

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Ставропольский государственный аграрный университет»

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕНИЯ И
ИЗНОСА ПРИ РЕМОНТЕ МАШИН И
ОБОРУДОВАНИЯ**

Ставрополь

«АГРУС»

2019 г.

**ФГБОУ ВО СТАВРОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕНИЯ И ИЗНОСА
ПРИ РЕМОНТЕ МАШИН И
ОБОРУДОВАНИЯ**

**Методические указания
по выполнению лабораторных работ**

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям подготовки: 23.03.03 – «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов»; 35.03.06 – «Агроинженерия», очной и заочной форм обучения.

**Ставрополь
«АГРУС»
2019г.**

УДК 531.8 (076)
ББК 34.41 я 73
И 27

Авторский коллектив:

*Лебедев А.Т., Лебедев П.А., Захарин А.В., Жевора Ю.И., Искендеров Р.Р.,
Марьин Н.А., Доронина Н.П., Павлюк Р.В., Зубенко Е.В.,
Шумский А.С., Боглаёв К.А.*

Рецензенты:

*кандидат технических наук, доцент И.И. Швецов
кандидат технических наук, доцент В.М. Данилов,*

И 27. Исследование трения и износа при ремонте машин и оборудования: методические указания / А.Т. Лебедев, П.А. Лебедев, А.В. Захарин и др.— 2-е изд., перераб. и доп. Ставрополь: АГРУС Ставропольского гос. аграрного ун-та, 2019. –66 с.

В методических указаниях рассматриваются современные методы испытаний триботехнических материалов и узлов трения, принцип действия и конструкция лабораторного оборудования, представлены краткие теоретические сведения о физических явлениях, происходящих при трении.

УДК 531.8 (076)
ББК 34.41 я 73

*Рекомендовано к изданию учебно-методической
комиссией факультета механизации сельского хозяйства
Ставропольского государственного аграрного университета*

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	5
1. Лабораторная работа 1. Изучение геометрических характеристик поверхностей трения твёрдых тел.....	6
2. Лабораторная работа 2. Испытание образцов на износ.....	23
3. Лабораторная работа 3. Исследование фрикционных характеристик твёрдых тел	38
4. Лабораторная работа 4. Определение интенсивности изнашивания и ресурса пары трения	46
5. Лабораторная работа 5. Исследование изменения износа инструмента и режимов резания при финишном плазменном упрочнении (на примере сверления).....	56

Введение

В последние годы наука о трении, износе и смазке и её практическое применение стремительно развиваются во всех промышленно развитых странах. Знание научных основ трения, износа и смазки и их оптимального использования в инженерной практике обязательно в современных условиях для каждого инженера. Принцип сочетания теоретических знаний по триботехническим основам техники и совершенных методов испытаний триботехнических материалов и узлов трения при обслуживании и ремонте машин неукоснительно соблюдается и в практике преподавания курса «Триботехнические основы техники».

В настоящее время в лаборатории кафедры технического сервиса, стандартизации и метрологии создан комплекс современного оборудования для проведения триботехнических испытаний, что позволило организовать на этой базе цикл лабораторных работ. Выполнение этих работ способствует закреплению знаний, полученных при изучении теоретического курса, приобретению студентами необходимых навыков и умения в проведении экспериментальной части научных исследований.

Каждая лабораторная работа сопровождается краткими теоретическими сведениями о физической картине работы объекта исследования, а также включает необходимые расчётные зависимости и справочный материал. Подробно рассмотрен порядок выполнения работы.

С целью закрепления материала приводятся контрольные вопросы по основным положениям работы.

Лабораторная работа № 1

ИЗУЧЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ ТВЁРДЫХ ТЕЛ

1 Цель и содержание работы

1. Ознакомление с основными параметрами, характеризующими макро– и микрогеометрию поверхностей трения твёрдых тел.
2. Ознакомление с щуповым методом изучения геометрических характеристик профиля.
3. Изучение конструкции и принципа действия профилографа-профилометра MarSurf PS 1.
4. Анализ профилограмм с целью построения кривой опорной поверхности. Определение параметров шероховатости.

2 Теоретическое обоснование

В процессе изготовления или при эксплуатации деталей машин на их поверхности формируются неровности — отклонения от геометрической формы, заданной чертежом детали, которые определяют топографию поверхности и оказывают значительное влияние на взаимодействие твёрдых тел при внешнем трении и изнашивании. Форма и размеры неровностей на поверхности деталей зависят от кинематической схемы станка и способа обработки, механических свойств материала и колебаний в системе станок — приспособление — инструмент — деталь.

Принято различать четыре вида отклонений от правильной геометрической формы поверхности: макроотклонения, волнистость, шероховатость и субмикрощероховатость:

Макроотклонения — единичные, неповторяющиеся отклонения формы от номинальной (идеализированно правильной) геометрии (бочкообразность, выпуклость, вогнутость, конусность, и др.). Макроотклонения являются следствием погрешностей, вызванных неточностью изготовления станка и инструмента, а также упругими деформациями, возникающими под влиянием переменной силы резания.

Волнистость — совокупность периодических, регулярно повторяющихся, близких по размерам выступов и впадин, расстояние между которыми значительно больше, чем у неровностей, образующих шероховатость поверхности. Волнистость характеризуется размерами отклонений — шагом волны от 0,8 до 10 мм и высотой волны от 0,03 до 500 мкм и образуется, главным образом, вследствие колебаний, возникающих в процессе обработки. Форма волн близка к синусоидальной.

Шероховатость — совокупность микронеровностей с относительно малым шагом, образующих рельеф поверхности. Шероховатость поверхности формируется не только в процессе механической обработки, но и в процессе внешнего трения твердых тел. Шаг микронеровностей при этом составляет 2...800 мкм, а их высота 0,03...400 мкм. Шероховатость в значительной мере определяется структурой обрабатываемого материала и его напряженным состоянием.

Субмикрощероховатость — более мелкие неровности, имеющиеся на выступах, образующих шероховатость. Субмикрощероховатость пока не нормирована. В настоящее время разработаны достаточно надёжные средства её оценки, однако не созданы приборы, пригодные

для инженерной практики. Субмикрощероховатость играет существенную роль в протекании контактных процессов и в настоящее время интенсивно исследуется. Исследования поверхностей электронным микроскопом показывают, что субмикрощероховатость образуется неровностями, имеющими высоту 2...20 нм.

В процессе трения и износа деталей машин микрогеометрия поверхностей претерпевает значительные изменения. Наибольшие изменения испытывает более мягкая из сопрягаемых поверхностей. Её шероховатость приближается к шероховатости твердого контртела до тех пор, пока не достигнет некоторого оптимального значения, характерного для данного режима трения. Изменение шероховатости поверхности происходит при трении и изнашивании вследствие процессов пластического оттеснения, усталостного разрушения и, в некоторых случаях, микрорезания и глубинного вырывания.

Поскольку шероховатость поверхности оказывает существенное влияние на все процессы, протекающие в области контакта взаимодействующих тел, включая их деформирование, трение и изнашивание, большое внимание в трибтехнике уделяется разработке методов измерения шероховатости и способов количественного описания топографии поверхности.

Характеристики шероховатости изучаются преимущественно по профилограммам (рис. 1.1) в пределах базовой длины l . Базовую длину выбирают таким образом, чтобы на ней не проявлялись другие виды неровностей (волнистость и макроотклонения). В России и ряде других стран принята система отсчёта высот неровностей от средней линии.

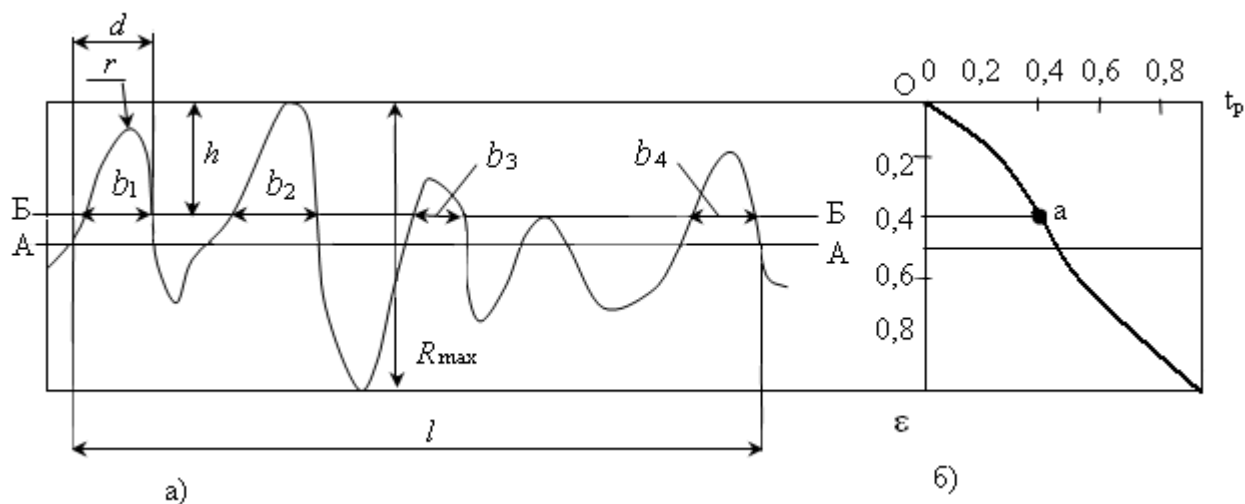


Рисунок 1.1 — Участок профилограммы (а) и кривая опорной поверхности (б)

А-А — средняя линия; Б-Б — секущая плоскость; d — диаметр пятна контакта, мкм; R_{max} — максимальная высота микронеровностей, мкм; r — радиус кривизны вершин выступа, мкм; h — сближение, мкм; r — радиус кривизны вершин выступа, мкм; l — базовая длина, мкм; b_1, b_2, b_3, b_4 , — соответственно отрезки, отсекаемые на заданном уровне в материале профиля линией, эквидистантной средней линии в пределах базовой длины (секущей плоскостью Б-Б); t_p — относительная опорная длина профиля; ε — относительное сближение.

Средняя линия (А-А) проводится в пределах базовой длины по направлению профиля таким образом, чтобы сумма квадратов отклонений точек профиля, расположенных выше и ниже средней линии, была минимальной. Через вершину самой высокой неровности и наиболее низко расположенной впадины, в пределах базовой длины, проводят линии выступов и впадин параллельно средней линии. Характеристики профиля отсчитываются по отношению к этим линиям.

При расчёте фрикционных характеристик твёрдых тел используются следующие параметры шероховатостей (ГОСТ 25142-82): R_a —

среднее арифметическое отклонение профиля; R_z — высота неровностей профиля по десяти микронеровностям в пределах базовой длины, мкм; R_{max} — максимальная высота микронеровностей, мкм; h — сближение, мкм; r — радиус кривизны вершин выступа, мкм; d — диаметр пятна контакта, мкм (рис. 1.1а).

Распределение материала в поверхностных слоях твердого тела задается *кривой опорной поверхности* (рис. 1.1б). Эта кривая играет важную роль при определении площади фактического контакта твердых тел в зависимости от нормальной нагрузки. Для практических целей широко используется начальный участок кривой Oa , расположенный выше средней линии, который может быть задан уравнением:

$$t_p = b \cdot \varepsilon^v, \quad (1.1)$$

где t_p — относительная опорная длина профиля;

ε — относительное сближение;

v и b — параметры кривой опорной поверхности.

