

**Федеральное агентство по образованию  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
Уфимский государственный авиационный технический университет**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПАР ТРЕНИЯ ДВС**

**Лабораторный практикум по дисциплине  
«Основы теории трения и изнашивания»**

**Уфа 2007**

Федеральное агентство по образованию  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
Уфимский государственный авиационный технический университет

Кафедра двигателей внутреннего сгорания

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАР ТРЕНИЯ ДВС

Лабораторный практикум по дисциплине  
«Основы теории трения и изнашивания»

Уфа 2007

Составитель: С.А. Загайко

УДК 621.43.001.24 (07)

ББК 31.365 (я7)

Исследование пар трения ДВС: Лабораторный практикум по дисциплине «Основы теории трения и изнашивания» / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т; Сост.: С.А. Загайко. – Уфа, 2007. – 23 с.

В работе рассматриваются основные показатели качества поверхностей деталей машин, а также основная пара трения практически любого двигателя внутреннего сгорания (ДВС) – подшипник скольжения. ДВС рассматривается как сложная триботехническая система, требующая многоаспектного изучения конструкции пар трения. Поэтому лабораторные работы построены таким образом, чтобы студенты могли понять все составляющие механических потерь в ДВС.

Предназначен для подготовки бакалавров по направлению 140500 – «Энергомашиностроение» и дипломированных специалистов по направлению 140500 специальности 140501 – «Двигатели внутреннего сгорания», изучающих дисциплину «Основы теории трения и изнашивания».

Ил. 5. Табл. 2. Библиогр.: 9 назв.

Рецензенты: канд. техн. наук, доц. Ахмедзянов Д.А.;  
канд. техн. наук, доц. Вахитов Ю.Р.

© Уфимский государственный  
авиационный технический университет, 2007

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	4
<b>Лабораторная работа № 1</b>	
<b>Определение показателей качества поверхности по заданной профилограмме</b>	
1. Цель работы .....	6
2. Общие сведения.....	6
3. Порядок выполнения работы .....	9
4. Вопросы для контроля .....	11
<b>Лабораторная работа № 2</b>	
<b>Расчет подшипников скольжения</b>	
1. Цель работы .....	12
2. Общие сведения.....	12
3. Порядок выполнения работы .....	16
4. Вопросы для контроля .....	17
<b>Лабораторная работа № 3</b>	
<b>Исследование потерь на трение в подшипнике скольжения</b>	
1. Цель работы .....	18
2. Общие сведения.....	18
3. Необходимое аппаратное и программное обеспечение .....	21
4. Порядок выполнения работы .....	21
5. Вопросы для контроля .....	22
Список литературы .....	23

## ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Основы теории трения и изнашивания» является дисциплиной по выбору общепрофессионального цикла учебного плана направления 140500 – «Энергомашиностроение» и специальности 140501 – «Двигатели внутреннего сгорания» направления подготовки дипломированных специалистов 140500. Содержание дисциплины определяется Дополнительными требованиями к Государственным образовательным стандартам высшего профессионального образования по вышеуказанным направлениям.

Знания и умения, приобретенные студентами при изучении данной дисциплины, являются фундаментальными для более глубокого изучения вопросов конструирования и эксплуатации энергоустановок, в том числе двигателей внутреннего сгорания.

Целью изучения данного курса является формирование у обучающихся:

- способностей проектирования узлов трения на основе системного подхода;
- умения строить и использовать модели для описания и прогнозирования различных явлений на фрикционном подвижном контакте;
- осуществлять их качественный и количественный анализ.

К основным задачам изучения курса относятся:

- изучение теоретических основ упругого контакта твердых металлических тел;
- изучение напряжений и деформаций в зонах упругого и пластического контакта;
- установление функциональной связи коэффициента внешнего трения с физико-механическими свойствами материалов контактирующих тел, геометрией поверхностей соприкосновения и давления их сжатия;
- установление функциональных связей изнашивания с физико-механическими свойствами материалов контактирующих тел, геометрией поверхностей соприкосновения, давления их сжатия и температурой;

- ознакомление с проблемами оптимизации конструирования и расчета узлов трения с учетом смазки, технологии обработки деталей таких узлов, условий эксплуатации и т.д.

Дисциплина курса построена на основе дидактического принципа эффективного обучения. В логике обучения предусмотрено:

- первичное ознакомление с теоретическими основами механики взаимодействия твердых тел при трении;
- изучение основ механико-молекулярной теории трения и изнашивания;
- ознакомления с расчетами сопряжений деталей машин на износ;
- выработка у студентов навыков и умения выполнить практические расчеты на надежность узлов трения в машинах и оптимизации их работоспособности.

В результате изучения курса студент должен:

- иметь представление об общих принципах распределения давлений в зонах контакта деталей машин с учетом шероховатости их поверхностей;
- знать и уметь использовать методы проектирования и расчета триботехнических систем;
- владеть методами расчета коэффициента трения, износа деталей машин и сопряжений;
- иметь опыт проектирования и расчет узлов трения, в том числе с использованием вычислительной техники.

Изучение курса базируется на общенаучных и общепрофессиональных дисциплинах: физике, математике, теоретической механике, сопротивлению материалов, металловедении.

Развитию этих знаний и умений служат нижеследующие лабораторные работы.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ПО ЗАДАННОЙ ПРОФИЛОГРАММЕ

## 1. Цель работы

Целью работы является изучение показателей качества поверхности и их определение по заданной профилограмме. Работа рассчитана на 4 часа.

