

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ
ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ СИСТЕМ ИМ. В. А. БЕЛОГО

Н. К. МЫШКИН
М. И. ПЕТРОКОВЕЦ

ТРИБОЛОГИЯ

ПРИНЦИПЫ И ПРИЛОЖЕНИЯ



ИММС НАНБ • ГОМЕЛЬ • 2002

УДК 620.179.112
М 96
ББК 34.41 2

Книга рекомендована к изданию Ученым советом Института механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАН Беларуси

Рецензент: член-корреспондент НАН Беларуси,
профессор, доктор технических наук
Ю. М. Плескачевский

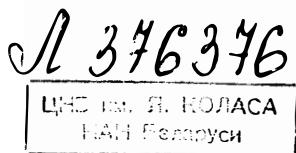
Мышкин Н. К., Петроковец М. И. Трибология. Принципы и приложения. – Гомель:
ИММС НАНБ, 2002. – 310 с.
ISBN 985-6477-18-2

Изложены основы современной трибологии как науки о закономерностях трения, изнашивания и смазки. Особое внимание уделяется физическим и механическим процессам, сопровождающих 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, работающих в области машиностроения, а также будет полезна студентам и аспирантам, изучающим проблемы трения, изнашивания и смазки.

Табл. 43. Ил. 173. Библиогр.: 386 назв.

УДК 620.179.112
ББК 34.41



ISBN 985-6477-18-2

© Н. К. Мышкин, М. И. Петроковец, 2002

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	9
Глава 1. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ТРИБОЛОГИИ	11
1.1. Поверхность твердого тела	11
1.2. Топография поверхности	13
1.2.1. Геометрические параметры поверхности	13
1.2.2. Современные методы измерения шероховатости	23
1.3. Трение	28
1.3.1. Законы трения	28
1.3.2. Модель трения Боудена–Тейбора	31
1.4. Изнашивание	34
1.4.1. Стадии изнашивания	35
1.4.2. Элементарная модель изнашивания	35
1.5. Смазка	38
1.5.1. Роль смазки	38
1.5.2. Вязкость	39
1.5.3. Трение смазанных поверхностей	41
1.5.4. Граничная смазка	43
1.6. Некоторые тенденции в трибологии	44
Литература	45
Глава 2. МЕХАНИКА ФРИКЦИОННОГО КОНТАКТА	47
2.1. Контакт гладких тел	47
2.1.1. Упругий контакт	47
2.1.2. Пластический и упругопластический контакт	56
2.2. Упругий контакт с адгезией	60
2.2.1. Модель Дерягина–Муллера–Топорова (ДМТ)	61
2.2.2. Модель Джонсона–Кендалла–Робертса (ДКР)	62
2.2.3. Сравнительный анализ моделей адгезионного контакта	65
2.3. Контакт шероховатых поверхностей	67
2.3.1. Модель Демкина	68
2.3.2. Модель Гринвуда–Вильямсона	71
2.3.3. Критерий перехода от упругого контакта к пластическому	74
Литература	76
Глава 3. ВНЕШНЕЕ ТРЕНИЕ	77
3.1. Трение скольжения	77
3.1.1. Фактическая площадь контакта	77
3.1.2. Межповерхностные связи	80
3.1.3. Деформация при трении	83
3.1.4. Расчет коэффициента трения	84

