

М материалов и технологий

К. УОРДЕН

Новые
интеллектуальные
материалы
и конструкции



ТЕХНОСФЕРА



МИКРОАНАЛИТИЧЕСКИЕ ЧИПЫ ДЛЯ ЭКСПРЕСС-КОНТРОЛЯ ГАЗОВЫХ И ЖИДКИХ СРЕД

ПОРТАТИВНЫЙ ПРИБОР ДЛЯ ЭЛЕКТРОФОРЕТИЧЕСКОГО
ЛАЗЕРНОГО КВАЗИУПРУГОГО СВЕТОРАССЕЯНИЯ В МИКРОЧИПЕ



Стеклоянный капиллярный
3-канальный микрочип



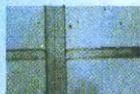
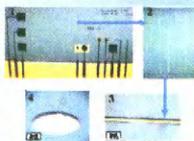
Фрагмент, размеры
канала в сечении
50 x 50 микрон

- Лазер 532 нм, 20 мВт
- Капиллярные микрочипы из оптического стекла и полимера (одноразовые) 1 и 3-х канальные
- Сечение капилляра 30x100 микрон
- ВВ блок питания 0-2 кВ с компьютерным управлением, непрерывным изменением напряжения и измерением тока и напряжения
- Микропроцессорная карта с USB поддержкой
- Время анализа 5 - 60 секунд
- Объекты: 2 нм - 10 нм

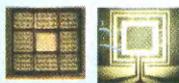
ПОРТАТИВНЫЙ ЭЛЕКТРОФОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗАТОР С КАПИЛЛЯРНЫМ МИКРОЧИПОМ

- Лазерное возбуждение флуоресценции при 473 нм, 1мВт
- Сечение капилляра 10x60 микрон
- Длина капилляра 20, 100 мм
- ВВ блок питания 0-2 кВ с компьютерным управлением, непрерывным изменением напряжения и измерением тока и напряжения
- Микропроцессорная карта с USB поддержкой
- Объекты: ФИТЦ аминокислоты, пептиды, белки

Микроаналитический чип на базе пленочного фоторезиста 1 - вид сверху, 2,3 - капилляры, 4 - резервуар для жидкости



Транспортный капилляр и планарный световой канал



Микрореактор для термоциклирования в геном анализе
1 - нагреватель, 2 - термочувствительный элемент



Планарные капиллярные микрочипы из оптического стекла

ГАЗОВЫЙ МИКРОХРОМАТОГРАФ НА ЧИПЕ

- Кремний, размеры: 18 x 30 мм
- Капиллярная колонка 50 x 100 микрон
- Длина колонки 2 м
- Детектор по теплопроводности на основе SiC
- Терморегуляция с помощью терморезистивного элемента на основе SiC

А - колонка В - терморезистивные элементы на базе структур SiC



ЦЕНТР МИКРОТЕХНОЛОГИИ И ДИАГНОСТИКИ

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
197376 Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5
Тел/факс: (812) 234-16-82 e-mail: cmid@eltech.ru



М И Р **м а т е р и а л о в** **и т е х н о л о г и й**

К. УОРДЕН

**Новые
интеллектуальные
материалы
и конструкции.**

Свойства и применение

Перевод с английского
под редакцией
С.Л. Баженова

ТЕХНОСФЕРА

Москва

2006

К. Уорден

Новые интеллектуальные материалы и конструкции.

Свойства и применение

Москва:

Техносфера, 2006. - 224с. ISBN 5-94836-065-2

Основное свойство "интеллектуальных" материалов и изделий состоит в способности реагировать на изменение внешних условий и условий эксплуатации. Они могут также ремонтировать себя или изменять свои функциональные характеристики.

В книге описаны системы волоконно-оптических датчиков, которые могут измерять деформацию, температуру и механическое напряжение. Обсуждаются способы реагирования интеллектуальных конструкций на возникающие резонансные колебания. Описаны сплавы, обладающие эффектом памяти формы, а также пьезокерамики, широко используемые в качестве датчиков в рассматриваемых структурах. Даны примеры применения магнестрикционных материалов в качестве активных приводов, реагирующих на изменение внешних условий. Описаны жидкостные интеллектуальные системы, способные изменять свое движение под действием электрического сигнала и вызывать появление реальных сил и смещений. Рассмотрены биоимплантаты и живые организмы, изучение которых облегчает разработку принципов работы новых интеллектуальных структур.



© 2003 by World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.

