

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
НАУКИ  
ИНСТИТУТ МАШИНОВЕДЕНИЯ  
УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИМАШ УрО РАН)



Утверждаю

Директор ИМАШ УрО РАН

Э.С. Горкунов

« 24 » *Июль* 2013 г.

**ПРОГРАММА-МИНИМУМ**

кандидатского экзамена по специальности

**05.02.04 «Трение и износ в машинах»**

по техническим наукам

Программа-минимум  
содержит 11 стр.

## **Введение**

Настоящая программа базируется на следующих разделах: основные понятия, термины и история развития трибологии; механические и физико-химические свойства поверхностей; геометрические характеристики поверхностей и их контактное взаимодействие; трение и изнашивание твердых тел, смазка; тепловые процессы при трении, изнашивании и смазке; моделирование процессов трения, изнашивания и смазки; триботехнические материалы и триботехнологии; смазочные материалы; методы и средства испытания на трение и износ; принципы конструирования узлов трения и экологические и экономические аспекты трибологии.

Программа разработана экспертным советом Высшей аттестационной комиссии Минобразования России по машиностроению при участии Государственного унитарного предприятия "Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта", Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Российского Государственного университета нефти и газа им И.М. Губкина, Ростовского Государственного университета путей сообщения и Брянского Государственного технического университета.

### **1. Вводный раздел**

Основные понятия, термины и определения. Сведения об истории развития трибологии.

### **2. Общие сведения о механических и физико-химических свойствах материалов и их поверхностей**

Основы теории твердого тела. Понятие о диаграммах состояния. Силы связей в твердых телах. Изменение свойств твердых тел в зависимости от температуры.

Упругие свойства кристаллов. Модули упругости и упругие постоянные. Теоретическая и реальная прочность кристаллов. Дефекты в кристаллах.

Механические свойства материалов. Свойства при динамическом нагружении. Пластическая деформация, упрочнение при пластическом деформировании. Сверхпластичность металлов.

Виды разрушения. Механизмы зарождения трещин. Вязкое, хрупкое разрушение. Явление несовершенной упругости. Упругий гистерезис и последействие. Эффект Баушингера. Релаксация напряжений. Ползучесть, усталость.

Диффузия в твердых телах. Законы диффузии.

Поверхность твердых тел. Особенности строения и состава поверхностных слоев. Поверхностная энергия.

Сорбционные процессы. Физическая адсорбция и хемосорбция. Адсорбционное облегчение деформации. Адгезия и когезия. Виды адгезионного взаимодействия. Пленки на поверхностях твердых тел и механизмы их образования. Дисперсные системы.

Неметаллические материалы. Особенности структуры и свойств полимеров. Композиционные материалы.

### **3. Геометрические характеристики поверхностей и контактное взаимодействие твердых тел**

#### *3.1. Геометрические характеристики поверхностей твердых тел.*

Общие представления о реальной топографии поверхностей трения. Методы описание поверхностей твердых тел. Виды неровностей поверхностей деталей машин. Характеристики микрогеометрии поверхностей. Методы измерения микрогеометрии.

#### *3.2. Контактное взаимодействие твердых тел.*

Механика контактного взаимодействия твердых тел. Контактная задача Герца. Эпюры распределения напряжений. Контакт упругих тел при наличии трения. Контакт тел за пределами упругости.

Дискретность контакта. Микро- и макро- масштабный уровень рассмотрения характеристик дискретного контакта. Номинальная, контурная и фактическая площади касания. Сближение поверхностей под нагрузкой. Понятие о ненасыщенном и насыщенном контакте. Механика контактного взаимодействия твердых тел с шероховатыми поверхностями.

Методы расчета фактической площади касания. Соотношения между фактическими площадями контакта и сближением контактирующих тел в неподвижном состоянии и при скольжении. Экспериментальные способы определения фактических площадей касания и сближений.

Деформация шероховатых волн. Расчет номинального давления и площади контакта с учетом параметров шероховатости, волнистости и макроотклонений.

