

Содержание

Часть В. Сканирующая зондовая микроскопия

22. Сканирующая зондовая микроскопия: принцип действия, аппаратура, зонды

Bharat Bhushan, Othmar Marti	15
22.1. Сканирующий туннельный микроскоп	17
22.1.1. Конструкция СТМ Биннига и др.....	19
22.1.2. Коммерческие образцы СТМ.....	20
22.1.3. Конструкция зонда СТМ	23
22.2. Атомная силовая микроскопия	24
22.2.1. Конструкция АСМ, разработанная Биннигом и др.	28
22.2.2. Коммерческие образцы АСМ.....	28
22.2.3. Конструкция АСМ зонда	36
22.2.4. Методы измерения сил трения	41
22.2.5. Нормальная составляющая силы и сила трения. Калибровка луча от кантилевера	46
22.3. Аппаратура АСМ и анализ.....	49
22.3.1. Механика кантилеверов	49
22.3.2. Аппаратура и анализ систем обнаружения изгибов кантилеверов ...	53
22.3.3. Конструкции для трехмерного измерения силы	65
22.3.4. Система сканирования и управления.....	66

Литература	74
------------------	----

23. Зонды для сканирующей микроскопии

Jason H. Hafner	83
23.1. Атомная силовая микроскопия	85
23.1.1. Принцип действия	85
23.1.2. Стандартные острия зондов	86
23.1.3. Характеристики острий зондов.....	87
23.1.4. Заострение зондов оксидом	89
23.1.5. Зонды, изготовленные методом ионно-лучевого травления.....	90
23.1.6. Зонды, изготовленные методом электронно-лучевого осаждения (ЭЛО).....	90
23.1.7. Зонды из углеродных нанотрубок.....	91
23.2. Сканирующая туннельная микроскопия.....	99
23.2.1. Механическая нарезка СТМ зондов	99
23.2.2. Электрохимическое травление при изготовлении СТМ зондов.....	100

Литература	100
------------------	-----

24. Бесконтактная атомная силовая микроскопия и связанные с ней темы

Franz J. Giessibl, Yasuhiro Sugawara, Seizo Morita, Hirotaka Hosoi, Kazuhisa Sueoka, Koichi Mukasa, Akira Sasahara, Hiroshi Onishi	103
24.1. Атомная силовая микроскопия (АСМ).....	104
24.1.1. Сигнал изображения в АСМ.....	104

24.1.2.	Экспериментальные измерения и шумы.....	105
24.1.3.	Рабочий режим статического АСМ	106
24.1.4.	Рабочий режим динамического АСМ	107
24.1.5.	Четыре дополнительные проблемы, с которыми сталкивается АСМ	107
24.1.6.	Частотно-модулированный АСМ (ЧМ-АСМ)	109
24.1.7.	Соотношение между сдвигом частоты и силами	110
24.1.8.	Шум в частотно-модулированном АСМ: общие вычисления	111
24.1.9.	Заключение	112
24.2.	Применение к полупроводниковым поверхностям	112
24.2.1.	Поверхность Si(111)-7 × 7.....	112
24.2.2.	Моногидридные поверхности Si(100)-(2 × 1) и Si(100)-(2 × 1):Н.....	115
24.2.3.	Поверхность кремния с металлическими слоями	116
24.3.	Применение к диэлектрическим поверхностям	120
24.3.1.	Щелочные галоиды, фториды и окислы металлов.....	121
24.3.2.	Получение изображений поверхности NiO(001) с атомным разрешением.....	127
24.4.	Применение к молекулам.....	130
24.4.1.	Почему молекулы и какие молекулы?	130
24.4.2.	Механизм получения изображений молекул.....	130
24.4.3.	Перспективы	134
Литература	.....	135
25. Сканирующая зондовая микроскопия при низких температурах		
Markus Morgenstern, Alexander Schwarz, Udo D. Schwarz	.....	142
25.1.	Работа микроскопа при низких температурах.....	144
25.1.1.	Дрейф	144
25.1.2.	Шум.....	144
25.1.3.	Стабильность	145
25.1.4.	Пьезорелаксация и гистерезис.....	145
25.2.	Приборное оснащение	145
25.2.1.	Простая конструкция СЗМ для переменной температуры.....	146
25.2.2.	Конструкция ССМ, основанная на криостате.....	147
25.3.	Сканирующая туннельная микроскопия и спектроскопия.....	149
25.3.1.	Атомная манипуляция.....	150
25.3.2.	Получение изображений движения атомов.....	151
25.3.3.	Детектирование света от отдельных атомов и молекул	153
25.3.4.	Спектроскопия с высоким разрешением	154
25.3.5.	Создание изображений электронных волновых функций.....	160
25.3.6.	Получение изображений поляризации спина: наноманетизм	166
25.4.	Сканирующая силовая микроскопия и спектроскопия	167
25.4.1.	Получение изображений на атомном уровне.....	169
25.4.2.	Силовая спектроскопия	173
25.4.3.	Атомная манипуляция.....	176
25.4.4.	Микроскопия электростатической силы	177
25.4.5.	Магнитная силовая микроскопия	178

