Закалка при 410 °С, старение	0,062	80
Контроль образец	Сталь 45	ГОСТ 1050-88	Закалка	0,056	570

**Характеристика среды испытаний**

Испытательная среда	Гост, ТУ	Температура, °С	Влажность, %	Примечание
Масло МК-8	ГОСТ 6457—66	20±2	-	

**Режим испытаний**

Амплитуда, мкм	Нагрузка, Н	Частота, Гц	Количество циклов испытаний
50	500	30	500 000

**Результаты испытания**

Номер образца	Износ $h$ , мкм	Средний износ $h$ , мкм	Интенсивность изнашивания, $I$
1	12,6; 12,5; 12,7; 12,4; 11,8; 12,9; 12,2; 12,5	12,45	25·10 <sup>-5</sup>
2	11,6; 11,5; 11,9; 12,2; 12,0; 11,9; 12,1; 12,4	11,95	
3	12,9; 13,0; 12,6; 12,7; 12,4; 12,8; 12,8; 12,6	12,72	
4	12,4; 12,5; 12,9; 12,4; 12,9; 12,8; 12,6; 12,5	12,62	
5	12,2; 12,0; 12,4; 12,7; 12,3; 12,4; 12,5; 12,4	12,36	

Подпись \_\_\_\_\_

**Исходные данные для расчета показателей надежности**Таблица Б1 - Значение частот  $m$ , ресурсов двигателей по частичным интервалам наработки

Варианты задания	Номера частичных интервалов					
	1	2	3	4	5	6
1	1	3	13	17	4	2
2	2	4	12	18	3	1
3	2	4	12	17	4	1
4	1	3	17	14	4	1
5	2	3	13	17	4	1
6	1	4	14	17	3	1
7	2	3	13	17	3	2
8	1	4	11	18	4	2
9	1	4	14	17	3	1
10	1	3	14	17	4	1
11	1	4	12	17	4	2
12	1	3	11	19	4	2
13	1	3	12	18	4	2
14	2	4	12	17	3	2
15	2	3	13	16	4	2
16	1	3	13	18	4	1
17	1	4	17	14	3	1
18	2	4	18	12	3	1
19	1	3	19	11	4	2
20	2	4	17	13	3	1
21	2	3	17	13	4	1
22	2	4	17	12	4	1
23	1	4	19	11	3	2
24	2	3	17	12	4	2
25	2	4	19	10	3	2