## 2. Общие сведения

В технике под поверхностью детали понимают наружный слой, который по строению и другим физическим свойствам отличается от внутренних слоев. Комплекс свойств, приобретаемых поверхностью детали в результате ее обработки, характеризуются обобщенным понятием «качество поверхности» [8].

Всякое реальное тело имеет отклонение от идеальной формы, называемые *погрешностями*, которые делят на 3 категории (рис. 1.1):

1) **макрогеометрические отклонения**  $\Delta$  – это отклонения формы поверхности от заданной (номинальной), определяемой чертежом;

2) **волнистость поверхности**  $H_v$  – совокупность более или менее регулярно чередующихся возвышенностей и впадин с шагом волны, значительно превышающим ее высоту ( $S_v / H_v > 40$ ). Различают *продольную* и *поперечную* волнистости;

3) **шероховатость поверхности**  $R_{max}$  – совокупность неровностей, представляющих из себя выступы и впадины с относительно малым расстоянием между ними, образующих рельеф поверхности ( $t = 2 \div 800$  мкм,  $R_{max} = 0,03 \div 400$  мкм).

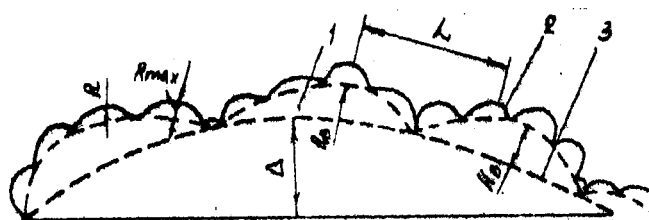


Рис. 1.1. Основные характеристики геометрии шероховатых поверхностей

Графическое изображение реального профиля в определенном масштабе, полученное по данным измерений шероховатости называют *профилограммой шероховатости*. Различают продольную и попе-

речную профилограммы шероховатости. Профилограммы снимают с реального профиля с помощью специальных приборов – профилографов. Диапазоны увеличения современных профилографов составляют: вертикальное увеличение –  $200 \div 100000$ , горизонтальное увеличение –  $20 \div 2000$ .

Для определения параметров шероховатости применяют следующие базовые определения (рис. 1.2):

**Базовая длина  $l$**  – длина базовой линии, используемой для выделения неровностей, характеризующих шероховатость поверхности и для количественного определения параметров.

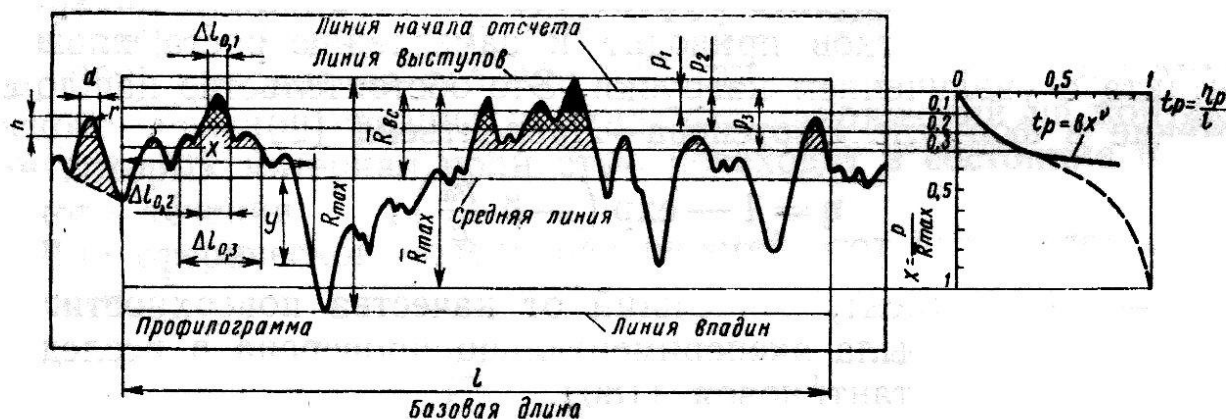


Рис. 1.2. Профилограмма поверхности

**Средняя линия** – базовая линия, имеющая форму номинального профиля и проведенная так, что в пределах базовой длины среднее квадратическое отклонение профиля от этой линии минимально.

**Линия выступов профиля** – линия, эквидистантная средней линии, проходящая через высшую точку профиля в пределах базовой длины.

**Линия впадин профиля** – линия, эквидистантная средней линии, проходящая через низшую точку профиля в пределах базовой длины.

ГОСТ 2789–73 предусматривает следующие параметры, характеризующие шероховатость поверхности:

1)  $Ra$  – *среднее арифметическое отклонение профиля от средней линии* – среднее арифметическое абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины  $l$ :



$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad \text{или} \quad Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|. \quad (1.1)$$

2)  $Rz$  – высота неровностей профиля по 10-ти точкам – сумма средних абсолютных значений высот 5-ти наибольших выступов и 5-ти наибольших впадин в пределах базовой длины  $l$ :

$$Rz = \frac{1}{5} \left( \sum_{i=1}^5 |y_{Pi}| + \sum_{i=1}^5 |y_{Vi}| \right). \quad (1.2)$$

3)  $Rmax$  – наибольшая высота неровностей профиля – расстояние между линией выступов и линией впадин в пределах базовой длины  $l$ .