ОГЛАВЛЕНИЕ

3.1.5. Влияние эксплуатационных факторов на трение	88
3.1.6. Предварительное смещение	91
3.1.7. Фрикционные автоколебания	93
3.2. Трение качения	94
3.2.1. Упругий гистерезис	95
3.2.2. Микропроскальзывание	96
3.2.3. Адгезия	97
3.2.4. Пластическая деформация	98
3.2.5. Общее сопротивление качению	98
3.3. Тепловыделение при трении	99
3.3.1. Постановка тепловой задачи трения	100
3.3.2. Температура фрикционного контакта	103
3.3.3. Термическая неустойчивость фрикционного контакта	104
Литература	106
Глава 4. ИЗНАШИВАНИЕ	107
4.1. Основные механизмы изнашивания	107
4.2. Абразивное изнашивание	110
4.3. Адгезионное изнашивание	115
4.4. Усталостное изнашивание. Теория Крагельского	117
4.5. Коррозионное изнашивание	120
4.6. Изнашивание при фреттинге	122
4.7. Эрозионное изнашивание	124
4.8. Кавитационное изнашивание	127
4.9. Комбинированные виды изнашивания	129
Литература	130
Глава 5. ТЕОРИЯ СМАЗКИ	131
5.1. Вязкое течение	131
5.1.1. Физические соотношения	131
5.1.2. Уравнение неразрывности	133
5.1.3. Уравнение движения	133
5.1.4. Уравнение энергии	136
5.2. Гидродинамическая смазка	137
5.2.1. Некоторые основы гидродинамической смазки	137
5.2.2. Формула Петрова	139
5.2.3. Уравнение Рейнольдса	141
5.2.4. Уравнение Рейнольдса для радиального подшипника	143
5.3. Упругогидродинамическая смазка	151
Литература	154
Глава 6. ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ, ДИАГНОСТИКА И МОНИТОРИНГ ИЗНАШИВАНИЯ	155
6.1. Общая методология	155
6.2. Обработка, представление и стандартизация результатов трибоиспытаний	157
6.3. Трибологические базы данных	160
6.4. Трибодиагностика и мониторинг изнашивания	164
6.4.1. Методы диагностики изнашивания	166

6.4.2. Анализ продуктов изнашивания	168
6.4.3. Мониторинг изнашивания трибосистем	175
Литература	178
Глава 7. ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ	179
7.1. Металлы и сплавы	180
7.2. Керамические материалы	186
7.3. Полимеры	188
7.4. Композиционные материалы	191
7.5. Перспективы триботехнического материаловедения	196
Литература	196
Глава 8. СМАЗКИ И ПРИСАДКИ	197
8.1. Масла	198
8.1.1. Моторные масла	198
8.1.2. Трансмиссионные масла	201
8.2. Пластичные смазки	202
8.3. Присадки	203
8.4. Твердые смазки	208
8.5. Направления развития смазочных материалов	209
Литература	210
Глава 9. ПОКРЫТИЯ И МОДИФИЦИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ	211
9.1. Покрытия триботехнического назначения	211
9.1.1. Электрохимические покрытия	212
9.1.2. Наплавленные покрытия	214
9.1.3. Испарительные методы	216
9.2. Полимерные и металлополимерные покрытия	218
9.3. Модифицирование поверхности	220
9.3.1. Модифицирование структуры	221
9.3.2. Модифицирование химического состава	222
9.4. Направления развития методов модифицирования поверхности и нанесения покрытий	223
Литература	224
Глава 10. ТРЕНИЕ И ИЗНАШИВАНИЕ В ТРИБОСОПРЯЖЕНИЯХ	225
10.1. Подшипники скольжения	225
10.1.1. Конструкции подшипников скольжения	225
10.1.2. Режимы трения подшипников скольжения	227
10.1.3. Прогнозирование эксплуатационных свойств подшипников скольжения	230
10.2. Подшипники качения	235
10.2.1. Конструкции подшипников качения	235
10.2.2. Долговечность и надежность подшипников качения	240
10.2.3. Трение в подшипниках качения	242
10.2.4. Износ подшипников качения	244
10.3. Зубчатые передачи	245
10.3.1. Типы зубчатых передач	246
10.3.2. Трение, износ и усталость зубчатых колес	248

ОГЛАВЛЕНИЕ

10.4. Электрические контакты	253
10.4.1. Классификация электрических контактов	253
10.4.2. Конструктивные аспекты	255
10.4.3. Материалы	255
10.4.4. Смазки для электрических контактов	256
10.5. Уплотнения	257
10.5.1. Типы уплотнений	257
10.5.2. Трение и износ уплотнений	261
10.6. Тормозные устройства	264
10.6.1. Некоторые конструкции фрикционных устройств	264
10.6.2. Трение и износ в тормозах	266
10.7. Микротрибосистемы	268
Литература	270
Приложение 1	
СПОСОБЫ ОПИСАНИЯ ШЕРОХОВАТОЙ ПОВЕРХНОСТИ	271
Приложение 2	
ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ	279
Приложение 3	
ФОРМЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДАННЫХ И СТАНДАРТЫ	
ТРИБОИСПЫТАНИЙ	287
Приложение 4	
БИБЛИОГРАФИЯ ПО ТРИБОЛОГИИ	
(монографии, справочники, учебники)	293
Предметный указатель	302