**Таблица Б2 - Варианты частичных интервалов к практическому занятию**

№ варианта	Границы частичных интервалов, в тыс. моточасов					
	1	2	3	4	5	6
1	0,5 – 1,5	1,5 – 2,5	2,5 – 3,5	3,5 – 4,5	4,5 – 5,5	
2	0 – 1,0	1,0 – 2,0	2,0 – 3,0	3,0 – 4,0	4,0 – 5,0	5,0 – 6,0
3	0,7 – 1,5	1,5 – 2,3	2,3 – 3,1	3,1 – 3,9	3,9 – 4,7	4,7 – 5,5
4	0 – 1,1	1,1 – 2,2	2,2 – 3,3	3,3 – 4,4	4,4 – 5,5	
5	0 – 1,2	1,2 – 2,4	2,4 – 3,6	3,6 – 4,8	4,8 – 6,0	
6	0,1 – 1,0	1,0 – 1,9	1,9 – 2,8	2,8 – 3,7	3,7 – 4,6	4,6 – 5,5
7	0,5 – 1,6	1,6 – 2,7	2,7 – 3,8	3,8 – 4,9	4,9 – 6,0	
8	0,5 – 1,4	1,4 – 2,3	2,3 – 3,2	3,2 – 4,1	4,1 – 5,0	5,0 – 5,9
9	0,9 – 1,7	1,7 – 2,5	2,5 – 3,3	3,3 – 4,1	4,1 – 4,9	4,9 – 5,7
10	0,8 – 1,6	1,6 – 2,4	2,4 – 3,2	3,2 – 4,0	4,0 – 4,8	4,8 – 5,6
11	0,6 – 1,6	1,6 – 2,6	2,6 – 3,6	3,6 – 4,6	4,6 – 5,6	
12	0,7 – 1,7	1,7 – 2,7	2,7 – 3,7	3,7 – 4,7	4,7 – 5,7	
13	0,8 – 1,8	1,8 – 2,8	2,8 – 3,8	3,8 – 4,8	4,8 – 5,8	
14	0,9 – 1,9	1,9 – 2,9	2,9 – 3,9	3,9 – 4,9	4,9 – 5,9	
15	0,2 – 1,1	1,1 – 2,0	2,0 – 2,9	2,9 – 3,8	3,8 – 4,7	4,7 – 5,6
16	0,3 – 1,2	1,2 – 2,1	2,1 – 3,0	3,0 – 3,9	3,9 – 4,8	4,8 – 5,7
17	0,4 – 1,3	1,3 – 2,2	2,2 – 3,1	3,1 – 4,0	4,0 – 4,9	4,9 – 5,8
18	0,4 – 1,4	1,4 – 2,4	2,4 – 3,4	3,4 – 4,4	4,4 – 5,4	5,4 – 6,4
19	0,6 – 1,5	1,5 – 2,4	2,4 – 3,3	3,3 – 4,2	4,2 – 5,1	5,1 – 6,0
20	0,2 – 1,3	1,3 – 2,4	2,4 – 3,5	3,5 – 4,6	4,6 – 5,7	
21	0,3 – 1,4	1,4 – 2,5	2,5 – 3,6	3,6 – 4,7	4,7 – 5,8	
22	0,4 – 1,5	1,5 – 2,6	2,6 – 3,7	3,7 – 4,8	4,8 – 5,9	
23	0,1 – 1,2	1,2 – 2,3	2,3 – 3,4	3,4 – 4,5	4,5 – 5,6	
24	0,1 – 1,1	1,1 – 2,1	2,1 – 3,1	3,1 – 4,1	4,1 – 5,1	5,1 – 6,1
25	0,2 – 1,2	1,2 – 2,2	2,2 – 3,2	3,2 – 4,2	4,2 – 5,2	5,2 – 6,2

**Параметры и коэффициенты закона распределения  
Вейбула (ЗРВ)**

<b>b</b>	<b>K<sub>b</sub></b>	<b>C<sub>b</sub></b>	<b>V</b>	<b>S<sub>b</sub></b>	<b>P<sub>оп</sub></b>
0,800	1,133	1,428	1,261	2,815	0,669
0,820	1,114	1,367	1,227	2,707	0,661
0,840	1,096	1,311	1,196	2,608	0,658
0,860	1,080	1,261	1,167	2,514	0,655
0,880	1,066	1,214	1,139	2,427	0,652
0,900	1,052	1,171	1,113	2,345	0,649
0,920	1,040	1,132	1,088	2,268	0,645
0,940	1,029	1,095	1,064	2,195	0,641
0,960	1,018	1,061	1,042	2,127	0,638
0,980	1,009	1,029	1,020	2,062	0,635
1,000	1,000	1,000	1,000	2,000	0,632
1,040	0,984	0,947	0,962	1,886	0,626
1,080	0,971	0,900	0,927	1,782	0,620
1,120	0,959	0,858	0,894	1,688	0,615
1,160	0,949	0,821	0,865	1,601	0,610
1,200	0,941	0,787	0,837	1,521	0,605
1,240	0,933	0,757	0,811	1,447	0,600
1,280	0,926	0,729	0,787	1,378	0,596
1,320	0,921	0,704	0,765	1,314	0,592
1,360	0,916	0,681	0,744	1,255	0,588
1,400	0,911	0,660	0,724	1,198	0,584
1,420	0,909	0,650	0,714	1,172	0,582
1,460	0,906	0,631	0,696	1,120	0,578
1,480	0,904	0,622	0,687	1,096	0,577
1,500	0,903	0,613	0,679	1,072	0,576
1,520	0,901	0,605	0,671	1,049	0,574
1,540	0,900	0,597	0,663	1,026	0,572
1,560	0,899	0,589	0,655	1,004	0,570
1,580	0,898	0,581	0,647	0,983	0,569
1,600	0,897	0,574	0,640	0,962	0,568
1,620	0,896	0,567	0,633	0,942	0,566
1,640	0,895	0,560	0,626	0,922	0,564
1,660	0,894	0,553	0,619	0,902	0,563
1,680	0,893	0,546	0,612	0,883	0,562
1,700	0,892	0,540	0,605	0,865	0,561
1,720	0,892	0,534	0,599	0,847	0,559
1,740	0,891	0,528	0,593	0,829	0,558
1,760	0,890	0,522	0,587	0,812	0,557
1,780	0,890	0,517	0,581	0,795	0,556
1,800	0,889	0,511	0,575	0,779	0,555