4)  $r$  – средний радиус кривизны вершин выступов – среднее значение кривизны выступов вершин, определенное для 5-ти наиболее высоких выступов в пределах базовой длины  $l$ :

$$r = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 r_i. \quad (1.3)$$

5)  $Sm$  – средний шаг неровностей – средний шаг неровностей профиля в пределах базовой длины  $l$ .

6)  $S$  – средний шаг в пределах одного выступа – средний шаг в пределах одного выступа, расположенных на базовой длине  $l$ .

7) *Опорная кривая профиля* – характеризует распределение материала по высоте шероховатого слоя. Опорную кривую строят в относительных координатах (рис. 1.3). Начальный участок кривой аппроксимируют степенной функцией вида

$$tp = bx^v, \quad \text{где} \quad tp_i = \frac{\sum \Delta l_i}{l} \quad \text{и} \quad x_i = \frac{y_i}{R_{max}}. \quad (1.4)$$

$b$  и  $v$  – *параметры опорной кривой* – параметры степенной аппроксимации начальной части опорной кривой от вершины до средней линии, построенной в относительных координатах.

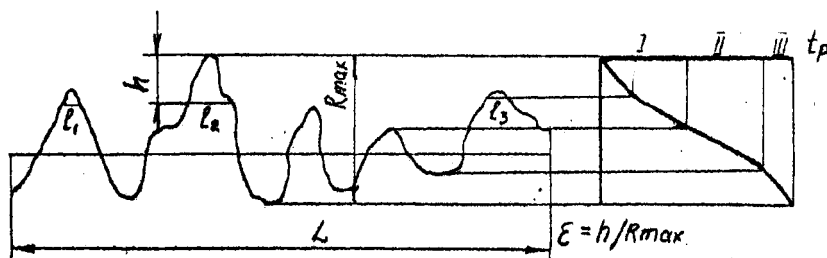


Рис. 1.3. Схема построения опорной кривой

В машиностроении параметры опорной кривой принимают значения  $b = 0,4 \div 2,5$  и  $\nu = 1,8 \div 2,2$ .

8) *Комплексная характеристика шероховатости  $\Delta$* , учитывающая остроту выступов и распределение шероховатого слоя по высоте профиля, определяется по формуле:

$$\Delta = \frac{R \max}{rb^{1/\nu}} . \quad (1.5)$$

### 3. Порядок выполнения работы

Работу необходимо выполнять в следующей последовательности:

3.1. Получить у преподавателя профилограмму поверхности и перенести ее на миллиметровку.

3.2. Выделить на профилограмме участок, который будет иметь длину, например, 10 см, и являться базовой длиной при количественном определении параметров шероховатости поверхности.

3.3. Провести среднюю линию. Линию надо провести так, чтобы площади, находящиеся между линией и профилограммой, над средней линией и под ней были примерно одинаковы (расхождение не должно превышать 5%).

Для начала «на глазок» проведите линию посередине профилограммы и по миллиметровке подсчитайте площади над линией и под ней. Для удобства подсчета площадей разбейте базовую длину на участки по 1 мм (в пределах каждого участка высота профилограммы считается постоянной (это допущение)).

Если расхождение площадей составит более 5%, то необходимо провести корректировку по высоте расположение средней линии. Величину корректировки можно определить по формуле:

$$h = \frac{S_+ - S_-}{l} ,$$

где  $S_+$  и  $S_-$  – площади над нулевой линией и под ней соответственно. Знак у величины корректировки  $h$  укажет, куда необходимо перенести линию: если «+» – вверх, если «-» – вниз. Затем окончательно провести скорректированную среднюю линию.

3.4. Провести линии выступов и впадин через самые высшую и низшую точки профилограммы соответственно.

3.5. Определить высотные параметры  $Ra$ ,  $Rz$  (по формулам (1.1) и (1.2)) и  $Rmax$ . Причем параметр  $Ra$  определяется по высотам, определяемым через каждый миллиметр по средней линии (то есть, при базовой длине  $l = 10$  см (100 мм) и разбивке на участки по 1 мм должно быть 100 замеров ( $n = 100$ )). Окончательные параметры записать с учетом масштаба по вертикали.

3.6. Определить параметр  $r$  по формуле (1.3). Для этого на пяти наибольших выступах построить вписанные окружности и вычислить среднее арифметическое значение. Окончательно параметр записать с учетом масштаба по вертикали.

3.7. Определить длинновые параметры  $Sm$  и  $S$ . При определении параметра  $Sm$  определить точки начала выступа на средней линии и измерить расстояния между этими точками. Затем вычислить среднее арифметическое значение.

При определении параметра  $S$  измерить расстояния между пиками высот в пределах одного выступа и вычислить среднее арифметическое значение.

Окончательные параметры записать с учетом масштаба по горизонтали.

3.8. Построить опорную кривую по схеме рис. 1.3. Для чего справа от профилограммы строится квадрат со стороной, равной  $Rmax$ . По сторонам квадрата в относительных единицах откладываются высоты  $x_i$  и степень заполнения материала на данной высоте  $tp_i$ . Значения параметров определить по формулам (1.4).

3.9. Определить параметры опорной кривой  $b$  и  $v$ . Для этого в верхней части (выше средней линии) на опорной кривой выбрать две промежуточные точки и по миллиметровке определить значения  $tp_1$ ,  $x_1$  и  $tp_2$ ,  $x_2$ . Затем составить систему уравнений

$$\begin{cases} tp_1 = bx_1^v \\ tp_2 = bx_2^v \end{cases}$$

и решить относительно  $b$  и  $v$ .