Литература	183
26. Обнаружение силы высших гармоник в динамической силовой микроскопии	
Ozgun Sahin, Calvin F. Quate, Olav Solgaard, Franz J. Giessibl	193
26.1. Моделирование сил взаимодействия зонд–образец в полуконтактном режиме АСМ	194
26.1.1. Силы зонд–образец как периодический колебательный сигнал	194
26.1.2. Частотный спектр силы взаимодействия зонд–образец	195
26.1.3. Зависимость силовых гармоник от упругих свойств	196
26.2. Увеличение определенной гармоники силы взаимодействия при использовании резонанса изгиба	199
26.2.1. Реакция кантилевера на силы высшей гармоники	199
26.2.2. Совершенствование механизма реакции кантилевера АСМ	200
26.2.3. Использование гармонических кантилеверов	201
26.3. Восстановление сил взаимодействия зонд–образец с временным разрешением с использованием торсионного кручения	202
26.3.1. Крутильный отклик сопряженных торсионных кантилеверов	203
26.3.2. Временное разрешение измерений сил	205
26.4. Примеры применения	206
26.4.1. Измерения с временным разрешением взаимодействия между острием зонда и образцом из различных материалов	207
26.4.2. Количественные сравнения свойств материалов образца	208
26.4.3. Определение перехода двойной полимерной смеси из высокоэластичного состояния в стеклообразное при одной гармонической силе	209
26.4.4. Детальный анализ сил с временным разрешением	211
26.5. Высшая гармоника — атомно-силовая микроскопия при малой амплитуде	212
26.5.1. Принцип работы	212
26.5.2. Примеры использования	215
26.5.3. Заключение	215
Литература	216
27. Динамические режимы атомно-силовой микроскопии	
A. Schirmeisen, B. Anczykowski, Harald Fuchs	218
27.1. Мотив: измерение одинарной атомной связи	219
27.2. Генератор синусоидальных колебаний: модель динамического АСМ	224
27.3. Динамические разновидности атомно-силовой микроскопии (АСМ)	226
27.3.1. Амплитудная модуляция — полуконтактный режим АСМ	228
27.3.2. Режимы автовозбуждения	236
27.4. Контроль Q	242
27.5. Процессы рассеивания, измеряемые динамическим АСМ	246
27.6. Заключение	252
Литература	253
28. Силовая микроскопия молекулярного распознавания: от простых связей к сложным энергетическим ландшафтам	
Peter Hinterdorfer, Ziv Reich	258
28.1. Химия остриевого лиганда	259
28.2. Фиксирование рецепторов на поверхностях зонда	262