b	K <sub>b</sub>	C <sub>b</sub>	V	S <sub>b</sub>	P <sub>он</sub>
1,820	0,889	0,506	0,569	0,763	0,553
1,840	0,888	0,501	0,564	0,747	0,552
1,860	0,888	0,496	0,558	0,731	0,551
1,880	0,888	0,491	0,553	0,716	0,550
1,900	0,887	0,486	0,547	0,701	0,549
1,920	0,887	0,481	0,542	0,687	0,548
1,940	0,887	0,476	0,537	0,672	0,547
1,960	0,887	0,472	0,532	0,658	0,546
1,980	0,886	0,468	0,527	0,645	0,545
2,000	0,886	0,463	0,523	0,631	0,544
2,020	0,886	0,459	0,518	0,618	0,543
2,040	0,886	0,455	0,513	0,605	0,542
2,060	0,886	0,451	0,509	0,592	0,541
2,080	0,886	0,447	0,505	0,579	0,540
2,100	0,886	0,443	0,500	0,567	0,539
2,120	0,886	0,439	0,496	0,555	0,538
2,140	0,886	0,436	0,492	0,543	0,537
2,160	0,886	0,432	0,488	0,531	0,536
2,180	0,886	0,428	0,484	0,520	0,535
2,200	0,886	0,425	0,480	0,509	0,535
2,220	0,886	0,421	0,476	0,498	0,534
2,260	0,886	0,415	0,468	0,476	0,533
2,280	0,886	0,412	0,465	0,465	0,532
2,300	0,886	0,408	0,461	0,455	0,531
2,320	0,886	0,405	0,457	0,444	0,531
2,340	0,886	0,402	0,454	0,434	0,530
2,360	0,886	0,399	0,451	0,424	0,529
2,380	0,886	0,396	0,447	0,415	0,528
2,400	0,886	0,393	0,444	0,405	0,527
2,420	0,887	0,391	0,441	0,395	0,527
2,440	0,887	0,388	0,437	0,386	0,526
2,460	0,887	0,385	0,434	0,377	0,526
2,480	0,887	0,382	0,431	0,368	0,525
2,500	0,887	0,380	0,428	0,359	0,524
2,520	0,887	0,377	0,425	0,350	0,524
2,540	0,888	0,374	0,422	0,341	0,523
2,560	0,888	0,372	0,419	0,332	0,522
2,580	0,888	0,369	0,416	0,324	0,521
2,600	0,888	0,367	0,413	0,315	0,520
2,620	0,888	0,364	0,410	0,307	0,520
2,640	0,889	0,362	0,407	0,299	0,519