3.10. Определить параметр  $\Delta$  по формуле (1.5).

3.11. Отчетностью за лабораторную работу является профилограмма с записанными рядом с ней показателями качества поверхности.

3.12. Защита лабораторной работы заключается в ответе студента на вопросы для контроля и дополнительные вопросы преподавателя.

#### 4. Вопросы для контроля

1. Перечислите показатели качества поверхности деталей машин.
2. Как соотносятся между собой показатели  $Ra$ ,  $Rz$  и  $Rmax$ ?
3. Чем отличаются параметры  $S$  и  $Sm$ ?
4. Что характеризуют параметры опорной кривой  $b$  и  $\nu$ ?
5. Что такое профилометр?
6. Каково увеличение современных профилографов?
7. Для какой цели проводят профилометрирование?

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2. РАСЧЕТ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ

## 1. Цель работы

Целью работы является получение основных навыков расчета подшипников скольжения жидкостного трения в двигателях внутреннего сгорания. Работа рассчитана на 4 часа.

## 2. Общие сведения

Подшипники скольжения – опоры вращающихся деталей, сопряженные поверхности которых находятся в относительном движении и разделены слоем жидкости. Часть вала, находящаяся в контакте с отверстием в корпусе подшипника, называется цапфой, а сопряженная с ней часть корпуса подшипника – вкладышем.

Оптимальным режимом работы таких подшипников является режим жидкостного трения, при котором контакт деталей полностью исключен, так что износ отсутствует и коэффициент трения минимален [2, 10]. Этот режим работы требует постоянной подачи жидкости в подшипник. Если количество жидкости недостаточно, то подшипник будет работать в режиме полужидкостного трения, что может привести к его нагреву, повышенному износу, задиру и т. д.

В подавляющем большинстве случаев в качестве рабочей среды подшипника скольжения используются масла и маслоподобные материалы, но иногда в качестве рабочей жидкости применяются и другие материалы. Следует отметить, что в зависимости от назначения подшипника для смазки иногда целесообразно применять воду (например, в насосах перекачки воды) и некоторые другие жидкости.

Важной характеристикой смазывающего вещества является динамическая вязкость – способность этого вещества сопротивляться сдвигу под действием силы. Единицей динамической вязкости в СИ служит измеренная в ньютонах сила, необходимая для перемещения слоя жидкости высотой в 1 м и площадью в  $1 \text{ м}^2$  со скоростью 1 м/с. Еще одной важным параметром смазывающего вещества является вязкостно-температурная характеристика (ВТХ) – зависимость вязкости смазывающего материала от температуры этого материала.

Особые требования предъявляются к выбору материалов контактирующих поверхностей. Цапфа вала должна иметь высокую чистоту обработки поверхности, а для повышения ее износостойкости

рекомендуется закаливать эту часть вала или покрывать износостойкими материалами.

**Режим жидкостного трения.** Подшипники скольжения, работающие в режиме жидкостного трения, применяются в основном в качестве опор высокоскоростных валов. Для расчета таких подшипников, строго говоря, требуется решать сложную гидродинамическую задачу. Однако в инженерных расчетах принимают упрощенную модель: изотермическое ламинарное течение вязкой несжимаемой жидкости между двумя абсолютно жесткими параллельными пластинками, одна из которых неподвижна, а другая движется с некоторой скоростью (напомним, что при ламинарном течении скорости движения частиц жидкости на поверхностях контакта с пластинками равны скоростям самих поверхностей). При этом частицы жидкости перемещаются только вследствие действия постоянной силы трения.

В такой постановке задача расчета параметров течения жидкости является классической и в механике жидкости и газа называется задачей Рейнольдса. Она может быть использована для расчета широкого класса подшипников скольжения.

**Практические методы расчетов радиальных подшипников, работающих в условиях жидкостного трения.** Одной из основных задач проектирования подшипника скольжения является подбор его геометрических размеров. Задача эта может быть решена в ходе проверочного расчета, когда выбираются некоторые размеры подшипника и характеристики материалов, а после этого производится проверка правильности принятого решения. Многократно повторенная операция проверочного расчета дает возможность выбора таких вариантов конструкций, которые являются наиболее подходящими для заданных условий. Эту расчетную работу целесообразно поручить компьютеру, а для принятия окончательного решения следует сформулировать ряд требований, предъявляемых к подшипнику.

**Критерии работоспособности.** Критериями работоспособности опор скольжения являются допустимая температура в рабочей зоне подшипника и минимальная толщина смазочной пленки. Несущая способность пленки может быть потеряна вследствие чрезмерного нагружения опоры при малой скорости скольжения либо вследствие теплового разрушения. Как известно, сопротивление продавливанию сильно увеличивается с уменьшением толщины пленки, поэтому потеря грузоподъемности в опоре трения происходит в основном по

причине теплового разрушения смазывающей пленки. Процесс теплового разрушения смазывающей пленки сводится к следующему. Предположим, что по какой-либо причине температура в рабочей зоне не достигла такого значения, при котором вследствие падения вязкости смазки и уменьшения запаса толщины смазочного слоя произошел переход подшипника в режим полужидкостной смазки. Возрастание коэффициента трения приводит к прогрессирующему увеличению тепловыделения до тех пор, пока температура смазочной пленки достигнет критического значения, при котором теряются смазочные свойства и возникает непосредственный контакт отдельных участков трущихся поверхностей.