28.3.	Обнаружение сил взаимодействия при распознавании отдельных молекул	264
28.4.	Основные принципы силовой спектроскопии молекулярного распознавания	267
28.5.	Силовая спектроскопия распознавания	270
28.5.1.	Силы, энергии и кинетические скорости	270
28.5.2.	Сложные связи и энергетические барьеры	273
28.5.3.	Живые клетки и мембраны	279
28.6.	Визуализация распознавания	280
28.7.	Некоторые выводы	283
Литература		283
29. Нанотрибология, наномеханика и определение характеристик материалов		
Bharat Bhushan		289
29.1.	Описание АСМ/ЛСМ и различных методов измерений	291
29.1.1.	Шероховатость поверхности и измерение сил трения	292
29.1.2.	Измерение адгезии	296
29.1.3.	Царапание, износ, изготовление/обработка изделий	297
29.1.4.	Измерение поверхностного потенциала	298
29.1.5.	Определение характеристик локальной деформации <i>in situ</i>	299
29.1.6.	Измерения наноотпечатков	300
29.1.7.	Локальная упругость поверхности и картографирование вязкоупругих свойств	300
29.1.8.	Измерение граничной смазки	305
29.2.	Отображение поверхности, трение и адгезия	305
29.2.1.	Изображение поверхности и трение на наноуровне	305
29.2.2.	Микромасштабное трение	310
29.2.3.	Анизотропия микротрения	314
29.2.4.	Поверхность – шероховатость – независимое трение на микроуровне	317
29.2.5.	Влияние скорости на трение на микро/наноуровне	321
29.2.6.	Трение на наноуровне и картографирование износа	324
29.2.7.	Адгезия и трение во влажной среде	326
29.2.8.	Зависимость сил мениска и Ван-дер-Ваальса от расстояния	333
29.2.9.	Влияние масштаба при трении	334
29.3.	Износ, царапание, локальная деформация, изготовление/нанобработка	339
29.3.1.	Наномасштабный износ	339
29.3.2.	Микромасштабное царапание	340
29.3.3.	Микромасштабный износ	342
29.3.4.	Определение характеристик локальной деформации <i>in situ</i>	346
29.3.5.	Наноизготовление/нанобработка	350
29.4.	Инденитирование	351
29.4.1.	Пикоинденитирование	351
29.4.2.	Наномасштабное инденитирование	352
29.4.3.	Локальная упругость поверхности и вязко-упругое картографирование	355
29.5.	Граничная смазка	356

29.5.1. Перфторполиэфирные смазки	356
29.5.2. Самосборные монослои	363
29.5.3. Измерение толщины жидких пленок	367
29.6. Заключение	369
Литература	371
30. Поверхностные силы и нанореология	
молекулярно-тонких пленок	
Marina Ruths, Jacob N. Israelachvili	379
30.1. Введение: типы поверхностных сил	379
30.2. Методы изучения поверхностных сил	382
30.2.1. Законы действия сил	382
30.2.2. Силы адгезии	383
30.2.3. УИПС и АСМ	384
30.2.4. Некоторые другие методики измерения сил	387
30.3. Нормальные силы взаимодействия между сухими (без смазки) поверхностями	388
30.3.1. Силы Ван-дер-Ваальса в вакууме и инертных газах	388
30.3.2. Взаимодействие с обменом зарядами	391
30.3.3. Спекание и холодная сварка	392
30.4. Нормальные силы взаимодействия между поверхностями в жидкостях ..	393
30.4.1. Силы Ван-дер-Ваальса в жидкостях	393
30.4.2. Электростатические и ионно-корреляционные силы	395
30.4.3. Сольватация и структурные силы	398
30.4.4. Гидратация и гидрофобные силы	401
30.4.5. Силы взаимодействия с участием полимеров	405
30.4.6. Силы при тепловых колебаниях	408
30.5. Адгезионные и капиллярные силы	409
30.5.1. Капиллярные силы	409
30.5.2. Механика адгезии	410
30.5.3. Влияние структуры поверхности, шероховатости и рассогласований кристаллических решеток	412
30.5.4. Неравновесное и зависящее от скорости взаимодействие: адгезионный гистерезис	414
30.6. Введение: различные режимы трения и ограничения для моделей сплошной среды	416
30.7. Соотношение между адгезией и трением для сухих (без смазки и покрытых твердой смазкой) поверхностей	417
30.7.1. Закон Амонтонса и отклонения от него вследствие адгезии: модель Коблстона	417
30.7.2. Вклад силы адгезии и нагрузки в межповерхностное трение	420
30.7.3. Примеры экспериментального изучения трения сухих поверхностей	426
30.7.4. Переход от межповерхностного трения в зоне взаимодействия к нормальному трению с износом	432
30.8. Смоченные смазывающей жидкостью поверхности	433
30.8.1. Вязкие силы и трение толстых пленок: режим сплошной среды	433
30.8.2. Трение в пленках промежуточной толщины	435
30.8.3. Граничная смазка молекулярно-тонких пленок: нанореология	438

