

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Пензенский государственный университет» (ПГУ)

---

А. Н. Литвинов

# Прикладные вопросы механики контактирования деформируемых тел

Учебное пособие

Пенза  
Издательство ПГУ  
2012

УДК 621.891

ББК 34.41

Л64

**Р е ц е н з е н т ы:**

НТС «Приборные изделия и устройства спецтехники»

ФНПЦ «ПО "Старт" им. М. В. Проценко»;

доктор технических наук,

профессор кафедры «Технология общего

и роботизированного производства»

Пензенской государственной технологической академии

*А. В. Ланищikov*

**Литвинов, А. Н.**

Л64      Прикладные вопросы механики контактирования деформируемых тел : учеб. пособие / А. Н. Литвинов. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. – 166 с.

ISBN 978-5-94170-450-7

Изложены основные сведения о формировании качества поверхностей деталей трибосопряжений узлов трения. Рассмотрены вопросы контактного взаимодействия и тепловые процессы, протекающие в зоне контакта поверхностей трения; предложена методика расчета температуры вспышки при наличии антифрикционных и других покрытий на поверхностях контактирующих тел. Дана методика расчета контактных напряжений в многослойных гетерогенных структурах. Материал, представленный в пособии, соответствует требованиям государственных образовательных стандартов высшего профессионального образования по направлениям 151600, 190100 и 141100.

Учебное пособие подготовлено на кафедре «Теоретическая и прикладная механика» и предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по указанным направлениям; полезно также для аспирантов и инженерно-технических работников, занимающихся вопросами проектирования гетерогенных трибосопряжений в машино-, автомобиле- и приборостроении.

**УДК 621.891**

**ББК 34.41**

**ISBN 978-5-94170-450-7**

© Пензенский государственный  
университет, 2012

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие .....	5
Введение .....	7
1. Основные параметры качества поверхностей трения трибосопряжений.....	10
1.1. Основные термины и определения в трибологии.....	10
1.2. Основные виды изнашивания контактных поверхностей .....	13
1.3. Параметры качества поверхностей .....	16
1.4. Способы описания реальной поверхности .....	35
1.5. Современные методы измерения шероховатости.....	38
2. Основные характеристики контактного взаимодействия поверхностей трения деталей трибосопряжений .....	43
2.1 Механика контакта.....	44
2.2. Контакт гладких поверхностей.....	49
2.3. Контакт шероховатых поверхностей .....	57
2.4 Анализ напряженно-деформированного состояния в зоне контакта .....	64
2.5. Проверка прочности при контактном взаимодействии.....	72
2.6. Расчет контактной жесткости .....	76
3. Контактное взаимодействие многослойных структур .....	78
3.1. Классификация слоев .....	78
3.2. Моделирование напряженно-деформированного состояния в зоне контакта .....	82
3.3. Исследование краевых эффектов в зоне контакта.....	89
4. Тепловые процессы в зоне контакта поверхностей трения.....	95
4.1. Тепловыделение при трении.....	96
4.2. Коэффициент взаимного перекрытия трущихся тел .....	100
4.3. Температура в зоне контакта .....	104
4.4. Расчет температуры вспышки на контактирующих поверхностях с антифрикционными покрытиями.....	112
4.4.1. Применение номограмм для расчета температуры вспышки .....	122
4.4.2. Расчет температуры вспышки на контактирующих поверхностях зубчатых колес .....	125
4.4.3. Расчет температуры вспышки в зоне контакта элементов пары скольжения .....	126

4.5. Реализация эффекта избирательного переноса при использовании металлоплакирующих смазочных композиций .....	129
Заключение .....	131
Список литературы .....	132
Приложение 1. Обеспечение параметров состояния поверхностей деталей машин при различных видах обработки .....	137
Приложение 2. Пример проектирования металлоплакирующей смазочной композиции .....	157

## Предисловие

Пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлениям 151600 «Прикладная механика», 190100 «Наземные транспортно-технологические комплексы» и 141100 «Энергетическое машиностроение» и изучающих курсы «Математические модели в теории трения и изнашивания», «Механика контактирования упругих тел», «Моделирование тепловых процессов приборов», «Прикладные задачи по деталям машин и основам конструирования», «Механика материалов и конструкций», «Прикладная механика», «Триботехника». Материал, изложенный в пособии, может использоваться студентами при выполнении лабораторных работ, при курсовом и дипломном проектировании.

### **В результате изучения студент должен знать:**

- основные понятия трибологии;
- основные термины и определения;
- триботехнические требования, предъявляемые к контактным поверхностям, и методы их обеспечения;
- основные параметры, характеризующие качество поверхностей трения деталей трибосопряжений;
- основные характеристики контактного взаимодействия деталей трибосопряжения;
- основные тепловые процессы, происходящие в зоне контакта деталей трибосопряжений;
- сущность эффекта избирательного переноса и условия его реализации.

### **Студент должен уметь:**

- технически грамотно выбирать конструкционные материалы деталей трибосопряжений;
- пользоваться измерительной техникой и проводить контроль качества поверхностей деталей трибосопряжений и покрытий, наносимых на них;
- обосновывать расчетную схему узла трибосопряжения с точки зрения прочностных и тепловых расчетов в зоне контакта;
- проводить численный анализ напряженно-деформированного состояния в зоне контакта трибосопряжений (в том числе и гетерогенных);

- выполнять тепловой расчет в зоне контакта с учетом антифрикционных покрытий на деталях трибосопряжений;
- проектировать металлоплакирующие смазочные композиции, обеспечивающие эффект избирательного переноса в зоне контакта.

