

**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Кафедра ремонта тракторов, автомобилей  
и сельскохозяйственных машин

**ТРИБОТЕХНИКА**

*Практикум*

**МИНСК  
БГАТУ  
2009**

УДК 621.891(076.5)  
ББК 34.41я7  
Т 67

Рекомендовано научно-методическим советом факультета  
«Технический сервис в АПК» БГАТУ

Протокол № 2 от 25 февраля 2009 г.

Авторы:

д-р техн. наук *В.А. Зеленин*;  
д-р техн. наук, проф., Лауреат Государственной премии, зав. кафедрой  
механизации и электрификации животноводства УО «Гродненский  
государственный аграрный университет» *В.С. Ивашко*;  
канд. техн. наук, доц. *В.В. Кураш*;  
канд. техн. наук, доц. *В.А. Лойко*

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф. БНТУ *Н.В. Стиридонов*;  
д-р техн. наук, проф. БГАТУ *Л.М. Акулович*

Т67 **Триботехника** : практикум / В.А. Зеленин [и др.] – Минск :  
БГАТУ, 2009. – 60 с. – ISBN 978-985-519-099-9.

УДК 621.891(076.5)  
ББК 34.41я7

ISBN 978-985-519-099-9

© БГАТУ, 2009

## СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ .....	4
ВВЕДЕНИЕ .....	5
Лабораторная работа 1 МЕТОДИКИ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ МАТЕРИАЛОВ .....	6
Лабораторная работа 2 ИЗУЧЕНИЕ МИКРОГЕОМЕТРИИ ПОВЕРХНОСТИ .....	13
Лабораторная работа 3 ИЗУЧЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ МИКРОГЕОМЕТРИИ В ПРОЦЕССЕ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И ЕЕ ВЛИЯНИЯ НА ПАРАМЕТРЫ ТРЕНИЯ .....	18
Лабораторная работа 4 ЗАКОНОМЕРНОСТИ ТРЕНИЯ КАЧЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ .....	23
Лабораторная работа 5 ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ НАГРУЖЕНИЯ НА КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ .....	28
Лабораторная работа 6 ИЗУЧЕНИЕ ИЗНАШИВАНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ЗАКРЕПЛЕННЫМ АБРАЗИВОМ .....	34
Лабораторная работа 7 ИЗУЧЕНИЕ ИЗНАШИВАНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ СВОБОДНЫМ АБРАЗИВОМ .....	38
Лабораторная работа 8 ОЦЕНКА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ .....	42
ЛИТЕРАТУРА .....	46
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 .....	48
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 .....	57

## ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

$A$	– площадь; $A_a$ – номинальная, $A_c$ – контурная,
$A_z$	– фактическая площадь контакта (ФПК);
$F_T$	– сила трения;
$H$	– микротвердость; $HB$ – по Брюнелю;
$I_h$	– интенсивность изнашивания (безразмерная), $I_g$ – по массе;
$L$	– длина пути скольжения;
$M_{тр}$	– момент трения;
$N, P$	– нагрузка;
$R_a$	– среднее арифметическое отклонение от средней линии профиля поверхности;
$R_{max}$	– максимальная высота микронеровностей профиля;
$R_z$	– высота неровностей профиля;
$S$	– средний шаг неровностей по вершинам профиля;
$S_m$	– средний шаг неровностей профиля;
$V$	– объем.
$b$	– параметр кривой опорной поверхности (безразмерный);
$d$	– диаметр поверхности трения образец-контртело;
$f$	– коэффициент трения скольжения; $f_k$ – трения качения;
$i$	– удельный износ; $i_L$ – линейный, $i_g$ – по массе;
$\kappa_n$	– коэффициент проскальзывания;
$l$	– длина базового профиля;
$m$	– масса;
$n$	– частота вращения;
$p$	– давление; $p_a$ – номинальное; $p_c$ – контурное; $p_z$ – фактическое;
$r$	– радиус сферы, индентора и единичной микронеровности;
$t$	– время;
$t_p$	– относительная опорная длина профиля;
$v_c$	– скорость скольжения;
$v$	– параметр кривой опорной поверхности.
$\gamma$	– плотность.

## ВВЕДЕНИЕ

Всесторонняя подготовка инженеров конструкторских и технологических специальностей для различных отраслей народного хозяйства предусматривает обязательное изучение методов повышения надежности и долговечности машин на основе достижений триботехники – науки о трении, смазке и изнашивании узлов и деталей машин.

Инженерные и научные разработки в области сельскохозяйственного и автотракторного машиностроения обеспечили высокий уровень выпускаемой в Республике Беларусь продукции. Вместе с тем, расширение рынка на страны СНГ и дальнего зарубежья, обуславливает необходимость дальнейшего совершенствования техники, обеспечения ее конкурентоспособности с лучшими мировыми аналогами.

Особо актуальна проблема увеличения ресурса машин за счет выполнения ремонтно-восстановительных работ изношенных узлов. Выход на новый уровень связан с поиском оптимальных решений при выборе материалов, конструкций и технологии ремонта узлов трения. Перспективными путями повышения долговечности является: использование при восстановлении износившихся поверхностей деталей новых композиционных, пористых самосмазывающихся металлических и полимерных материалов, обеспечивающих работоспособность машин в экстремальных условиях эксплуатации. Применение материалов, обладающих качественно новыми физико-механическими свойствами, многокомпонентных и многоуровневых покрытий, в том числе алмазоподобных, сочетающих высокую износостойкость и твердость с низким коэффициентом трения, антифрикционных адаптирующихся покрытий с эффектом самосмазывания при температурах до 800°C, а также современных смазочных материалов, обладающих реверсивными смазочными свойствами при циклических изменениях температуры, позволит повысить межремонтный ресурс машин и механизмов.

Выполнение лабораторных работ позволит закрепить у студентов теоретические знания и приобрести навыки по определению закономерностей трения и изнашивания твердых тел, свойств смазочных материалов, на основании которых оцениваются их триботехнические свойства и определяются возможные области применения. Практикум предназначен для ознакомления студентов с порядком выполнения лабораторных работ и оформления отчетов по выполненной работе.

Студенты должны знать правила техники безопасности и строго их соблюдать при выполнении работ.

## Лабораторная работа № 1 МЕТОДИКИ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ МАТЕРИАЛОВ

**Цель работы:** ознакомление с оборудованием для триботехнических испытаний, измерения силы трения; определение коэффициента трения, интенсивности изнашивания и температуры в контакте трущихся тел.

Студент должен:

**знать:**

- основные триботехнические термины (трение, изнашивание, износ и др.);
- основные методики исследования процессов трения и изнашивания;
- методы определения износа трущихся тел;
- устройство и принцип работы машины для испытания материалов на трение и износ 2070 СМТ-1;

**уметь:**

- подготавливать к работе машину для испытания материалов на трение и износ 2070 СМТ-1;
- снимать и оценивать показания индикаторов машины для испытания материалов на трение и износ 2070 СМТ-1;
- выполнять расчеты износостойкости образцов по данным эксперимента и определять классы их износостойкости.

### Методы и средства испытаний на трение и износ

В трибологии используется более 150 методов испытаний материалов и узлов трения, которые регламентируются отечественными и зарубежными стандартами: ГОСТ, ASTM, SAE, ISO и DIN. Эти методы базируются на теориях моделирования, системного анализа и математической статистики.

Основным методом прогнозирования качества трибосопряжений является трибомониторинг. Он охватывает совокупность средств методов испытаний и диагностики, непрерывного контроля и регулирования характеристик подвижных сопряжений. В трибомониторинге выделяют два направления: трибometriю и трибодиагностику.

**Трибометрия** включает методы и средства измерения основных параметров фрикционного контакта (сила трения, износ, температура, шероховатость, контактная деформация, контурная и факти-

ческая площади касания) как в процессе трения, так и после фрикционного взаимодействия.

**Трибодиагностика** – это совокупность методов и средств непрерывного контроля состояния подвижных соединений по продуктам изнашивания, магнитной индукции, акустической эмиссии и т. п.

**Трибомониторинг** является основной частью триботехнических испытаний. Цель этих испытаний – установить совместимость выбранных материалов в паре трения, включая смазочный материал и привести их фрикционно-износные характеристики, которые сопоставляются с классами износостойкости (см. приложение 2), с базами данных по коэффициентам трения материалов и с техническими требованиями к конкретным узлам трения с целью выбора материалов, для которых и выполняются испытания.

В зависимости от назначения, применяемые в трибологии средства испытаний можно условно разделить на три большие группы:

- приборы для определения физико-механических и теплофизических свойств поверхностей контактирующих элементов пары трения (например, твердомеры, дилатометры, приборы для определения затухающих колебаний, дефектоскопы и т. п.);
- лабораторные машины и установки для испытаний материалов на трение и износ;
- стенды для испытания узлов трения.

Машины трения и стенды, как правило, имеют блочный принцип построения и включают ряд функциональных блоков.

1. Испытательный блок, который предназначен для формирования испытываемой пары трения. Он должен обеспечивать точную, надежную и достаточно быструю установку образцов, однозначность и определенность в реализации расчетной схемы испытаний, включая равномерность нагрузки и износа образцов за счет их самоустанавливаемости или других мер. Соединения испытательного блока не должны иметь зазоров, вызывающих дополнительные динамические нагрузки на элементы конструкции. Чаще всего должна обеспечиваться возможность испытаний образцов различных типов по нескольким схемам, т. е. универсальность и возможность быстрой переналадки. Испытательный блок обычно связан с блоком привода, с измерительным блоком и с нагружающим блоком.

2. Блок привода предназначен для сообщения движения одному или нескольким элементам (или образцам), которые входят в узел трения. Он обычно включает электродвигатель (иногда гидродвигатель), передаточный механизм, кинематика которого определяется

фактором относительного движения пары трения. Привод должен обеспечивать плавность движения, без рывков и ударов, широкий диапазон регулирования скорости движения или частоты вращения, устойчивое поддержание заданной программой испытания скорости движения или частоты вращения образца.

3. Блок нагружения предназначен для создания заданной нагрузки на образцы, постоянной или переменной, и поддержания этой нагрузки на заданном уровне. Для этого используют рычажно-гравитационные, пружинные, пневматические, электромагнитные и гидравлические механизмы, которые должны обеспечивать плавное приложение и стабильность режима нагружения независимо от изменений в процессах трения и изнашивания.

4. Блок накопления кинетической энергии (на машинах нестационарного трения), который выполняется в виде набора маховых масс, присоединяемых по мере необходимости к валу машины, на котором закреплен один из испытываемых образцов.

5. Блок для имитации специальной среды (газовой, жидкостной) при испытаниях пары трения. Камера этого блока служит для проведения испытаний в условиях повышенных или пониженных температур, вакуума, загрязнения абразивом, смазочного материала и т. п. Часто она выполняет также защитную функцию, ограждая оператора от воздействия продуктов износа, шума и др.

6. Блоки управления и измерения. Они обычно электрически связаны с машиной и компьютером для обработки информации, регистрируемой в процессе испытания: момента (силы) трения, силы нормального давления, скорости, пути трения, температуры в заданной зоне, работы трения, износа.

В России АО «Точприбор» в настоящее время выпускает серийно разработанные совместно с ИМАШ РАН триботехнические комплексы 2168 УМТ «Унитриб», ИИ-5018, 2070 СМТ-1 и другие модели, имеющие ряд сменных узлов, которые позволяют проводить испытания практически по всем схемам контактирования фрикционных элементов в парах трения, применяемых в машиностроении.

## Оборудование

Машина для испытания материалов (металлов, сплавов и жестких конструкционных пластмасс) на трение и износ 2070 СМТ-1; весы аналитические ВЛА-200М; часы.

## Порядок выполнения работы

1. Изучить методику проведения испытаний на машине СМТ-1 (Приложение 1, паспорт на машину трения СМТ-1).

