

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УТВЕРЖДАЮ:  
Проректор по учебной работе,  
д-р пед. наук, профессор  
Н.В. Гафурова



**ПРОГРАММА**  
кандидатского экзамена  
по специальности 05.02.04 – Трение и износ в машинах

**ПРОГРАММА-МИНИМУМ**  
кандидатского экзамена по специальности  
**05.02.04 «Трение и износ в машинах»**  
по техническим наукам

**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 Министерства образования Российской Федерации 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 последствие. 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**

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.

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**

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.

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.

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.

Трение качения и трение вращения. 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 форсированный 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**

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

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 неадиабатическая 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.

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.

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 токообразованием.

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

Тепловые задачи при трении и 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**

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.

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 по улучшению экологических и экономических показателей работы машин. Методики оценки экономической эффективности и экологической чистоты технических систем.

### **Основная литература**

1. Бишутин С.Г., Горленко А.О., Матлахов В.П. Износостойкость деталей машин и механизмов. Брянск: БГТУ, 2010. -112 с.
2. Гаркунов Д.Н., Мельников Э.Л., Гаврилюк В.С. Триботехника. Краткий курс. Издательство МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2008, 344 с.
3. Горячева И. Г. Механика фрикционного взаимодействия. М.: Наука, 2001, 478 с.
4. Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. - 368 с.
5. Основы трибологии (трение, износ, смазка): Учеб. для техн. вузов / Под ред. А.В. Чичинадзе. 2-е изд. М.: Машиностроение, 2001.
6. Справочник по триботехнике / Под общ. ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение; Варшава. Т.1: 1989; Т.2: 1990; Т.3: 1992.
7. Сильман Г.И., Горленко О.А. Триботехническое материаловедение и триботехнология. Учебник для вузов / Г. И. Сильман, О. А. Горленко. - М.: Машиностроение, 2006. 348 с.
8. Фролов К.В. Современная трибология: Итоги и перспективы. М.: Издательство ЛКИ, 2008. 480 с.
9. Чичинадзе А.В. и др. Основы трибологии (трение, износ, смазка). Учебник для технических вузов. 2-е изд. переработ. и доп. / А. В. Чичинадзе, Э. Д. Браун, Н. А. Буше и др.; Под общ. ред. А. В. Чичинадзе. - М.: Машиностроение, 2001. 664 с.

10. Пенкин Н.С., Пенкин А.Н., Сербин В.М. Основы трибологии и триботехники. Учеб. пособие. - М.: Машиностроение, 2008. - 206 с.

## Дополнительная литература

К разделу 1

1. Буяновский И.А., Фукс И.Г., Богдасаров Л.Н. Очерки по истории трибологии. М.: Нефть и газ, 1998.
2. Любимов Д.Н., Рыжиков В.А. Физико-химические процессы при трении. Учеб. пособие / Шахтинский институт ЮРГТУ. – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2003. - 142 с.
3. Подшипники скольжения. Термины, определения и классификация. Ч. 2: Трение и изнашивание. Ч. 3: Смазка и смазывание. Международный стандарт ИСО 4378-2,3 -1983.

К разделу 2

1. Бакли Д. Поверхностные явления при адгезии и фрикционном взаимодействии. М.: Машиностроение, 1986.
2. Жарков В.Я. Триботехническое материаловедение Учеб. пособие. - Брянск: БГТУ, 2005. -159 с.
3. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение. М.: Машиностроение, 1980.
4. Рыбакова Л.М., Куксенкова Л.И. Структура и износостойкость металла. М.: Машиностроение, 1982.

К разделу 3

1. Горячева И.Г., Добычин М.Н. Контактные задачи в трибологии. М.: Машиностроение, 1988.
2. Демкин Н.Б., Рыжов Э.В. Качество поверхностей и контакт деталей машин. М.: Машиностроение, 1981.
3. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. М.: Мир, 1989.
4. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение, 2000.

К разделу 4

1. Геккер Ф.Р. Динамика машин, работающих без смазочных материалов в узлах трения. М.: Машиностроение, 1983.

2. Александров В.М., Чебаков М.И. Введение в механику контактных взаимодействий. Ростов-на-Дону: ЦВВР, 2007. -114 с.

3. Шустер Л.Ш. Адгезионное взаимодействие твердых металлических тел. Уфа: Гилем, 1999.

К разделу 5

1. Гриб В.В. Решение триботехнических задач численными методами. М.: Наука, 1982.
2. Погодаев Л.В., Шевченко П.А. Гидроабразивный и кавитационный износ судового оборудования. М.: Судостроение, 1984.
3. Сорокин Г.М. Трибология сталей и сплавов. М.: Недра, 2000.