Минимальная толщина смазочного слоя является другим основным параметром, характеризующим режим жидкостной смазки. В отличие от идеальных подшипников в реальных трущиеся поверхности имеют шероховатости, искажения геометрической формы, а иногда деформации и монтажные перекосы осей. В реальных подшипниках разделение трущихся поверхностей вкладыша и цапфы смазочным слоем наступает при значительно большей толщине слоя, чем толщина граничного слоя смазки (0,1 ÷ 0,3 мкм). Работа подшипника жидкостной смазки устойчива при соблюдении условия

$$h_{min} \geq h_{кр} + 2 \text{ мкм.}$$

Предельная толщина слоя  $h_{кр}$ , являющаяся границей перехода подшипника из полужидкостного режима в режим жидкостной смазки или обратно, называется критической минимальной толщиной смазочного слоя. Следовательно, невыполнение этого условия ведет к появлению смешанного режима, когда возможны местные перегревы и повреждения поверхностей. В более тяжелых случаях возможно возникновение полужидкостной смазки, вызывающей заедание и заклинивание деталей в относительном движении.

В общем случае

$$h_{кр} = h_{ш} + h_{в} + h_n + h_{\delta} + h_u,$$

где  $h_{ш}$  и  $h_{в}$  – высоты микронеровностей поверхностей шипа и подшипника;  $h_n$ ,  $h_{\delta}$  и  $h_u$  – величины, учитывающие соответственно перекося, прогиб упругой линии вала по длине подшипника, отклонение от цилиндричности шипа и вкладыша (бочкообразность, конусность, огранка и т.д.).

Под  $h_n$  следует понимать не только результат поворота упругой линии, связанной с изгибом вала, но и результат монтажных переко-

сов. Если вал достаточно жесткий и монтажные перекосы контролируются, то можно принять  $h_n = 0$ , что характерно для большинства ПС.

Величину  $h_o$  следует учитывать в случаях, когда удельная нагрузка достигает больших значений. С достаточной достоверностью можно считать  $h_o = 0$  при  $p_m \leq 2$  МПа.

Значением  $h_u$  учитываются макронеровности, которые всегда получаются при обработке резанием рабочих поверхностей деталей ПС. Размеры этих макронеровностей обычно ограничиваются допусками на цилиндричность, приняв  $h_u$  равным половине суммы допусков на отклонение контуров поперечного сечения шипа и вкладыша по окружности.

Таким образом, допускаемая величина минимального зазора определяется как сумма высот микронеровностей и поверхностей цапфы вала и вкладыша соответственно и допуска цилиндричности:

Для надежности работы ПС задают коэффициент запаса, который определяют по следующей формуле

$$S = \frac{h_{\min}}{h_{кр}},$$

где  $h_{\min}$  – расчетная минимальная толщина смазочной пленки, мкм.

Значение коэффициента запаса не должно быть меньше  $S=1,3 \div 1,5$ , так как кроме описанных выше параметров на величину минимального зазора может существенно влиять другие погрешности изготовления подшипника.

Расчет подшипников скольжения на основе гидродинамической теории смазки заключается в определении минимально допустимого зазора между валом и подшипником, при котором сохраняется надежное жидкостное трение. Расчет обычно производится на режиме максимальной нагрузки.

Минимальный слой смазки в подшипнике по гидродинамической теории

$$h_{\min} = 55 \cdot 10^{-9} \frac{\mu n d}{k_{cp} \chi c}, \text{ мм},$$

где  $\mu$  – динамическая вязкость масла, Па·с;  $n$  – частота вращения вала, об/мин;  $d$  – диаметр вала, мм;  $k_{cp} = P / (l \cdot d)$  – среднее удельное давление на опорную поверхность подшипника, МПа;  $l$  – длина опорной поверхности подшипника, мм;  $\chi = \Delta / d$  – относительный зазор;  $\Delta$  –



диаметральный зазор между подшипником и валом, мм;  $c = 1 + d/l$  – коэффициент, характеризующий геометрию в подшипнике.

Диаметральный зазор можно определить в зависимости от диаметра вала по следующей приближенной формуле  $\Delta = 0,007\sqrt{d}$ , мм.

Коэффициент запаса надежности подшипника  $K = h_{min} / h_{кр}$ , где  $h_{кр}$  – величина критического слоя масла в подшипнике, при котором возможен переход жидкостного трения в другие режимы трения:

$$h_{кр} = h_e + h_n + D_e + D_n.$$

Критический слой масла в подшипнике определяется величинами неровностей поверхностей вала  $h_e$  и подшипника  $h_n$ . Значения  $h_e$  и  $h_n$  определяются в зависимости от вида механической обработки поверхностей. Для оценочных расчетов можно принять, что величина неровностей  $h$ , мм, равна средней шероховатости поверхностей  $Ra$ , мкм. Поэтому  $h = Ra/10^3$ .  $D_e$  и  $D_n$  – допуск нецилиндричности поверхностей вала и подшипника соответственно.

Длину подшипника выбирают из соотношения в машиностроении, равном  $l/d = 0,8 - 1,2$ .

### 3. Порядок выполнения работы

В процессе выполнения работы необходимо проделать следующее:

1. С помощью генератора заданий выбрать исходные данные для расчета подшипника скольжения (см. рис. 2.1 и таблицу 2.1).