2. Выполнить (вместе с преподавателем) следующие операции до установки образцов:

- выбрать схему испытаний «образец-контртело» по таблице 1.1;
- определить диапазон частоты вращения образцов (контртела)  $n$ ;
- установить необходимый шпиндель;
- подключить воду для охлаждения;
- установить требуемый коэффициент проскальзывания сменой шкива.

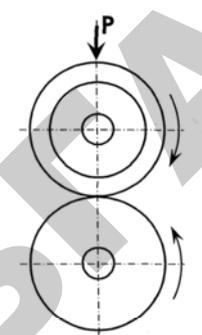
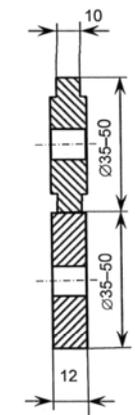
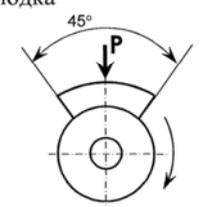
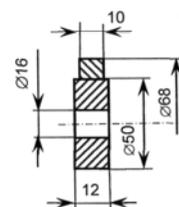
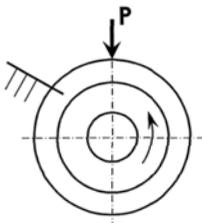
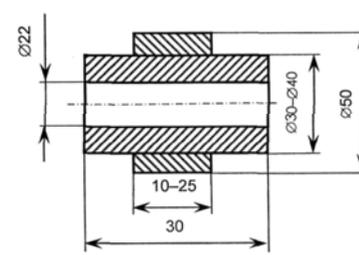
3. Выбрать образец согласно размерам, указанным в таблице 1.1, протереть поверхность трения тампоном, смоченным в растворителе, определить его массу  $m_1$  на весах ВЛА-200М.

Установить образец в держателе. Проверить индикатором биение образцов и их поворотом добиться наименьшего биения.

4. Выключателем подать напряжение на вход электрической схемы машины. Тумблерами, находящимися на передней панели, включить потенциометры, записывающие температуру в зоне трения и момент трения.

5. Установить переключатель рода работы (Приложение 1) в положение «Проверка» и осуществить тарировку системы измерения момента трения. Для этого застопорить фиксатором диск датчика момента трения, на вал машины установить рычаг, уравновесить его и закрепить гайкой. Кнопкой установить диапазон измерения момента трения в положение «1». Резисторами, расположенными на панели потенциометра, установить положение «Нуль». На подвес рычага установить груз массой 5 кг ( $M_{тр} = 20 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ) и резистором «Установка предела» довести стрелку прибора до деления «100». Снять груз и проконтролировать положение нуля. Последовательно увеличивая нагрузку путем установки на подвес грузов массой 0,25; 0,25; 0,5; 0,5 и 0,5 кг, записать показания прибора. Соответствующие моменты трения будут равны 1; 2; 4; 6; 8 и 10 Н·м. Тарировку провести три раза на диапазонах «I» и «II». Снять фиксатор диска (см. паспорт машины трения 2070 СМТ-1).

Таблица 1.1 — Варианты схем испытаний «образец-контртело»

Схемы испытаний	Размеры образцов
<p>Диск-диск</p> 	
<p>Диск-колодка</p> 	
<p>Вал-втулка</p> 	

6. Установить переключатель рода работы (Приложение 1) в положение «Работа» и кнопкой запустить в работу электродвигатель (должна загореться сигнальная лампочка). В зависимости от выбранных режимов нагружения установить диапазоны измерения частоты вращения вала кнопкой (на положение «5» или «10») и кнопкой – «Момент трения» (на «1» или «2»); стрелку потенциометра 5 установить в положение «Нуль»; установить требуемую скорость вращения вала резисторами (грубо) и (точно), сверяясь с показаниями предварительно протарированного механическим тахометром вольтметра.

7. Установить термопару в отверстие образца, обойму с образцом закрепить на валу каретки.

8. Каретку до соприкосновения образцов опускать плавно, не допуская ударов.

9. Требуемую нагрузку задавать пружиной либо навесными грузами. Нагружение образцов вести плавно, вращая винт нагружения при вращении образцов, наблюдая за величиной момента трения по потенциометру.

10. Скорректировать частоту вращения вала резисторами.

11. Испытание образца на износ провести в течение времени  $t = 40$  мин.

12. После окончания испытаний выключить машину (последовательность операций — обратная вышеописанной).

13. Провести оценку среднего квадратического отклонения случайной составляющей погрешности измерения момента трения и построить тарировочный график  $M_{тр} = M(n')$ , где  $n'$  – показания по шкале потенциометра. Рассчитать коэффициент трения.

14. Определить массу образца после истирания ( $m_2$ ) и рассчитать интенсивность изнашивания по формуле:

$$I = (m_1 - m_2) / (L),$$

где  $L$  – длина пути скольжения ( $L = \pi d n t$ ).

15. Сравнить полученное значение интенсивности изнашивания с данными таблицы приложения 1 и определить класс износостойкости исследованного образца.

16. Построить графики изменения температуры и коэффициента трения от времени испытаний.

## Содержание отчета

1. Название работы.
2. Схема испытаний.
3. Эскиз образцов.
4. Таблицы результатов испытаний.
5. Тарировочный график  $M_{тр} = M(n')$ .
6. Расчет интенсивности изнашивания.
7. Графики изменения температуры и коэффициента трения от времени испытаний.
8. Выводы.

## Контрольные вопросы

1. Какие методы измерения коэффициента трения и износа наиболее часто применяются в триботехнике?
2. Какие машины трения Вы знаете?
3. Чем отличаются лабораторные испытания от стендовых и эксплуатационных?
4. Назовите схемы контактирования элементов пары трения и реальные узлы машин, в которых они могут быть реализованы.

**Рекомендуемая литература:** [1–6]

## Лабораторная работа № 2 ИЗУЧЕНИЕ МИКРОГЕОМЕТРИИ ПОВЕРХНОСТИ

**Цель работы:** изучить методики определения параметров шероховатости поверхностей; установить характер влияния вида механической обработки поверхности на параметры шероховатости.

Студент должен:

**знать:**

- основные характеристики макро- и микрогеометрии поверхности твердого тела (шероховатость, волнистость и др.);
- классификацию шероховатости (технологическая, эксплуатационная и др.) и условия ее формирования;
- параметры шероховатости;
- методику получения профилограмм с помощью профилографа «Калибр»;

**уметь:**

- подготавливать к работе профилограф «Калибр»;
- снимать профилограммы образцов;
- рассчитывать параметры шероховатости поверхности.

### Геометрия поверхностей

В процессе изготовления или при эксплуатации деталей машин на их поверхности формируются неровности, которые определяют топографию поверхности. Принято различать четыре вида отклонений от правильной геометрической формы поверхности: макроотклонения, волнистость, шероховатость и субмикрошероховатость. К макроотклонениям относятся единичные, неповторяющиеся отклонения формы от номинальной идеализованно правильной геометрии (выпуклость, вогнутость, конусность) в соответствии с ГОСТ 2789–73:

1. Волнистость представляет собой совокупность периодических, регулярно повторяющихся, близких по размерам выступов и впадин, расстояние между которыми значительно больше, чем у неровностей, образующих шероховатость поверхности. Расстояние между вершинами волн (шаг волн) находится в пределах 0,8...10 мм, а высота, как правило, – в пределах 0,03...500 мкм. Форма волн близка к синусоидальной.

2. Под шероховатостью поверхности понимают совокупность микронеровностей с относительно малым шагом, образующих рельеф поверхности. Шаг микронеровностей меняется в пределах 2...800 мкм, а их высота – от 0,01 до 400 мкм. На выступах, образующих шероховатость, имеются еще более мелкие неровности – субмикрошероховатости. Субмикрошероховатость пока не нормируется. В настоящее время разработаны достаточно надежные средства ее оценки, однако не созданы приборы, пригодные для инженерной практики. Субмикрошероховатость играет существенную роль в протекании контактных процессов. С помощью электронно-микроскопических исследований установлено, что субмикро-шероховатость образуется неровностями, имеющими высоту 2...20 нм.

Пример профилограммы участка поверхности, по которой определяют параметры микрошероховатости деталей машин, представлена на рисунке 2.1.

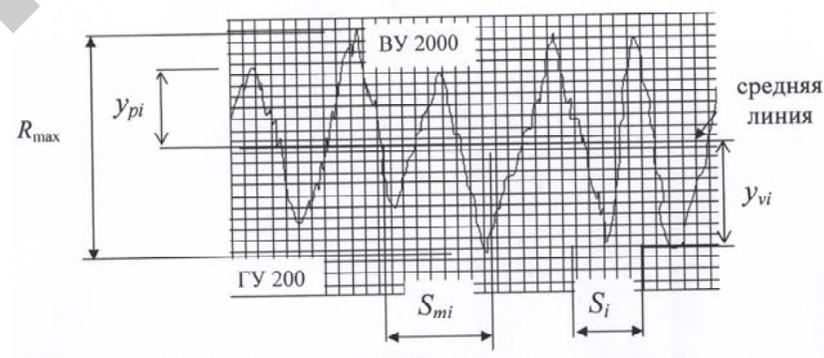


Рисунок 2.1 – Профилограмма

### Оборудование

Измерительный инструмент для определения длины линий; профилограф «Калибр»; образцы материалов, обработанных различными методами (шлифованием, точением, фрезерованием, полированием).

## Порядок выполнения работы

1. Изучить инструкцию и методику получения профилограмм с помощью профилографа «Калибр».

2. Получить профилограммы образцов (по указанию преподавателя).

3. Рассчитать геометрические параметры поверхности. При этом руководствоваться следующей методикой:

- выбрать характерный участок профилограммы, содержащий не менее пяти микровыступов и пяти микровпадин;
- провести среднюю линию профиля;
- на средней линии нанести отрезки (не менее 20) и определить для них отклонения от профиля  $y_i$ ;
- рассчитать среднее арифметическое отклонение профиля по формуле:

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|,$$

где  $n$  – число разбиений базовой линии на отрезки достаточно малой длины;

$y_i$  – отклонение профиля от средней линии на  $i$ -м отрезке;

- определить значения высот пяти наибольших выступов и глубин пяти наибольших впадин;
- вычислить высоту неровностей профиля  $R_z$  по десяти точкам, как  $1/5$  суммы средних абсолютных значений высот пяти наибольших выступов и глубин пяти наибольших впадин, измеренных по отношению к средней линии профиля на базовой длине, т. е.:

$$R_z = \frac{1}{5} \left( \sum_{i=1}^5 |y_{p,i}| + \sum_{i=1}^5 |y_{v,i}| \right),$$

где  $y_{p,i}$  – высота наибольших пяти выступов;  $y_{v,i}$  – глубины наибольших пяти впадин;

- определить максимальную высоту микронеровностей  $R_{\max}$  – расстояние между линией впадин и линией выступов, которые проводятся параллельно средней линии профиля соответственно через самую глубокую впадину и вершину самого высокого выступа  $R_{\max} = y_{p, \max} + y_{v, \max}$ ;

- определить шаг микронеровностей  $S_m$  – среднее расстояние между двумя соседними точками пересечения со средней линией профиля участков, имеющих с ней одинаковый по знаку наклон (расчет проводить для  $n = 5$ ):

$$S_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{m,i},$$

- где  $n$  – число пересечений;  $S_{m,i}$  – шаг профиля на  $i$ -м участке;
- вычислить среднее расстояние между выступами:

$$s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i,$$

где  $S_i$  – расстояние между соседними выступами на базовой длине профилограммы  $l$ ;

- с учетом различия в увеличении прибора по горизонтали и вертикали рассчитать средний угол профиля поверхности:

$$\operatorname{tg} \alpha_H = 4R_a / s_m.$$

4. Для выбранной профилограммы построить опорную кривую профиля поверхности  $t_p(\varepsilon)$ , т. е. зависимость опорной длины профиля от уровня сечения профиля. Для этого следует:

- параллельно средней линии профиля провести не менее 10 сечений;
- для каждого сечения определить  $\varepsilon$  как отношение расстояния этого сечения от линии начала отсчета к  $R_{\max}$  и  $t_p$  как относительную сумму длин сечений микронеровностей по формуле:

$$t_p = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^n l_i,$$

где  $l_i$  – длина сечения  $i$ -го выступа.