Параметры v и b зависят от вида механической обработки. Для проведения ориентировочных расчетов можно принимать $b = 2$ и $v = 2$.

Указанная кривая может быть построена также экспериментальным путем на основании анализа профилограмм.

2 Аппаратура и материалы

Для изучения геометрических характеристик шероховатых поверхностей используется несколько методов. Среди них наибольшее распространение получил щуповой метод с помощью профилометра (профилографа), сущность которого заключается в том, что по поверхности трения перемещается алмазная игла с малым радиусом закругления.

Колебания иглы в вертикальном направлении повторяют неровности профиля поверхности. Эти колебания преобразуются в электрические сигналы, которые усиливаются и записываются в виде профилограммы, а специальное интегрирующее устройство выдает значения R_a и другие характеристики профиля. Недостатком щупового метода измерения профиля являются искажения, возникающие в результате вдавливания иглы в исследуемую поверхность, поскольку в зоне контакта имеют место значительные давления. Кроме того, ощупывающая игла имеет радиус закругления конечных размеров 2...10 мкм, поэтому при скольжении по выступу профиль искажается (записывается радиус выступа, увеличенный на радиус иглы). Преимущества щупового метода состоят в возможности его применения к поверхностям, шероховатость и волнистость которых изменяется в широких пределах, а также быстроте измерений и полноте получаемой информации. Схема работы профилографа показана на рисунке 1.2.

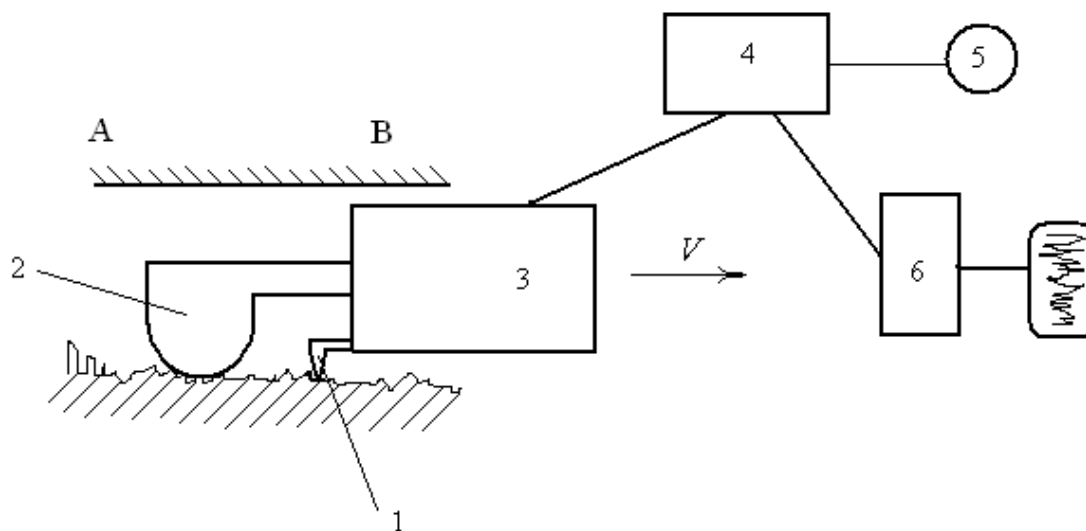


Рисунок 1.2 — Схема работы профилографа:

1 — профилограф; 2 — шаровая опора; 3 — преобразующий датчик;
 4 — усиливающий блок; 5 — показывающий прибор; 6 — самописец;
 А-В — гладкая ровная поверхность.

В профилографе игла 1 перемещается по поверхности и смещается по вертикали относительно шаровой опоры 2, имеющей большой радиус кривизны и поэтому скользящей по вершинам микровыступов, опускаясь и поднимаясь в соответствии с имеющейся волнистостью. Перемещение иглы 1 преобразуется датчиком 3 в электрические сигналы, которые поступают в блок 4, где усиливаются и анализируются, и отсюда — на показывающий прибор 5 и самописец 6. Благодаря тому, что шаровая опора имеет большой радиус и скользит по вершинам выступов, она повторяет форму волн, и прибор реагирует только на шероховатость поверхности.

Для одновременной оценки шероховатости и волнистости поверхности прибор работает в другом режиме: опора 2 прижимается и скользит по гладкой ровной поверхности АВ, а игла реагирует и на шероховатость поверхности, и на её волнистость.

В современных профилометрах получаемые в процессе измерения данные анализируются с помощью ЭВМ, и сразу выдаются значения характеристик шероховатости и волнистости. Примером такого прибора для измерения шероховатости является профилограф MarSurf PS 1, внешний вид которого показан на рисунке 1.3. Прибор имеет автономное питание — более 500 измерений без необходимости подзарядки. Проводит замеры в широком диапазоне положений в зависимости от конфигурации детали (вертикальном, горизонтальном, перевернутом). Благодаря встроенному эталону шероховатости вероятность ошибки значительно уменьшена. Во внутреннем блоке памяти может храниться до 15 профилей или 20000 результатов. Диапазон измерений прибора составляет максимум 350 мкм (-200...+150 мкм). Прибор прост в обслуживании, компактен, мобилен,

имеет небольшой вес (прибл. 400 г). Даже не имея специальной подготовки, им можно проводить корректные измерения: если включен автоматический режим, то прибор распознает периодические и аperiodические профили и автоматически устанавливает соответствующую норму величины отсечки шага и соответствующие участки ощупывания. Быстрые и надежные измерения на месте гарантируют требуемое качество поверхности в процессе производства.

Корпус прибора 1 (рис. 1.3) сверху снабжен трехточечной опорой для измерений в потолочном положении, внизу находится призма для цилиндрических объектов измерений. Благодаря крепкому корпусу MarSurf PS 1 не чувствителен к жестким условиям работы.



Рисунок 1.3 — Прибор измерения шероховатости MarSurf PS 1:

1 — корпус, 2 — индикатор, 3 — клавиатура, 4 — устройство подачи, 5 — щуп, 6 — Start-клавиши, 7 — устройство защиты щупа.

Результаты измерений могут отображаться на жидкокристаллическом индикаторе 2 по выбору в метрической или в дюймовой системе единиц измерения. На клавиатуре 3 клавиши «Ra» и «Rz» служат для выбора параметров R_a и R_z , с соответствующей индикацией, «F1» — клавиша для включения свободного программируемого параметра, «Lt/Lc» — клавиша для установки величины отсечки шага и участка ощупывания. Все функции прибора объединены в логически построенном каталоге. Клавиши со стрелками «▲», «▶», «▼», «◀» предназначены для выбора и установки желаемых функций. Результаты установки отображаются на индикаторе 2.

Устройство подачи 4 необходимо для выбора правильной позиции измерения передвижением в продольном направлении или поворотом. При этом направляющие штифты на механизме подачи помогают найти оптимальное рабочее положение. Максимальная длина участка ощупывания составляем 17,5 мм.

Щуп 5 настроен на предприятии-изготовителе. Для проведения особо точных измерений методом ощупывания, а также для последующей проверки профилограф обладает функцией автоматического динамического калибрования.

Зеленые Start-клавиши 6 (слева и справа) включают прибор, подтверждают щуп, запускают и прерывают текущее измерение. Комбинации клавиш: «Start» + «Lt/Lc» — открывает каталог установок; «Start» + «Ra» — показывает выбранные параметры один за другим; «Start» + «Rz» — выключает прибор при сохранении установок, с которыми было осуществлено последнее безошибочное измерение.

Устройство защиты щупа 7 в соединении с дугой для установки высоты или измерительной стойкой можно использовать как вторую опорную точку.

На рисунке 1.4 MarSurf PS 1 стоит на призматической нижней стороне или на дугах устройства установки высоты 2. Измерения проводятся на ровной поверхности или в отверстии детали 3, головка щупа указывает вниз.

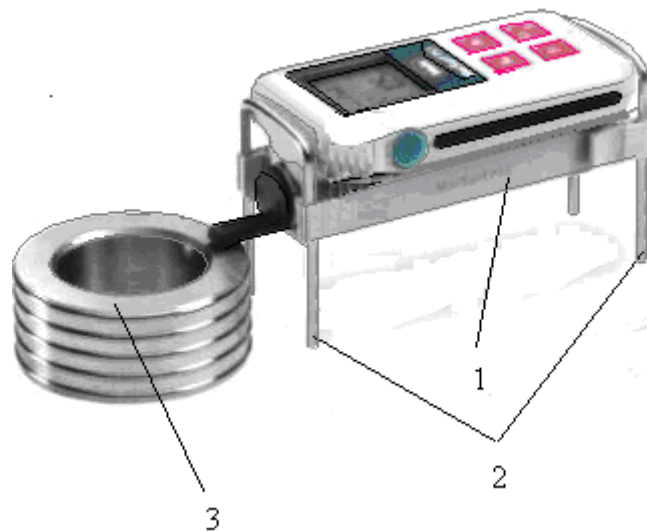


Рисунок 1.4 — MarSurf PS 1 с устройством установки высоты:

1 — опора для крепления принадлежностей устройства установки высоты; 2 — две дуги для установки высоты; 3 — контролируемая деталь.

При стационарном режиме работы можно укреплять MarSurf PS 1 на измерительной стойке (рис. 1.5). На рисунке 1.6 показан пример измерения цилиндра (вес цилиндрического объекта может быть до 1 кг). Прибор лежит на своей верхней стороне (трехточковая опора), призма служит опорой цилиндру, головка щупа указывает вверх. В зависимости от длины объекта измерения можно передвигать механизм подачи в продольном направлении в переднее или заднее положение упора.

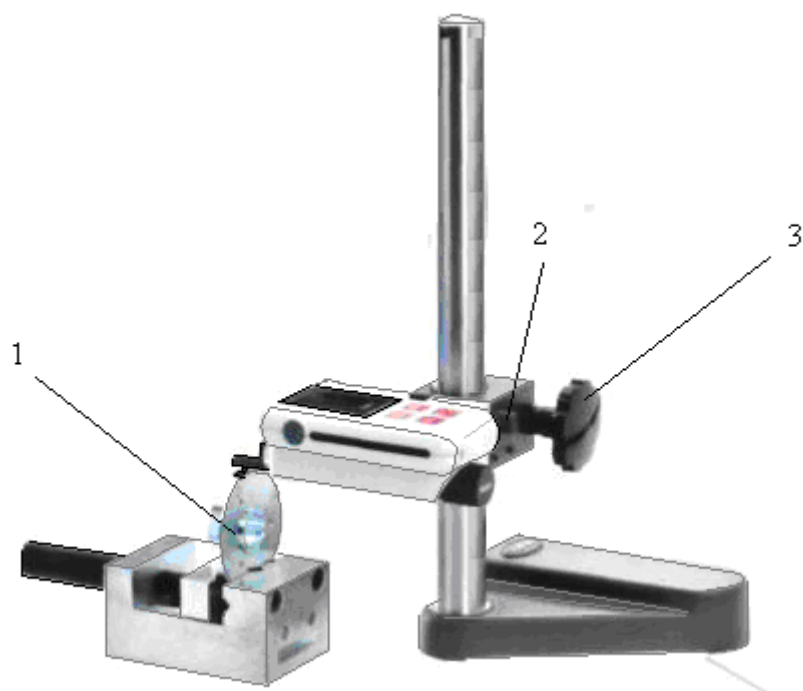


Рисунок 1.5 — Стационарное место измерения с измерительной стойкой:

1 — контролируемая деталь; 2 — установочный винт для коррекции наклона; 3 — маховичок для установки высоты

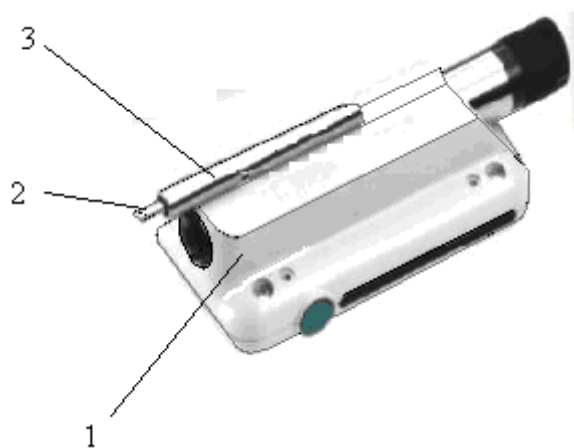


Рисунок 1.6 — Измерение цилиндрических объектов:

1 — призма прибора; 2 — щуп; 3 — цилиндрический объект.