All Rights Reserved

© 2006, ЗАО "РИЦ "Техносфера",

перевод на русский язык, оригинал-макет, оформление

ISBN 5-94836-065-2

ISBN 981-02-4776-1 (англ)

Содержание

Предисловие	9
Глава 1. Понятие интеллектуальных технологий	10
1.1. Интеллектуальные структуры	10
1.2. Использование интеллектуальных устройств	10
1.2.1. Междисциплинарные науки	10
Глава 2. Системы датчиков	14
2.1. Введение	14
2.2. Требования к системам датчиков в интеллектуальных структурах	15
2.3. Датчики	17
2.3.1. Требования и возможности	17
2.3.2. Традиционные датчики	19
2.3.3. Оптоволоконные датчики	20
2.3.4. Микроэлектромеханические системы	28
2.3.5. Пьезокерамики и пьезоэлектрические полимеры	32
2.3.6. Поверхностные пленки и нити	33
2.4. Заключение	35
Глава 3. Контроль колебаний	37
3.1. Введение	37
3.1.1. Динамическое поведение структуры	38
3.1.2. Гармонический анализ колебаний	40
3.2. Датчики и электромеханические преобразователи	42
3.3. Активный контроль структур	44
3.3.1. Контроль отдельных гармоник колебаний	45
3.3.2. Демпфирование	46
3.3.3. Обратная связь по координате	47
3.3.4. Другие регуляторы	48
3.4. Примеры контроля колебаний	49
3.4.1. Консольная балка	50
3.4.2. Поворачиваемая балка	52
3.4.3. Поворачиваемая рама	53
3.4.4. Антенна	57
3.4.5. Пластина	61
3.5. Заключение	63
Литература	63
Глава 4. Обработка данных	65
4.1. Введение	65
4.2. Датчики	67
4.3. Анализ информации множества датчиков	69
4.4. Модель СЗЛ	72
4.5. Модель Бойда	75
4.6. Модель водопада	76

4.7. Общая модель	77
4.8. Анализ данных в интеллектуальных структурах	78
4.9. Детекция расслоений при помощи акустических волн	79
4.9.1. Лэмбовские волны	79
4.9.2. Детекция аномалии	81
4.9.3. Результаты	82
4.10. Оптимизация расположения датчиков и их контроль	84
4.10.1. Оптимальное расположение датчиков	84
4.10.2. Определение отказов	87
4.11. Заключение	89
Приложение А. Многослойная нейронная сеть	90
Литература	91
Глава 5. Сплавы с эффектом памяти	94
5.1. Введение	94
5.2. Структурная природа эффекта памяти	95
5.3. Односторонняя память формы	96
5.4. Эффект двусторонней памяти	97
5.5. Эффект суперупругости	99
5.6. История исследования сплавов с памятью формы	99
5.7. Почему бы не использовать биметаллические пластины?	102
5.8. Сплавы с памятью формы	102
5.9. Никель-титановые сплавы	103
5.9.1. Введение	103
5.9.2. Механические характеристики	103
5.9.3. Коррозионная стойкость	104
5.9.4. Тройные сплавы	105
5.9.5. Механические и физические свойства	105
5.10. Использование сплава NiTi	105
5.11. Сплавы с эффектом памяти формы как «интеллектуальные» силовые преобразователи	108
5.11.1. Политические факторы	109
5.11.2. Экономические факторы	109
5.11.3. Социальные факторы	110
5.11.4. Технологические факторы	110
5.12. Применение сплавов с памятью формы в интеллектуальных конструкциях	110
5.12.1. Являются ли сплавы с памятью формы интеллектуальными материалами?	111
5.12.2. Сплавы с памятью формы в интеллектуальных структурах	111
5.12.2.1. Пассивные композиционные структуры	112
5.12.2.2. Контроль формы структуры	113
5.12.2.3. Контроль вибрации	114
5.12.2.4. Контроль потери устойчивости	115