30.9.	Влияние наномасштабной текстуры на трение	449
30.9.1.	Роль формы заключенных между поверхностями молекул.....	449
30.9.2.	Влияние структуры поверхности.....	451
Литература	.....	454
31. Силы межповерхностного взаимодействия и спектроскопические исследования ограниченных поверхностями жидкостей		
Y. Elaine Zhu, Ashis Mukhopadhyay, Steve Granick	.....	473
31.1.	Гидродинамическая сила в жидкостях, возникающая на микро- и наноровнях: вопросы граничных условий с отсутствием скольжения.....	474
31.1.1.	Как подсчитывается величина скольжения	476
31.1.2.	Механизм управления скольжением в жидкостях с низкой вязкостью	476
31.1.3.	Экспериментальные исследования.....	478
31.1.4.	Скольжение может регулироваться растворенным газом.....	481
31.1.5.	Скольжение по смачиваемым поверхностям	482
31.1.6.	Целенаправленное создание скольжения.....	483
31.1.7.	Выводы	484
31.2.	Гидрофобное взаимодействие и поведение воды на гидрофобной поверхности раздела	484
31.2.1.	Экспериментальные исследования.....	485
31.2.2.	Гидрофобное взаимодействие.....	486
31.2.3.	Гидрофобность на поверхностях Януса	488
31.3.	Сверхскоростное спектроскопическое исследование эффектов в жидкостях, находящихся между различными поверхностями: комбинирование сверхскоростной спектроскопии и измерения силы с помощью специального оборудования	492
31.3.1.	Проблемы	494
31.3.2.	Принципы ФКС измерений	495
31.3.3.	Организация эксперимента.....	496
31.4.	Сравнение процессов трения и диффузии в молекулярно-тонких пленках.....	498
31.5.	Диффузия поверхностных молекул при сдвиге	503
31.6.	Выводы	505
Литература	.....	505
32. Использование сканирующих устройств для исследования наномасштабной адгезии между твердыми телами в присутствии жидкостей и монослойных пленок		
Robert W. Carpick, James Batteas, Maarten P. de Boer	.....	512
32.1.	Важность изучения адгезии в наномасштабах.....	512
32.2.	Методы измерения адгезии	514
32.3.	Калибровка сил, перемещений и наконечников	521
32.3.1.	Калибровка силы	522
32.3.2.	Определение параметров наконечника.....	523
32.3.3.	Калибровка перемещений	524
32.3.4.	Наклон кантилевера.....	524
32.4.	Влияние капилляров жидкости на адгезию	525

32.4.1. Теоретическое обоснование и аппроксимации	525
32.4.2. Экспериментальные исследования образования капилляров с помощью сканирующих устройств.....	529
32.4.3. Пересмотр теоретических представлений.....	533
32.4.4. Перспективные направления.....	536
32.5. Самособранные монослои (ССМ).....	537
32.5.1. Адгезия при взаимодействии ССМ.....	537
32.5.2. Микроскопия сил химического взаимодействия: общая методология.....	538
32.5.3. Адгезия на ССМ-модифицированных поверхностях в жидкостях....	540
32.5.4. Влияние на адгезию внутри- и межцепочных взаимодействий	542
32.5.5. Адгезия на уровне одной связи	543
32.5.6. Перспективные направления	545
32.6. Заключение	546
Литература	546
33. Трение и износ на атомном уровне	
Enrico Gnecco, Roland Bennewitz, Oliver Pfeiffer, Anisoara Socoliuc, Ernst Meyer	555
33.1. Микроскопия сил трения в сверхвысоком вакууме	555
33.1.1. Микроскопия сил трения.....	556
33.1.2. Калибровка силы	557
33.1.3. Исследования в сверхвысоком вакууме	560
33.1.4. Микроскоп для работы в сверхвысоком вакууме (СВВ).....	561
33.2. Модель Томлинсона.....	562
33.2.1. Одномерная модель Томлинсона.....	562
33.2.2. Двумерная модель Томлинсона.....	563
33.2.3. Трение между атомно-плоскими поверхностями	564
33.3. Эксперименты по изучению трения на атомном уровне.....	565
33.3.1. Анизотропия трения.....	569
33.4. Тепловые эффекты при атомном трении	570
33.4.1. Модель Томлинсона при конечной температуре.....	571
33.4.2. Зависимость трения от скорости.....	573
33.4.3. Зависимость трения от температуры.....	574
33.5. Геометрические эффекты в наноконтактах.....	575
33.5.1. Механика сплошных сред для единичных неровностей.....	576
33.5.2. Зависимость трения от нагрузки.....	577
33.5.3. Оценка площади контакта.....	579
33.6. Износ на атомном уровне.....	580
33.6.1. Абразивный износ на атомном уровне.....	580
33.6.2. Вклад износа в трение	581
33.7. Моделирование молекулярной динамики атомного трения и износа	583
33.7.1. Моделирование молекулярной динамики процессов трения	583
33.7.2. Моделирование молекулярной динамики абразивного износа.....	585
33.8. Диссипация энергии при бесконтактной микроскопии атомных сил	587
33.9. Выводы	590