5. Определить значения параметров  $b$  и  $v$  начального участка функции  $t_p = b\varepsilon^v$ . Для этого на кривой выбрать две характерные точки в интервале  $0 \dots \varepsilon_H$ , где  $\varepsilon_H$  – значение  $\varepsilon$  сечения, проходящего через вершину самого низкого выступа, и определить пары значений  $t_{p,1}, \varepsilon_1; t_{p,2}, \varepsilon_2$ . Тогда  $b$  и  $v$  могут быть получены в результате решения системы уравнений:

**Лабораторная работа № 3**  
**ИЗУЧЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ МИКРОГЕОМЕТРИИ**  
**В ПРОЦЕССЕ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ**  
**И ЕЕ ВЛИЯНИЯ НА ПАРАМЕТРЫ ТРЕНИЯ**

$$\begin{cases} t_{p,1} = b\varepsilon_1^v \\ t_{p,2} = b\varepsilon_2^v \end{cases}$$

Используя соотношение  $R_B = s_m^2 / (bRp)$ , определить средний радиус кривизны выступов  $R_B$ , где  $R_B$  – наибольшая высота выступа.

6. Полученные результаты представить в виде таблицы 2.1.

Таблица 2.1

Материал образца	Вид обработки	$R_a$	$R_z$	$R_{max}$	$S_m$	$S$	$R_B$	$\alpha_H$	$b$	$v$

**Содержание отчета**

1. Название работы.
2. Схема испытаний.
3. Профилограмма поверхности образцов.
4. Расчет геометрических параметров поверхности.
5. Таблица полученных результатов.
6. Опорная кривая профиля поверхности.
7. Выводы.

**Контрольные вопросы**

1. Какими параметрами характеризуется шероховатость поверхности по ГОСТ 2789–73?
2. Как проводят среднюю линию профиля?
3. Как строится опорная кривая профиля поверхности?
4. Какой должна быть опорная кривая профиля поверхности, обеспечивающая наименьшие контактные напряжения при соприкосновении с гладкой плоскостью?

**Рекомендуемая литература:** [1, 3, 4, 7, 8]

**Цель работы:** определить характер влияния параметров шероховатости на коэффициент трения и скорости изнашивания, установить закономерности изменения топографии поверхности в процессе динамического контакта.

Студент должен:

**знать:**

- характеристики дискретного контакта твердых тел (номинальная, контурная, фактическая площадь контакта);
- механизм взаимодействия контактирующих тел в зависимости от механических свойств и величины внешнего давления;
- условие возникновения пластического ненасыщенного контакта;
- двойственную природу сил трения;

**уметь:**

- работать с машиной для испытания материалов на трение и износ 2070 СМТ-1.
- работать с профилографом «Калибр».
- подбирать вид и режимы механической обработки рабочей поверхности детали, обеспечивающие наименьшие затраты на механическую обработку, наименьшее время приработки и износ рабочей поверхности детали в результате приработки.

**Контактное взаимодействие твердых тел**

Вследствие деформируемости реальных тел их контакт осуществляется не в точке, а внутри некоторой области контакта, которая при наличии микрорельефа поверхности (волнистости, шероховатости) состоит из совокупности дискретных пятен контакта. В области взаимодействия поверхностей и в ее окрестности возникает напряженное состояние, которое оказывает существенное влияние на процессы трения и изнашивания. От контактных напряжений зависит состояние поверхности и поверхностных пленок на ней,

возникновение адгезионных связей в области взаимодействия, накопление поврежденности поверхностных слоев и их разрушение.

Наибольшая концентрация напряжений достигается вблизи отдельных пятен контакта на расстояниях, соизмеримых с масштабом отдельной неровности (микроуровень). При удалении от поверхности на расстояние, соизмеримое с размером области контакта (макроуровень), на величину и распределение напряжений в большей степени оказывают влияние макроформа и объемные свойства взаимодействующих тел.

В триботехнике рассматриваются некоторые модельные задачи о контактом взаимодействии двух тел (контактные задачи), решения которых могут быть применены для анализа напряженного состояния тел как на микроуровне (контакт неровностей), так и на макроуровне (взаимодействие зубьев шестерен, деталей шариковых и роликовых подшипников и т. д.) Задачи о контакте двух сфер и двух цилиндров, относятся к контактными задачам для тел несогласованной формы. Характерной особенностью контакта тел несогласованной формы является то обстоятельство, что их первоначальный контакт (при нулевой нагрузке) осуществляется в точке (точечный контакт) или по линии (линейный контакт). Так, в шарикоподшипнике контакт между шариком и обоймой – точечный, а в роликовом подшипнике имеет место линейный контакт между цилиндрическим роликом и кольцом. В отличие от контакта тел согласованной формы, имеющих очень близкие очертания и соизмеримую с размерами тел область взаимодействия (примером могут служить плоские скользящие опоры, подшипники скольжения и т.д.), область контакта между телами несогласованной формы, как правило, мала, по сравнению с размерами самих тел. Вблизи этой области (при контактном взаимодействии) возникает высокая концентрация напряжений, которая определяется главным образом геометрическими и механическими характеристиками тел в окрестности области контакта. Конфигурация тел вдали от области контакта практически не влияет на характер распределения контактных напряжений.

На микроуровне модельные задачи о взаимодействии двух тел цилиндрической или сферической формы могут быть использованы для анализа напряжений в области контакта (двух неровностей) на поверхностях взаимодействующих тел, которые часто моделируются с выступами сферической формы, или двух волн (контакт двух цилиндров).

Решения контактных задач позволяют изучить зависимость контактных характеристик (контактные давления, форму и размер области контакта, сближение тел) и напряженного состояния вблизи области взаимодействия от нагрузки, приложенной к контактирующим телам, формы поверхностей, механических свойств взаимодействующих тел и условий контакта (наличия трения, сцепления и т. д.).

### Оборудование

Машина трения СМТ-1; профилограф типа «Калибр»; набор образцов; весы аналитические лабораторные ВЛА-1000; часы.

### Порядок выполнения работы

#### *Изучение влияния параметров шероховатости на коэффициент трения и скорость износа*

1. Установить образец с известной микрогеометрией поверхности (использовать образцы, изучение которых проводилось при выполнении работы № 2) в машину трения СМТ-1.
2. Включить машину (Приложение 1) при заданных режимах (давлении, скорости скольжения) и определить значение коэффициента трения.
3. Выполнить пп. 1 и 2 для других образцов с известной микрогеометрией поверхности (по указанию преподавателя).
4. Результаты испытаний представить в виде таблицы 3.1.

Таблица 3.1

Вид обработки поверхности	$P_z$	$b$	$v$	$V_c$	$P_c$	$f$	$L$

5. По данным, внесенным в таблицу 3.1, построить графики зависимости  $f(P_z)$  при различных  $V_c$  и  $P_c$ . Сделать вывод о характере зависимостей.

### Изучение изменений микрогеометрии поверхности в процессе трения

1. Получить профилограмму для данного образца. Определить основные параметры шероховатости поверхности ( $R_a$ ,  $R_z$ ,  $s_m$ ).
2. Установить образец в машину трения СМТ-1 и провести испытание при заданных режимах.
3. Периодически через равные промежутки времени снимать профилограмму поверхности. Профиль желательнее определять для одного и того же участка. Рассчитать параметры шероховатости согласно п.1.
4. Методом взвешивания определить износ тела за время трения.
5. Результаты испытаний представить в таблице 3.2.

Таблица 3.2

Время трения	$R_a$	$R_z$	$s_m$	$V_c$	$P_c$	$f$	$L$

6. По формуле  $P_{ск} = 0,065HB$  для данного материала определить критическое значение давления  $P_{ск}$ , при превышении которого наблюдается пластический ненасыщенный контакт.
7. По полученным данным построить графики зависимостей, сделать вывод о характере изменений этих величин в процессе трения при  $P_c > P_{ск}$  и  $P_c < P_{ск}$ .

### Содержание отчета

1. Название работы.
2. Таблица результатов испытаний.
3. Графики зависимости  $f(P_z)$  при различных  $V_c$  и  $P_c$ .
4. Профилограмма образца до испытаний.
5. Расчет основных параметров шероховатости поверхности.
6. Профилограммы через равные промежутки времени испытаний на машине трения СМТ-1.
7. Расчет основных параметров шероховатости поверхности.
8. Таблица результатов испытаний.
9. Расчет критического значения давления для данного материала.
10. Графики зависимостей параметров шероховатости от времени испытаний.
11. Выводы.

### Контрольные вопросы

1. Дайте определение нормальной, контурной и фактической площадей контакта. Какие существуют экспериментальные методы их определения?
2. Как влияют параметры шероховатости на коэффициент трения?
3. Предложите и обоснуйте способ расчета величины износа по изменению шероховатости контактирующих поверхностей.

Рекомендуемая литература: [1, 3, 7, 8, 9]

## Лабораторная работа № 4 ЗАКОНОМЕРНОСТИ ТРЕНИЯ КАЧЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

**Цель работы:** экспериментально изучить влияние режимов нагружения на коэффициент трения качения.

Студент должен:

**знать:**

- значение термина «качение». Виды качения;
- определение коэффициента трения качения;
- механизм трения качения (упругих и твердых тел);
- особенность поведения коэффициента трения качения при увеличении диаметра твердого тела;
- влияние смазки при чистом качении;

**уметь:**

- работать с машиной для испытания материалов на трение и износ 2070 СМТ-1;
- обосновывать применение материалов и смазки в узлах трения качения.

### Трение качения

Сила трения качения, по крайней мере, в 10 раз меньше силы трения скольжения. Сопротивление качению объясняется деформационными потерями в нижележащем твердом теле.

При отсутствии пластической деформации трение обусловлено гистерезисными потерями в твердом теле. При трении качения происходит взаимное проскальзывание поверхностей. Гистерезисные потери при трении качения поясняются с помощью рисунка 4.1.

Еще О. Рейнольдс (1876 г.) заметил, что когда цилиндр из твердого материала катится по плоской поверхности резины, то при каждом обороте он проходит путь меньший, чем длина окружности цилиндра. Он предположил, что резина растягивается в точке *C* не так, как в точках *B* и *D*, и в результате имеет место, как уже упоминалось, проскальзывание с соответствующим рассеиванием энергии. Из рисунка 4.1 видно, что впереди перед шариком в точке *D* образуется ступенька, а позади шарика в точке *A* деформируемый материал частично восстанавливается под действием сил упругости либо упругого гистерезиса. Кроме того, вследствие необратимой пластической деформации силы реакции позади шарика меньше,

чем силы давления впереди него. В результате шарик совершает работу деформации.

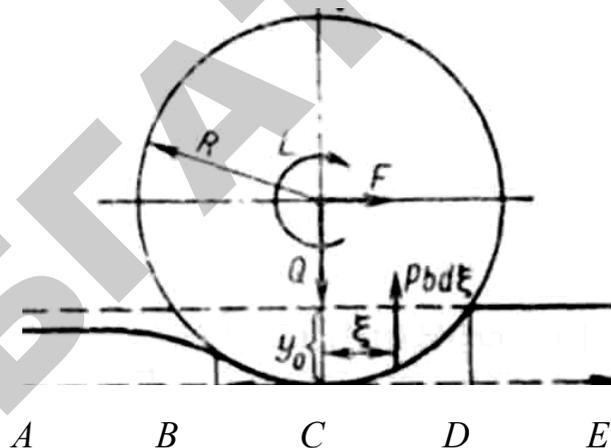


Рисунок 4.1 – Схема деформации основания при качении шарика по плоскому упругому основанию

При трении качения металлического шарика по основанию из металла деформации поверхностей невелики, и оксидные пленки, имеющиеся на поверхностях трения, не подвергаются значительным разрушениям.