Схема индикатора MarSurf PS 1 с показаниями приведена на рисунке 1.7 (в режиме измерения не могут появляться одновременно все элементы индикации).

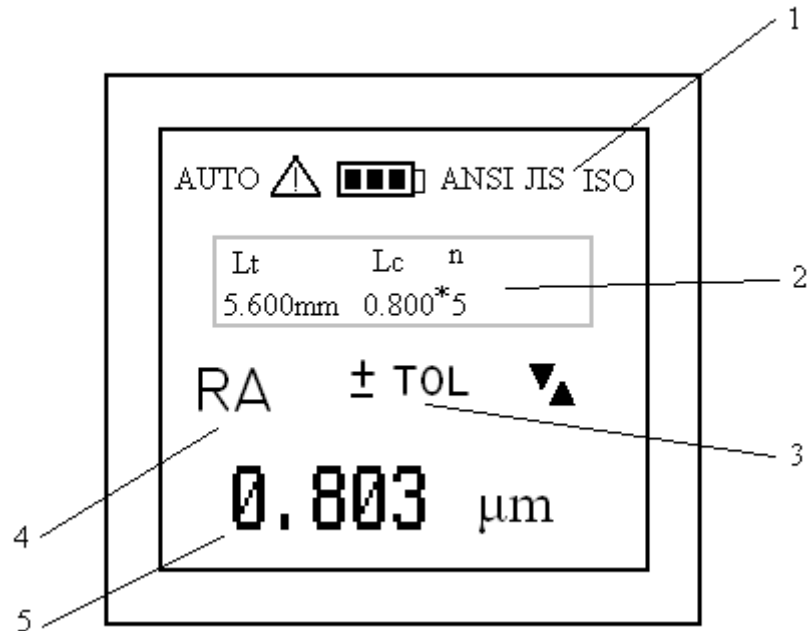


Рисунок 1.7 — индикатор MarSurf PS 1:

1 — указательные символы; 2 — текстовое поле; 3 — указательные символы; 4 — измеряемый параметр; 5 — результат измерения с указанием размерности.

На индикаторе указательные символы 1 означают: AUTO — автоматическая установка отсечки шага и участка ошупывания; \triangle — нестандартные условия измерения; \blacksquare — состояние зарядки аккумулятора; ANSI, JIS, ISO — выбранный стандарт. На текстовом поле 2 можно увидеть: Lt — величину отсечки шага; Lc — величину участка ошупывания; n — число отдельных участков измерения. Указательные символы 3: + TOL и - TOL показывают соответственно превышение верхней и нижней границы допуска измеряемого параметра; знаки « \blacktriangle »

и «▼» означают превышение соответственно верхней и нижней границы диапазона измерения.

4 Указания по технике безопасности

1. Для зарядки сетевого аккумулятора профилометра следует использовать исключительно поставляемый сетевой прибор.

2. Снятие профилограммы производится только лаборантом или преподавателем, ведущим занятия.

3. Следует всегда использовать устройство защиты щупа, чтобы защитить щуп от повреждений. Исключение — в узких отверстиях или в трудно доступных местах измерения.

5 Методика и порядок выполнения работы

1. Изучить основные параметры шероховатости и аналитические выражения для их определения.

2. При помощи профилометра MarSurf PS 1 построить профилограмму поверхности трения опытного образца.

3. По заданной профилограмме определить относительную опорную длину профиля и относительное сближение.

Для этого надо обработать профилограмму в следующей последовательности:

а) в промежутке от вершины самого высокого и самого низкого относительно средней линии выступа надо провести 5...6 секущих плоскостей, параллельных этой линии (линия Б — Б на рисунке 1.1а);

б) измерить расстояние от каждой из этих плоскостей до вершины самого высокого выступа и найти для каждой секущей плоскости сближение $h_1, h_2 \dots h_i$, мм;

в) определить опорную длину профиля (рис. 1.1а), мм,

$$\eta_{pi} = b_1 + b_2 + \dots + b_i . \quad (1.2)$$

г) для каждой секущей плоскости определить относительную опорную длину профиля

$$t_p = \eta_{pi} / l \quad (1.3)$$

и относительное сближение

$$\varepsilon_i = h_i / R_{max} , \quad (1.4)$$

где R_{max} — максимальная высота микронеровностей, мм;

l — базовая длина профилограммы, мм.

Результаты измерений следует занести в таблицу 1.1.

Таблица 1.1 — Данные для построения кривой опорной поверхности

Параметр	Номер секущей плоскости					
	1	2	3	4	5	6
h_i , мм						
η_{pi} , мм						
t_p						
ε_i						

6 Содержание отчета и его форма

1. Построить кривую опорной поверхности.

Используя систему координат, показанную на рис. 1.1 б, следует построить начальный участок кривой опорной поверхности. Для этого на основании данных, приведенных в таблице 1.1, по оси абсцисс надо отложить значения параметра t_p , а по оси ординат соответствующее ему значение параметра ε_i , и соединить полученные таким образом точки плавной кривой. В результате должна получиться вогнутая кривая, отражающая характер распределения материала в поверхностных слоях твёрдого тела.

2. На основании анализа профилограмм определить параметры шероховатости поверхности R_a , R_z , S и S_m , мкм.

Для этого в пределах базовой длины профилограммы (рис. 1.1) следует найти соответствующие отклонения неровностей профиля относительно средней линии и произвести вычисления по известным выражениям:

Средним арифметическим отклонением профиля R_a , мкм, называют среднее арифметическое абсолютных значений y , мкм, отклонений профиля в пределах базовой длины l

$$R_a = \frac{1}{\ell} \int_0^{\ell} |y(x)| dx \quad \text{или} \quad R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y|. \quad (1.5)$$

Высота неровностей профиля по десяти точкам R_z , мкм, представляет собой сумму средних абсолютных значений высот пяти наибольших выступов профиля и глубин пяти наибольших впадин профиля в пределах базовой длины l

$$R_z = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 |y_{pi}| + \sum_{i=1}^5 |y_{vi}| \right), \quad (1.6)$$

где y_{pi} — высота i -го наибольшего выступа профиля, мкм;

y_{vi} — глубина i -й наибольшей впадины профиля, мкм.

Наибольшая высота неровностей профиля R_{max} , мкм, является полной высотой профиля, т. е. расстоянием между линией выступов профиля и линией впадин профиля в пределах базовой длины.

Средний шаг местных выступов профиля S , мкм, — среднее значение шагов местных выступов профиля в пределах базовой длины

$$S \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n s_i . \quad (1.7)$$

Средний шаг неровностей профиля S_m , мкм, — среднее значение шага неровностей профиля по средней линии в пределах базовой длины

$$S_m \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n s_{mi} . \quad (1.8)$$

Параметры S и S_m дают представление о расстояниях между характерными точками пересечения профиля со средней линией. В отчете необходимо выполнить вычисления по формулам (1.2)...(1.8).

7 Контрольные вопросы

1. Назовите основные причины отклонений от номинального профиля реальных поверхностей твёрдых тел.
2. Какие виды отклонений от правильной геометрической формы поверхности вы знаете?

3. Перечислите основные параметры шероховатости.
4. Для чего строится кривая опорной поверхности?
5. Как строится кривая опорной поверхности?
6. Каков принцип действия профилограф-профилометра?
7. В чём заключаются недостатки и преимущества щупового метода измерения профиля?
8. Поясните конструкцию и принцип действия профилографа MarSurf PS 1.

8 Основная литература

1. Гаркунов, Д.Н. Триботехника : учебное пособие / Д.Н. Гаркунов, Э.Л. Мельников, В.С. Гаврилюк. – 2-е изд., стер. – М. : КНОРУС, 2013. – 408 с. (Бакалавриат).
2. Землянушнова, Н.Ю. Исследование трения и износа при ремонте машин и оборудования : методические рекомендации для выполнения лабораторных работ / Н.Ю. Землянушнова, А.Т. Лебедев, Н.П. Дорони-на, А.В. Захарин, А.С. Слюсарев, А.А. Лазаренко, – Ставрополь : АГРУС, 2008. – 44 с.
3. Чичинадзе, А.В. Трение, износ и смазка / А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун, Н.А. Буше, И.А. Буюновский, Ф.Р. Геккер, И.Г. Горячева, В.В. Гриб, Н.Б. Демкин, М.Н. Добычин, Ю.А. Евдокимов, С.М. Захаров, В.Я. Кершенбаум, Ю.М. Лужнов, М.А. Мамхегов, Н.М. Михин, А.Т. Романова. — М : Машиностроение, 2003. —576 с.

Дополнительная литература

1. Инструкция по эксплуатации MarSurf PS 1, 2005. — 57 с.

Лабораторная работа № 2

ИСПЫТАНИЕ ОБРАЗЦОВ НА ИЗНОС

1 Цель и содержание работы

1. Ознакомиться с основными понятиями и определениями, относящимися к износу деталей и рабочих органов машин.
2. Ознакомиться с конструкцией, принципом действия и правилами эксплуатации машины трения СМЦ-2.
3. Экспериментальным путём определить коэффициент трения скольжения в паре трения «диск-колодка».

2 Теоретическое обоснование

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

Пара трения — совокупность двух подвижно сопрягающихся поверхностей деталей (образцов) в реальных условиях службы или испытаний. Помимо материала, формы контактирующих поверхностей, относительного их перемещения, пара трения характеризуется окружающей средой, в том числе видом смазочного материала. Пара трения образуется соприкасающимися поверхностями деталей, входящих в машинный узел. С такой точки зрения зубья ковша экскаватора и грунт в совокупности не образуют пару трения.

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

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

Количественно изнашивание характеризуется *скоростью изнашивания* — отношением износа детали к интервалу времени, в течение которого он возник или *интенсивностью изнашивания* — отношением износа детали (или испытуемого образца) к пути трения или объему выполненной работы. При определении интенсивности изнашивания может оказаться более целесообразным относить износ к другому показателю, общему для всех узлов и агрегатов данной машины. Так, для автомобилей в качестве такого показателя может быть принято число километров пробега, а для тракторов число гектаров пахоты или часов работы двигателя.