### **4. Трение твердых тел**

#### *4.1. Внешнее трение.*

Основные положения и развитие теории внешнего трения. Виды фрикционного взаимодействия. Трение скольжения, качения и верчения. Трение покоя. Предварительное смещение твердых тел при внешнем трении. Предварительное смещение при упругих и пластических деформациях в зонах контакта микронеровностей. Механизмы диссипации энергии при фрикционном взаимодействии.

#### *4.2. Силы и коэффициенты внешнего трения.*

Определение сил и коэффициентов внешнего трения при упругих и пластических деформациях в зоне контакта микронеровностей. Зависимости коэффициента внешнего трения от вида контакта, нагрузки, температуры, скорости скольжения, свойств материалов пары трения.

#### *4.3. Динамические процессы при трении.*

Динамические процессы при скольжении твердых тел без смазочного материала. Влияние внешних вибраций на процесс трения. Фрикционные автоколебания. Устойчивость скольжения при трении твердых тел.

#### *4.4. Трение качения.*

Трение качения и верчения. Природа трения качения. Качение упругих тел. Сцепление и проскальзывание при качении. Зависимость между тангенциальной силой и относительным проскальзыванием. Распределение нормальных и тангенциальных напряжений. Влияние тангенциального усилия в контакте на границы упругого и пластического поведения материала (диаграмма приспособляемости материала).

Качение тел, обладающих свойствами релаксации и последействия. Особенности свободного качения, с тормозным и тяговым моментом.

Опоры качения. Контактная прочность. Долговечность опор качения.

### **5. Изнашивание твердых тел**

Классификация видов изнашивания. Количественные характеристики изнашивания. Износостойкость и классы износостойкости. Основные закономерности изнашивания. Модели и кинетика разрушения фрикционного контакта. Влияние различных факторов на износостойкость. Изменение вида разрушения поверхностей при трении в зависимости от режимов работы (приработка, установившийся и форсированные режимы). Особенности изнашивания полимерных материалов.

Термодинамический подход к разрушению и изнашиванию твердых тел.

Характеристика основных видов изнашивания: абразивное, гидроабразивное, кавитационное, усталостное, окислительное, при схватывании (заедании), при фреттинге, электроэрозионное, водородное, при избирательном переносе.

Основы расчета узлов трения на износ. Расчет формоизменения сопряженных тел при изнашивании.

Методы повышения износостойкости узлов трения.

### **6. Смазка**

#### *6.1. Виды смазки.*

Классификация видов смазки (смазочного действия). Основные признаки, характеризующие виды смазки.

#### *6.2. Жидкостная смазка.*

Виды жидкостной смазки: гидродинамическая, гидростатическая, гидростатодинамическая, эластогидродинамическая.

Гидродинамическая смазка. Основные уравнения теории гидродинамической смазки. Уравнение Рейнольдса и граничные условия. Уравнения переноса теплоты. Изотермическая и неізотермическая задачи теории гидродинамической смазки.

Расчет стационарно-нагруженных подшипников скольжения. Несущая способность, потери на трение в смазочном слое. Тепловой баланс.

Нестационарно-нагруженные подшипники скольжения. Система уравнений движения вала, течения смазочного материала, переноса теплоты. Критерии оценки работоспособности подшипников скольжения.

Гидродинамическая неустойчивость высокоскоростных подшипников скольжения.

Эластогидродинамическая смазка. Уравнения течения смазки и упругости. Зависимость вязкости смазочного материала от температуры и давления. Толщина смазочного слоя. Газовая смазка.

### *6.3. Граничная смазка.*

Граничная смазка. Природа и строение граничных слоев. Закономерности процессов при граничной смазке. Влияние смазочного материала, температуры, скорости скольжения, шероховатости поверхностей трения на процессы при граничной смазке. Долговечность граничных слоев. Переходные температуры при граничной смазке и температурно-кинетический метод их оценки. Изнашивание при граничной смазке. Подход к подбору смазочных материалов по критерию предельной температуры.

Специфические методы организации граничной смазки: избирательный перенос (эффект безызносности), эффект трибополимеризации.