Для приработанного состояния поверхностей по экспериментальным данным сила трения качения  $F = k N^n / D^m$ ,

где  $k$  - константа, зависящая от материала;  $N$  - нагрузка на шарик;  $D$  - диаметр шарика;  $n = 1,7..1,85$ ;  $m = 1,5..1,6$ .

Сила трения в подшипниках качения при высоких скоростях зависит от вязкости смазочного материала и может достигать больших величин. На силу трения в подшипниках качения влияют вязкость смазочного материала, трение в сепараторе подшипника, размер шариков, шероховатость поверхности и др.

Момент трения в подшипниках качения:

$$M = 0,5f_Q Qd \quad \text{или} \quad M = 0,5f_T Td,$$

где  $f_Q$  и  $f_T$  – коэффициенты трения при радиальной и осевой нагрузках, отнесенные к диаметру вала  $d$ ;  $Q$  и  $T$  – радиальная и осевая нагрузки.

Сила трения в подшипниках качения увеличивается в случае технологических и монтажных погрешностей, повышенных скоростей и при трении в уплотнениях. Значения коэффициентов трения в различных видах подшипников качения находятся в диапазоне 0,002–0,008.

### Оборудование

Машина трения СМТ-1; тела качения из стали (2 шт.), алюминия или бронзы (1 шт.); индикатор часового типа.

### Порядок выполнения работы

1. Установить стальной ролик (контртело) на валу машины трения (Приложение 1), установить второй ролик диаметром 40 мм и высотой 12 мм из стали на валу каретки. Протереть поверхности трения образцов тампоном, смоченным в растворителе.

2. Проверить биение образцов индикатором, наименьшее биение достигается проворачиванием образцов относительно вала. Операцию по установке коэффициента проскальзывания  $\kappa_n$  не выполнять – на всех машинах трения  $\kappa_n = 0$ .

3. Сдвинуть каретку в левое положение и надеть петлю троса уравнивания на винт каретки, плавно опустить каретку до соприкосновения образцов и зафиксировать ее от осевого перемещения.

4. Включить машину трения (порядок операций включения изложен в Приложении 1), исключая операции по тарировке системы измерения момента трения.

5. Резисторами установить частоту вращения вала  $n = 240 \text{ мин}^{-1}$  (мгновенная скорость в точке контакта  $V = 0,5 \text{ м/с}$ ), пружиной или навесными грузами задать нагрузку  $N = 100 \text{ Н}$ .

6. Скорректировать частоту вращения вала и осуществить проработку поверхностей трения в течение 15 мин.

7. Устанавливая значения  $N$  и  $V$  согласно таблице, записать момент трения, соответствующий каждому из заданных значений  $N$  и  $V$ . Продолжительность испытаний и записи момента трения для каждого из значений  $N$  и  $V$  должна быть не менее 5 мин.

8. Используя полученные при выполнении лабораторной работы № 1 тарировочные графики, определить значения момента трения  $M$  для различных режимов нагружения. При обработке кривой за-

писи момента трения выбрать семь значений момента трения и рассчитать коэффициент трения качения по формуле  $f_k = M/N$ .

9. Выполнить статистическую обработку полученных результатов. Полученные результаты занести в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Влияние режимов нагружения на коэффициент трения качения

$N, \text{ Н}$	50	100	150	200	100			
$V, \text{ м/с}$	0,5				0,1	0,3	0,6	1,0
$M, \text{ Н}\cdot\text{м}$								
$f, \text{ м}$								
$\Delta$								

10. Построить графики зависимостей  $f_k = f(N)$  и  $f_k = f(V)$ . На графиках указать доверительные интервалы.

11. По изложенной выше методике провести измерения коэффициента трения качения в присутствии смазки. Для этого: остановить машину, протереть тампоном поверхности стальных роликов и повторить испытания по п.п. 4–8 настоящей методики. Смазку вводить капельным способом в зону трения — одна капля смазки на одно испытание.

12. Выполнить статистическую обработку полученных данных (п. 9), занести их в таблицу и построить графики (п. 10).

13. Изучить сопротивление качению тел, выполненных из различных металлов. Для этого: заменить стальной ролик на валу каретки на бронзовой или алюминиевый (ролик на валу машины не заменяется), протереть тампоном поверхности трения обоих тел качения, плавно привести тела качения в контакт и провести испытания по п.п. 4–8 настоящей методики.

14. Выполнить статистическую обработку полученных данных (п. 9), занести их в таблицу и построить графики (п. 10).

15. Сделать вывод о влиянии режимов нагружения и механических свойств материалов сопрягаемых тел на сопротивление качению.

### Содержание отчета

1. Название работы.
2. Схема испытаний.

3. Таблица «Влияние режимов нагружения на коэффициент трения качения» для сухого трения, со смазкой, разноименных материалов.

4. Графики зависимостей  $f_k = f(N)$  и  $f_k = f(V)$  с указанием доверительных интервалов.

5. Выводы.

### Контрольные вопросы

1. Почему цилиндр катится по плоскости, а не скользит?

2. Как влияет изменение модуля упругости сопрягаемых тел на сопротивление качению? Какими причинами обусловлено это влияние?

3. В каких случаях введение смазки в зону трения снижает коэффициент трения качения? Почему?

4. После многократного качения шара по одной и той же дорожке трения коэффициент сопротивления качению уменьшается. Почему?

Рекомендуемая литература: [1, 4, 10, 11]

## Лабораторная работа № 5 ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ НАГРУЖЕНИЯ НА КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

**Цель работы:** изучить влияние режимов нагружения на процесс фрикционного взаимодействия твердых тел (металлов и пластмасс).

Студент должен:

**знать:**

- условие возникновения трения скольжения;
- объяснение молекулярно-механической теории трения скольжения твердых тел;
- факторы, влияющие на коэффициент трения;
- особенности трения пористых материалов;
- преимущества и недостатки полимерных материалов;

**уметь:**

- работать с машиной для испытания материалов на трение и износ 2070 СМТ-1;
- подбирать материал для узла трения с известными условиями работы.

### Трение твердых тел

Первые результаты исследования трения твердых тел были обнаружены в трудах Леонардо да Винчи. Была выявлена пропорциональность сопротивления трения нагрузке, действующей на трущиеся поверхности. Кроме того, было отмечено, что тела с шероховатой поверхностью имеют большее сопротивление трения. Г. Амонтон в 1699 г. предложил записывать формулу для определения коэффициента трения в виде:

$$f_T = F_T / P,$$

где  $F_T$  – сила трения;  $P$  – приложенная по нормали к поверхности трения нагрузка, сжимающая взаимодействующие при трении твердые тела.

Это выражение получило название *закона Амонтона*.

Важнейший вклад в развитие науки о трении твердых тел внесли работы известного французского ученого Ш. Кулона. Он установил не менее знаменитый закон для внешней силы трения, носящий его имя, в виде

$$F_T = A + f_T' P,$$

где  $A$  – характеристика сцепляемости между взаимодействующими твердыми телами при трении, не зависящая от нагрузки;  $f_T'$  – одна из составляющих коэффициента трения;  $P$  – нагрузка.

Наиболее полно и завершено молекулярная теория трения получила развитие в трудах Б.В. Дерягина. Он дал новое обоснование, построенное на учете молекулярной шероховатости поверхностей взаимодействующих твердых тел, являющейся следствием дискретной структуры вещества. При расчете сил трения предполагается, что расположение и размеры атомов и молекул контактирующих тел не меняются, а целостность каждого тела обеспечивается силами межатомного и межмолекулярного взаимодействия, т. е. силами притяжения и отталкивания.

Предложенная И.В. Крагельским теория внешнего трения объясняет силу трения также двумя причинами:

- 1) силой сопротивления движению одного из взаимодействующих тел относительно другого, обусловленную межатомными и межмолекулярными взаимодействиями в зонах фактического касания твердых тел (молекулярная составляющая силы трения);
- 2) внедрением при контактировании отдельных микронеровностей более жестких тел в поверхность менее жестких тел. При относительном перемещении внедрившиеся микронеровности деформируют (передеформируют) поверхностные слои менее жесткого тела. Сила сопротивления, возникающая при этом, называется деформационной составляющей силы трения.

Следует отметить, что при трении кроме механических имеют место тепловые, электрические, магнитные и другие явления.

Взаимодействие контактирующих тел при скольжении друг относительно друга называется трением скольжения. Наряду с этим различают трение покоя, когда относительная скорость контактирующих тел равна нулю.

По кинематическому признаку внешнее трение подразделяют на трение: скольжения, качения и вращения.

При внешнем трении скольжения в случае поступательного движения тела относительная скорость  $V_{ск}$  всех точек одного из взаимодействующих тел практически одинаковая по значению и направлению.

При трении качения можно, по крайней мере, указать одну точку в зоне контакта, в которой относительная скорость скольжения взаимодействующих тел будет равна нулю.

Трение вращения по существу является частным случаем трения скольжения, которое имеет место при вращательном движении одного из контактирующих тел. В этом случае скорости относительного скольжения изменяются, подчиняясь определенной закономерности во всех точках контакта, за исключением точки пересечения площадки контакта с осью вращения; если взаимодействующие твердые тела совершают сложное движение, то преобладающим будет трение скольжения, т. е. во всех точках контакта относительная скорость скольжения будет отлична от нуля, хотя и неодинакова по значению.

Под внешним трением будем понимать комплекс явлений в зонах контактов микронеровностей двух скользящих друг относительно друга твердых тел, связанных с возникновением силы трения.

Кроме деления трения на внешнее и внутреннее важным является деление внешнего трения на сухое и граничное. Как показывает практика, сила взаимодействия при сухом трении обычно выше, чем при граничном.

Сила трения вызывает не только диссипацию энергии (фрикционные потери), но и существенно влияет на изнашивание взаимодействующих твердых тел. Поэтому в инженерной практике обычно используют комплекс мероприятий, приводящих к уменьшению силовых взаимодействий при трении.

Под силой трения при скольжении твердых тел друг относительно друга (сила внешнего трения)  $F_T$  понимают силу сопротивления относительному скольжению контактирующих твердых тел, лежащую в плоскости их касания. Сила внешнего трения:

$$F_T = F_{T_{\text{мол}}} + F_{T_{\text{мех}}},$$

где  $F_{T_{\text{мол}}}$  – составляющая силы трения, обусловленная межатомным и межмолекулярным взаимодействием;  $F_{T_{\text{мех}}}$  – механическая составляющая силы трения, обусловленная деформированием (передеформированием) поверхностных слоев менее жесткого твердого тела внедрившимися микронеровностями более жесткого тела.

### Оборудование

Машина трения СМТ-1; штангенциркуль; контртело; образцы.

### Порядок выполнения работы

1. Выбрать образец и схему испытаний ранее использованные в лабораторной работе № 1, установить контртело (ролик диаметром  $D = 40$  мм и высотой  $h = 12$  мм) на валу машины трения (Приложение 1). Протереть тампоном, смоченным в растворителе, поверхности трения образца и контртела. Установить образец в держателе машины.

2. Включить машину трения (Приложение 1).

3. Резисторами установить частоту вращения вала  $n = 240$  мин<sup>-1</sup> (скорость скольжения  $V = 0,5$  м/с).

4. Установить держатель с образцом на вал каретки и задать нагрузку  $N = 100$ Н.

5. Скорректировать частоту вращения вала и осуществить приработку поверхностей трения в течение 15 мин.

6. Установить значения  $N$  и  $V$  (см. таблицу 5.1) и записать момент трения, соответствующий каждому значению  $N$  и  $V$ . Продолжительность изнашивания и регистрации момента трения для каждого из заданных значений  $N$  и  $V$  должна быть не менее 5 мин.

7. Используя полученные при выполнении лабораторной работы №1 тарифовочные графики, определить значения момента трения и коэффициента трения для различных значений  $N$  и  $V$ . При обработке кривой записи момента трения выбрать для каждого фиксированного значения  $N$  и  $V$  семь значений момента трения и рассчитать.