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

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

Износ деталей и узлов трения приводит к ухудшению фрикционных показателей машины и, как правило, регламентирует её 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 расчётом дополнительные нагрузки, вибрация, шум. В многочисленных научных и практических работах по вопросам износа описаны различные мето-

ды его измерения, например взвешивание продуктов износа, взвешивание самого образца, измерение впадины, возникшей в результате износа, спектрально-аналитическое исследование продуктов износа, измерение радиоактивности.

Конкретный метод определения износа выбирают исходя из экспериментальных требований. Все чаще переходят к измерению износа непосредственно на промышленных установках. Так, например, методом вырезанных лунок можно определить величины износа цилиндров и поршневых колец, шеек коленчатых валов. В ряде случаев используется метод изотопов. Исследуемые поверхности активируются и подвергаются износу. По радиоактивности продуктов износа можно сделать количественные оценки износа, которые могут быть определены с помощью регистрирующих устройств. Таким образом, весь процесс измерения можно автоматизировать. Чувствительность этого метода очень высока, так как подбором соответствующих изотопов всегда можно достичь требуемого эффекта.

Среди традиционных методов испытаний первое место занимает спектральный анализ металлических продуктов износа в смазочном масле, так как в этом случае чувствительность может достигать значений $1:10^5$, а для некоторых элементов даже $1:10^6$. Этого достаточно, чтобы, например, при работе двигателя внутреннего сгорания уже через несколько часов работы обнаружить следы металла в масле. Таким образом можно также одновременно определять износ различных деталей.

При выборе метода измерения износа большую роль играет вопрос о необходимости прерывания работы машины или механизма во время испытания, чтобы измерить износ различных частей. Поэтому

непрерывно действующие методы, такие как радиоактивные и спектроскопические, имеют большие преимущества.

На кафедре технического сервиса, стандартизации и метрологии СтГАУ для испытания материалов на износ и определения их антифрикционных свойств при трении скольжения и трении качения при нормальных температурах с парами образцов диск-диск, диск-колодка и втулка-вал установлена машина модели СМЦ-2. Испытания проводятся методом взвешивания образца.

3 Аппаратура и материалы

Машина модели СМЦ-2 состоит из следующих основных узлов (рис. 2.1): 1 — каретка, 2 — механизм нагружения, 3 — бабка нижнего образца, 4 — датчик, 5 — привод, 6 — пульт управления.

Для проведения испытаний в жидких средах с различными образцами машина укомплектована камерами и приспособлениями: камера для испытания образцов «диск-диск» и «диск-колодка», камера для испытания образцов «втулка-вал», держатель, съемник, ключ.

Каретка 1 (рис. 2.1) предназначена для проведения испытаний без смазки и со смазкой с образцами:

- диск по диску при трении качения и трении качения с проскальзыванием;
- диск - колодка при трении скольжения.

Конструкцией каретки предусматривается и осевое перемещение каретки вдоль оси трубы. От осевого перемещения в процессе испытания каретка фиксируется с помощью фиксатора. Откидывание каретки и осевое ее перемещение используется при установке камеры для испытания круглых образцов и образцов «диск-колодка».

Каретка может быть снята с машины для установки и работы с камерой для образцов «вал-втулка».

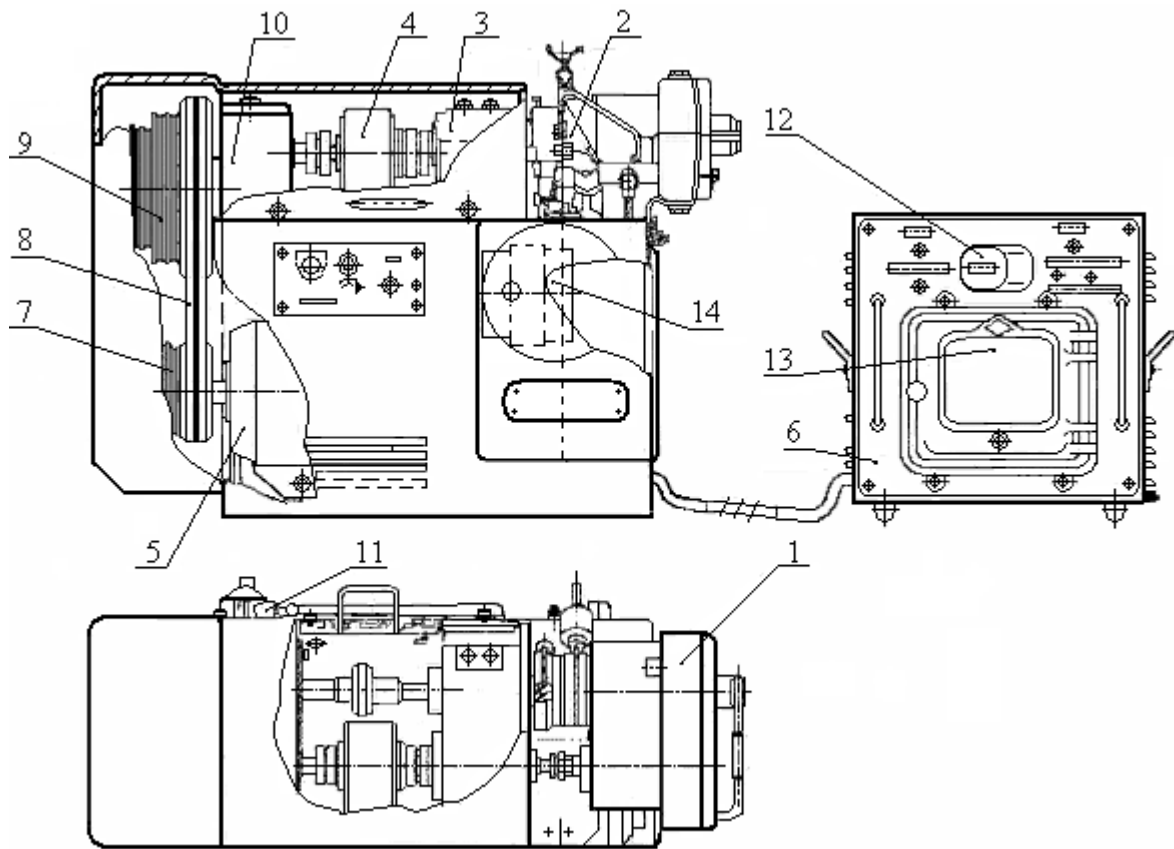


Рисунок 2.1 — Машина трения СМЦ-2:

1 — каретка; 2 — механизм нагружения; 3 — бабка нижнего образца; 4 — датчик; 5 — привод; 6 — пульт управления; 7 — трехступенчатый ведущий шкив; 8 — клиновые ремни; 9 — ведомый шкив; 10 — редуктор; 11 — конечный выключатель; 12 — счетчик суммарного числа оборотов нижнего образца; 13 — показывающий и записывающий потенциометр.

В корпусе каретки в подшипниках монтируется вал, на которой с помощью специальной гайки крепится верхний образец. Вал получает вращение через сменные прямозубые колеса от вала, установленного в

подшипниках. Подбором соответствующих пар сменных колес можно изменить число оборотов верхнего образца с целью получения требуемого процента проскальзывания верхнего образца относительно нижнего, скорость вращения которого обеспечивается клиноременной передачей и является величиной постоянной.

Подшипники вала каретки охлаждаются водой, циркулирующей по лабиринту камеры охлаждения. Подсоединение шлангов с водопроводной водой к корпусу каретки осуществляется согласно схеме подвода воды. Чтобы исключить нагрузку на образцы от неуравновешенных масс консольно закрепленной каретки, на машине имеется противовес, который размещается внутри станины машины. Противовес, соединяется с кареткой посредством канатика, который закреплен на ось-винте, ввернутом в корпус каретки.

Приложение нагрузки к образцам осуществляется через кронштейн.

Для фиксации вала от проворота при испытании на трение скольжения предназначается фиксатор.

При работе с камерой для испытания круглых образцов и «диск-колодка» в процессе установки образцов в корпус камеры требуется отсоединить и вновь присоединить противовес к корпусу каретки. При работе с камерой для испытания образцов «вал-втулка», когда каретка должна сниматься с машины требуется отсоединить противовес от корпуса каретки. Для удобства отсоединения и присоединения противовеса к корпусу каретки противовес поднимается или опускается винтом при вращении гайки.

Механизм нагружения 2 предназначен для приложения нагрузки к испытываемым образцам. При вращении ось-винта в скобе пружина

нагрузки сжимается. При этом движение тяги через зубчатую рейку и вал-колесо будет передаваться на барабанную шкалу 14, которая отградуирована в условных делениях.

Настройка шкалы на «0» производится вращением ручки, на которую предварительно следует нажать. Предварительное натяжение пружины нагрузки осуществляется гайками. Установка величины нагрузки, приложенной к образцам, производится в соответствии с тарировочными графиками.

Бабка нижнею образца 3 предназначена для установки образца, закрепленного на валу специальной гайкой, и каретки.

Вал смонтирован в радиальных подшипниках и установлен в корпусе. Уплотнения, защищающие подшипники от пыли, лабиринтные, чтобы исключить в них трение, которое может внести дополнительную погрешность при измерении момента трения на образцах.

Смазка подшипников осуществляется через масленки.

Подшипники охлаждаются водой, циркулирующей по лабиринту корпуса, подсоединение шлангов к корпусу бабки осуществляется согласно схеме подвода воды.

Датчик 4 служит для измерения крутящего момента (момента трения). В машине используется бесконтактный индуктивный датчик.

Привод машины электромеханический со ступенчатым регулированием скоростей. Привод предназначен для передачи вращения от электродвигателя к испытываемым образцам.

На валу электродвигателя посажен трехступенчатый ведущий шкив 7:

первая ступень $D = 90$ мм (2 ручья);

вторая ступень $D = 133$ мм (2 ручья);

третья ступень $D = 200$ мм (2 ручья).

С помощью клиновых ремней 8 передается вращение ведомому шкиву 9, который также имеет три ступени:

первая ступень $D = 276$ мм (2 ручья);

вторая ступень $D = 245$ мм (2 ручья);

третья ступень $D = 184$ мм (2 ручья).

От вала со шкивом вращение передается на вал редуктора 10.

Изменение числа оборотов нижнего образца обеспечивается кинематикой машины следующими ступенями:

$N_1 = 300$ об/мин;

$N_2 = 500$ об/мин;

$N_3 = 1000$ об/мин.

Скорости нижнего образца устанавливаются перестановкой ремня клиноременной передачи, которая приводится от электродвигателя типа А02-32/6 (2,2 кВт; 950 об/мин).

Конечный выключатель 11 типа КВД-3-24, являющийся датчиком к счетчику 12 суммарного числа оборотов нижнего образца, получает вращение через червячную пару с передаточным отношением 1:100, поэтому для получения действительного суммарного числа оборотов нижнего образца показания счетчика необходимо умножить на 100.

С валом нижнего образца жестко связан датчик, который измеряет момент трения и выдает пропорциональный ему электрический сигнал на показывающий и записывающий потенциометр 13.