### *6.4. Трение, износ, смазка в экстремальных условиях.*

Трение, износ и смазка в экстремальных условиях. Влияние низких и высоких температур при трении. Воздействие радиации, вакуума, газовой среды, электромагнитных полей. Трибологические проблемы в космосе.

Трение сопровождаемое током.

## **7. Тепловые процессы при трении, изнашивании и смазке**

Тепловые задачи при трении изнашивании твердых тел. Общая постановка задачи теплопроводности при трении. Три основных режима трения: стационарный, нестационарный, квазистационарный. Влияние температуры на трибологические характеристики пар трения.

Расчет температур при стационарном режиме трения. Определение поля температур, средней температуры поверхности трения и температурной вспышки при нестационарном режиме трения. Коэффициент распределения тепловых потоков. Расчет объемной температуры при повторно-кратковременном режиме трения.

Тепловая динамика трения и износа твердых тел. Определение интенсивности изнашивания при трении с учетом тепловых процессов.

## **8. Моделирование процессов трения, изнашивания и смазки**

Физическое моделирование процессов трения, изнашивания и смазки. Трибологические системы. Виды подобия в трибосистемах. Метод анализа размерностей и его использование при моделировании процессов трения и изнашивания.

Сложные трибосистемы. Методология и математическое моделирование сложных трибосистем.

## **9. Триботехнические материалы и триботехнологии**

### *9.1. Триботехнические конструкционные материалы.*

Совместимость трибосистем. Выбор конструкционных материалов трибосистем с учетом их совместимости.

Понятие о самоорганизации трибосистем. Принципы создания новых материалов на основе структурной приспособляемости и самоорганизации трибосистем.

Металлические материалы для узлов трения различного назначения. Рекомендуемые области использования антифрикционных сплавов. Порошковые, керамические композиционные материалы для антифрикционных и фрикционных узлов трения.

Полимерные и металлополимерные композиционные материалы для подшипников, опор скольжения, тормозов в муфт сцепления.

### *9.2. Триботехнологии.*

Виды износостойких покрытий и упрочнения поверхностных слоев. Наплавка износостойких слоев. Напыление износостойких покрытий из порошковых материалов. Лазерное упрочнение. Упрочнение ионно-плазменной обработкой. Диффузионные покрытия. Механотермическое формирование износостойких покрытий. Электрохимические покрытия.

## **10. Смазочные материалы**

Классификации смазочных материалов: по агрегатному состоянию, происхождению, способу получения, назначению. Жидкие смазочные материалы. Состав, эксплуатационные свойства и ассортимент масел. Базовые масла. Функциональные присадки, антифрикционные добавки к маслам.

Пластичные смазочные материалы. Состав, эксплуатационные свойства и ассортимент пластичных смазок.

Твердые смазочные материалы.

## **11. Методы и средства испытаний на трение и износ**

Трибометрия и трибодиагностика. Цикл триботехнических испытаний. Испытательная техника для трибологических испытаний и исследований пар трения. Особенности триботехнических испытаний смазочных материалов. Планирование экспериментов при оценке трения и износа.

## **12. Принципы конструирования узлов трения различного назначения**

Основы проектирования, подбора материалов и конструктивного оформления узлов трения. Принцип геометрической оптимизации трибосистем. Выбор рационального нагружения элементов пар трения. Обеспечение необходимого режима смазки узлов трения с разными видами смазочных материалов. Тепловые режимы в технических системах. Оценка вероятности безотказной работы и прогнозирование ресурса узлов трения.

### **13. Экологические и экономические аспекты трибологии**

Трибологические источники загрязнений окружающей среды. Направление работ для улучшения экологических и экономических показателей работы машин. Методики оценки экономической эффективности и экологической чистоты технических систем.

