

Н.К. МЫШКИН, В.В. КОНЧИЦ, М. БРАУНОВИЧ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОНТАКТЫ



ДОЛГОПРУДНЫЙ
2008

Н.К. Мышкин, В.В. Кончиц, М. Браунович

Электрические контакты: Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2008 — 560 с.

ISBN 978-5-91559-003-7

Профессиональное учебно-справочное руководство по электрофизике, механике и материаловедению контактных соединений в электротехнике и электронике. Первое издание по тематике в отечественной литературе.

Рассмотрены характеристики сильноточных соединений, подвижных и разрывных контактов. Особое внимание уделено износу и эксплуатационным свойствам, коррозии и применению смазок, показателям надежности.

Для разработчиков и технологов, инженеров-практиков, студентов и преподавателей технических университетов.

ISBN 978-5-91559-003-7 © 2008, Н.К. Мышкин,
В.В. Кончиц, М. Браунович

© 2008, ООО Издательский Дом
«Интеллект», оригинал-макет,
оформление

18449052

Содержание

Введение	8
----------------	---

Глава 1. ФИЗИКА И МЕХАНИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОНТАКТА	16
---	----

1.1. Поверхность твердых тел	16
------------------------------------	----

1.1.1. Физика поверхности	16
---------------------------------	----

1.1.2. Геометрия поверхности	19
------------------------------------	----

1.1.3. Современные методы исследования поверхности	27
--	----

1.2. Контакт твердых тел	31
--------------------------------	----

1.2.1. Упругий контакт	31
------------------------------	----

1.2.2. Пластический и упругопластический контакт	33
--	----

1.2.3. Упругий контакт с адгезией	39
---	----

1.2.4. Контакт шероховатых поверхностей	46
---	----

1.3. Трение, износ и смазка в контакте	57
--	----

1.3.1. Законы трения	57
----------------------------	----

1.3.2. Трение скольжения	60
--------------------------------	----

1.3.3. Изнашивание	72
--------------------------	----

1.3.4. Смазка	82
---------------------	----

1.3.5. Масштабный фактор	83
--------------------------------	----

<i>Список литературы к главе 1</i>	86
--	----

Глава 2. ПРОХОЖДЕНИЕ ТОКА В КОНТАКТЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ	88
---	----

2.1. Сопротивление стягивания в электрическом контакте	88
---	----



2.1.1. Влияние частоты тока	92
2.1.2. Роль размера пятна контакта, наноконтакты	95
2.1.3. Влияние поверхностных пленок	99
2.1.4. Влияние расположения пятен контакта	106
2.2. Сопротивление контакта шероховатых поверхностей	113
2.3. Тепловыделение в электрическом контакте	124
2.3.1. Контакт без пленок	124
2.3.2. Контакт с пленками	127
2.4. Нагрев электрического контакта при трении	134
<i>Список литературы к главе 2</i>	139
Глава 3. КОНТАКТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ	141
3.1. Металлические контактные материалы	141
3.1.1. Свойства металлов и сплавов, используемых в электрических контактах	141
3.1.2. Металлы и сплавы для тяжело- и средненагруженных контактов	161
3.1.3. Металлы и сплавы для слаботочных контактов	166
3.1.4. Материалы для жидкометаллических контактов	168
3.1.5. Пружинные контактные материалы	170
3.1.6. Материалы, обладающие эффектом памяти, и их применение в электрических контактах	172
3.2. Покрытия и модифицирование поверхности	173
3.2.1. Инженерия поверхности	173
3.2.2. Методы модификации материалов электрических контактов	174
3.2.3. Покрытия в электрических контактах	178
3.3. Композиционные контактные материалы	199
3.3.1. Композиционные материалы для контактов коммутационных аппаратов	200
3.3.2. Самосмазывающиеся композиционные материалы для скользящих контактов	210
3.4. Наноструктурные материалы	224
3.4.1. Структура и механические свойства	225
3.4.2. Электрические свойства	227
3.4.3. Магнитные свойства	229
3.4.4. Теплостойкость наноструктурных материалов	233
3.4.5. Наноструктурные покрытия	234
3.4.6. Углеродные нанотрубки	235
<i>Список литературы к главе 3</i>	237