Для предохранения машины от перегрузок при возрастании величины момента трения свыше 150 кгс × см конструкцией предусматривается механическая защита.

В шкив, расположенном на валу редуктора, устанавливается предохранительный штифт, закрытый колпачком.

НА МАШИНЕ УСТАНОВЛИВАЕТСЯ ТОЛЬКО ОДИН ШТИФТ.

Второе отверстие в шкиве является резервным.

Пульт управления 6 выполняется самостоятельным узлом, который можно установить на отдельном столе. Оператор, управляющий машиной, имеет возможность, не вставая из-за своего рабочего стола (т. к. пульт управления можно установить на столе оператора), следить по шкале потенциометра за изменением момента трения (шкала потенциометра условная, истинную величину момента находят по тарифовочному графику).

На лицевой панели пульта управления установлен счетчик суммарного числа оборотов вала нижнего образца, который получает электроимпульсы от конечного выключателя. Включение счетчика в работу осуществляется переводом тумблера «Счетчик» в положение «ВКЛ». Индекс шкалы потенциометра устанавливается на нуль путем поворота ручки «Установка нуля», «Грубо», «Плавно». Переключателем рода работы «Испытание», «Тарировка» устанавливается вид работы на машине. В случае нештатной ситуации машину можно выключить, нажав на кнопку «Стоп».

Для контроля температуры в паре трения на машину установлена термопара, подсоединенная к лучевому осциллографу. К нему же подсоединен вывод датчика момента трения. Осциллограф позволяет вести непрерывное наблюдение за парой трения (схема измерения дана на рис. 2.2).

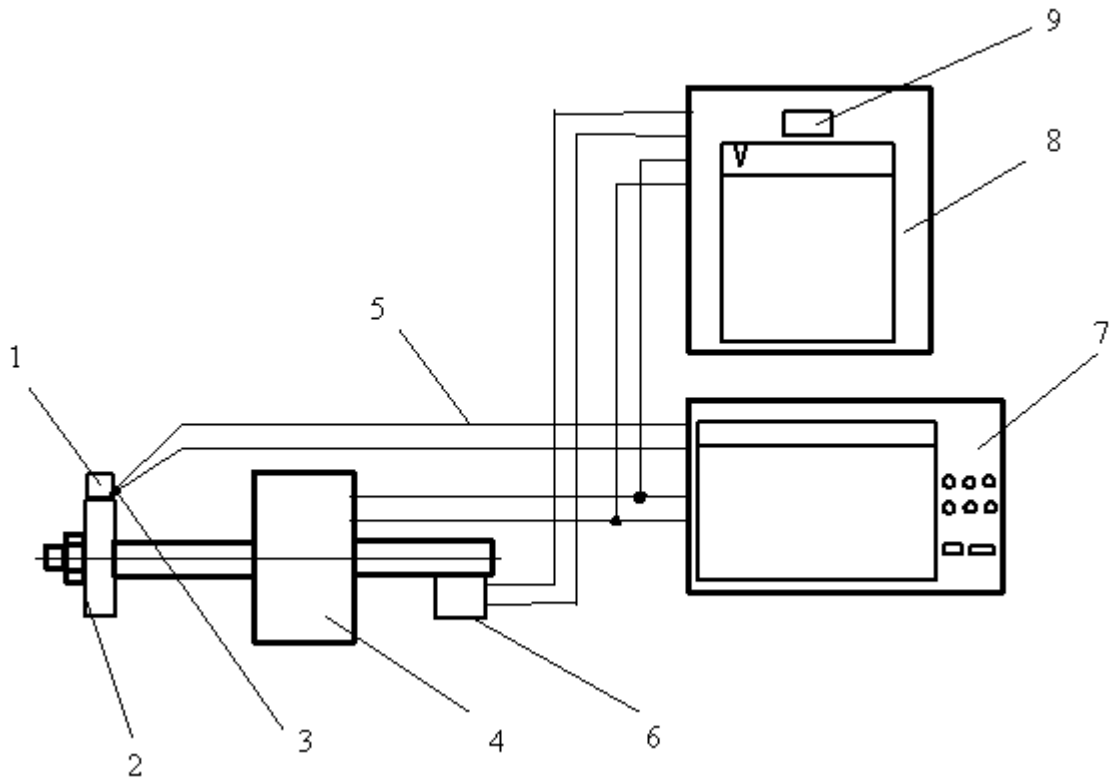


Рисунок 2.2 — Схема измерений:

1 — образец «колодка»; 2 — образец «диск»; 3 — термопара; 4 — датчик момента; 5 — соединительные провода; 6 — датчик измерения числа циклов работы; 7 — осциллограф; 8 — потенциометр-мометоизмеритель; 9 — счетчик числа циклов.

4 Указания по технике безопасности

1. Перед включением лабораторной установки в сеть проверить надежность заземления.
2. Включение установка производится только лаборантом или преподавателем, ведущим занятия.
3. При включённом электроприводе запрещается прикасаться к вращающимся частям лабораторной установки.

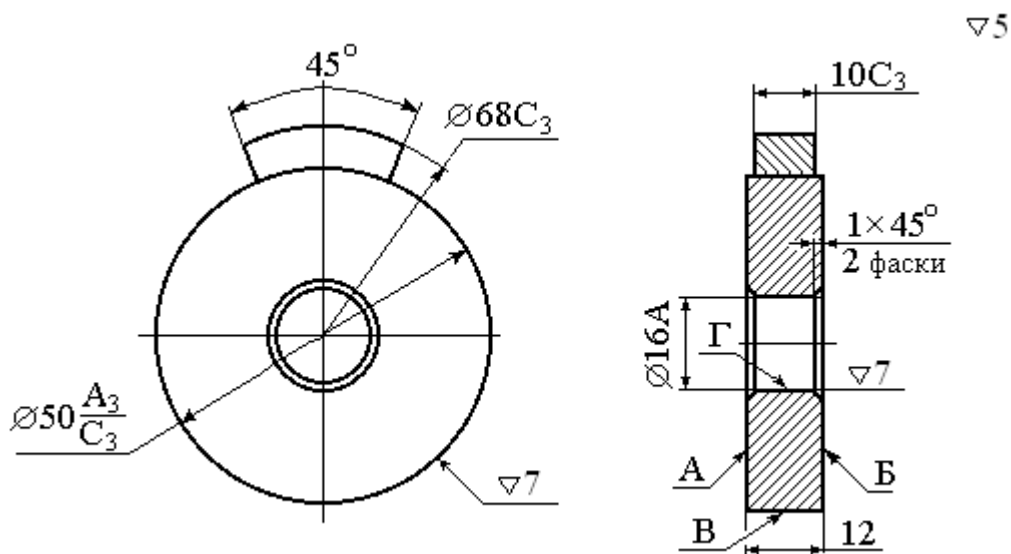
4. Запрещается работать при снятых ограждениях, производить затяжку и свинчивание гаек крепления образцов на ходу машины, облокачиваться на машину при её пуске и работе.

5 Методика и порядок выполнения работы

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

2. Изучить конструкцию, принцип действия и правила эксплуатации машины трения СМЦ-2.

3. Экспериментальным путём определить коэффициент трения скольжения в паре трения «диск-колодка». Для этого следует подготовить образцы согласно чертежам (рис 2.3).



1. Непараллельность поверхн. А и Б не более 0,02 мм.
2. Радиальное биение поверхн. В относительно оси отв. Г не более 0,03 мм.
3. Торцовое биение поверхн. А относительно оси отв. Г не более 0,02 мм.

Рисунок 2.3 — Чертёж образцов

Перед установкой образцы следует промыть в растворителе для очищения от загрязнений, и для получения более точного результата, трижды взвесить на весах точностью не ниже 1-го класса. Средние результаты замеров необходимо занести в таблицу 2.1. Далее установить нижний образец на валу таким образом, чтобы радиальное биение при проворачивании вала от руки не превышало 0,1 мм. Контроль вести индикатором ИЧ-10 кл.1 ГОСТ 577-68. Переключатель рода работы на пульте управления установить в положение «Испытание», тумблер счетчика числа оборотов — в положение «Вкл». С помощью шлангов подвести воду к штуцерам водяного охлаждения на каретке и бабке нижнего образца.

Подбор скоростей валов следует вести в соответствии с техническим описанием машины. Далее необходимо закрепить образец «колотка» в держателе, а вал верхнего образца зафиксировать от поворота фиксатором, расцепить муфту верхнего вала и закрыть ограждение.

Машину включать в сеть поворотом рукоятки выключателя, расположенного на панели управления машины, в положение «ВКЛ». При этом на панели управления должна загореться сигнальная лампа «Сеть». Запустить машину, нажав на кнопку «Пуск», расположенную на панели управления машины. Далее следует нагрузить образцы, медленно и плавно вращая винт нагружения и наблюдая за положением индекса на шкале потенциометра, показывающего величину момента трения.

По окончании работы нажать кнопку «Стоп», расположенную на панели управления машины и отключить машину от электросети поворотом рукоятки выключателя.

Проведение испытания.

После пуска машины необходимо прогреть ее в течении 5...10 мин. Далее к образцам приложить нагрузку и приступить непосредственно к их испытанию. Каждые 50 циклов работы следует снимать показания температуры и момента трения. Затем остановить машину трения, образцы снять, тщательно промыть, взвесить в трёх повторностях и определить среднее значение замеров. Все данные занести в таблицу 2.1.

После снятия всех показаний рассчитать и записать в таблицу износ образцов и коэффициент трения.

Износ образцов определить по формуле

$$I = m_0 - m, \quad (2.1)$$

где I — износ образца, гр.;

m_0 — масса образца до испытания, гр.;

m — масса образца в процессе испытания, гр.

Таблица 2.1 — Результаты испытания образцов на износ

Показатели	Наработка циклов, n						
	0	50	100	150	200	250	300
Масса диска, m_d , гр.							
Износ диска, I_d , гр							
Масса колодки, m_k , гр.							
Износ колодки, I_k , гр.							
Температура в паре трения, t , град.							
Момент трения, M_t , кгс × см.							
Коэффициент трения, f							

Коэффициент трения в паре определить на основе показаний моменто-измерителя по формуле

$$f = \frac{M_T}{P_n \cdot R_0}, \quad (2)$$

где f — коэффициент трения;

M_T — момент трения, кгс × см;

P_n — нагрузка, кгс;

R_0 — радиус круглого образца, см.

По данным таблицы 2.1 необходимо построить зависимости износа, температуры и коэффициента трения от числа циклов нагружения:

$$I=f(n), t=f(n), f=f(n).$$

6 Содержание отчета и его форма

Теоретическую и экспериментальную части работы следует оформить в виде отчёта и по полученным результатам сформулировать выводы.

7 Контрольные вопросы

1. Дайте определение понятию «пара трения».
2. Что такое «изнашивание», «износ»?
3. Чем характеризуется изнашивание?
4. Какие методы определения износа Вы знаете?
5. Поясните конструкцию и принцип действия машины СМЦ-2.
6. Как зависят температура, коэффициент трения и износ от числа циклов нагружения?

8 Основная литература

1. Гаркунов, Д.Н. Триботехника : учебное пособие / Д.Н. Гаркунов, Э.Л. Мельников, В.С. Гаврилюк. – 2-е изд., стер. – М. : КНОРУС, 2013. – 408 с. (Бакалавриат).