Литература	591
34. Зависимость трения, адгезии и износа в наномасштабе от скорости скольжения	
Nikhil S. Tambe, Bharat Bhushan.....	597
34.1. Взаимосвязь науки и техники при проведении нанотрибологических исследований	597
34.2. Инструментарий	600
34.2.1. Расширение возможностей АСМ для исследований при высоких скоростях скольжения	600
34.2.2. Измерения сил трения и адгезии	602
34.2.3. Износ	603
34.2.4. Материалы, покрытия и смазки для применения в нанотехнологиях	604
34.3. Зависимость трения и адгезии на наноуровне от скорости скольжения..	605
34.4. Доминирующие режимы и механизмы трения	609
34.4.1. Комплексная модель трения на наноуровне.....	609
34.4.2. Модель молекулярной пружины для пластичных (вязкоупругих) самособранных монослоев (ССМ)	619
34.4.3. Модель гистерезиса адгезии и деформации для полимеров	622
34.4.4. Доминирующие режимы силы трения для различных образцов.....	624
34.5. Отображение трения на наноуровне	629
34.6. Исследование износа при высоких скоростях скольжения.....	633
34.6.1. Влияние скорости скольжения на возникновение трения и износа ...	633
34.6.2. Влияние непрерывного скольжения на трение при высоких скоростях скольжения	634
34.6.3. Отображение трения в наномасштабе	637
34.7. Идентификация материалов с низким трением и адгезией для нанотехнологических применений.....	640
34.8. Заключение	643
Литература	644
35. Компьютерное моделирование вдавливания и трения на нанометровом уровне	
Susan B. Sinnott, Seong-Jun Heo, Donald W. Brenner, Judith A. Harrison	650
35.1. Составляющие компьютерного моделирования	651
35.1.1. Энергии и силы	652
35.1.2. Важнейшие аппроксимации	654
35.2. Вдавливание.....	658
35.2.1. Поверхности.....	659
35.2.2. Тонкие пленки	671
35.3. Трение и смазка.....	677
35.3.1. Чистые поверхности	678
35.3.2. Декорированные поверхности	686
35.3.3. Тонкие пленки	689
35.4. Выводы	707