5.12.2.5. Акустический шум	115
5.12.2.6. Контроль степени поврежденности	115
5.13. Заключение	116
Литература	116
Глава 6. Пьезоэлектрики	119
6.1. Понятие пьезоэффекта	119
6.1.1. Кристаллография и пьезоэффект	119
6.1.2. Влияние поверхностного заряда на механическое поведение	122
6.1.3. Некоторые пьезоэлектрики	122
6.2. Использование прямого пьезоэлектрического эффекта	124
6.3. Акустические преобразователи	126
6.4. Пьезоэлектрические преобразователи	126
6.4.1. Двуслойные пьезопреобразователи в виде изгибающейся балки	127
6.4.2. Однослойные преобразователи	129
6.4.2.1. Преобразователи Moonie и Cymbal	130
6.4.3. Последовательное соединение и многослойные преобразователи	132
6.4.3.1. Многослойные преобразователи	133
6.4.3.2. Динамические характеристики многослойных структур	135
6.5. Увеличение смещения	137
6.5.1. Механическое усиление	138
6.5.2. Суммирование множества малых смещений	139
6.5.3. Метод ударного воздействия	141
6.6. Другие применения	142
Литература	142
Глава 7. Магнитострикция	144
7.1. Введение	144
7.1.1. Природа магнитострикции	145
7.2. Редкоземельные интерметаллические материалы	147
7.3. Приведение в действие	153
7.3.1. Универсальные преобразователи	153
7.3.2. Магнитострикционные двигатели	154
7.3.3. Акустические и ультразвуковые излучатели	157
7.3.4. Контроль колебаний и абсорберы	157
7.4. Заключение	159
Литература	160
Глава 8. Гидравлические интеллектуальные устройства	162
8.1. Введение	162
8.2. Основные понятия и принципы	162

8.3. Немного философии	168
8.4. Управляемый жидкостный клапан	170
8.5. Электроструктурируемые жидкости	171
8.6. Прогнозы эксплуатационных характеристик	174
8.7. Применение	178
Рекомендуемая литература	183
Литература	184
Глава 9. Интеллектуальные медицинские материалы	185
9.1. Введение	185
9.2. Первое поколение биоматериалов. «Глухие» биоматериалы	188
9.3. Второе поколение биоматериалов. Улучшенные биоматериалы	191
9.3.1. Фосфаткальциевая керамика	193
9.3.2. Биоактивные стекла	195
9.4. Биоматериалы третьего поколения. Интеллектуальные покрытия	196
9.4.1. Поверхность раздела материала и живой ткани	196
9.4.2. Модификация поверхности	198
9.4.3. Биологическая модификация поверхности	200
9.4.3.1. Антибактериальная модификация	201
9.4.3.2. Модификация, обеспечивающая связь с костью	201
9.4.3.3. Модификация, обеспечивающая совместимость с кровью	201
9.5. Следующее поколение биоматериалов. Истинно интеллектуальные биоматериалы	202
9.6. Заключение	204
Литература	204
Глава 10. Интеллектуальные структуры в природе	206
10.1. Введение	206
10.2. Биоподражающие интеллектуальные устройства	206
10.2.1. Механизмы рецепции	206
10.2.1.1. Механические рецепторы членистоногих	207
10.2.1.2. Органы чувств позвоночных	214
10.2.2. Суммирование и кодирование сигналов	216
10.2.3. Реакция	216
10.2.3.1. Кожа	216
10.2.3.2. Складчатые структуры	217
10.2.4. Использование	219
10.2.4.1. Жидкие кристаллы	219
10.3. Заключение	221
Литература	222

Предисловие

Редакторы данной книги участвовали во многих конференциях, на которых обсуждались проблемы интеллектуальных технологий. Две из них сыграли очень важную роль в ее создании. Первая была проведена в марте 1998 года Институтом физики в г. Брайтоне. На ней было сделано несколько пленарных докладов специалистами в области интеллектуальных технологий. После этого редакторы книги приняли участие в организации Международной конференции по интеллектуальным технологиям и устройствам, которая была проведена в Эдинбурге в декабре 2001 года. Эта конференция была ориентирована на использование результатов лабораторных исследований в промышленных разработках и на демонстрацию опытных моделей работающих интеллектуальных устройств. В некотором смысле это было естественным переходом от теории к ее практическому использованию.

Редакторам книги удалось привлечь ведущих специалистов к написанию книги, которая дает современное представление о быстро развивающейся области интеллектуальных устройств. Каждый автор написал главу, описывающую специфический раздел интеллектуальных технологий. Поскольку эти технологии носят мультидисциплинарный характер, авторы являются специалистами в различных областях, что позволит читателю ознакомиться с различными точками зрения, которые следует учитывать при проектировании интеллектуальных изделий.

Акцент была сделан на практическое использование интеллектуальных структур, материалов, устройств и механизмов. Данная книга будет полезна любому, кто хочет ознакомиться с состоянием дел в этой области или нацелен на работу в ней. В книге используются понятные термины, что делает ее доступной для широкого круга студентов, инженеров и исследователей, начиная от новичка и кончая известными специалистами.