2. Землянушнова, Н.Ю. Исследование трения и износа при ремонте машин и оборудования : методические рекомендации для выполнения лабораторных работ / Н.Ю. Землянушнова, А.Т. Лебедев, Н.П. Дорони-на, А.В. Захарин, А.С. Слюсарев, А.А. Лазаренко, – Ставрополь : АГРУС, 2008. – 44 с.

3. Чичинадзе, А.В. Трение, износ и смазка / А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун, Н.А. Буше, И.А. Буяновский, Ф.Р. Геккер, И.Г. Горячева, В.В. Гриб, Н.Б. Демкин, М.Н. Добычин, Ю.А. Евдокимов, С.М. Захаров, В.Я. Кершенбаум, Ю.М. Лужнов, М.А. Мамхегов, Н.М. Михин, А.Т. Романова. — М : Машиностроение, 2003. — 576 с.

Дополнительная литература

1. Машиностроение. Энциклопедия. В 40 т. Т. 4. Трение, износ и смазка, 1996.

Лабораторная работа № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ФРИКЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТВЁРДЫХ ТЕЛ

1 Цель и содержание работы

1. Изучить аналитические и экспериментальные методы определения фрикционных характеристик твердых тел.
2. Расчетным и экспериментальным путем определить коэффициент трения скольжения полимеров.

2 Теоретическое обоснование

Трение имеет молекулярно-механическую природу. На площади фактического контакта поверхностей действуют силы молекулярного притяжения, которые проявляются на расстояниях, в десятки раз превышающих межатомное расстояние в кристаллических решетках, и увеличиваются с повышением температуры. Наличие нескомпенсированных молекулярных сил на границе раздела фаз «твердое тело — газ», «твердое тело — жидкость», «жидкость — газ» обуславливает появление дополнительных сил притяжения (прилипания) между соприкасающимися телами.

Образование молекулярной связи, нормальной к поверхности раздела тел, между поверхностями соприкасающихся твердых или жидких тел (фаз) получило название *адгезии*. Она возможна между металлами и пленками окислов. Адгезия может быть обусловлена также и действием электростатических сил. Силы адгезии, как и молекулярные силы, прямо пропорциональны площади фактического контакта. Приложенное

давление влияет на эти силы косвенно, через площадь фактического контакта.

Если соприкасающиеся тела одинаковы, то адгезия при полном их соприкосновении переходит в *когезию (сцепление)*, которая характеризует прочность тел — силу сцепления между молекулами, атомами или ионами вещества в данном теле.

Относительное смещение поверхностей при наличии взаимного притяжения и адгезии сопровождается деформацией сдвига, что вследствие неидеальной упругости материала требует затраты энергии в необратимой форме. Разумеется, бóльшую тангенциальную силу надо приложить, если связь между телами нарушается не по месту соединения, а на некоторой глубине от поверхности.

Более сильным проявлением молекулярных сил является схватывание поверхностей. Сила трения в этом случае зависит от протяженности зон схватывания и сопротивления их разобщению.

Сила трения $P_{тр}$, Н, обусловленная механическим и молекулярным взаимодействиями

$$P_{тр} = aS_{\phi} + bP, \quad (3.1)$$

где a — средняя интенсивность молекулярной составляющей силы трения, Н/мм²;

S_{ϕ} — фактическая площадь контакта, мм²;

b — коэффициент, характеризующий механическую составляющую силы трения;

P — сила давления, Н.

Коэффициент трения f представляет собой отношение сил трения и давления

$$f = P_{mp} / P, \quad (3.2)$$

На основании формулы (3.1) имеем

$$f = aS_{\phi} / P + b \quad (3.3)$$

Переходя от отдельного микровыступа к множественному контакту твёрдых тел и принимая, что они расположены так, чтобы удовлетворять начальному участку кривой опорной поверхности, можно расчётным путём по выражениям (3.2) и (3.3) найти общий коэффициент трения, соответствующий упругому контакту

$$f = \frac{2,4\tau_0}{p_c^{0,2} \Delta^{0,4}} \left(\frac{1 - \mu^2}{E} \right)^{0,8} + \beta + 0,24\alpha_2 \Delta^{0,4} \left[\frac{p_c (1 - \mu^2)}{E} \right]^{0,2}, \quad (3.4)$$

где τ_0 — касательное напряжение при срезе адгезионной связи, МПа;

β — коэффициент упрочнения адгезионной связи;

α_2 — коэффициент гистерезисных потерь;

p_c — контурное давление в зоне контакта, МПа;

E — модуль упругости материала. МПа;

μ — коэффициент Пуассона;

Δ — параметр шероховатости, равный

$$\Delta = 0,707R_{max}/r, \quad (3.5)$$

где R_{max} — наибольшая высота микронеровностей, мкм.

Контурное давление, соответствующее упругому контакту, находится по зависимости

$$P_c = \frac{0,452HB^5}{E^4 \Delta^2}, \quad (3.6)$$

где HB — твердость более мягкого материала при контакте, МПа.

Выражения (3.4), (3.5) и (3.6) позволяют расчетным путем на стадии предварительного решения инженерных задач определять коэффициент трения скольжения. Однако этот параметр может быть также найден и экспериментальным путем. Для этого используются специальные методы исследования, которые позволяют оперативно оценить наиболее важные трибологические характеристики материалов.

Испытания рекомендуется проводить в следующей последовательности:

- лабораторные испытания с целью определения физико-механических характеристик материала;
- лабораторные исследования влияния различных факторов на фрикционные свойства пары трения;
- стендовые испытания для оценки влияния конструктивных особенностей узла трения на его триботехнические свойства;
- натурные (промышленные) испытания для определения эксплуатационных характеристик узла трения, в том числе надежности и долговечности.

Лабораторные испытания проводятся на машинах трения и стендах, которые отличаются по кинематическим признакам, схемам взаимодействия элементов пар трения и по коэффициенту взаимного перекрытия. В процессе испытаний регистрируются такие важнейшие параметры, как давление и температура в зоне контакта, сила трения, скорость скольжения и т. д.

3 Аппаратура и материалы

Для испытания образцов на кафедре технического сервиса и ремонта машин СТГАУ используется машина СМЦ-2, описанная в лабораторной работе 2.

В качестве объектов испытаний типа «диск по диску» используются образцы, выполненные из полимеров, основные характеристики которых приведены в табл. 3.1 и из стали ШХ - 15.

Таблица 3.1 — Физико-механические и фрикционные свойства полимеров

Вариант	Тип полимера	Характеристики полимера			
		<i>HВ</i> , МПа	<i>E</i> , МПа	$\tau_{0,}$ МПа	β
1	Фторопласт	31	1500	3,41	0,017
2	Полиэтилен ПЭВД	26	560	1,30	0,040
3	Полиэтилен ПЭНД	38	1000	1,14	0,050
4	Полипропилен	37	400	0,11	0,035
5	Поликапроамид	75	560	0,85	0,038
6	Винипласт	120	630	3,72	0,060
7	Капролон	130	2500	1,47	0,050
8	Капрон технический	70	1500	1,61	0,040
9	Полиамид 68П	160	1200	1,43	0,046
10	Плексиглас	160	400	9,81	0,150

4 Указания по технике безопасности

1. Перед включением лабораторной установки в сеть проверить надежность заземления.
2. Включение установки производится только лаборантом или преподавателем, ведущим занятия.
3. При включённом электроприводе запрещается прикасаться к вращающимся частям лабораторной установки.

4. Запрещается работать при снятых ограждениях, производить затяжку и свинчивание гаек крепления образцов на ходу машины, облокачиваться на машину при её пуске и работе.

5 Методика и порядок выполнения работы

1. Изучить основные теоретические положения о фрикционных свойствах твёрдых тел и методах их экспериментального определения.

2. Теоретическим путем определить по выражениям (3.4), (3.5) и (3.6) коэффициент внешнего трения полимера о сталь по следующим исходным данным:

— марка стали — ШХ15;

— вид обработки — плоское шлифование по 9-му классу шероховатости;

— параметры шероховатости — $R_{\max} = 2,4$ мкм, $r = 550$ мкм.

— тип полимера, его физико-механические и фрикционные свойства приведены в таблице 3.1;

— коэффициент Пуассона $\mu = 0,49$, коэффициент гистерезисных потерь $\alpha_2 = 0,36$.

3. На лабораторной установке изучить влияние нагрузочного режима на коэффициент внешнего трения.

Эксперимент проводить в следующей последовательности:

а) произвести притирку стандартного образца до достижения стабильных значений силы трения;

б) притёртый образец промыть и просушить в термошкафу;

в) разместить образец на установке и определить силу трения при значениях нормальной нагрузки, указанных в таблице 3.2;

Таблица 3.2 — Результаты триботехнических испытаний

Параметр	Нагрузка (P_n), Н					
	15	30	45	60	75	90
Момент трения, Н×мм						
Сила трения ($P_{тр}$), Н						
Коэффициент трения f						
Давление p (МПа) в трибосопряжении						

г) результаты испытаний занести в таблицу 3.2 и по выражению (3.2) найти коэффициент трения полимера о поверхность контртела.

4. По результатам испытаний построить график зависимости коэффициента трения от давления p (МПа) в трибосопряжении

$$p = \frac{P_n}{S},$$

где $S = \frac{\pi \times d}{8} \times 10$, мм², — площадь контакта образцов (рис. 2.3);

d — диаметр образца, мм.

6 Содержание отчета и его форма

Теоретическую и экспериментальную части работы следует оформить в виде отчёта и по полученным результатам сформулировать выводы.

7 Контрольные вопросы

1. Поясните смысл молекулярно-механической природы трения.
2. Дайте определение понятиям «адгезия» и «схватывание» поверхностей.

3. Какие составляющие определяет величину коэффициента трения скольжения?

3. Как определяется коэффициент трения скольжения экспериментальным путём?

4. Как влияет контактное давление на величину коэффициента трения скольжения?

8 Основная литература

1. Гаркунов, Д.Н. Триботехника : учебное пособие / Д.Н. Гаркунов, Э.Л. Мельников, В.С. Гаврилюк. – 2-е изд., стер. – М. : КНОРУС, 2013. – 408 с. (Бакалавриат).

2. Чичинадзе, А.В. Трение, износ и смазка / А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун, Н.А. Буше, И.А. Буяновский, Ф.Р. Геккер, И.Г. Горячева, В.В. Гриб, Н.Б. Демкин, М.Н. Добычин, Ю.А. Евдокимов, С.М. Захаров, В.Я. Кершенбаум, Ю.М. Лужнов, М.А. Мамхегов, Н.М. Михин, А.Т. Романова. — М : Машиностроение, 2003. — 576 с.

Дополнительная литература

1. Сербин В.М. Методические указания по проведению лабораторных занятий по дисциплине «Основы триботехники». Ставрополь, СевКавГТУ, 2003. — 41 с.

Лабораторная работа № 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗНАШИВАНИЯ И РЕСУРСА ПАРЫ ТРЕНИЯ

1 Цель и содержание работы

1. Изучить теоретические и экспериментальные методы определения интенсивности изнашивания твердых тел.
2. Расчетным и экспериментальным путем найти интенсивность изнашивания и ресурс опытных образцов.