К разделу 6

1. Буяновский И.А., Фукс И.Г., Шабалина Т.Н. Граничная смазка: этапы развития трибологии. М.: Нефть и газ, 2002.
2. Дроздов Ю.Н., Павлов В.Г., Пучков В.Н. Трение и износ в экстремальных условиях. М.: Машиностроение, 1986.
3. Дроздов Ю.Н. Узлы трения на Луне // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2002. № 3.
4. Елманов И.М., Колесников В.И. Термовязкоупругие процессы трибосистем в условиях упругогидродинамического контакта. Ростов-н/Дону: Изд-во СКНЦ ВШ, 1999.
5. Захаров С.М., Никитин А.П., Загорянский Ю.А. Подшипники коленчатых валов тепловозных дизелей. М.: Транспорт, 1981.
6. Пешти Ю.В. Газовая смазка. М.: Изд-во МГТУ, 1993.
7. Подольский М.Е. Упорные подшипники скольжения. М.: Машиностроение, 1981.
8. Коднир Д.С. Контактная гидродинамика смазки деталей машин. М.: Машиностроение, 1976.
9. Матвеевский Р.М., Буяновский И.А., Лазовская О.В. Противозадирная стойкость смазочных сред при трении в режиме граничной смазки. М.: Наука, 1978.
10. Никитин А.К., Ахвердиев К.С., Остроухов Б.И. Гидродинамическая теория смазки и расчет подшипников скольжения, работающих в стационарном режиме. М.: Наука, 1981.

К разделу 7

1. Чичинадзе А.В., Матвеевский Р.М., Браун Э.Д. Материалы в триботехнике нестационарных процессов. М.: Наука, 1986.

К разделу 8

1. Браун Э.Д., Евдокимов Ю.А., Чичинадзе А.В. Моделирование трения и изнашивания в машинах. М.: Машиностроение, 1982.
2. Захаров С.М., Жаров И.А. Методология моделирования сложных трибосистем // Трение и износ. 1988. Т. 14. № 5.
3. Тихомиров В.П., Горленко О.А. Порошин В.В. Методы моделирования процессов в триботехнических системах. Учебное пособие. - М.: МГИУ, 2004. - 292 с.

4. Чихос Х. Системный анализ в триботехнике. М.: Мир, 1982.

К разделу 9

1. Бершадский Л.И. Структурная термодинамика трибосистем. Киев: Знание, 1990.

2. Денисова Н.Е. Триботехническое материаловедение и триботехнология. Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2006. – 248с.
3. Синергетика и фракталы в материаловедении / В.С. Иванова, А.С. Баланкин, И.Ж. Бунин, А.А. Оксогоев. М.: Наука, 1994.
4. Кершенбаум В.Я. Механотермическое формирование поверхностей трения. М.: Машиностроение, 1987.
5. Федоров В.В. Кинетика поверхности и разрушения твердых тел. Ташкент: Изд-во ФАН, 1985.
- К разделу 10
1. Смазочные материалы. Антифрикционные и противоизносные свойства. Методы испытаний: Справочник / Р.М. Матвеевский, В.Л. Лашхи, И.А. Буяновский, И.Г. и др. М.: Машиностроение, 1989.
2. Топлива, смазочные материалы, технические жидкости. Ассортимент и применение: Справочник / Под ред. В.М. Школьникова. М.: Техинформ, 1999.
3. Шевеля В.В., Олександренко В.П. Трибохимия и реология износостойкости. Монография. - Хмельницкий: ХНУ, 2006. - 278 с.
- К разделу 11
1. Качество машин: Справочник / Под ред. А.Г. Сулова. Т. 1, 2 М.: Машиностроение, 1995.
2. Рыжов Э.В., Колесников Ю.В., Сулов А.Г. Контактное взаимодействие твердых тел при статических и динамических нагрузках. Киев: Наукова думка, 1988.
3. Смазочные материалы. Антифрикционные и противоизносные свойства. Методы испытаний: Справочник / Р.М. Матвеевский, В.Л. Лашхи, И.А. Буяновский и др. М.: Машиностроение, 1989.
- К разделу 12
1. Воскресенский В.А., Дьяков В.И. Расчет и проектирование опор скольжения (жидкостная смазка). М.: Машиностроение, 1980.
3. Уплотнения и уплотнительная техника: Справочник / Под ред. А.И. Голубева, Л.А. Кондакова. М.: Машиностроение, 1986.
- К разделу 13
1. Джост П. Будущее триботехники // Трение и износ. 1991 Т.12. №1.
2. Романова А.Т. Экономическое прогнозирование расходной части топливно-энергетического баланса железнодорожного транспорта / Актуальные проблемы развития железнодорожного транспорта: Сб. М.: Изд-во МИИТ, 1996.
3. Смазочные материалы и проблемы экологии / А.Ю Евдокимов, И.Г.Фукс и др. М.: Нефть и газ, 2000.