К. Уорден, Б. Баллоф и Д. Хейвуд

Октябрь 2002 года

ГЛАВА 1

ПОНЯТИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

*К. Уорден
У. А. Бахо
Дж. Хэйвуд*

1.1. Интеллектуальные структуры

«*Интеллектуальный*» – это слово часто можно услышать в рекламе новых товаров. Но зачастую данный термин используют в рекламных целях, неверно называя «интеллектуальным» любое сложное высокотехнологичное изделие. Между тем устройство является действительно *интеллектуальным*, лишь если оно способно реагировать на изменение внешних условий. Под изменением *внешних условий* мы понимаем изменение природных условий, условий эксплуатации или, скажем, перемещение конструкции в пространстве. А *реакцией* является изменение функциональных характеристик устройства.

Устройства, «чувствующие» внешние условия и способные изменять свои характеристики, имеют множество преимуществ по сравнению с обычными устройствами: они эффективнее, медленнее изнашиваются и имеют меньшие эксплуатационные затраты.

1.2. Использование интеллектуальных устройств

Область применения интеллектуальных изделий поистине безгранична. Они разрабатываются по-разному, но проектировщик обязательно сталкивается с одной и той же проблемой – как «научить» изделие реагировать, не слишком усложняя конструкцию и не увеличивая ее стоимость. Для решения этой задачи приходится применять методы нескольких смежных наук.

1.2.1. Междисциплинарные науки

Интеллектуальное изделие должно иметь систему измерительных *датчиков (сенсоров)* и механических *приводов (преобразователей)*, реагирующих в зависимости от полученных данных. При этом действия системы

могут быть весьма сложными. Если есть несколько вариантов реакции, структура должна выбрать наиболее эффективный способ реагирования. Поэтому во многих системах используются достаточно сложные способы проверки и обработки получаемого сигнала. Ниже мы рассмотрим вопросы, имеющие большое значение в интеллектуальных изделиях.

Глава 2. Системы датчиков

Датчики (сенсоры) измеряют деформацию, температуру или напряжение в разных точках изделия. Измерительная система должна быть не слишком сложной; ее необходимо связать с системой обработки данных, не нарушая при этом целостности структуры.

Ниже описаны основные требования, предъявляемые к сенсорным системам, и приведены примеры таких систем. Особое внимание уделено измерению локальных параметров системы и использованию оптических волокон.

Глава 3. Контроль колебаний

Снижение веса, что особенно актуально для космической техники, сопровождается увеличением амплитуды колебаний. Были случаи, когда спутники выходили из строя из-за колебаний, возникавших вследствие тепловых нагрузок. Эту проблему можно решить, вводя в структуру датчики и механические преобразователи (обычно пьезоэлектрические).

В данной главе приведены общие принципы контроля интеллектуальных структур и даны примеры их работы, например функционирование интеллектуальных антенн. Описаны некоторые идеи будущего использования интеллектуальных структур.

Глава 4. Обработка данных

Обработка данных имеет огромное значение при создании и эксплуатации интеллектуальных структур. Датчики могут дать обширную информацию о системе, но эти данные бесполезны, если нет алгоритма выделения действительно необходимой информации. В этой главе приведены методы обработки сигнала и даны примеры контроля жизнеспособности сенсоров в интеллектуальных структурах.

Глава 5. Сплавы с эффектом памяти

Существует два типа сплавов с эффектом памяти формы: одни способны к большой обратимой деформации при неизменной температуре (эффект сверхэластичности), другие восстанавливают свою форму при увеличении температуры (эффект тепловой памяти формы). Открытие сплава, названного нитинолом, в 1960-х годах вызвало большой интерес к таким материалам. В последующие годы область применений сплавов с этим необычным свойством сильно расширилась. Как правило, материалы с памятью формы используются в качестве механических приводов. Иногда они преобразуют тепловую энергию в движение или механическую работу.

В этой же главе описаны свойства таких сплавов и способы их использования в интеллектуальных структурах. Приведены примеры применения сплавов для контроля дефектности конструкций.

Глава 6. Пьезоэлектрики

Природные пьезоэлектрические кристаллы (такие как диоксид кремния) известны уже более ста лет. Они имеют большую жесткость и могут использоваться при высоких рабочих частотах. Благодаря прямому пьезоэлектрическому эффекту они успешно применяются в качестве тензодатчиков.

