

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. Ланщиков*

**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<br>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<br>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<br>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<br>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<br>поверхностях с антифрикционными покрытиями.....       | 112 |
| 4.4.1. Применение номограмм для расчета температуры<br>вспышки .....                                       | 122 |
| 4.4.2. Расчет температуры вспышки на контактирующих<br>поверхностях зубчатых колес .....                   | 125 |
| 4.4.3. Расчет температуры вспышки в зоне контакта элементов<br>пары скольжения .....                       | 126 |

|   |     |
|---|-----|
| 4.5. Реализация эффекта избирательного переноса<br>при использовании металлоплакирующих смазочных<br>композиций ..... | 129 |
| Заключение .....  | 131 |
| Список литературы .....   | 132 |
| Приложение 1. Обеспечение параметров состояния<br>поверхностей деталей машин при различных видах обработки.....       | 137 |
| Приложение 2. Пример проектирования металлоплакирующей<br>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.)».