

М Е Х А Н И К А

Н.К. Мышкин
М.И. Петроковец

ТРЕНИЕ, СМАЗКА, ИЗНОС

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
И ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ
ТРИБОЛОГИИ



МОСКВА
ФИЗМАТЛИТ®
2007

УДК 620.179.112

ББК 34.41

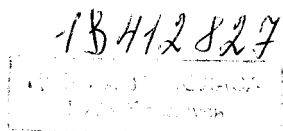
М 96

Мышкин Н. К., Петроковец М. И. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. — 368 с. — ISBN 978-5-9221-0824-9.

Изложены физико-технические основы современной трибологии как науки о закономерностях трения, изнашивания и смазки. Особое внимание уделяется физическим и механическим процессам, сопровождающим формирование и разрушение молекулярных связей. Обсуждаются прикладные аспекты трибологии, охватывающие широкий диапазон вопросов от основ фрикционного материаловедения, технологических способов повышения износостойкости трущихся поверхностей до конкретных деталей узлов трения. Книга содержит обширный справочный материал о триботехнических характеристиках смазок, материалов, деталей машин и способах модифицирования поверхностей.

Предназначена для научных и инженерно-технических работников в области машиностроения, а также будет полезна студентам и аспирантам, изучающим проблемы трения, изнашивания и смазки.

Табл. 46. Ил. 162. Библиогр. 140.



© ФИЗМАТЛИТ, 2007

ISBN 978-5-9221-0824-9

© Н. К. Мышкин, М. И. Петроковец, 2007

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	7
Введение	9
Глава 1. Поверхность твердого тела	12
1.1. Поверхность как физический объект	12
1.2. Геометрические параметры поверхности.	19
1.3. Текстура поверхности.	29
1.4. Современные методы исследования поверхности	37
1.4.1. Физические методы исследования поверхности (37). 1.4.2. Исследование шероховатости поверхности (39).	
Список литературы	45
Глава 2. Концепции трения, изнашивания и смазки	46
2.1. Трение	46
2.1.1. Законы трения (46). 2.1.2. Элементарная модель трения (50).	
2.2. Изнашивание	53
2.2.1. Стадии изнашивания (54). 2.2.2. Элементарная модель изнашивания (55).	
2.3. Смазка	58
2.3.1. Роль смазки в технике (58). 2.3.2. Вязкость и режимы смазки (60).	
2.4. Развитие концепций микро- и нанотрибологии	65
Список литературы	70
Глава 3. Механика и физика контакта твердых тел.	72
3.1. Контакт гладких тел.	72
3.1.1. Упругий контакт (72). 3.1.2. Пластический и упругопластический контакт (83).	
3.2. Упругий контакт с адгезией.	87
3.2.1. Модель Дерягина–Муллера–Топорова (ДМТ) (88). 3.2.2. Модель Джонсона–Кендалла–Робертса (ДКР) (90). 3.2.3. Сравнительный анализ моделей адгезионного контакта (94).	
3.3. Контакт шероховатых поверхностей	96
3.3.1. Модель Демкина (97). 3.3.2. Модель Гринвуда–Вильямсона (101). 3.3.3. Критерий перехода от упругого контакта к пластическому (105).	
Список литературы	107
Глава 4. Механика и физика трения скольжения	108
4.1. Трение скольжения	109