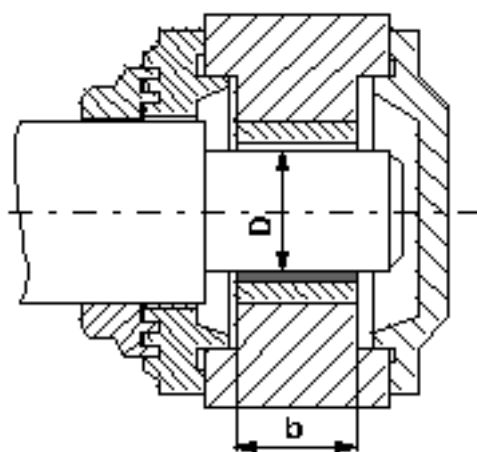


Рис. 2.1. Схема подшипника скольжения

Таблица 2.1

Буква в фамилии			Радиальная нагрузка, $P_r$ , Н	Частота вращения вала $n$ , об/мин	Шероховатость поверхностей $R_a$ , мкм	Нецилиндричность поверхностей, мм
А	Л	Х	1000	1000	0,2	0,006
Б	М	Ц	1500	1500	0,3	0,007
В	Н	Ч	2000	2000	0,4	0,008
Г	О	Ш	2500	2500	0,5	0,009
Д	П	Щ	3000	3000	0,6	0,010
Е	Р	Ъ	3500	3500	0,7	0,011
Ж	С	Ы	4000	4000	0,8	0,012
З	Т	Э	4500	4500	0,9	0,013
И	У	Ю	5000	5000	1,0	0,014
К	Ф	Я	5500	5500	1,1	0,015
			1	2	3	4
Номер буквы в фамилии						

2. По исходным данным расчетным способом определить геометрические размеры подшипника скольжения и провести расчет на его работоспособность с трехкратным запасом надежности.

Динамическую вязкость масла принять равной  $\mu = 0,0136$  Па·с.

3. Расчет оформить и представить в виде отчета.

4. Защита лабораторной работы заключается в ответе студента на вопросы для контроля и дополнительные вопросы преподавателя.

#### 4. Вопросы для контроля

1. Перечислите преимущества и недостатки подшипников скольжения.

2. Чем функционально отличается расчет подшипников скольжения от расчета подшипников качения?

3. Что такое несущая способность подшипника скольжения?

4. Каковы критерии работоспособности подшипника скольжения жидкостного трения?

5. От каких факторов зависит долговечность подшипников скольжения?

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕРЬ НА ТРЕНИЕ В ПОДШИПНИКЕ СКОЛЬЖЕНИЯ

## 1. Цель работы

Целью работы является изучение зависимости потерь на трение в подшипниках скольжения путем численного моделирования его работы. Работа рассчитана на 4 часа.

## 2. Общие сведения

Основной элемент подшипника скольжения – вкладыш с тонким слоем антифрикционного материала (рис. 3.1). В качестве антифрикционных материалов подшипников скольжения используют баббиты на основе олова и свинца до  $110^{\circ}\text{C}$ , литые бронзы, антифрикционные чугуны, пластмассы при водяной смазке. Применяются также пористые металлокерамические вкладыши на основе порошка бронзы или железа с добавками графита, меди, олова или свинца. Жидкая смазка, находящаяся в порах, выдавливается при перегрузках; этим обеспечиваются удовлетворительные условия работы подшипника. Для уменьшения расхода дорогостоящих материалов используют биметаллические вкладыши, представляющие собой стальную ленту с нанесённым на неё тонким антифрикционным слоем баббита, свинцовой бронзы, серебра, сплава алюминия с содержанием вкраплений олова до 30% и т.п.