#### **Основная литература**

1. Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения. М.: Физматгиз. 1963. 472 с.
2. Богданович П.Н., Прушак В.Я. Трение и износ в машинах. Учебник для технических вузов. Минск. Высшая школа. 1999. 374 с.
3. Боуден Ф.П., Тейбор Д. Трение и смазка. М.: Машиностроение. 1960. 151 с.
4. Буше Н.А. Трение, износ и усталость в машинах. М.: Транспорт, 1987. 223 с.
5. Гаркунов Д.Н. Триботехника. М.: Машиностроение, 1989. 328 с.
6. Дроздов Ю.Н., Арчegov В.Г., Смирнов В.И. Противоздирная стойкость трущихся тел. М.: Наука. 1981.
7. Евдокимов Ю.А., Колесников В.И., Тетерин А.Н. Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа. М.: Наука. 1980. 230 с.
8. Когаев В.П., Дроздов Ю.Н. Прочность и износостойкость деталей машин. М.: Высшая школа, 1991, 319 с.
9. Коровчинский М.В. Теоретические основы работы подшипников скольжения. М.: 1959.
10. Костецкий Б.И. Трение, износ и смазка в машинах. Киев, Техника, 1970. 396 с.
11. Крагельский И.В. Трение и износ. М.: Машиностроение. 1968. 480 с.
12. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.
13. Мур Д. Основы применения триботехники. М.: Мир, 1978. 487 с.
14. Основы трибологии (трение, износ, смазка). Учебник для технических вузов. 2-е издание / под ред. А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 2001, 664 с.
15. Проников А.С. Надежность машин. М.: Машиностроение. 1978, 592 с.
16. Справочник по триботехнике. /Под общ. редакцией М. Хебды, и А.В. Чичинадзе, М.: Машиностроение, Варшава. Т.1, 1989, 400 с.; Т.2, 1990, 420 с.; Т.3, 1992, 730 с.
17. Фукс И.Г., Буяновский И.А. Введение в трибологию. М.: Нефть и газ. 1995. 278 с.
18. Хрущев М.М., Бабичев М.А. Исследование изнашивания металлов. М.: Наука, 1960. 352 с.

#### **Дополнительная литература по разделу 1**

1. Буяновский И.А., Фукс И.Г., Богдасаров Л.Н. Очерки по истории трибологии. М.: Нефть и газ. 1998, 108 с.

2. Подшипники скольжения Термины, определения и классификация. Часть 2, Трение и изнашивание, Часть 3. Смазка и смазывание. Международный стандарт ИСО 4378-2,3 -1983.

#### **Дополнительная литература по разделу 2**

1. Бакли Д. Поверхностные явления при адгезии и фрикционном взаимодействии. М.: Машиностроение, 1986. 359 с
2. Гуляев А.П. Металловедение. М.: Metallургия. 1977, 664 с.
3. Дерягин Б.В., Кротова Н.А. Адгезия. М.: Из-во АН СССР, 1970
4. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение. М.: Машиностроение. 1980. 493 с.
5. Рыбакова Л.М., Куксенкова Л.И. Структура и износостойкость металла. М.: Машиностроение. 1982.

#### **Дополнительная литература по разделу 3**

1. Горячева И.Г., Добычин М.Н. Контактные задачи в трибологии. М.: Машиностроение, 1988, 256 с.
2. Демкин Н.Б., Рыжов Э.В. Качество поверхностей и контакт деталей машин. М.: Машиностроение 1981, 244 с.
3. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. М.: Мир, 1989, 510с.
4. Сулов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение. 2000, 520 с.
5. Хусу А.П., Витенберг Ю.Р., Пальмов В.А. Шероховатость поверхностей. М.: Наука, 1975.

#### **Дополнительная литература по разделу 4**

1. Геккер Ф.Р. Динамика машин, работающих без смазочных материалов в узлах трения. М.: Машиностроение, 1983, 280 с.
2. Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия. М.: Наука, 2001, 487 с.
3. Демкин Н.Б. Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей. М.: Наука, 1977, 230 с.
4. Михин Н.М. Внешнее трение твердых тел. М.: Наука, 1977, 230 с.
5. Пинегин С.В. Трение качения в машинах и приборах. М.: Машиностроение, 1976, 312 с.
6. Шустер Л.Ш. Адгезионное взаимодействие твердых металлических тел. Уфа. Гилем, 1999, 199 с.