Материал, изложенный в пособии, соответствует требованиям Государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования по указанным направлениям и в течение 10 лет был использован автором при чтении лекций, проведении практических и лабораторных занятий по курсам «Механика деформирования и контактирования упругих тел», «Теория трения», «Основы автоматизированного проектирования» профессионального цикла обучения, а также при курсовом и дипломном проектировании со студентами Пензенского государственного университета по направлению 151600 «Прикладная механика».

Автор выражает глубокую благодарность и признательность доктору технических наук, профессору В. И. Волчихину за постоянное внимание и поддержку, оказанную при выполнении научных исследований и их внедрении в учебный процесс.

## Введение

Перед машиностроением стоят новые задачи, связанные с обновлением и модернизацией машинного парка большей части отраслей промышленности России. В соответствии с прогнозом развития машиностроения на ближайшие двадцать лет особое внимание должно уделяться разработке, производству и применению новых материалов, способных адаптироваться к внешним воздействиям путем изменения свойств, что в конечном итоге улучшает функциональные параметры машин [1].

Известно, что разрушение деталей машин при их эксплуатации начинается в поверхностном слое металла. Под поверхностью трения следует понимать наружный слой, который по строению, физико-химическим свойствам отличается от внутренней части материала деталей трибосопряжения (по ГОСТ 30858 определяется как формирование качества поверхности трения).

Качество поверхности трения определяют геометрические характеристики поверхности (макроотклонения, волнистость, шероховатость), механические, физические и химические свойства тонких поверхностных слоев и напряжения в них.

При формировании качества поверхности трения следует учитывать:

- исходные характеристики конструкционного материала;
- внешние механические воздействия (скорость перемещения и нагрузка на трущиеся поверхности);
- поле распределения напряжений, деформаций и перемещений, возникающих в зонах контактирования элементов трибосопряжений;
- физико-химическое воздействие среды, в которой работают трибосопряжения узлов трения;
- температурный режим работы трибосопряжений в узлах трения.

Показатели износостойкости изделий зависят от рационального сочетания характеристик первичных структур поверхности, получаемых при изготовлении, и характеристик вторичных структур, возникающих и развивающихся непосредственно в процессе трения в условиях эксплуатации.

Для машин и механизмов, работающих в условиях сверхвысоких скоростей, высоких и низких температур, глубокого вакуума, химически агрессивных или химически инертных сред, износостойкость поверхностей трения должна обеспечиваться конструктивными и технологическими разработками по созданию такой первичной структуры поверхностей трения, характеристики которой в сложных условиях работы существенно не изменяются. Методы упрочнения поверхностей деталей выбирают с учетом целевого назначения изделий и условий их эксплуатации.

В зависимости от условий эксплуатации деталей машин в трибосопряжениях необходимо учитывать различные стороны качества поверхности трения. Так, при усталости наиболее глубокие впадины, царапины и трещины, полученные в процессе формообразования деталей, являются концентраторами напряжения. Износ и разрушение поверхностей трения происходят в местах расположения этих дефектов. При оценке коррозионной стойкости необходимо учитывать изменения физико-механических свойств верхнего слоя металла детали, сформированного при обработке.

Как показал опыт промышленности, эффективным способом защиты поверхностей трения от указанных видов повреждений и изнашивания является применение металлоплакирующих смазочных материалов: масел, пластичных и твердых смазочных материалов и защитных композиций.

Изучение эксплуатационных свойств поверхностного слоя металла является одной из важных задач машиностроения, так как эти свойства должны учитываться при проектировании триботехнических систем. При этом проектирование металлоплакирующих смазочных и защитных композиций необходимо производить с учетом состояния поверхностей трибосопряжений и создания условий для реализации эффекта избирательного переноса в зонах трения конкретных трибосопряжений. При достижении эффекта избирательного переноса в результате трения в зоне контакта самопроизвольно образуется неокисляющаяся тонкая металлическая пленка с низким сопротивлением сдвигу, не способная наклепываться. Избирательный перенос – вид фрикционного взаимодействия, характеризуемый в основном молекулярной составляющей силы трения. Устойчивым признаком избирательного переноса является образование защитной металлической или металлополимерной пленки, обладающей способностью снижать трение и уменьшать износ. Эффект избиратель-



ного переноса должен учитываться при выборе конструктивного исполнения изделий, смазочных и конструкционных материалов.

В пособии рассмотрены следующие вопросы:

- контактное взаимодействие деталей трибосопряжений;
- расчет основных характеристик и анализ напряженно-деформированного состояния в зоне контакта;
- методика расчета температуры вспышки в зоне контакта при наличии антифрикционных и других покрытий на поверхностях контактирующих тел;
- методика проектирования металлоплакирующей смазочной композиции, обеспечивающей реализацию эффекта избирательного переноса в трибосопряжениях.

В учебном пособии использованы экспериментальные исследования и опыт отечественной и зарубежной промышленности в области трения, износа и разработки смазочных материалов, а также научные разработки сотрудников Пензенского государственного университета. Ряд предложенных математических моделей для исследования напряженно-деформированного состояния в зонах контакта многослойных гетерогенных структур разработаны в рамках проведения НИР по проекту № 2.1.2/2989 аналитической целевой ведомственной программы Министерства образования и науки РФ «Развитие научного потенциала высшей школы (2009/2010 гг.)».