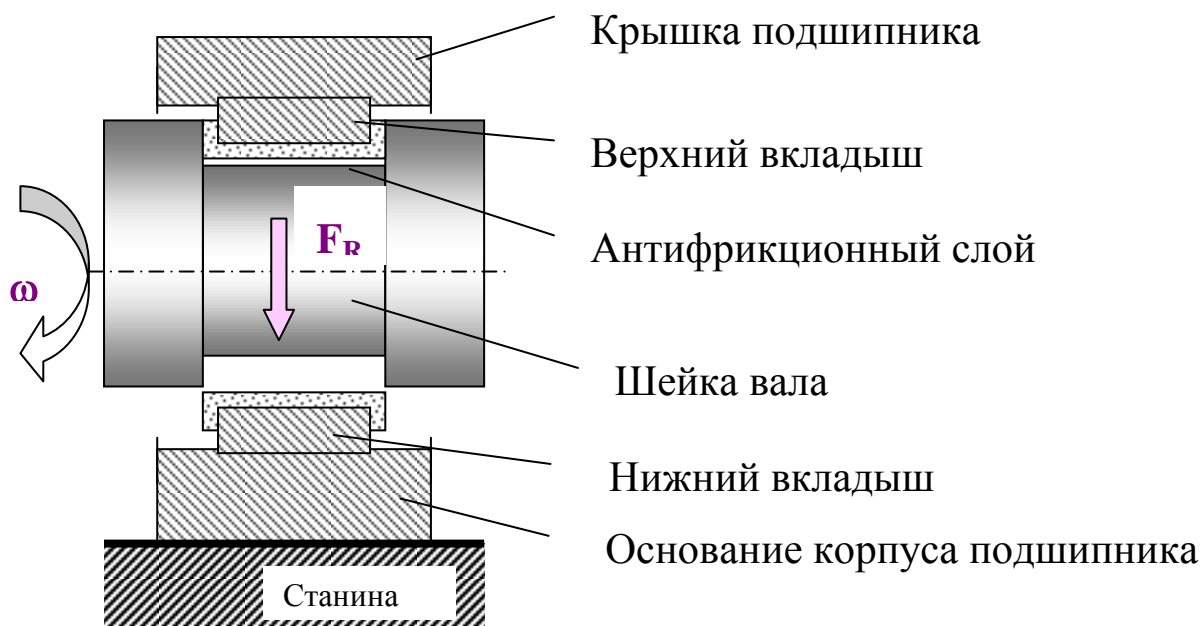


Рис. 3.1. Схема подшипника скольжения

### **Режимы трения скольжения.**

Потери на трение – основной показатель качества подшипника скольжения, так как от этого зависит износ и нагрев подшипника.

Поверхности подшипника скольжения покрыты тончайшей плёнкой масла, которая удерживается благодаря взаимодействию активных молекул масла и материала поверхности вкладыша. В местах перегрузок (на вершинках неровностей поверхности) плёнка может разрушаться и здесь возникает непосредственный контакт двух трущихся поверхностей. Происходит *адгезионное* взаимодействие и возможен отрыв микрочастиц поверхностного слоя. Такой режим трения скольжения называют **граничным трением**. Однако с увеличением скорости скольжения режим трения существенно изменяется.

Качественно влияние скорости скольжения можно продемонстрировать на примере скольжения на водных лыжах. Если движение начинается на мелководе, то сопротивление скольжению в основном связано с трением о дно водоёма. При относительно небольших скоростях скольжения не происходит полного отрыва лыж от дна водоёма. Это режим **полужидкостного (смешанного) трения**. Но при более высоких скоростях скольжения (выше некоторой критической скорости  $v_{кр}$ ) давление, обусловленное трением между поверхностью лыж и водой, создаёт достаточную подъёмную силу, чтобы водный лыжник скользил по поверхности воды, не касаясь дна водоёма. Такой режим трения называют **жидкостным трением**. При ещё больших скоростях потери возрастают в результате усиления турбулентности потока воды, обтекающего лыжи.

При работе подшипника скольжения в режиме граничного трения коэффициент трения порядка 0,1. При этом КПД одной пары подшипников скольжения с вкладышем из бронзы составляет  $0,97 \div 0,98$ ; с баббитовой заливкой –  $0,98 \div 0,99$ . В режиме жидкостного трения потери на трение резко уменьшаются. ***Коэффициент жидкостного трения составляет  $0,001 \div 0,005$ .***

При относительно небольших скоростях скольжения давление, создаваемое маслом, ещё недостаточно для отрыва вала от вкладыша. Коэффициент полужидкостного (смешанного) трения находится в пределах от 0,008 до 0,1.

Необходимое условие работы подшипника скольжения в режиме жидкостного трения можно сформулировать следующим образом: минимальная толщина масляного слоя  $h_{min}$  должна быть больше

суммы параметров  $R_z$  шероховатости поверхностей шейки вала и вкладыша подшипника, или  $h_{min} > R_{z1} + R_{z2}$ .

**Основные преимущества** по сравнению с подшипниками качения связаны с конструктивными особенностями подшипников скольжения:

– вкладыши подшипников скольжения изготавливаются как неразъемными, так и разъемными; это позволяет устанавливать их как на концевых участках валов, так и на шейках, например в случае многоопорных валов судов или коленчатых валов двигателей внутреннего сгорания;

– разъемные вкладыши позволяют регулировать зазоры между шейкой вала и вкладышем, что важно для прецизионных машин;

– относительно широкий спектр материалов вкладышей позволяет выбрать те из них, которые обеспечивают работоспособность подшипников в особых условиях, например в условиях коррозии при работе гидротурбин или при ударных нагрузках;

– подшипники скольжения имеют существенно меньшие габариты в радиальном направлении при одинаковой с подшипниками качения грузоподъемности.

**Особое преимущество** обусловлено использованием в подшипниках скольжения эффекта *образования при повышенных скоростях масляного слоя*, который разделяет трущиеся поверхности шейки вала и вкладыша подшипника. Поэтому потери на трение меньше, чем в подшипниках качения, особенно при высоких скоростях.

Специфические особенности подшипников скольжения обусловили их применение в качестве опор мощных турбин, при высоких (свыше 30 м/с) скоростях скольжения, при частотах вращения свыше 100000 оборотов в минуту.

**Основные недостатки** объясняются спецификой условий образования масляного слоя и его неустойчивостью при смене режима работы (пуск, остановки, внезапные перегрузки).

#### **Отказы подшипников скольжения.**

1. В результате износа вкладышей и шеек валов ухудшаются эксплуатационные показатели машин (коэффициент полезного действия, расход масла, устойчивость работы при смене режима). Для увеличения ресурса применяют поверхностное упрочнение шеек вала (поверхностную закалку, цементацию и другие), очистку смазки от

пыли и продуктов износа, охлаждение подшипников.

2. В условиях частой смены режима работы наблюдается **усталостное разрушение** поверхностного слоя вкладышей, например подшипников сельскохозяйственных, дорожных и транспортных машин.