#### **Дополнительная литература по разделу 5**

1. Гриб В.В. Решение триботехнических задач численными методами. М.: Наука, 1982, 112 с.
2. Козырев С.П. Гидроабразивный износ металлов при кавитации. М.: Машиностроение.

3. Погодаев Л.В., Шевченко П.А. Гидроабразивный и кавитационный износ судового оборудования. М.: Судостроение, 1984. 264 с.
4. Семенов А.П. Схватывание металлов. М.: Машгиз, 1958.
5. Сорокин Г.М. Трибология сталей и сплавов. М.: Недра, 2000, 317 с.
6. Тененбаум М.М. Сопротивление абразивному изнашиванию. М. Машиностроение. 1976. 270 с.

#### **Дополнительная литература по разделу 6**

1. Буяновский И.А., Фукс И.Г., Шабалина Т.Н. Граничная смазка: этапы развития трибологии. М.: Нефть и газ, 2002, 230 с.
2. Дроздов Ю.Н., Павлов В.Г., Пучков В.Н. Трение и износ в экстремальных условиях, М.: Машиностроение, 1986, 224 с.
3. Дроздов Ю.Н. Узлы трения на Луне. Проблемы машиностроения и надежности машин, 2002, № 3, с.50-54
4. Елманов И.М., Колесников В.И. Термовязкоупругие процессы трибосистем в условиях упругогидродинамического контакта. Ростов-на-Дону, Изд. СКНЦ ВШ, 1999.
5. Захаров С.М., Никитин А.П., Загорянский Ю.А. Подшипники коленчатых валов тепловозных дизелей. М.: Транспорт, 1981, 181 с.
6. Пешти Ю.В. Газовая смазка. М.: Из-во МГТУ, 1993. 381 с
7. Подольский М.Е. Упорные подшипники скольжения. М.: Машиностроение, 1981. 261 с.
8. Крагельский И.В., Любарский И.М., Гусяков А.А. Трение и износ в вакууме. М.: Машиностроение, 1973, 215 с.
9. Коднир Д.С. Контактная гидродинамика смазки деталей машин. М.: Машиностроение, 1976. 303 с.
10. Матвеевский Р.М., Буяновский И.А., Лазовская О.В. Противозадирная стойкость смазочных сред при трении в режиме граничной смазки. М.: Наука, 1978.
11. Никитин А.К., Ахвердиев К.С., Остроухов Б.И. Гидродинамическая теория смазки и расчет подшипников скольжения, работающих в стационарном режиме. М.: Наука. 1981.
12. Тодер И.А., Тарабаев Г.И. Крупногабаритные гидростатодинамические подшипники. М.: Машиностроение. 1976, 199 с.
13. Токарь И.Я. Проектирование и расчет опор трения.. М.: Машиностроение, 1971. 168 с.

#### **Дополнительная литература по разделу 7**

1. Расчет, испытание и подбор фрикционных пар/ А.В. Чичинадзе, Э.Д. Браун, А.Г. Гинзбург, А.В. Игнатьева . М.: Наука, 1979. 267 с.
2. Семенов А.П. Трение и адгезионное взаимодействие тугоплавких материалов при высоких температурах. М.: Наука, 1972
3. Чичинадзе А.В., Матвеевский Р.М., Браун Э.Д. Материалы в триботехнике нестационарных процессов. М.: Наука, 1986 г. 248 с.

### **Дополнительная литература по разделу 8**

1. Браун Э.Д., Евдокимов Ю.А., Чичинадзе А.В. Моделирование трения и изнашивания в машинах. М.: Машиностроение. 1982. 190 с.
2. Захаров С.М., Жаров И.А. Методология моделирования сложных трибосистем. Трение и износ. 1988. Т14, № 5.с. 825-833.
3. Чихос Х. Системный анализ в трибонике. М.: Мир. 1982. 351 с.