**Функция плотности вероятности  $a - f(T)$  закона распределения Вейбулла**

$T_{ci}$ \ $a$ \ $b$	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	3,0
0,1	0,905	0,711	0,536	0,392	0,281	0,198	0,030
0,2	0,819	0,752	0,662	0,565	0,470	0,384	0,119
0,3	0,741	0,745	0,719	0,672	0,613	0,548	0,263
0,4	0,670	0,716	0,735	0,733	0,714	0,682	0,450
0,5	0,607	0,676	0,726	0,759	0,776	0,779	0,662
0,6	0,549	0,630	0,700	0,757	0,803	0,837	0,870
0,7	0,497	0,582	0,602	0,734	0,800	0,858	1,043
0,8	0,449	0,534	0,616	0,695	0,771	0,844	1,151
0,9	0,407	0,487	0,566	0,645	0,723	0,801	1,172
1,0	0,368	0,442	0,515	0,589	0,662	0,730	1,104
1,1	0,333	0,399	0,464	0,529	0,593	0,656	0,950
1,2	0,301	0,359	0,414	0,468	0,520	0,569	0,767
1,3	0,273	0,321	0,367	0,409	0,447	0,480	0,564
1,4	0,247	0,287	0,323	0,353	0,377	0,394	0,378
1,5	0,223	0,256	0,2828	0,301	0,313	0,316	0,231
1,6	0,202	0,227	0,245	0,245	0,255	0,247	0,123
1,7	0,183	0,202	0,212	0,213	0,205	0,189	0,064
1,8	0,165	0,178	0,182	0,176	0,162	0,141	0,029
1,9	0,150	0,157	0,155	0,144	0,126	0,103	0,011
2,0	0,135	0,139	0,132	0,117	0,096	0,073	0,004
2,1	0,123	0,122	0,112	0,094	0,073	0,051	0,001
2,2	0,111	0,107	0,094	0,075	0,054	0,035	–
2,3	0,100	0,094	0,079	0,060	0,040	0,023	–
2,4	0,091	0,082	0,066	0,047	0,029	0,015	–
2,5	0,0082	0,072	0,055	0,036	0,021	0,010	–

**Интегральная функция  $F(T)$  закона распределения Вейбулла**

$\frac{T_1^a}{a}$ \ $b$	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0	3,5
0,1	0,095	0,061	0,039	0,025	0,016	0,010	0,003	0,001	0,000
0,2	0,181	0,135	0,100	0,073	0,054	0,039	0,018	0,008	0,004
0,3	0,259	0,210	0,169	0,136	0,108	0,086	0,048	0,027	0,015
0,4	0,330	0,283	0,242	0,206	0,175	0,148	0,096	0,062	0,040
0,5	0,393	0,353	0,315	0,281	0,250	0,221	0,162	0,117	0,085
0,6	0,451	0,418	0,387	0,357	0,329	0,302	0,243	0,194	0,154
0,7	0,503	0,479	0,455	0,432	0,409	0,387	0,336	0,290	0,249
0,8	0,551	0,535	0,519	0,503	0,488	0,473	0,436	0,401	0,367
0,9	0,593	0,586	0,578	0,570	0,563	0,555	0,536	0,518	0,499
1,0	0,632	0,632	0,632	0,632	0,632	0,632	0,632	0,632	0,632
1,1	0,667	0,674	0,681	0,688	0,695	0,702	0,719	0,736	0,752
1,2	0,699	0,712	0,725	0,738	0,750	0,763	0,793	0,822	0,850
1,3	0,727	0,746	0,764	0,782	0,799	0,815	0,854	0,889	0,918
1,4	0,753	0,776	0,798	0,820	0,840	0,859	0,902	0,936	0,961
1,5	0,777	0,803	0,829	0,852	0,874	0,895	0,936	0,966	0,984
1,6	0,798	0,828	0,855	0,880	0,903	0,923	0,961	0,983	0,994
1,7	0,817	0,849	0,878	0,903	0,926	0,944	0,977	0,993	0,998
1,8	0,835	0,868	0,897	0,923	0,944	0,961	0,987	0,997	–
1,9	0,850	0,885	0,914	0,939	0,958	0,973	0,993	0,999	–
2,0	0,865	0,899	0,929	0,952	0,969	0,982	0,996	–	–
2,1	0,877	0,912	0,941	0,962	0,978	0,988	0,998	–	–
2,2	0,889	0,924	0,951	0,971	0,984	0,992	0,999	–	–
2,3	0,900	0,934	0,960	0,977	0,989	0,995	–	–	–
2,4	0,909	0,943	0,967	0,983	0,992	0,997	–	–	–
2,5	0,918	0,950	0,973	0,987	0,994	0,998	–	–	–