8. Определить среднее значение  $f$  по формуле:

$$f = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i,$$

где  $n = 7$  – число параллельных измерений.

9. Рассчитать несмещенную выборочную дисперсию:

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_i - \bar{f})^2.$$

10. Определить доверительный интервал  $\Delta = t \cdot S / \sqrt{n - 1}$ , используя критерий Стьюдента  $t$ . Для 95 %-ного доверительного интервала и  $n = 7$  величина  $t = 2,45$ . Тогда с вероятностью  $P = 0,95$  доверительный интервал:

$$\Delta = f - 2,45s/\sqrt{n-1}; \quad \Delta = f + 2,45s/\sqrt{n-1};$$

11. Рассчитать значения  $f$  и  $\Delta$  для различных режимов нагружения. Полученные данные представить в виде таблицы 5.1.

Таблица 5.1 – Влияние режимов нагружения на коэффициент трения

$N, H$	50	100	150	200	100			
$V, м/с$	0,5				0,1	0,3	0,6	1,0
$M, Н \cdot м$								
$f$								
$\Delta$								

В зависимости от материала образца режимы нагружения могут быть изменены.

12. Построить графики зависимостей  $f = f(N)$  и  $f = f(V)$ . На графиках указать доверительные интервалы.

13. Построить линии равных коэффициентов трения для различных значений  $N$  и  $V$ . Для этого:

– параллельно оси скоростей на графиках  $f = f(V)$  построенных для различных значений  $N$ , провести сечение, соответствующее  $f = 0,2$ ;

– выбрать значения  $N$  и  $V$ , соответствующие точкам пересечения секущей линии с кривыми  $f = f(V)$ , построить соответствующие им точки в системе  $N-V$ ;

– построить линию равных значений коэффициентов трения по точкам в системе  $N-V$ ;

– по описанной методике построить линии равных значений для других двух величин коэффициента трения.

14. Уменьшить площадь поверхности трения образца до  $A_a = 1,5$  см<sup>2</sup> и определить коэффициент трения при  $N = 100$  Н и  $V = 0,5$  м/с.

15. Определить  $f$  при  $N = 100$  Н и  $V = 0,5$  м/с для площади  $A_a$  образца, равной 1 см<sup>2</sup>.

16. Рассчитать коэффициенты взаимного перекрытия для  $A_a = 2; 1,5; 1$  см<sup>2</sup> по формуле  $k_{вз} = A_a / (\pi Dh)$ .

17. Данные по  $k_{вз}$  и  $f$  представить в виде таблицы 5.2.

Таблица 5.2 – Зависимость коэффициента трения от коэффициента взаимного перекрытия

$A_a, \text{см}^2$	2	1,5	1,0
$k_{вз}$			
$f$			

18. Сделать вывод о влиянии конструктивных параметров узла трения на его фрикционные характеристики.

### Содержание отчета

1. Название работы.
2. Схема испытаний.
3. Таблица результатов «Влияние режимов нагружения на коэффициент трения» для металлов и пластмасс.
4. Графики для  $f = f(N)$  и  $f = f(V)$  металлов и пластмасс.
5. Линии равных коэффициентов трения в координатах  $N-V$  для металлов и пластмасс.
6. Таблица «Зависимость коэффициента трения от коэффициента взаимного перекрытия» для металлов и пластмасс.
7. Выводы.

### Контрольные вопросы

1. Какая из пар трения (металл–металл, металл–полимер, полимер–полимер) по фрикционным характеристикам более чувствительна к изменению  $k_{вз}$ ?
2. В каком случае возможен подъем? После достижения минимума?
3. Посредством каких факторов оказывает влияние температура в зоне контакта на коэффициент трения?
4. Стальной ползун движется возвратно-поступательно с низкой скоростью по поверхности полимерной направляющей. Контакт вязкоупругий. Какие участки дорожки трения направляющей будут изнашиваться интенсивнее? Почему?

Рекомендуемая литература: [1, 4, 12, 13]

## Лабораторная работа № 6 ИЗУЧЕНИЕ ИЗНАШИВАНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ЗАКРЕПЛЕННЫМ АБРАЗИВОМ

**Цель работы:** экспериментально изучить влияние режимов нагружения и твердости материалов на интенсивность их изнашивания закрепленным абразивом.

Студент должен:

**знать:**

- значение термина «абразивное изнашивание»;
- виды абразивных частиц;
- факторы, влияющие на процесс абразивного изнашивания;
- механизмы разрушения поверхности трения деталей твердыми абразивными частицами;
- механизм абразивного изнашивания полимерных материалов;

**уметь:**

- работать с машиной для испытания материалов на трение и износ 2070 СМТ-1.

### Изнашивание твердых тел

Под изнашиванием понимают процесс разрушения и отделения материала с поверхности твердого тела или накопления его остаточной деформации при трении, проявляющийся в постепенном изменении размеров и формы тела.

Износ есть результат изнашивания, определяемый в единицах длины, объема, массы. Износ деталей и узлов трения приводит к ухудшению функциональных показателей машины и, как правило, регламентирует ее ресурс. В результате износа нарушается кинематическая точность механизмов, снижается производительность, уменьшается прочность деталей, увеличиваются расходы на ремонт машины, затраты энергии на производство конечной продукции, появляются не предусмотренные расчетом дополнительные нагрузки, вибрация, шум.

Термины и определения в области изнашивания регламентированы ГОСТ 27674 «Трение, изнашивание и смазка». Количественное изнашивание характеризуется скоростью изнашивания  $y$  – отношением значения износа  $\Delta h$  к интервалу времени  $t$ , в течение которого он возник, или интенсивностью изнашивания  $I$  – отношением износа  $\Delta h$  к обусловленному пути  $L$ , на котором происходило

изнашивание, или к объему выполненной работы. Различают мгновенную (в определенный момент времени) и среднюю скорость изнашивания (за определенный интервал времени).

Под износостойкостью понимают свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях трения, оцениваемое величиной, обратной скорости или интенсивности изнашивания.

Значения износостойкости на практике колеблются в широких пределах  $10^3 \dots 10^{13}$ . Установлены десять классов износостойкости изделий от 3 до 12 в соответствии с показателем степени (Приложение 1).

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

Наибольшее распространение получила следующая классификация видов изнашивания по характеру воздействия на поверхность трения и протекающих на ней процессов при эксплуатации машин:

**механическое изнашивание** – абразивное; гидроабразивное (газоабразивное); гидроэрозионное (газоэрозионное); кавитационное; усталостное; изнашивание при фреттинге; изнашивание при заедании;

**коррозионно-механическое** – окислительное; изнашивание при фреттинг-коррозии; водородное, в агрессивных средах;

**молекулярно-механическое** – при схватывании, адгезионное, тепловое, электроэрозионное.

### Оборудование

Машина трения СМТ-1; шлифовальная шкурка М 64С 16-П С А (с размером абразивных зерен основной фракции шлифматериала 160 мкм) и У2Г 63С М63 СФЖ А (с размером абразивных зерен основной фракции шлифматериала не более 63 мкм) (ГОСТ 13344–79); два образца цилиндрической формы из стали 45 ГОСТ 1050–94. Смазочный материал промышленное масло И-Г-А-32 ГОСТ 17479.4–87.

### Порядок выполнения работы

1. Подготовить образец для испытаний согласно размерам, представленным в лабораторной работе № 1, установить образец на валу машины трения. Протереть последовательно бензином и ацетоном поверхности трения образца. Установить в держателе машины колодку с одной из шлифовальных шкур.

2. Включить машину трения (порядок операций включения изложен в Приложении 1, исключая операции по тарировке системы измерения момента трения).

3. Резисторами установить скорость вращения вала  $n = 240$  об/мин (скорость скольжения  $V = 0,5$  м/с). Включить подачу смазочного материала.

4. Установить держатель с колодкой на вал каретки и задать нагрузку  $N = 10$  Н.

5. Регистрировать по потенциометру, используя полученные при выполнении лабораторной работы № 1 тарировочные графики, момент трения.

Последовательно повторить п. 5 для нагрузок 20, 30, 40, 50 Н. Рассчитанные значения коэффициента трения занести в таблицу 5.1.

6. Повторить п.п. 5 и 6 с новым образцом и другой шлифовальной шкуркой.

7. После окончания испытаний выключить машину.

8. Построить графики изменения коэффициента трения от нагрузки на истираемые абразивом образцы.

### Содержание отчета

1. Название работы.
2. Схема испытаний.
3. Таблица результатов испытаний.
4. Графики зависимости коэффициента трения от нагрузки на истираемые свободным абразивом образцы.
5. Выводы.

### Контрольные вопросы

1. Какие механизмы абразивного изнашивания вам известны?
2. Назовите основные виды абразивного изнашивания.
3. Изобразите графически зависимость интенсивности абразивного изнашивания металлов и полимеров от их твердости.
4. Изобразите графически зависимость интенсивности абразивного изнашивания от режимов фрикционного нагружения.

**Рекомендуемая литература:** [1, 3, 10, 14, 17, 18]

### Лабораторная работа № 7 ИЗУЧЕНИЕ ИЗНАШИВАНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ СВОБОДНЫМ АБРАЗИВОМ

**Цель работы:** экспериментально изучить влияние режимов нагружения и твердости материалов на интенсивность их изнашивания свободным абразивом.

Студент должен:

**знать:**

- механизм изнашивания от абразивных частиц в зазоре пары трения;
- критерий перехода от микрорезания к многоциклового механизму разрушения;
- способы повышения сопротивления материала абразивному изнашиванию;
- особенности абразивного изнашивания пластических масс;

**уметь:**

- работать с машиной для испытания материалов на трение и износ 2070 СМТ-1.

### Абразивное изнашивание

Абразивному изнашиванию подвержены детали и узлы трения большинства машин и оборудования, применяемых в горнорудной промышленности, сельском хозяйстве, буровое оборудование и инструмент, рабочие органы и ходовая часть строительно-дорожной и транспортной техники, дробильно-размольные, смесительные машины и оборудование перерабатывающих производств и т. д.

Отличительным признаком абразивного изнашивания является участие в процессе твердых частиц, обладающих различной структурой, формой, размерами, твердостью, прочностью, незначительной адгезией к трущимся поверхностям. Трение в присутствии абразивных частиц характеризуется нестационарностью контактов твердых частиц с изнашивающейся поверхностью, широким спектром и высокой концентрацией напряжений, физико-химической активацией поверхностей твердых тел.

По характеру силового воздействия абразива на трущиеся детали различают:

- скольжение детали по монолитному абразиву;
- качение детали по абразиву;

- соударение с частицами абразива;
- соударение детали с монокристаллическим абразивом;
- воздействие потока абразивных частиц на поверхность детали (гидроабразивное и газоабразивное изнашивание);
- скольжение детали в массе абразивных частиц;
- взаимодействие сопряженных деталей в контакте с абразивными частицами.

Каждый вид взаимодействия обуславливает присущее ему напряженно-деформированное состояние, степень активизации и последующее разрушение поверхности детали. Разрушение поверхности может быть результатом одноактного взаимодействия абразива с поверхностью (срезание стружки) или многоактного процесса деформирования поверхности абразивными частицами. Учитывая различия в механизмах разрушения поверхностей, классифицировать материалы по их способности сопротивляться абразивному изнашиванию не представляется возможным.

Исследования изнашивания материалов по корундовому полотну, проведенные М. Хрущовым, показали, что относительная износостойкость чистых металлов в ненаклепанном состоянии и сталей в отожженном состоянии прямо пропорциональна твердости материала:  $\varepsilon \sim HB$ . Для термообработанных сталей характерна зависимость:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \alpha(HB - HB_0),$$

где  $\varepsilon_0$  – относительная износостойкость стали в отожженном состоянии;  $\alpha$  – коэффициент пропорциональности;  $HB_0$  – твердость стали в отожженном состоянии кроме того процессы абразивного изнашивания зависят от формы и размеров абразивных частиц.