С целью уменьшения влияния неточности изготовления и деформаций в процессе эксплуатации на износ и разрушение поверхностных объёмов вкладыша и шейки вала используют самоустанавливающиеся вкладыши. Конструкция таких подшипников обеспечивает небольшой поворот вкладыша вокруг оси, перпендикулярной плоскости действия изгибающего момента.

3. В результате интенсивных перегрузок возможно **заедание** цапфы или вала во вкладыше подшипника скольжения. Происходит резкое возрастание потерь на трение, интенсивный разогрев с последующим плавлением материала вкладыша, обычно изготавливаемого из легкоплавких баббитов. Для предотвращения заедания при работе машин с резкими изменениями нагрузки применяются гидростатические подшипники с принудительной подачей масла под давлением в зону контакта вала с вкладышем.

### **3. Необходимое аппаратное и программное обеспечение**

1. Персональные компьютеры типа IBM Pentium III и выше с тактовой частотой задающего генератора не менее 800 МГц и оперативной памятью не менее 128 Мб. Операционная система – Windows 2000 и выше.

2. Программный комплекс TRIBONIC.

### **4. Порядок выполнения работы**

1. С помощью генератора заданий выбрать исходные данные для расчета подшипника скольжения (см. рис. 3.1 и таблицу 3.1).

2. По заданным исходным данным в программе TRIBONIC рассчитать потери на трение в подшипнике скольжения и построить семейство кривых. Изменять следует только те параметры, которые задаются в таблице. Остальные параметры в программе оставить по умолчанию.

Диаметральный зазор определить по эмпирической формуле

$$\Delta = 0,007\sqrt{d}, \text{ мм.}$$

Таблица 3.1

Буква в фамилии	Диаметр шейки вала, мм	Длина подшипни- ка, мм	Динамиче- ская вяз- кость мас- ла, Па·с	Высота микронеров- ностей поверхности вала и вкладыша, мм
А Л Х	40	30	0,0110	0,050
Б М Ц	41	31	0,0111	0,051
В Н Ч	42	32	0,0112	0,052
Г О Ш	43	33	0,0113	0,053
Д П Щ	44	34	0,0114	0,054
Е Р Ы	45	35	0,0115	0,055
Ж С Ь	46	36	0,0116	0,056
З Т Э	47	37	0,0117	0,057
И У Ю	48	38	0,0118	0,058
К Ф Я	49	39	0,0119	0,059
	1	2	3	4
Номер буквы в фамилии				

3. Нагрузку на подшипники  $P$ ,  $H$ , задавать перебором из следующих значений: 10000, 20000, 30000, 40000, 50000 и 60000 Н.

4. Расчет провести для следующих частот вращения вала: 1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000 об/мин.

5. Семейство кривых построить в координатах  $N_{mp} = f(n)$  и  $N_{mp} = f(P)$ . Проанализировать полученные графики и записать сделанные выводы.

6. Работу оформить в виде отчета.

7. Защита лабораторной работы заключается в ответе студента на вопросы для контроля и дополнительные вопросы преподавателя.

### 5. Вопросы для контроля

1. Как механические потери в подшипнике скольжения зависят от скоростного режима?

2. Как механические потери в подшипнике скольжения зависят от нагрузочного режима?

3. Объясните возможные скачкообразные изменения механических потерь в подшипнике скольжения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Трение**, износ и смазка (трибология и триботехника) / Под ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2003.
2. **Загайко, С.А.** Расчет механических потерь в двигателях внутреннего сгорания: Учебное пособие / С. А. Загайко; Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа: УГАТУ, 2006.
3. **Колчин, А.И.** Расчет автомобильных и тракторных двигателей: Учебное пособие для вузов / А.И. Колчин, В.П. Демидов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 2003.
4. **Гаркунов, Д.Н.** Триботехника: Учебник для вузов / Д.Н. Гаркунов. – М.: Машиностроение, 1999.
5. **Основы трибологии** (трение, износ, смазка): Учебник для технических вузов / Под ред. А.В.Чичинадзе. – М.: Наука и техника, 1995.
6. **Справочник по триботехнике**: В 3 т. / Под общ. ред. М.Хебды, А.В.Чичинадзе. – М.: Машиностроение. – Т.1: 1989. Т.2: 1990.
7. **Шустер, Л.Ш.** Основы триботехники: Учебное пособие / Л.Ш. Шустер. – Уфа: УГАТУ, 1994.
8. **Крагельский, И.В.** Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977.
9. **Двигатели** внутреннего сгорания / Под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова В 4-х томах. Издание 4-е. – М.: Машиностроение, 1984.
10. **Воскресенский, В.А.** Расчет и проектирование опор скольжения (жидкостная смазка): Справочник / В.А. Воскресенский, В.И. Дьяков. – М.: Машиностроение, 1980.



Составитель: ЗАГАЙКО Сергей Андреевич

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПАР ТРЕНИЯ ДВС

Лабораторный практикум по дисциплине  
«Основы теории трения и изнашивания»

Подписано в печать \_\_. \_\_. 2007. Формат 60x84 1/16.  
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Times New Roman Cyr.  
Усл. печ. л. \_\_. Усл. кр.-отт. \_\_. Уч.-изд. л. \_\_.  
Тираж 100 экз. Заказ № \_\_\_\_.

ГОУ ВПО Уфимский государственный авиационный технический  
университет  
Центр оперативной полиграфии УГАТУ  
450000, Уфа-центр, ул. К. Маркса, 12