### **Дополнительная литература по разделу 9**

1. Белый В.А., Свириденко А.П., Петроковец М.И., Савкин В.Г. Трение полимеров. М.: Наука. 1972
2. Бершадский Л.И. Структурная термодинамика трибосистем. Киев. Знание, 1990. 31 с.
3. Буше Н.А., Копытько В.В. Совместимость трущихся поверхностей. М.: Наука, 1981. 223 с.
4. Богатин О.Б., Мороз В.А., Черный И.Н. Основы расчета полимерных узлов трения. М.: Наука, 1972.
5. В.С. Иванова, А.С. Баланкин, И.Ж. Бунин, А.А. Оксогоев. Синергетика и фракталы в материаловедении. М.:Наука, 1994, 383 с.
6. Кершенбаум В.Я. Механотермическое формирование поверхностей трения. М.: Машиностроение, 1987. 230 с.
7. Подшипники из алюминиевых сплавов/ Н.А.Буше, А.С.Гуляев, В.А. Двоскина, К.М. Раков, М.: Транспорт, 1974. 274 с.
8. Семенов А.П., Савинский Ю.Э. Металлофторопластовые подшипники. М.: Машиностроение, 1976. 192 с.
9. Федоров В.В. Кинетика поверхности и разрушения твердых тел. Ташкент, ФАН.: 1985. 167 с.

### **Дополнительная литература по разделу 10**

1. Смазочные материалы. Антифрикционные и противозносные свойства. Методы испытаний/ Справочник Р.М. Матвеевский, В.Л. Лашхи, И.А. Буяновский, И.Г. Фукс, К.М. Бадыштова. М.: Машиностроение, 1989, 224 с.
2. Топлива, смазочные материалы, технические жидкости. Ассортимент и применение. Справочник/под ред. В.М.Школьников. М.: «Техинформ», 1999,596 с
3. Попок К.К. Химмотология топлив и смазочных масел. М.:Воениздат, 1970. 192 с.
4. Розенберг Ю.А. Влияние смазочных материалов на надежность и долговечность машин. М.: Машиностроение, 1970. 315 с.
5. Сеницын В.В. Подбор и применение пластичных смазок. М.: Химия. 1972. 310 с.

### **Дополнительная литература по разделу 11**

1. Качество машин: Справочник/ Под. ред. А.Г. Сулова. М.: Машиностроение. 1995. Т1 256 с; Т2. 430 с.

2. Рыжов Э.В., Колесников Ю.В., Суслов А.Г. Контактное взаимодействие твердых тел при статических и динамических нагрузках. Киев: Наукова думка, 1988, 172 с.
3. Смазочные материалы. Антифрикционные и противоизносные свойства. Методы испытаний/ Справочник Р.М. Матвеевский, В.Л. Лашхи, И.А. Буяновский, И.Г. Фукс, К.М. Бадыштова. М.: Машиностроение, 1989, 224 с.

#### **Дополнительная литература по разделу 12**

1. Воскресенский В.А., Дьяков В.И. Расчет и проектирование опор скольжения (Жидкостная смазка). М.: Машиностроение. 1980. 224 с.
2. Орлов П.И. Основы конструирования. Кн. 2, М.: Машиностроение. 1972. 526 с.
3. Годер И.А., Кудрявцев Н.А., Рязанов А.А. и др. Гидродинамические опоры прокатных станов, М.: Металлургия.1968. 399 с.
4. Уплотнения и уплотнительная техника. Справочник/Под. ред. А.И. Голубева Л.А. Кондакова,. М.: Машиностроение, 1986. 464 с.

#### **Дополнительная литература по разделу 13**

1. Джост П. Будущее триботехники//Трение и износ,1991,Т.12,№1, 10-15 с.
2. Романова А.Т. Экономическое прогнозирование расходной части топливно-энергетического баланса железнодорожного транспорта/ В сб. "Актуальные проблемы развития железнодорожного транспорта". М.: МИИТ,1996. 132 с.
3. Смазочные материалы и проблемы экологии/ А.Ю Евдокимов, И.Г.Фукс, и др. М.: Нефть и газ,2000, 424 с.