4.1.1. Фактическая площадь контакта (109).	4.1.2. Межповерхностные связи (113).	4.1.3. Деформация при трении (115).	4.1.4. Расчет коэффициента трения (116).	4.1.5. Влияние эксплуатационных факторов на трение (121).	4.1.6. Предварительное смещение (124).	4.1.7. Фрикционные автоколебания (126).	
4.2. Тепловыделение при трении.							127
4.2.1. Постановка тепловой задачи трения (128).	4.2.2. Температура фрикционного контакта (132).	4.2.3. Термическая неустойчивость фрикционного контакта (133).					
Список литературы							135
Глава 5. Механика и физика трения качения							136
5.1. Упругий гистерезис							137
5.2. Микропроскальзывание							139
5.3. Адгезия							144
5.4. Пластическая деформация.							146
5.5. Общее сопротивление качению.							147
Список литературы							148
Глава 6. Изнашивание.							150
6.1. Основные механизмы изнашивания.							150
6.2. Абразивное изнашивание.							154
6.3. Адгезионное изнашивание.							159
6.4. Усталостное изнашивание							162
6.5. Коррозионное изнашивание, фреттинг, эрозия и кавитация							165
6.6. Комбинированные виды изнашивания							175
Список литературы							176
Глава 7. Гидродинамика смазки.							177
7.1. Вязкое течение							177
7.1.1. Физические соотношения (177).	7.1.2. Уравнение неразрывности (179).	7.1.3. Уравнение движения (180).	7.1.4. Уравнение энергии (183).				
7.2. Гидродинамическая смазка							184
7.2.1. Основы гидродинамической смазки (184).	7.2.2. Формула Петрова (187).	7.2.3. Уравнение Рейнольдса (189).	7.2.4. Уравнение Рейнольдса для радиального подшипника (191).				
7.3. Упругогидродинамическая смазка							200
Список литературы							203
Глава 8. Физико-технические методы контроля изнашивания.							205
8.1. Испытания на трение и изнашивание и их данные.							205
8.2. Обработка, представление и стандартизация результатов трибоиспытаний							207
8.3. Трибологические базы данных							211
8.4. Диагностика и мониторинг изнашивания							216

8.4.1. Методы диагностики изнашивания (217).	8.4.2. Анализ продуктов изнашивания (219).	8.4.3. Мониторинг изнашивания трибосистем (228).
Список литературы		232
Глава 9. Материалы для узлов трения		233
9.1. Металлы и сплавы		235
9.2. Керамические материалы		242
9.3. Полимеры		244
9.4. Композиционные материалы		248
9.5. Перспективы триботехнического материаловедения		253
Список литературы		253
Глава 10. Смазки и масла		255
10.1. Смазочные масла и пластичные смазки		256
10.2. Присадки		263
10.3. Твердые смазки		269
10.4. Направления развития смазочных материалов		271
Список литературы		272
Глава 11. Покрытия и модифицирование поверхности		273
11.1. Покрытия триботехнического назначения		274
11.1.1. Электрохимические покрытия (274).	11.1.2. Наплавленные покрытия (276).	11.1.3. Испарительные методы (279).
11.2. Полимерные и металлополимерные покрытия		282
11.3. Модифицирование поверхности		284
11.3.1. Модифицирование структуры (284).	11.3.2. Модифицирование химического состава (286).	
11.4. Направления развития методов модифицирования поверхности и нанесения покрытий		287
Список литературы		289
Глава 12. Узлы трения		290
12.1. Подшипники скольжения		290
12.1.1. Конструкции подшипников скольжения (290).	12.1.2. Режимы трения подшипников скольжения (292).	12.1.3. Прогнозирование эксплуатационных свойств подшипников скольжения (295).
12.2. Подшипники качения		301
12.2.1. Конструкции подшипников качения (302).	12.2.2. Долговечность и надежность подшипников качения (307).	12.2.3. Трение в подшипниках качения (310).
12.2.4. Износ подшипников качения (312).		
12.3. Зубчатые передачи		313
12.3.1. Типы зубчатых передач (314).	12.3.2. Трение, износ и усталость зубчатых колес (316).	
12.4. Электрические контакты		323
12.4.1. Классификация электрических контактов (323).	12.4.2. Конструктивные аспекты (325).	12.4.3. Материалы (325).
12.4.4. Смазки для электрических контактов (326).		

12.5. Уплотнения	327
12.5.1. Типы уплотнений (328). 12.5.2. Трение и износ уплотнений (332).	
12.6. Тормозные устройства	334
12.6.1. Некоторые конструкции фрикционных устройств (335). 12.6.2. Трение и износ в тормозах (336).	
Список литературы	339
Приложение 1. Способы описания шероховатой поверхности	340
Приложение 2. Основные положения теории теплопроводности . .	350
Приложение 3. Формы представления данных и стандарты испытаний на трение и износ	358
Предметный указатель	365