### Оборудование

Машина трения СМТ-1; кварцевый песок ГОСТ 2138–56 двух фракций: до 5 мкм и более 5 до 35 мкм; два образца цилиндрической формы из стали 45; два контр-образца - колодки из стали 45 ГОСТ 1050–94. Смазочный материал индустриальное масло И-Г-А-32 ГОСТ 17479.4–87.

### Порядок выполнения работы

1. Подготовить образец для испытаний согласно размерам, представленным в Приложении 1, установить образец на валу машины трения. Протереть последовательно бензином и ацетоном поверхности трения образца. Установить в держателе машины колодку.
2. Подставить под образец емкость с кварцевым песком одной из фракций.
3. Включить машину трения (порядок операций включения изложен в Приложении 1, исключая операции по тарировке системы измерения момента трения).
4. Резисторами установить частоту вращения вала  $n = 240 \text{ мин}^{-1}$  (скорость скольжения  $V = 0,5 \text{ м/с}$ ). Включить подачу смазочного материала.
5. Установить держатель с колодкой на вал каретки и задать нагрузку  $N = 10 \text{ Н}$ .
6. Регистрировать по потенциометру, используя полученные при выполнении лабораторной работы № 1 тарировочные графики, момент трения.
7. Последовательно повторить п. 5 для нагрузок 20, 30, 40, 50 Н. Рассчитанные значения коэффициента трения занести в таблицу.
8. Повторить п.п. 5 и 6 с новым образцом и другой фракцией кварцевого песка.
9. После окончания испытаний выключить машину.
10. Построить графики изменения коэффициента трения от нагрузки на истираемые свободным абразивом образцы.

### Содержание отчета

1. Название работы.
2. Схема испытаний.
3. Таблица результатов испытаний.
4. Графики зависимости коэффициента трения от нагрузки на истираемые свободным абразивом образцы.
5. Выводы.

### Контрольные вопросы

1. Для каких трибосопряжений характерно контактно-абразивное изнашивание свободными частицами?
2. Опишите механизм абразивного изнашивания твердого материала при тяжелых режимах нагружения.
3. Какова зависимость интенсивности изнашивания тел от размера частиц?
4. Какова особенность абразивного изнашивания эластомеров?

Рекомендуемая литература: [1, 18, 19, 20]

### Лабораторная работа № 8 ОЦЕНКА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Цель работы:** определение смазочной способности масел.

Студент должен:

**знать:**

- основные назначения смазки;
- преимущества и недостатки смазочных масел;
- назначение присадок;
- критерии выбора оптимальной смазки для работы в конкретных условиях;

**уметь:**

- работать с машиной для испытания материалов на трение и износ 2070 СМТ-1;
- подбирать наиболее подходящую смазку для данных условий трения.

### Классификация видов смазки

Одним из наиболее эффективных путей обеспечения надежности и долговечности подвижных сопряжений деталей машин и механизмов и минимизации энергетических потерь при их эксплуатации является использование в качестве компонентов этих сопряжений смазочных материалов.

**Смазочными материалами (СМ)** называются продукты органического и неорганического происхождения, которые вводят между поверхностями с целью уменьшения потерь на трение в этом сопряжении, износа пар трения и предотвращения заедания. Благодаря тому, что внутреннее трение в смазочных материалах существенно меньше, чем внешнее трение несмазанных деталей, исключение или минимизация непосредственного контакта пар трения приводит к улучшению фрикционно-износных характеристик сопряжения.

Смазочный материал является важнейшим конструкционным элементом узла трения, во многом определяющим его **надежность**, а также потери энергии при функционировании узла.

В условиях жидкостной или газовой смазки при рабочих режимах полностью исключен непосредственный контакт трущихся тел. Он возможен только при пусках и остановках. Внешнее трение

твердых тел отсутствует, его заменяет внутреннее трение смазочной среды, составляющей слой, разделяющий эти тела в большинстве узлов трения жидкостная смазка, обеспечивающая полное разделение рабочих поверхностей контактирующих деталей в процессе эксплуатации, осуществляется под действием давления, создаваемого в слое жидкости, ограниченном этими поверхностями, при их относительном перемещении. Скорость течения представляет собой сумму скоростей вязкого течения с линейным профилем скоростей по толщине слоя и скорости течения, вызванной градиентом давления, развиваемого в слое жидкости, с параболическим профилем скоростей течения. Это обеспечивает постоянство расхода жидкости по длине зазора, а развиваемое давление обеспечивает несущую способность смазочному слою.

Если геометрия контакта и условия работы узла трения не обеспечивают реализацию жидкостной смазки, то разделение контактирующих поверхностей и устранение (или локализацию) металлического контакта обеспечивают граничные слои, образующиеся на поверхностях трения в результате взаимодействия активных компонентов смазочного материала с поверхностными слоями трущихся тел. Такой режим смазки называют *граничным*.

**Смешанная (полужидкостная) смазка** – режим смазочного действия, при котором существует частично гидродинамическая или эласто- гидродинамическая, частично граничная смазка.

Смешанная смазка чаще всего возникает в узлах трения, предназначенных для работы в условиях гидродинамической смазки, вследствие нарушений по разным причинам условий ее образования.

Одним из свидетельств существования такого режима является разрыв смазочного слоя на некотором угле поворота вала, возникающий в шатунном подшипнике двигателя внутреннего сгорания. При измерении толщины смазочного слоя с помощью емкостного датчика в момент контакта шероховатостей поверхности происходит замыкание измерительной цепи. Более детальный анализ зоны контакта показывают периодические контакты – разрывы смазочного слоя, свидетельствующие о режиме существования смешанной смазки.

Однако режим смешанной смазки имеет место в небольшой зоне, в которой расчетная толщина смазочного слоя меньше критической.

Режим смазки, характеризующий в целом эти процессы, можно назвать **комбинированной смазкой**, при которой существует одновременно гидродинамическая и смешанная смазки, дающие резуль-

тирующую не- сущую способность  $P_{\Sigma}$ . Газовая смазка (ГС) – смазка, при которой разделение поверхностей трения деталей, находящихся в относительном движении, осуществляется газом, в качестве которого применяют в основном воздух, азот, неон и хладон, а также газы с очень низким коэффициентом вязкости (водород). ГС применяется в узлах трения точных приборов, аппаратуре ядерных установок, ультрацентрифугах, газовых турбинах, турбокомпрессорах.

## Оборудование

Машина трения СМТ-1; два образца из стали 45 ГОСТ1050–94; смазочные материалы: индустриальное масло И-Г-А-32 ГОСТ 17479.4–87 и моторное масло М-8В1 ГОСТ 10541–78; ветошь; бензин (ГОСТ 443–76); ацетон (ГОСТ 2603–79).

## Порядок проведения работы

1. Изготовить образец для испытаний согласно размерам, представленным в лабораторной работе № 1, установить контртело на валу машины трения (Приложение 1). Протереть последовательно бензином и ацетоном поверхности трения образца и контртела. Установить образец в держателе машины.
2. Включить машину трения (порядок операций включения изложен в лабораторной работе № 1, исключая операции по тарировке системы измерения момента трения).
3. Резисторами установить частоту вращения вала  $n = 240 \text{ мин}^{-1}$  (скорость скольжения  $V = 0,5 \text{ м/с}$ ).
4. Установить держатель с образцом на вал каретки и задать нагрузку  $N = 100 \text{ Н}$ .
5. Включить подачу одного из масел.
6. Регистрировать по потенциометру, используя полученные при выполнении лабораторной работы № 1 тарировочные графики, температуру и момент трения через каждые 2 минуты.
7. Повторить п.п. 5 и 6 с новым образцом и другим маслом.
8. После окончания испытаний выключить машину.
9. Рассчитать коэффициент трения.
10. Построить графики изменения температуры и коэффициента трения от времени испытаний для всех смазок.
11. Сделать вывод о наиболее подходящей смазке для данных условий трения.

## Содержание отчета

1. Название работы.
2. Схема испытаний.
3. Графики изменения температуры и коэффициента трения от времени испытания для всех указанных смазок.
4. Выводы.

## Контрольные вопросы

1. Укажите основные функции смазки в узлах трения.
2. Каковы преимущества и недостатки жидких смазок по сравнению с пластичными?
3. Перечислите физико-химические характеристики смазочных материалов.
4. Каково назначение присадок?
5. Каков критерий выбора оптимальной смазки для работы в конкретных условиях?

**Рекомендуемая литература:** [1, 4, 5, 10, 21–23]

## ЛИТЕРАТУРА

1. Чичинадзе, А.В. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А.В. Чичинадзе [и др.]; под общей ред. А.В. Чичинадзе. – Москва : Машиностроение, 2003. – 576 с.
2. Куксенова, Л.И. Методы испытаний на трение и износ / Л.И. Куксенова. – Москва: Интернет Инжиниринг 2001. – 152 с.
3. Чичинадзе, А.В. Основы трибологии. Учебник для технических вузов / А.В. Чичинадзе. – Москва :Машиностроение, 2001. – 664 с.
4. Крагельский, И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – Москва : Машиностроение, 1977. – 525 с.
5. Справочник по триботехнике. В 3-х т. / под ред. М. Хебды и А.В. Чичинадзе. – Москва : Машиностроение.
6. Гриб, В.В. Лабораторные испытания материалов на трение и износ / В.В. Гриб, Г.Е. Лазарев. – Москва : Наука, 1968. – 240 с.
7. Демкин, Н.Б. качество поверхности и контакт деталей машин / Н.Б. Демкин, Э.В. Рыжов. – Москва : Машиностроение, 1981. – 244 с.
8. Мышкин, Н.К. Трибология. Принципы и приложения / Н.К. Мышкин, М.Н. Петроковец. – Гомель : ИММС НАНБ, 2002. – 310 с.
9. Белый, В.А. Трение и износ материалов на основе полимеров / В.А. Белый [и др.]. – Минск : Наука и техника, 1976. – 167 с.
10. Гаркунов, Д.Н. Триботехника: Учебник для студентов вузов / Д.Н. Гаркунов. - 2-ое изд. перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 1989. – 328 с.
11. Богданович, П.Н.. Триботехника / П.Н. Богданович, В.С. Ивашко, П.Н. Прушак. – Москва : БГАТУ, 2001. – 159 с.
12. Крагельский, И.В. Узлы трения машин / И.В. Крагельский, Н.М. Михин. – Москва : Машиностроение, 1984. – 280 с.
13. Михин, Н.М. Внешнее трение твердых тел / Н.М. Михин. – Москва : Наука, 1977. – 230 с.
14. Полимеры в узлах трения машин и приборов : справочник / под ред. А.В. Чичинадзе. – Москва : Машиностроение, 1980. – 326 с.
15. Богданович, П.Н. Трение и износ в машинах / П.Н. Богданович, П.Н. Прушак. – Минск : Высшая школа, 1999. – 374 с.

**ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ И НАСТРОЙКА  
МАШИНЫ 2070 СМТ-1.**

**1. ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ**

Машина позволяет проводить испытания с различными образцами, нагрузками и частотой вращения образцов, а также коэффициентами проскальзывания. Кроме того, работа может вестись как в камере с различными смазкам, так и без камеры. Поэтому независимости от поставленной перед испытателем задачей перед испытанием необходимо провести подготовку машины.

Общими операциями до установки образцов являются:

- установка диапазона частоты вращения образцов, которую производят, сменяя шкив на электродвигателе согласно маркировке на шкиве и таблице на крышке;
- установка необходимого шпинделя;
- подключение воды для охлаждения подшипников каретки и шпинделя;
- подготовка к работе электрооборудования.

**1.1. Подготовка электрооборудования**

Установите переключатель рода работы на пульте управления (Рисунок 1) в положение «Работа», переключатель счетчика числа оборотов в положение «Включено».

Включением выключателя 2 подайте напряжение на блок тиристорного привода, схему управления, схему измерения момента и нагрузки, при этом загорится лампа 17. Установите блок переключателей 13 «Освещение камеры» в положение «Вкл». Кнопкой 5 «Пуск» запустите в работу электродвигатель привода машины. Лампа 6 сигнализирует о подключении электродвигателя к сети. В зависимости от рода испытаний установите блоки переключателей в нужное положение:

- «Диапазон момента» 12;
- «Частота вращения» 18;
- «Нагрузка» 24 или 25.