Литература	708
36. Наномасштабные механические свойства — технологии их измерения и применения	
Andrzej J. Kulik, Andras Kis, Gérard Gremaud, Stefan Hengsberger, Gustavo S. Luengo, Philippe K. Zysset, László Forró	722
36.1. Локальная механическая спектроскопия как альтернатива динамической контактной АСМ	724
36.1.1. СМЛУ (сканирующая микроскопия с локальным ускорением) с переменной температурой (Т-СМЛУ)	725
36.1.2. Пример 1: локальная механическая спектроскопия полимеров	727
36.1.3. Пример 2: локальная механическая спектроскопия NiTi	728
36.2. Статические методы — мезоскопические образцы, модули сдвига и упругости (Юнга)	730
36.2.1. Углеродные нанотрубки (УНТ) — введение в фундаментальные морфологии и методы производства	730
36.2.2. Измерение механических свойств УНТ с помощью МСЗ (микроскопии со сканирующим зондом)	732
36.2.3. Микротрубочки и их упругие свойства	740
36.3. Сканирующее нановдавливание как инструмент для определения наномеханических свойств биологической ткани в сухих и влажных условиях	742
36.3.1. Сканирующее нановдавливание (СН)	742
36.3.2. Применение СН	742
36.3.3. Пример 1: изучение механических свойств тонкого слоя кости с использованием СН	744
36.3.4. Пример 2: нановдавливание в человеческий волос в сухом и влажном состоянии: проблемы глубины нановдавливания	752
36.3.5. Выводы	758
36.4. Общие выводы и перспективы	758
Литература	759
37. Наномеханические свойства поверхностей твердых тел и тонких пленок	
Adrian B. Mann	765
37.1. Инструментарий	766
37.1.1. АСМ и сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ)	766
37.1.2. Нановдавливание	767
37.1.3. Применение нановдавливания	769
37.1.4. Дополнительные методики	771
37.1.5. Исследования выпуклостей	771
37.1.6. Акустические методы исследования	772
37.1.7. Методы визуализации	774
37.2. Анализ данных	774
37.2.1. Упругие контакты	775
37.2.2. Давление в идеальные пластические материалы	776
37.2.3. Адгезионные контакты	777
37.2.4. Геометрия индентора	777
37.2.5. Анализ кривых нагрузка/перемещение	778

37.2.6. Модифицирование аналитических подходов	782
37.2.7. Альтернативные методы анализа	784
37.2.8. Измерение контактной жесткости	785
37.2.9. Измерение вязкоупругости	786
37.3. Модели деформации	787
37.3.1. Зарождение дефектов	787
37.3.2. Варьирование глубины	789
37.3.3. Анизотропные материалы	790
37.3.4. Растрескивание и деламинация	790
37.3.5. Фазовые переходы	791
37.4. Тонкие пленки и мультислои	793
37.4.1. Тонкие пленки	794
37.4.2. Мультислои	798
37.5. Развивающиеся области наномеханики	800
Литература	801
38. Влияние масштаба на механические свойства и трибологию	
Bharat Bhushan, Michael Nosonovsky	808
38.1. Обозначения	808
38.2. Введение	810
38.3. Влияние масштаба на механические свойства	813
38.3.1. Предел текучести и твердость	814
38.3.2. Сопротивление сдвигу в зоне взаимодействия	816
38.4. Влияние масштаба на шероховатость поверхности и контактные параметры ..	820
38.4.1. Зависимость шероховатости и контактных параметров от масштаба	820
38.4.2. Зависимость контактных параметров от нагрузки	823
38.5. Влияние масштаба на трение	824
38.5.1. Адгезионное трение	825
38.5.2. Деформация двух взаимодействующих тел	828
38.5.3. Трение при деформации трех взаимодействующих тел	829
38.5.4. Механизм прерывистого движения (храповой механизм)	831
38.5.5. Анализ мениска	832
38.5.6. Величина коэффициента трения и переход из упругого в пластическое состояние	833
38.5.7. Сравнение с экспериментальными данными	835
38.6. Влияние масштаба на износ	840
38.7. Влияние масштаба на температуру в зоне взаимодействия	841
38.8. Заключение	842
38.A. Статистика распределения частиц по размерам	844
38.A.1. Статистические модели распределения частиц по размерам	844
38.A.2. Данные по типичным распределениям частиц по размерам	847
Литература	848
39. Механика в биологической нанотехнологии	
Rob Phillips, Prashant K. Purohit, Jané Kondev	852
39.1. Взаимодействие и взаимосвязь биологии и нанотехнологии как отдельная наука	853