Значения  $r_1$  и  $r_3$  для доверительных границ по Вейбуллу

$N \backslash a$	0,99		0,95		0,90		0,80	
	$r_1$	$r_3$	$r_1$	$r_3$	$r_1$	$r_3$	$r_1$	$r_3$
1	100	0,22	19,5	0,33	9,50	0,43	4,48	0,62
2	13,5	0,30	5,63	0,42	3,77	0,51	2,42	0,67
3	6,88	0,36	3,66	0,48	2,73	0,57	1,95	0,70
4	4,85	0,40	2,93	0,52	2,29	0,60	1,74	0,73
5	3,91	0,43	2,54	0,55	2,05	0,62	1,62	0,75
6	3,36	0,46	2,29	0,57	1,90	0,65	1,54	0,76
8	2,75	0,50	2,01	0,61	1,72	0,68	1,43	0,78
10	2,42	0,53	1,83	0,64	1,61	0,70	1,37	0,80
15	2,01	0,59	1,62	0,68	1,46	0,74	1,28	0,83
20	1,81	0,63	1,51	0,72	1,37	0,77	1,24	0,85
25	1,68	0,66	1,44	0,74	1,33	0,79	1,21	0,86
30	1,60	0,71	1,39	0,76	1,29	0,80	1,18	0,87
40	1,50	0,74	1,32	0,78	1,24	0,83	1,16	0,88
50	1,43	0,76	1,28	0,80	1,21	0,84	1,14	0,89
60	1,38	0,78	1,25	0,82	1,19	0,86	1,12	0,90
80	1,32	0,80	1,21	0,84	1,16	0,87	1,10	0,91
100	1,28	0,84	1,19	0,86	1,14	0,88	1,09	0,92
150	1,22	0,86	1,15	0,88	1,12	0,90	1,07	0,93
200	1,19	0,87	1,13	0,89	1,10	0,92	1,06	0,94
250	1,17	0,87	1,11	0,90	1,09	0,92	1,06	0,95

Коэффициент Ирвина  $\lambda$  т

Повторность информации, N	10	20	30	50	100	400
$\lambda$ т при $\alpha = 0,95$	1,5	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9
$\lambda$ т при $\alpha = 0,99$	2,0	1,8	1,7	1,6	1,5	1,3

Приложение 3

№	Наименование деталей	Размер по чертежу, мм	Зазоры, мм			Действительный размер, мм	Наработка, мото-ч
			Начальный	Допустимый	Предельный		
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Блок цилиндров Толкатель	$25^{+0,052}$	0,008...	0,17	0,30	25,060	$T_{м.р.}=4000$ $T_{изм}=1500$
		$25^{-0,008}$ $-0,022$	... 0,074			24,960	
2	Втулка распределительного вала Вал распределительный	$50^{+0,025}$	0,050 ...	0,17	0,40	50,034	$T_{м.р.}=3500$ $T_{изм}=2000$
		$50^{-0,050}$ $-0,089$	... 0,114			49,810	
3	Втулка направляющая клапана Клапан впускной	$11^{+0,027}$	0,035 ...	0,20	0,40	11,035	$T_{м.р.}=3100$ $T_{изм}=2100$
		$11^{-0,035}$ $-0,060$	... 0,087			10,880	
4	Втулка направляющая клапана Клапан выпускной	$11^{+0,027}$	0,070 ...	0,20	0,40	11,060	$T_{м.р.}=3900$ $T_{изм}=1500$
		$11^{-0,070}$ $-0,090$	... 0,117			10,886	
5	Коромысло клапана Валик коромысло	$19^{+0,053}$ $+0,020$	0,020 ...	0,12	0,35	19,076	$T_{м.р.}=3200$ $T_{изм}=1800$
		$19^{-0,021}$	... 0,074			18,935	
6	Вкладыши шатунные Вал коленчатый	$68^{+0,025}$ $-0,010$	0,065 ...	0,135	0,30	68,054	$T_{м.р.}=4200$ $T_{изм}=1000$
		$68^{-0,075}$ $-0,090$	... 0,115			67,890	
7	Вкладыши коренные Вал коленчатый	$75^{+0,031}$ $-0,010$	0,070 ...	0,146	0,30	75,054	$T_{м.р.}=2530$ $T_{изм}=1500$
		$75^{-0,080}$ $-0,095$	... 0,126			74,840	
8	Втулка Фланец установочный топливного насоса	$50^{+0,027}$ $+0,020$	0,050 ...	0,20	0,40	50,045	$T_{м.р.}=2530$ $T_{изм}=2000$
		$50^{-0,030}$ $-0,085$	... 0,112			49,864	