Перед началом испытаний прогрейте измерительную схему машины в течение 30 минут. После прогрева установите на нуль стрелку потенциометра 14 измерения момента резистором 11 «Ус-

16. Польшер, Г. Основы трения и изнашивания / Г. Польшер, Ф. Майснер. – Москва : Машиностроение, 1984. – 264 с.

17. Ивашко, В.С. Надежность технических систем : учеб.-метод. комплекс / В.С. Ивашко, В.В. Кураш, А.В. Кудина. – Минск : БГАТУ, 2008. – 148 с.

18. Трение, изнашивание и смазка : справочник. Т 1 / под ред. Крагельского И.В. и Алисина В.В. – Москва : Машиностроение, 1976. – 276 с.

19. Тененбаум, М.М. Сопротивление абразивному изнашиванию / М.М. Тененбаум. – Москва : Машиностроение, 1976. – 270 с.

20. Хрущов, М.М. Исследование изнашивания материалов / М.М. Хрущов, М.А. Бабичев. – Москва : Наука, 1970. – 286 с.

21. Матвеевский, Р.М. Смазочные материалы : справочник / Р.М. Матвеевский [и др.]. – Москва : Машиностроение, 1989. – 248 с.

22. Заславский, Ю.С. Трибология смазочных материалов / Ю.С. Заславский. – Москва : Химия, 1991. – 286 с.

23. Мышкин, Н.К. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии / Н.К. Мышкин, М.Н. Петровец. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 368 с.

тановка нуля» и указателя нагрузка 23 одним из резисторов, расположенных внутри блока 21.

## 1.2. Работа с образцами «диск-диск»

Установите требуемый коэффициент проскальзывания сменой шкива 7 (рисунок 2).

Наденьте крышку 20 (рисунок 3) на вал каретки перед установкой верхнего образца при работе в жидкой среде.

Установите образцы. При затягивании гаек, крепящих образцы, удерживайте вал вторым ключом. Если не удерживать вал вторым ключом, может произойти **ПОЛОМКА ДАТЧИКА МОМЕНТА**. Гайка вала каретки имеет левую резьбу. При затягивании гаек не прилагайте большого усилия, так как при работе гайки самозатягиваются.

Биение образцов проверяйте индикатором.

Наименьшего биения добивайтесь поворотом образца.

После этого сдвиньте каретку в левое положение и на винт 22 (рисунок 4) наденьте петлю троса 23 уравнивания, **ПЛАВНО** опустите каретку до соприкосновения образцов, зафиксируйте ее от осевого перемещения и закрепите крышку камеры.

## 1.3. Подготовка к работе с образцами «диск-колодка»

Проводится аналогично подготовке к работе по схеме «диск-диск», дополнительно выполните следующее:

- расцепите полумуфту 30 и заведите болт 29 в паз стойки 22 (рисунок 4);
- установите на валу каретки колодку 5 в держателе (рисунки 5 и 6).

## 1.4. Подготовка для работы по схеме «вал-втулка»

1. Поднимите каретку в верхнее положение;
2. Расцепите муфту привода каретки (см. п. 1.3);
3. Установите образец «вал» на вал шпинделя и закрепите его гайкой;
4. Наденьте на образец «вал» обойму с закрепленным в обойме образцом «втулка»;
5. Обойму зафиксируйте в испытательной камере (см. описание работы с испытательной камерой);

6. Закройте испытательную камеру крышкой 25 (рисунок 3).

## 1.5. Порядок работы

В процессе работы машину обслуживает один лаборант. Поскольку метода испытаний на машине не стандартизованы, параметры испытаний выбирайте в зависимости от задачи, поставленной перед испытанием, или методики испытаний, принятой в организации, эксплуатирующей машину.

Каретку до соприкосновения образцов опускайте плавно, не допуская ударов.

Удары могут вызвать неисправимое биение валов. Нагружение образцов усилием  $P$  ведите плавно вращая винт нагружения при вращающемся образце, наблюдая за величиной момента трения по потенциометру.

При испытании образцов с высоким коэффициентом трения образцы дополнительно законтрите.

**НЕ ПЕРЕГРУЖАЙТЕ МАШИНУ МОМЕНТОМ СВЫШЕ УСТАНОВЛЕННОГО ДИАПАЗОНА 10 ИЛИ 20 Н·м.**

При смене испытанных образцов пользуйтесь съемником. **ЗАПРЕЩАЕТСЯ РАБОТАТЬ НА РЕЗОНАНСНЫХ РЕЖИМАХ И РЕЖИМАХ, БЛИЗКИХ К РЕЗОНАНСУ, А ТАКЖЕ С ОБРАЗЦАМИ, ИМЕЮЩИМИ БИЕНИЕ БОЛЕЕ 0,1 мм.**

## 2. РЕГУЛИРОВАНИЕ И НАСТРОЙКА

### 2.1. Настройка частоты вращения нижнего образца

Для измерения частоты вращения нижнего образца во время испытания используйте вольтметр 20 (рисунок 1).

Указатель частоты вращения имеет два предела измерения: от 150 до 1500 мин<sup>-1</sup> или от 75 до 750 мин<sup>-1</sup>.

При измерении частоты вращения от 150 до 1500 мин<sup>-1</sup>, переключатель указателя частоты вращения В5 поставьте в положение «10», а при частоте вращения до 750 мин<sup>-1</sup>, переключатель В6 – в положение «х5». Для определения частоты вращения нижнего образца умножьте показание по указателю частоты вращения на множитель переключателя В5 или В6.

Частоту вращения настраивайте следующим образом.

Включите машину и задайте частоту вращения  $1500 \text{ мин}^{-1}$ , резисторами  $R1$  и  $R2$ , расположенными на лицевой стороне пульта управления. Переключатель указателя частоты вращения  $B6$  поставьте в положение «х10». Резистором  $R4$ , расположенным внутри выдвижного блока, установите стрелку указателя частоты вращения на отметку 150. Задатчиком частоты вращения  $R1$  установите частоту вращения  $1500 \text{ мин}^{-1}$  и проверьте истинную частоту вращения нижнего образца. Если она отличается от заданной, подкорректируйте показания указателя частоты вращения  $V$  резисторами  $R1$  и  $R2$ .

Задатчиками частоты вращения  $R1$  и  $R2$  установите по указателю частоты вращения  $750 \text{ мин}^{-1}$  и переключатель указателя частоты вращения  $B5$  поставьте в положение «х5». Резистором  $B3$  установите стрелку указателя частоты вращения на отметку 150, что соответствует частоте вращения  $750 \text{ мин}^{-1}$ .

После настройки резисторы  $R3$  и  $R4$  законтрите.

## 2.2. Настройка измерения момента трения

Стрелку шкалы потенциометра ЭП1 установите на нуль с помощью резисторов «Установка нуля»  $R11$  «Грубо»,  $R12$  «Плавно» (рисунок 1). На подвес 10 приспособления положите груз массой 5 кг, создающий момент 20 Н·м.

Переключатель диапазонов установите в положение «х2».

При этом стрелка потенциометра должна показать 98–100 делений шкалы. Если показания стрелки не будут соответствовать указанному диапазону шкалы (больше или меньше), то с помощью резистора «Установка предела»  $B19$  установите необходимый диапазон 98–100 делений по шкале потенциометра.

Снимите грузы и проконтролируйте нуль на шкале потенциометра ЭП1. Проконтролируйте при моменте 20 Н·м принятый диапазон. Диапазон измерения момента считается установленным, если при нулевой нагрузке стрелка потенциометра находится на нуле, а при моменте 20 Н·м – на заданном значении шкалы потенциометра в пределах погрешности. Снимите грузы, проконтролируйте нуль шкалы потенциометра, невозвращение на нуль должно быть в пределах погрешности. На подвеску приспособления положите груз массой 2,5 кг, создающий момент 10 Н·м. Установите переключатель диапазонов в положение «х1». При этом стрелка потенциометра должна показать 98–100 делений.

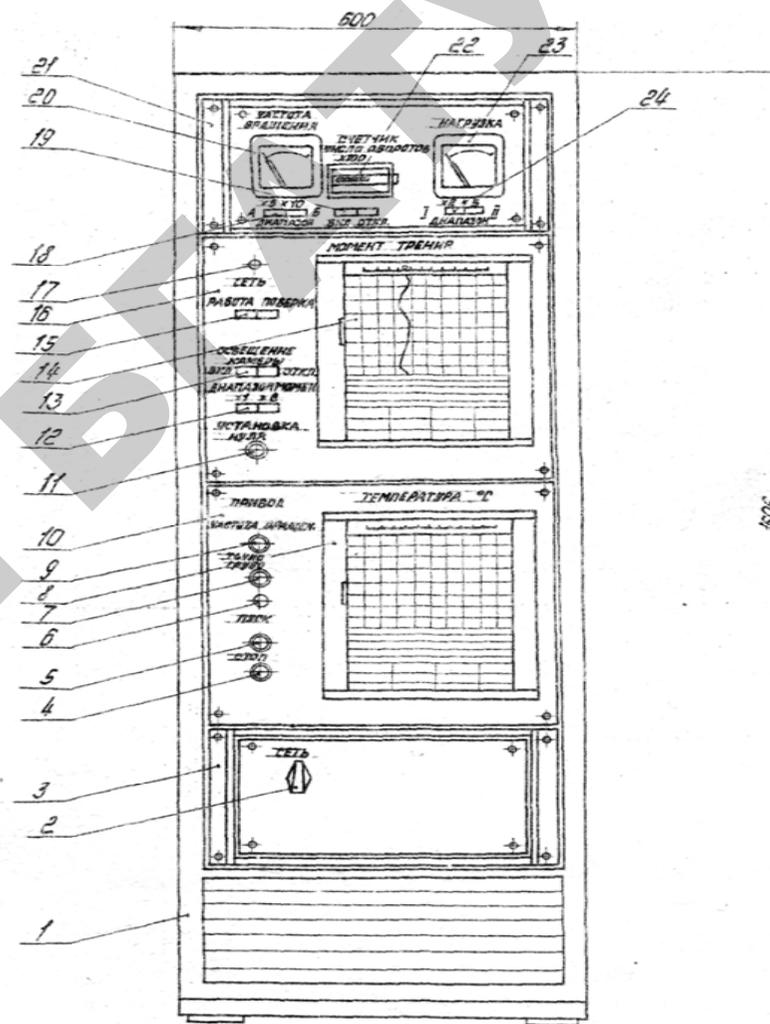


Рисунок 1 – Пульт управления:

1 – стойка; 2 – выключатель; 3 – блок; 4 – кнопка; 5 – кнопка; 6 – лампа; 7 – резистор; 8 – потенциометр; 9 – резистор; 10 – панель; 11 – резистор; 12 – блок переключателей; 13 – блок переключателей; 14 – потенциометр; 15 – блок переключателей; 16 – панель; 17 – лампа; 18, 19, 24 – блоки переключателей; 20 – вольтметр; 21 – блок; 22 – счетчик; 23 – микроамперметр