39.1.1.	Биологическая нанотехнология	853
39.1.2.	Самосборка как биологическая нанотехнология.....	853
39.1.3.	Молекулярные двигатели как примеры биологической нанотехнологии.....	854
39.1.4.	Молекулярные каналы и насосы как примеры биологической нанотехнологии.....	855
39.1.5.	Влияние биологии на нанотехнологию	856
39.1.6.	Нанотехнология в биологии и исследования с помощью единичных молекул.....	857
39.1.7.	Проблемы моделирования зоны био-, нано- взаимодействия.....	860
39.2.	Масштабы био-, нановзаимодействия.....	862
39.2.1.	Пространственные масштабы и структуры.....	863
39.2.2.	Временные масштабы и процессы.....	866
39.2.3.	Масштабы силы и энергии: взаимодействие детерминированных и тепловых сил.....	868
39.3.	Моделирование зоны нано-, биовзаимодействия.....	871
39.3.1.	Противоречие между универсальностью и специфичностью.....	871
39.3.2.	Исследование биологических систем на атомарном уровне.....	872
39.3.3.	Исследование биологических систем как сплошной среды.....	873
39.4.	Нанотехнологические процессы в природе: вирусы в качестве типичного примера.....	875
39.5.	Заключение.....	883
Литература		884
40. Использование АСМ и нановдавливания для исследования структурных, наномеханических и нанотрибологических характеристик человеческого волоса		
Bharat Bhushan, Carmen LaTorre, Guohua Wei		888
40.1.	Человеческий волос, кожа и средства ухода за волосами.....	892
40.1.1.	Человеческий волос и кожа.....	892
40.1.2.	Уход за волосами: мытье, кондиционирование и процессы, приводящие к повреждению волос.....	898
40.2.	Экспериментальные методики.....	904
40.2.1.	Экспериментальные процедуры.....	907
40.2.2.	Образцы волос и кожи.....	917
40.3.	Определение структурных характеристик волос с использованием АСМ.....	920
40.3.1.	Структура поперечных и продольных сечений волоса.....	921
40.3.2.	Структуры различных слоев кутикулы.....	923
40.3.3.	Выводы.....	926
40.4.	Определение наномеханических характеристик с использованием нановдавливания и нанопроцарапывания.....	928
40.4.1.	Твердость, модуль Юнга и ползучесть.....	928
40.4.2.	Сопротивление процарапыванию.....	936
40.4.3.	Выводы.....	943
40.5.	Макромасштабные трибологические характеристики.....	946
40.5.1.	Исследование трения и износа различных типов волос.....	946

40.5.2. Влияние температуры и влажности на трение волос	950
40.5.3. Выводы	951
40.6. Определение нанотрибологических характеристик с использованием АСМ.....	951
40.6.1. Шероховатость, трение и адгезия.....	951
40.6.2. Распределение слоя кондиционера и связующее взаимодействие на поверхности волоса.....	977
40.6.3. Выводы	987
40.7. Заключение	990
40.А. Аппроксимация толщины слоя кондиционера	992
Литература	993
41. Механические свойства наноструктур	
Bharat Bhushan	996
41.1. Экспериментальные методики измерения механических свойств наноструктур.....	999
41.1.1. Испытание на вдавливание и процарапывание с использованием микро/наноинденторов	999
41.1.2. Испытания наноструктур на изгиб с использованием АСМ.....	1001
41.1.3. Испытания микро/наноструктур на изгиб с использованием наноиндентора	1006
41.2. Результаты экспериментов и их обсуждение	1007
41.2.1. Испытания керамических материалов и металлов на вдавливание и процарапывание с использованием микро/наноиндентора	1007
41.2.2. АСМ испытания керамических нанобалок на изгиб.....	1013
41.2.3. Испытание металлических микробалок на изгиб с использованием наноиндентера	1017
41.2.4. Испытания с использованием наноиндентера полимерных микробалок на вдавливание и процарапывание	1018
41.2.5. Испытания полимерных микробалок на изгиб с использованием наноиндентера	1021
41.3. Конечно-элементный анализ наноструктур с впадинами шероховатости и царапинами	1025
41.3.1. Распределение напряжения в гладкой нанобалке.....	1027
41.3.2. Влияние шероховатости в продольном направлении	1028
41.3.3. Влияние шероховатости и царапин в поперечном направлении	1029
41.3.4. Влияние напряжений и перемещений в упругих, упругопластических или упруго-идеально-пластических материалах	1032
41.4. Заключение	1033
Литература	1034