продолжение приложения 3

1	2	3	4	5	6	7	8
9	Втулка ведомой шестерни	$18^{+0,060}_{+0,030}$	0,030 ...	0,14	0,25	18,084	$T_{м.р.}=2530$ $T_{изм}=2100$
	Палец ведомой шестерни	$18_{-0,012}$	... 0,072			17,972	
10	Втулка промежуточной шестерни	$40^{+0,050}_{+0,025}$	0,025 ...	0,14	0,30	40,074	$T_{м.р.}=2530$ $T_{изм}=2150$
	Палец промежуточной шестерни	$40_{-0,025}$	... 0,075			39,840	
11	Втулка распределительного вала	$50^{+0,027}$	0,030 ...	0,17	0,40	50,086	$T_{м.р.}=2630$ $T_{изм}=2000$
	Вал распределительный	$50_{-0,087}^{-0,030}$	... 0,114			49,714	
12	Корпус масляного насоса	$42,25^{+0,060}_{+0,010}$	0,040 ...	0,30	0,55	42,479	$T_{м.р.}=2530$ $T_{изм}=2100$
	Шестерня масляного насоса	$42,25_{-0,085}^{-0,030}$	... 0,145			42,100	
13	Корпус масляного насоса (глубина гнезд под шестерни)	$28^{+0,060}$	0,040 ...	0,16	0,20	28,078	$T_{м.р.}=2530$ $T_{изм}=1300$
	Шестерня масляного насоса	$28_{-0,070}^{-0,040}$	... 0,130			27,906	
14	Крышка корпуса ротора	$19^{+0,025}$	+0,040 ..	0,16	0,20	19,044	$T_{м.р.}=230$ $T_{изм}=1100$
	Ось ротора	$19_{-0,070}^{-0,040}$	... +0,095			18,910	
15	Крыльчатка водяного насоса	$17^{+0,019}_{-0,008}$	-0,027 ...	0,04	0,10	17,042	$T_{м.р.}=3600$ $T_{изм}=2100$
	Валик водяного насоса	$17^{+0,019}_{+0,007}$	... +0,012			16,986	
16	Корпус ротора	$18^{+0,019}$	+0,030 ...	0,10	0,18	18,042	$T_{м.р.}=3000$ $T_{изм}=1500$
	Вал редуктора	$18_{-0,055}^{-0,030}$	... +0,074			17,83	
17	Шарикоподшипник 305	$25_{-0,010}$	-0,017...	0,03	0,08	25,012	$T_{м.р.}=3500$ $T_{изм}=2500$
	Валик водяного насоса	$25 \pm 0,007$	...+0,007			24,976	

Учебное издание

**Беломестных Владимир Афанасьевич  
Бураев Михаил Кондратьевич**

## **НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

**Учебно-методическое пособие**

Лицензия на издательскую деятельность

ЛР № 070444 от 11.03.98 г.

Условных печатных листов 9,0. Тираж 50

Издательство Иркутской государственной сельскохозяйственной академии  
664038, Иркутская обл. Иркутский р-н, пос. Молодежный