2 Теоретическое обоснование

В условиях трения скольжения широко используется интегральный показатель — *линейная интенсивность изнашивания*, которая находится по зависимости

$$I_h = h / L, \quad (4.1)$$

где h — толщина изношенного слоя материала, мм;

L — путь трения, на котором происходило изнашивание, мм.

Этот показатель является одной из главных триботехнических характеристик материалов, которая значительно влияет на ресурс работы всего механизма в целом и отдельных его узлов. Интенсивность изнашивания зависит, в свою очередь, от физико-механических свойств материала, наличия смазки, режима трения, микрогеометрии взаимодействующих поверхностей и внешней среды. Практикой установлено, что в зависимости от условий трения эта величина может изменяться в диа-

пазоне от 10^{-12} до 10^{-5} , т. е, отличаться на семь порядков. В этой связи при решении конкретных инженерных задач используются как расчетные, так и экспериментальные методы определения интенсивности изнашивания трибосопряжений.

Аналитический метод в рамках молекулярно-механической теории был предложен И. В. Крагельским, который показал, что в процессе трения участвует только фактическая площадь контакта. Поэтому удельный износ i_h , представляет собой фактический объём изношенного материала ΔV_r , делённый на площадь фактического касания и отнесённый к пути трения, равному диаметру пятна касания

$$i_h = h^*/d = \Delta V_r / (A_r \cdot d), \quad (4.2)$$

где h^* — толщина изношенного слоя пятна касания, мм;

d — диаметр пятна касания, мм;

ΔV_r — объём изношенного слоя пятна касания, мм³;

A_r — фактическая площадь контакта, мм².

Фактический объём изношенного материала ΔV_r связан с объёмом деформируемого при трении материала V_r равенством

$$\Delta V_r = \frac{V_r}{n}, \quad (4.3)$$

где n — число циклов взаимодействия, приводящее к разрушению объёма ΔV_r .

Тогда из выражений (4.1), (4.2) и (4.3) следует, что интенсивность изнашивания

$$I_h = i_h \frac{A_r}{A_a} = i_h \frac{p_a}{p_r} \quad (4.4)$$

где A_a — номинальная площадь контакта, мм²;

p_a — номинальное давление в контакте, МПа;

p_r — фактическое давление в контакте, МПа.

Используя в качестве основы сферическую модель шероховатой поверхности и произведя соответствующие преобразования в выражении (4.4), можно получить следующую зависимость для определения интенсивности изнашивания твёрдых тел при типичных видах механической обработки ($b = 2$, $\nu = 2$ — параметры кривой опорной поверхности) и упругом контакте

$$I_h = \frac{0,34 p_c \cdot k^t}{\sigma_0^t} \cdot \left(\frac{1 - \mu^2}{E} \right) \cdot \left[\tau_0 + 0,5 \beta \cdot p_c^{0,2} \cdot \Delta^{0,4} \cdot \left(\frac{E}{1 - \mu^2} \right)^{0,8} \right]^t, \quad (4.5)$$

где p_c — контурное давление в контакте, МПа;

σ_0 — предельное напряжение растяжения, МПа;

t — показатель кривой усталости;

μ — коэффициент Пуассона;

E — модуль упругости, МПа;

τ_0 — касательное напряжение при срезе адгезионной связи, МПа;

β — коэффициент упрочнения адгезионной связи;

k — коэффициент, характеризующий напряженное состояние материала;

Δ — параметр шероховатости.

Контурное давление, МПа, соответствующее упругому контакту, может быть найдено по выражению

$$P_c = \frac{0,452HB^5}{E^4 \Delta^2} \quad (4.6)$$

где HB — твердость материала, МПа.

Остальные параметры, входящие в выражения (4.5) и (4.6), определяются по справочным данным (табл. 4.1) и относятся (кроме Δ) к менее жёсткому материалу трущейся пары.

Практическая ценность полученных результатов заключается в том, что по известной интенсивности изнашивания может быть определен ресурс работы этой пары t в часах

$$t = \frac{[h]}{60I_h L^* k_u}, \quad (4.7)$$

где $[h]$ — допустимая толщина изношенного слоя материала, мм;

L^* — путь трения в единицу времени, мм/мин.;

k_u — коэффициент использования оборудования.

Для вращающихся деталей этот параметр находится по выражению

$$t = \frac{[h]}{I_h 60\pi d n k_u}, \quad (4.8)$$

где d — средний диаметр поверхности трения, мм;

n — частота вращения детали, мин⁻¹.

Помимо расчётных методов также широко применяют экспериментальные методы исследования изнашивания твердых тел.

3 Аппаратура и материалы

В работе использовать установку СМЦ-2 для испытания материалов на трение и износ, (конструкция этой установки подробно рассмотрена в лабораторной работе № 2).

Для проведения эксперимента на машине трения следует установить образец испытуемого материала, взаимодействующий с контртелом в виде металлического кольца.

Кольцо привести во вращение, и образец нагрузить при помощи набора грузов. В процессе испытаний необходимо контролировать силу трения в трибосопряжении. После завершения эксперимента снять и взвесить образцы на аналитических весах типа ВЛА-200.

В качестве объектов испытаний использовать образцы, выполненные из полимеров, основные характеристики которых приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 — Физико-механические и фрикционные свойства полимеров

№	Полимер	Характеристики полимера						
		E , МПа	HB , МПа	τ_0 , МПа	β	t	σ_0 , МПа	$\rho \cdot 10^{-3}$ г/мм ³
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Фторопласт	1500	31	3,41	0,017	5,0	63	2,20

Окончание таблицы 4.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
2	Полиэтилен ВД	560	26	1,30	0,040	2,7	125	1,20
3	Полиэтилен НД	1000	38	1,14	0,050	3,2	96	1,32
4	Полипропилен	400	37	0,11	0,035	2,5	224	0,91
5	Поликапроамид	560	75	0,85	0,038	2,3	360	1,36
6	Винипласт	630	120	3,72	0,060	2,9	68	1,20
7	Капролон	2500	130	1,47	0,050	2,6	630	1,15
8	Капрон технич.	1500	70	1,61	0,040	2,8	700	1,13
9	Полиамид 68П	1200	160	1,43	0,046	2,0	180	1,40
10	Плексиглас	400	160	9,81	0,150	13	147	1,12

4 Указания по технике безопасности

1. Перед включением лабораторной установки в сеть проверить надежность заземления.
2. Включение установки производится только лаборантом или преподавателем, ведущим занятия,
3. При включённом электроприводе запрещается прикасаться к вращающимся частям лабораторной установки.
4. Запрещается работать при снятых ограждениях, производить затяжку и свинчивание гаек крепления образцов на ходу машины, облокачиваться на машину при её пуске и работе.

5 Методика и порядок выполнения работы

1. Изучить особенности конструкции, принцип действия и порядок эксплуатации лабораторной установки.

2. Теоретическим путем на основании выражений (4.5) и (4.6) определить интенсивность изнашивания полимера о сталь по следующим исходным данным:

- марка стали — ШХ15;
- вид обработки — плоское шлифование по 9-му классу шероховатости;
- параметр шероховатости — $\Delta = 2,6 \cdot 10^{-3}$;
- коэффициент Пуассона — $\mu = 0,49$;
- коэффициент — $k = 3$;
- тип полимера, его физико-механические и фрикционные свойства приведены в табл. 4.1.

3. Для полученного значения I_h по зависимости (4.8) определить долговечность трибосопряжения, приняв: $[h] = 1$ мм, $d = 40$ мм, $k_u = 0,65$, $n = 300$ мин⁻¹.

4. На лабораторной установке изучить влияние нагрузочного режима на интенсивность изнашивания заданного полимера.

Эксперимент проводить в следующей последовательности:

- а) произвести притирку стандартного образца до достижения стабильных значений силы трения;
- б) притёртый образец промыть в инертной жидкости и просушить в термошкафу;
- в) трижды взвесить образец на весах и определить среднюю начальную массу — m_1 (г);
- г) установить образец на машину трения и производить его изнашивание в течение 500 оборотов контртела при постоянной скорости скольжения и значениях нормальной нагрузки указанных в табл. 4.2;

д) определить взвешиванием массу образца после завершения испытаний (m_2) и результаты занести в табл. 4.2;

е) определить интенсивность изнашивания полимера при разных значениях нормальной нагрузки по выражению

$$I_h = h/L, \quad (4.9)$$

где h — толщина изношенного слоя материала, мм;

L — путь трения, мм.

Таблица 4.2 — Результаты эксперимента

Параметры	Нормальная нагрузка (P_n), Н				
	20	40	60	80	100
m_1 , Г					
m_2 , Г					
Δm , Г					
h , мм					
I_h					
t , час					
$M_{тр}$, Н×мм					
P_{mp} , Н					
f					
p , МПа					

Толщина изношенного слоя материала образца h находится по зависимости

$$h = (m_1 - m_2) / S \cdot \rho, \quad (4.10)$$

где m_1 — исходная масса образца, г;

m_2 — масса образца после испытания, г;

ρ — плотность материала образца, г/мм³;

S — площадь основания образца, мм².

Путь трения

$$L = \pi \cdot d \cdot N = 3,14 \cdot 40 \cdot 500 = 62,8 \cdot 10^3 \text{ мм.} \quad (4.11)$$

ж) по результатам испытаний построить график зависимости $I_h = f(p)$ и сравнить расчетные и экспериментальные значения. p — давление в трибосопряжении, МПа.

5. На основании данных таблицы 4.2 определить коэффициент трения скольжения полимера при взаимодействии со сталью.

6 Содержание отчета и его форма

Теоретическую и экспериментальную части работы следует оформить в виде отчёта в последовательности, указанной в предыдущем разделе, и по полученным результатам сформулировать выводы.

7 Контрольные вопросы

1. В чем отличие износа от изнашивания?
2. Что такое линейная интенсивность изнашивания? Как она определяется?
3. В каких пределах изменяется интенсивность линейного изнашивания?

4. От каких факторов зависит интенсивность линейного изнашивания?
5. Как влияет интенсивность износа на долговечность?

8 Основная литература

1. Гаркунов, Д.Н. Триботехника : учебное пособие / Д.Н. Гаркунов, Э.Л. Мельников, В.С. Гаврилюк. – 2-е изд., стер. – М. : КНОРУС, 2013. – 408 с. (Бакалавриат).
2. Чичинадзе, А.В. Трение, износ и смазка / А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун, Н.А. Буше, И.А. Буяновский, Ф.Р. Геккер, И.Г. Горячева, В.В. Гриб, Н.Б. Демкин, М.Н. Добычин, Ю.А. Евдокимов, С.М. Захаров, В.Я. Кершенбаум, Ю.М. Лужнов, М.А. Мамхегов, Н.М. Михин, А.Т. Романова. — М : Машиностроение, 2003. — 576 с.

Дополнительная литература

1. Машиностроение. Энциклопедия. В 40 т. Т. 4. Трение, износ и смазка. 1996.
2. Сербин В.М. Методические указания по проведению лабораторных занятий по дисциплине «Основы триботехники». Ставрополь, СевКавГТУ, 2003. — 41 с.