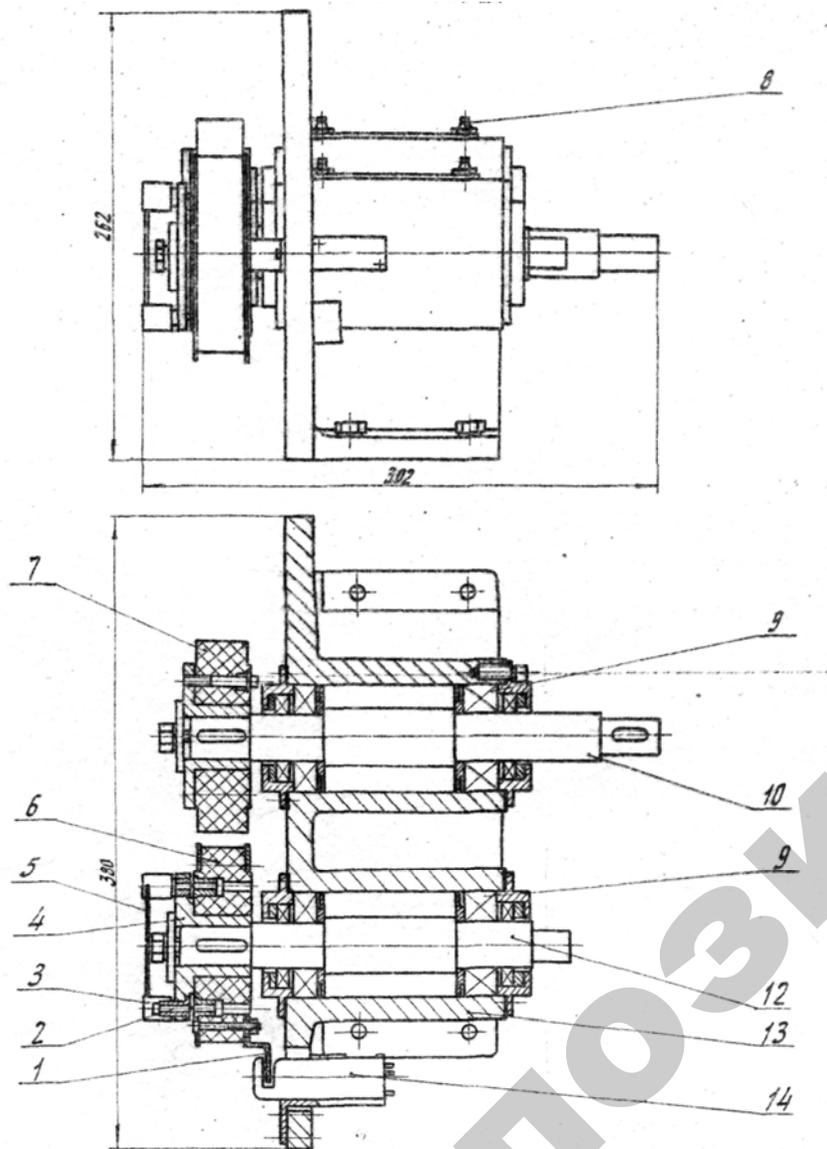


Рисунок 2 – Бабка привода:

1 – флажок; 2 – штифт предохранительный; 3 – гайка; 4 – втулка; 5 – проволока; 6 – шкив; 7 – шкив; 8 – шприц-масленка; 9 – подшипник; 10 – вал; 12 – вал; 13 – корпус; 14 – датчик

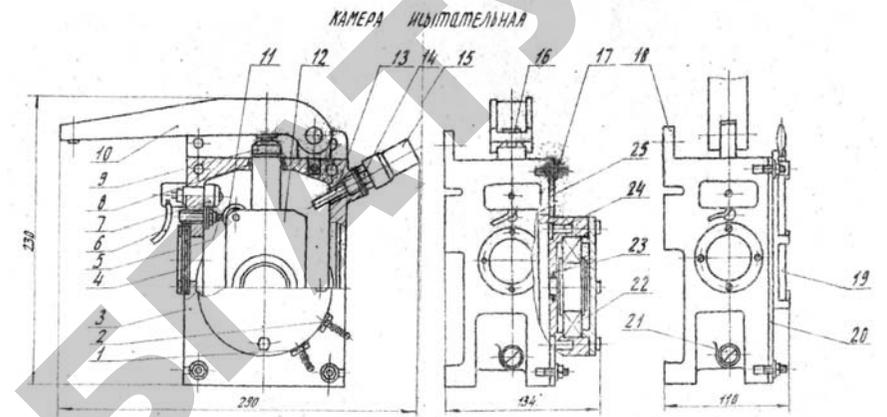


Рисунок 3 – Камера испытательная:

1 – штуцер; 2 – штуцер; 3 – крышка; 4 – окно; 5 – упор; 6 – привод; 7 – осветитель; 8 – уплотнение; 9 – толкатель; 10 – рычаг; 11 – подшипник; 12 – обойма; 13 – трубка; 14 – штуцер; 15 – колпак; 16 – подушка; 17 – винт откидной; 18 – корпус; 19 – замок клиновой; 20 – крышка; 21 – пробка; 22 – подшипник; 23 – уплотнение; 24 – камера охлаждения; 25 – крышка

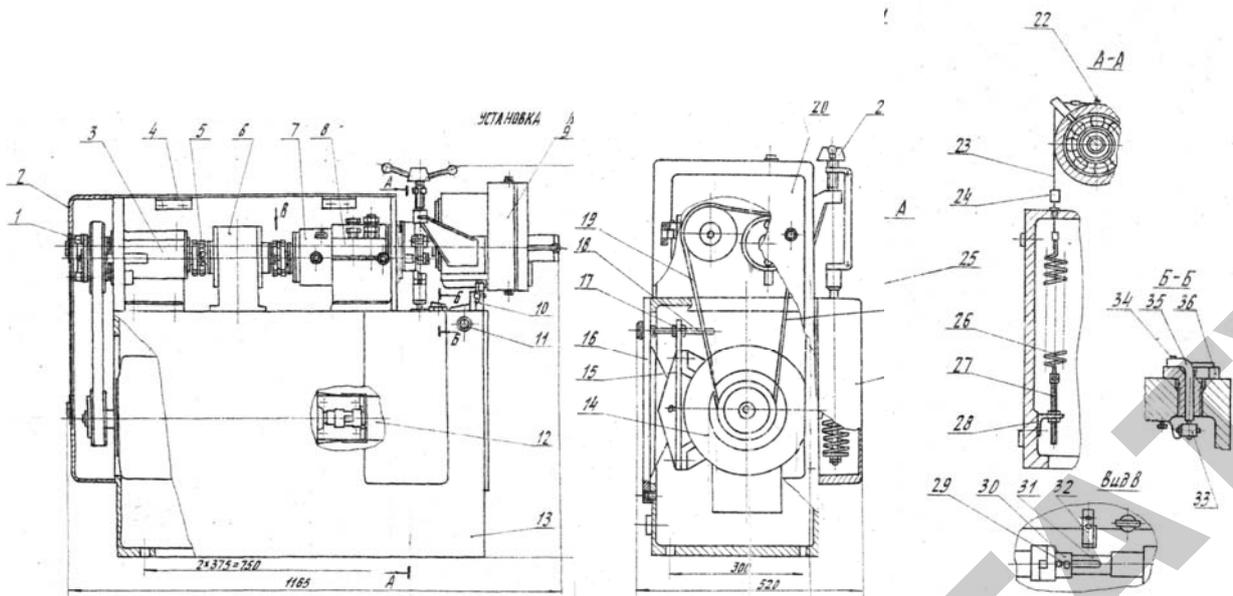


Рисунок 4 – Установка испытательная:

1 – гайка; 2 – кожух; 3 – бабка; 4 – кожух; 5 – муфта; 6 – датчик; 7 – шпиндель; 8 – бабка нижнего образца; 9 – каретка; 10 – фиксатор; 10 – фиксатор; 11 – кнопка «Стоп»; 12 – тахогенератор; 13 – станина; 14 – электродвигатель; 15 – плата; 16 – плата; 17 – гайка; 18 – винт; 19 – ремень; 20 – крышка; 21 – винт; 22 – винт; 23 – трос; 24 – упор; 25 – механизм нагружения; 26 – пружина; 27 – винт; 28 – гайка; 29 – болт; 30 – полумуфта; 31 – вал каретки; 32 – стойка; 33 – микропереключатель; 34 – пружина; 35 – штифт; 36 – корпус зажима

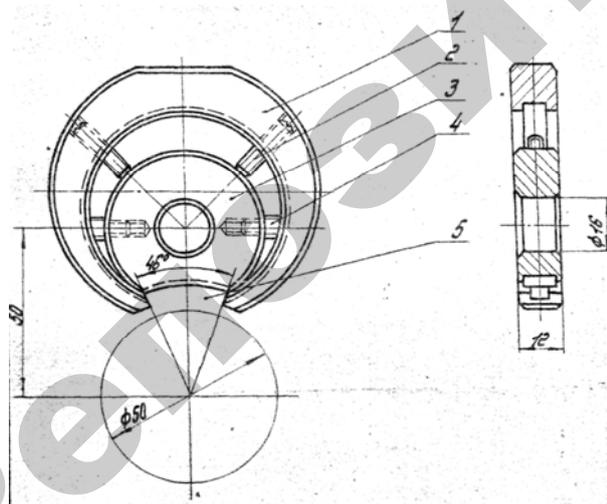


Рисунок 5 – Держатель:

1 – хомут; 2 – винт; 3 – палец; 4 – винт; 5 – колодка

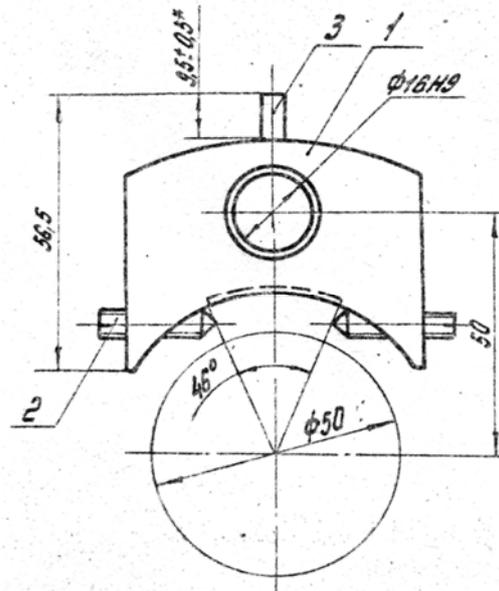


Рисунок 6 – Держатель:

1 – корпус; 2 – винт М6х25.66.05 ГОСТ 1476–75; 3 – штифт 5Гх16.013 ГОСТ 3128–70

## Приложение 2

Таблица 1 – Классы износостойкости узлов трения машин, аппаратов, приборов

Класс износостойкости	Интенсивность изнашивания ( <i>I</i> )		Вид контактного взаимодействия поверхностей
	от	до	
Нулевой	$10^{-13}$	$10^{-12}$	Упругое
Первый	$10^{-12}$	$10^{-11}$	
Второй	$10^{-11}$	$10^{-10}$	
Третий	$10^{-10}$	$10^{-9}$	Упруго-пластическое
Четвертый	$10^{-9}$	$10^{-8}$	
Пятый	$10^{-8}$	$10^{-7}$	Пластическое
Шестой	$10^{-7}$	$10^{-6}$	
Седьмой	$10^{-6}$	$10^{-5}$	
Восьмой	$10^{-5}$	$10^{-4}$	Микрорезание (хрупкое и вязкое разрушение)
Девятый	$10^{-4}$	$10^{-3}$	
Десятый	$10^{-3}$		

Учебное издание

**Зеленин** Виктор Алексеевич  
**Ивашко** Виктор Сергеевич  
**Кураш** Вячеслав Владимирович  
**Лойко** Владимир Алексеевич

### ТРИБОТЕХНИКА

*Практикум*

Ответственный за выпуск *Г.И. Анискович*  
Редактор, корректор *М.А. Макрецкая*  
Технический редактор *М.А. Макрецкая*  
Компьютерная верстка *М.А. Макрецкая*

Подписано в печать 21.05.2009 г. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman. Ризография.  
Усл. печ. л. 3,29. Уч.-изд. л. 2,73. Тираж 125 экз. Заказ 479.

Издатель и полиграфическое исполнение  
Белорусский государственный аграрный технический университет  
ЛИ № 02330/0131734 от 10.02.2006. ЛП № 02330/0131656 от 02.02.2006.  
220023, г. Минск, пр-т Независимости, 99, к. 2

**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Кафедра ремонта тракторов, автомобилей  
и сельскохозяйственных машин

**ТРИБОТЕХНИКА**

РЕПОЗИТОЙ БГТУ