Глава 4. РАБОТОСПОСОБНОСТЬ И НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ	240
4.1. Факторы работоспособности и надежности электрических контактов	240
4.2. Механизмы отказов контактов	243
4.2.1. Перегрев площади контакта	244
4.2.2. Окисление контактов	246
4.2.3. Коррозия	248
4.2.4. Фреттинг	248
4.2.5. Интерметаллические соединения	258
4.2.6. Электромиграция	263
4.2.7. Релаксация напряжений и ползучесть	265
4.2.8. Термическое расширение	270
4.3. Влияние отказов контактов	271
4.3.1. Модель прогноза ресурса электрических контактов	273
Список литературы к главе 4	279
Глава 5. КОНТАКТНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ В СИЛЬНОТОЧНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ	281
5.1. Болтовые соединения	281
5.1.1. Фреттинг болтовых соединений	287
5.1.2. Влияние интерметаллидов	291
5.1.3. Ползучесть и релаксация напряжений	293
5.2. Разъемные контакты шина—вилка	295
5.3. Обжатые соединения	297
5.3.1. Механизмы отказов контактных соединений	299
5.4. Контактные соединения в электрических сетях	300
5.4.1. Винтовые соединения	301
5.4.2. Клиновые и сварные соединения	306
5.5. Способы повышения надежности контактных соединений	309
5.5.1. Оптимизация конструкции для повышения площади контакта	309
5.5.2. Оптимизация контактного давления	312
5.5.3. Механические контактные приспособления	313
5.5.4. Смазки и контактные составы	320
Список литературы к главе 5	323



Глава 6. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОНТАКТЫ В ЭЛЕКТРОНИКЕ	324
6.1. Материалы для электронных соединений	324
6.2. Механизмы отказов электронных соединений	331
6.2.1. Пористость поверхностных слоев	331
6.2.2. Коррозия и загрязнения	333
6.2.3. Фреттинг	337
6.2.4. Полимеризация при трении	343
6.2.5. Интерметаллические соединения	344
6.2.6. Ползучесть и релаксация напряжений	354
6.2.7. Электромиграция	355
6.2.8. Усы	357
6.3. Методы повышения надежности электронных соединений	359
6.3.1. Модификация покрытий	359
6.3.2. Действие смазок	361
<i>Список литературы к главе 6</i>	<i>363</i>
 Глава 7. ПОДВИЖНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОНТАКТЫ	 365
7.1. Трение и износ в электрических контактах	365
7.2. Металлические контакты, работающие без смазки	370
7.2.1. Слаботочные контакты	370
7.2.2. Сильноточные контакты	374
7.2.3. Стабильность контактного сопротивления и электрический шум	385
7.3. Смазанные металлические контакты	388
7.3.1. Факторы действия смазки	388
7.3.2. Электрические свойства граничных смазочных слоев	389
7.3.3. Проводимость смазанных контактов	393
7.3.4. Действие смазки в скользящих электрических контактах	411
7.3.5. Смазки для электрических контактов	425
7.4. Скользящие контакты композит—металл	431
7.4.1. Влияние переходных слоев на электрические характеристики	431
7.4.2. Эффект «смазывания» электрическим током	452
7.4.3. Электрический износ	465
<i>Список литературы к главе 7</i>	<i>491</i>



Глава 8. РАЗРЫВНЫЕ КОНТАКТЫ	494
8.1. Общие сведения, специфика работы	494
8.2. Конструктивные особенности разрывных контактов	497
8.3. Износ в разрывных контактах	502
8.4. Искро- и дугогашение в разрывных контактах	513
8.5. Работоспособность разрывных контактов	515
<i>Список литературы к главе 8</i>	518
Глава 9. ЭЛЕКТРОКОНТАКТНАЯ ДИАГНОСТИКА И МОНИТОРИНГ	519
9.1. Диагностика поверхностей контакта	520
9.2. Оценка площади контакта и режимов контактного взаимодействия	525
9.3. Оценка свойств материалов и смазок	531
9.4. Использование анализа изображений в диагностике	538
9.5. Мониторинг электрических контактов	543
<i>Список литературы к главе 9</i>	550
Приложение. Книжные издания по проблемам электрических контактов на русском языке	552
Предметный указатель	555