Лабораторная работа № 5

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ИЗНОСА ИНСТРУМЕНТА И РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ ПРИ ФИНИШНОМ ПЛАЗМЕННОМ УПРОЧНЕНИИ (НА ПРИМЕРЕ СВЕРЛЕНИЯ)

1 Цель и содержание работы

1. Ознакомление с сущностью финишного плазменного упрочнения (ФПУ).
2. Ознакомление с элементами процесса резания при сверлении.
3. Исследование влияния ФПУ на элементы процесса резания при сверлении.

2 Теоретическое обоснование

Финишное плазменное упрочнение (ФПУ) – новая технология для многократного повышения работоспособности инструмента, штампов, пресс-форм и деталей машин, рассчитанная на массовое применение в промышленности. ФПУ подвергаются изделия из инструментальных сталей, твердых сплавов, а также из других сталей и сплавов.

ФПУ является заключительной операцией и проводится после окончательной механической, термической и абразивной обработки изделий. ФПУ не подлежат изделия, имеющие на упрочняемых зонах следы окисления, прижоги, заусенцы, сколы, затупления, а также оксидные и органические покрытия.

Цель ФПУ – изготовление инструмента, штампов, прессформ, ножей, фильер, подшипников и других деталей машин со специальными свойствами поверхности: высокими износостойкостью, антифрикцион-

ностью, коррозионнотойкостью, жаростойкостью, разгаростойкостью, антисхватыванием, стойкостью против фреттинг - коррозии и др.

Сущность ФПУ состоит в нанесении износостойкого покрытия с одновременным осуществлением процесса повторной плазменной закалки приповерхностного слоя (на глубину нескольких микрометров). Покрытие является продуктом плазмохимических реакций реагентов, прошедших через дуговой плазмотрон. Закалка происходит за счет локального воздействия высококонцентрированной плазменной струи.

Эффект от ФПУ достигается за счет изменения физико-механических свойств поверхностного слоя: увеличения микротвердости, уменьшения коэффициента трения, создания сжимающих напряжений, залечивания микродефектов, образования на поверхности диэлектрического и коррозионнотойкого пленочного покрытия с низким коэффициентом теплопроводности, химической инертностью и специфической топографией поверхности.

При сверлении *глубина резания* t равна половине диаметра сверла D , мм,

$$t = D/2. \quad (1)$$

Подача s – перемещение сверла в осевом направлении за один его оборот (мм/об). Так как сверло имеет две главные режущие кромки, то подача, приходящаяся на каждую режущую кромку, $s_z = s/2$.

Скорость резания v – окружная скорость вращения точки режущей кромки, расположенной на наружном диаметре сверла, м/мин,

$$v = \frac{\pi \times D \times n}{1000}, \quad (2)$$

где n – частота вращения сверла, мин⁻¹.

Машинное (основное технологическое) время при сверлении, мин,

$$T_{\text{маш}} = \frac{L}{n \times s}, \quad (3)$$

где $T_{\text{маш}}$ – машинное (основное технологическое время), мин;

L – длина прохода сверла в направлении подачи, мм;

n – частота вращения сверла, об/мин;

s – подача сверла в осевом направлении за один оборот, мм/об.

$$L = l + l_1 + l_2, \quad (4)$$

где l – глубина сверления, мм;

$l_1 \approx 0,3D$ – величина врезания, мм;

D – диаметр сверла, мм;

$l_2 = 1 \dots 3$ мм – величина перебега.

Все основные явления, свойственные процессу точения (упругие и пластические деформации обрабатываемого материала, усадка стружки, наростообразование на режущей кромке сверла, тепловыделение и др.), присущи и сверлению. Вместе с тем процесс сверления имеет и ряд особенностей: в более тяжелых условиях протекает процесс образования стружки; затруднен отвод стружки и подвод смазочно-охлаждающей жидкости. Переменное значение скорости резания и переднего угла по длине режущей кромки сказывается на характере образования стружки. Поперечная режущая кромка (перемычка) имеет угол резания больше 90° , а скорость резания у перемычки почти равна нулю, поэтому у перемычки происходит не резание, а смятие материала, что вызывает повышенный износ сверла. Направляющие ленточки, не имея заднего угла, создают при сверлении значительное трение о по-

верхность обработанного отверстия. Поэтому применение ФПУ при сверлении является актуальной задачей.

3 Аппаратура и материалы

Оборудование для ФПУ включает в себя переносной блок аппаратуры с жидкостным дозатором (рис. 5.1), малогабаритный плазмотрон с плазмохимическим генератором (рис. 5.2) и источник питания (рис. 5.3).



Рисунок 5.1 - Блок аппаратуры с жидкостным питателем



Рисунок 5.2 - Плазмотрон с плазмохимическим генератором



Рисунок 5.3 - Источник тока

С целью определения влияния ФПУ на режимы резания при сверлении ФПУ подверглась предварительно обезжиренная поверхность спирального сверла диаметром 7 мм (рис. 5.4). Материал сверла – быстрорежущая сталь Р6М5. При упрочнении рабочей поверхности сверл их державки закрепляются в шпинделе токарного станка JET BD-920 W (Германия).



Рисунок 5.4 – Финишное плазменное упрочнение сверла

Для исследования влияния упрочнения на режимы резания при механической обработке использованы 4 пластины из стали 45 толщиной по 15 мм. Режущие кромки сверл до проведения эксперимента показаны на рисунке 5.5.



Рисунок 5.5 - Режущие кромки сверл до просверливания отверстий

4 Указания по технике безопасности

1. Эксплуатация установки должна производиться с соблюдением правил техники безопасности и производственной санитарии при электросварочных работах. Допуск к работе с установкой осуществляется после изучения правил техники безопасности, технического описания и инструкции по эксплуатации установки.

2. Операторы ФПУ должны иметь квалификационную 1 группу по электробезопасности, а также допуск к эксплуатации сосудов, работающих под давлением (газовых баллонов).

3. Для защиты органов зрения при проведении процесса ФПУ использовать защитные очки со светофильтром В-2. При работе на установке использовать защитную одежду (халаты, перчатки), специальный инструмент, ключ к баллону с аргоном.

4. Работа на оборудовании проводится только лаборантом или преподавателем, ведущим занятия.

5. Процесс ФПУ производить при включенной местной вытяжной вентиляции.

6. Все работы с технологическим препаратом Сетол производить при включенной вентиляции.

7. Работу на установке следует производить стоя на диэлектрическом коврик.

8. Запрещается работать без заземления, с поврежденной изоляцией проводов, без защитных кожухов.

9. Запрещается работать без водяного охлаждения плазмотрона и плазмохимического генератора.

10. Запрещается прикасаться к токоведущим частям плазмохимического генератора в момент включения дуги.

11. В случае пробоя изоляции следует немедленно отключить установку от сети.

12. При срыве шланга воды или аргона и при любом другом нарушении их подачи или герметичности коммуникаций оборудования необходимо немедленно выключить источник тока и всю установку; перекрыть подачу воды или аргона на установку, работу прекратить до выяснения причины и устранения неисправности.

13. Все движущиеся части станков должны быть ограждены кожухами (ограждениями) из листовой стали, пластмасс или проволочной сетки.

14. Пусковые устройства станков должны быть расположены так, чтобы обеспечить удобство и безопасность использования, быстроту остановки станка и невозможность его случайного пуска.

15. Для защиты глаз и лица работающего от стружки применять прозрачные щитки и экраны из органического стекла, а также защитные очки.

16. Удаление стружки нельзя производить руками во избежание их ранения; следует пользоваться для этого металлическим крючком и щеткой-смёткой.

17. Ответственность за нарушение техники безопасности, при отсутствии договоренности с ответственным за оборудование и помещение, в соответствие с действующим законодательством, полностью несет лицо, нарушившее технику безопасности.

5 Методика и порядок выполнения работы

1 В пластинах из стали 45 толщиной по 15 мм каждая при ручной подаче и частоте вращения шпинделя 430 об/мин, без СОЖ просвер-

лить по 10 сквозных отверстий сверлами, упрочненными ФПУ (рис. 5.6 а) и не упрочненными (рис. 5.6 б).



а)



б)

Рисунок 5.6 – Сверление отверстий в пластине: а) сверло, подвергнутое ФПУ, б) сверло, изготовленное по обычной технологии

Следует не забывать, что на качество процесса влияет правильность закрепления сверл. При использовании сверлильного патрона с ключом возможно ослабление силы закрепления инструмента во время его работы, проворот сверла и деформация его режущих кромок (рис. 5.7).



Рисунок 5.7 – Деформация рабочей части сверла в результате ослабления силы его закрепления

Провести хронометраж машинного времени, необходимого для качественного просверливания отверстий. Эксперимент должен иметь две повторности.

2. Результаты изменения машинного времени представить в таблице 5.1.

3. Сравнить визуально износ режущих кромок инструментов (рис. 5.8).

4. По известным формулам (3, 4) определить изменение ручной подачи сверла с возрастанием количества просверливаемых отверстий. Результаты изменения подачи представить в таблице 5.2.

Таблица 5.1 – Результаты изменения машинного времени при получении отверстий сверлами подвергнутыми и не подвергнутыми ФПУ

Кол-во просверленных отверстий нарастающим итогом, шт.	Среднее машинное время при ручной подаче, нарастающим итогом с.	
	Сверло, не подвергнутое ФПУ	Сверло, подвергнутое ФПУ
10		
20		
30		
40		



а)



б)

Рисунок 5.8 – Износ режущих кромок сверл: а) – не подвергнутого ФПУ; б) – подвергнутого ФПУ

5. Построить графики зависимости машинного времени от количества просверленных отверстий при ручной подаче и ручной подачи от количества просверленных отверстий. Сравнить режимы обработки инструментами упрочненными и не упрочненными ФПУ, представленные в таблицах 5.1 и 5.2.

Таблица 5.2 – Результаты изменения ручной подачи сверл подвергнутых и не подвергнутых ФПУ

Кол-во просверленных отверстий нарастающим итогом, шт.	Подача сверла в осевом направлении, мм/об	
	Сверло, не подвергнутое ФПУ	Сверло, подвергнутое ФПУ
10		
20		
30		
40		

6. Сформулировать выводы.

6 Содержание отчета и его форма

1. В отчет занести результаты изменения машинного времени при получении отверстий сверлами упрочненными и не упрочненными ФПУ.

2. В отчет занести результаты изменения ручной подачи сверл упрочненных и не упрочненных ФПУ.

3. Сформулировать выводы.

7 Контрольные вопросы

1. Что такое ФПУ?

2. В чем цель и сущность ФПУ?

3. Каковы правила техники безопасности при работе на установке для ФПУ?

4. Как влияет ФПУ инструмента на режимы механической обработки?

5. Как изменяется ресурс инструментов при упрочнении на установке ФПУ?

8 Литература

1. Землянушнова, Н.Ю. Технология финишно-плазменного упрочнения : учебно-методическое пособие / Н.Ю. Землянушнова, А.Т. Лебедев, А.В. Захарин и др.; Ставропольский государственный аграрный университет. – Ставрополь : АГРУС, 2008. – 64 с.

2. Некрасов, С.С. Обработка материалов резанием. – М. : Агропромиздат, 1988. – 336 с.

Учебное издание

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕНИЯ И
ИЗНОСА ПРИ РЕМОНТЕ МАШИН И
ОБОРУДОВАНИЯ**

Методические указания