Позже появились искусственные керамические пьезоэлектрики; их используют как механические преобразователи. При этом обычно применяется обратный пьезоэлектрический эффект, состоящий в изменении размеров при приложении электрического поля. Возникающая в таких керамиках сила очень велика, а характерное время реагирования мало. Их недостатком является малая величина смещения.

В этой главе описаны основы пьезоэлектрического эффекта и даны примеры действия пьезопреобразователей различной формы. Обсуждаются методы увеличения деформации в целях использования пьезоэлектриков в обычных устройствах. Описаны примеры применения пьезоэлектриков в интеллектуальных устройствах.

Глава 7. Магнитострикция

Интерес к магнитострикционным материалам появился сразу после открытия эффекта магнитоупругости – изменения формы и размеров тела при намагничивании – в редкоземельных элементах тербии (Tb), самарии (Sm) и диспрозии (Dy). Сначала их недостатком считалась малая величина эффекта. Интерес к ним усилился после открытия компаунда, известного как терфенол и обладающего сильным магнитострикционным эффектом. Этот компаунд обладает огромным потенциалом использования в различных изделиях.

В этой главе приведены примеры использования материалов с сильным магнитострикционным эффектом и описаны особенности таких устройств. В частности, обсуждается использование этих материалов в активных интеллектуальных структурах. В заключении описаны тонкие магнитострикционные пленки.

Глава 8. Гидравлические интеллектуальные устройства

Интеллектуальные структуры реагируют на внешнее воздействие благодаря способности изменять свое движение «по команде» электрического сигнала, не меняя при этом конфигурацию аппаратуры. Аналогично источникам электрического напряжения, величина которого зависит от продолжительности импульса на входе, умный механизм должен вызывать появление сил, скоростей и (что наиболее важно) смещений. Необходимость получения больших ускорений и смещений, сопровождаемых значительным выделением тепла, ограничивает возможности интеллектуальных материалов.

Интеллектуальные конструкции могут иметь различный вид. К ним относятся и самонаводящиеся бомбы, и ткацкий станок, производящий ткани с изменяющимся рисунком (без его останковки), и приборы, оперирующие материалами различной формы. Управление интеллектуальной структурой может осуществляться электромагнитными, гидравлическими или пьезоэлектрическими силами. В этой главе обсуждаются разработки в этой области и, в частности, методы, основанные на применении *электрогеологических* и *магнитогеологических* жидкостей.

Глава 9. Интеллектуальные медицинские материалы

Имплантация материала в биологическую ткань обычно вызывает реакцию отторжения. Если не проявлять особую осторожность при выборе материала и технологии его производства, имплантант может быть чрезвычайно опасен для организма. Защитные свойства организма ориентированы на выявление и реагирование на инородные тела. Хорошо, если инородным телом является бактерия, которая окружается и уничтожается, но плохо, если это искусственный медицинский имплантант.

Реакция организма на инородное тело зависит от особенностей материала и места его имплантации. Она может состоять в отторжении, капсулировании, свертывании крови и т.д. Рассмотрены способы избежать такую реакцию организма. Описаны последние достижения в разработке имплантируемых материалов, помогающих выращиванию новых тканей или вживлению имплантированного материала. Такие материалы особенно актуальны при заживлении ожогов и восстановлении нервных окончаний.

Глава 10. Интеллектуальные структуры в природе

Окружающий нас биологический мир содержит огромное количество готовых решений самых разных задач. Работа биолога, видящего такое решение, зачастую состоит в выяснении, какой же была задача. Если по имеющемуся ответу удалось установить заданный Природой вопрос и выяснить способы оптимизации ответа на него, найденные ею решения можно применить и к техническим задачам.

Использование в интеллектуальных системах идей, основанных на изучении биологических объектов, требует отхода от традиционных методов проектирования. В этой главе даны примеры, которые показывают применение таких идей как на уровне материала, так и на уровне структуры. В качестве примеров приведены насекомые и растения, имеющие сенсоры и своеобразные активаторы.

ГЛАВА 2

СИСТЕМЫ ДАТЧИКОВ

Б. Калшоу

2.1. Введение

Система датчиков или сенсоров – это «нервная система» интеллектуальной структуры. Она контролирует состояние конструкции, определяет уровень механической нагрузки и других физических параметров. В идеале датчики должны обнаруживать любые изменения контролируемых параметров во всех частях структуры. Стремясь к этой цели, многие исследователи разрабатывают конструкции, подобные существующим в природе «биологическим моделям» интеллектуальных структур. Впрочем, даже в природных системах сенсоры, как правило, сосредоточены преимущественно лишь в некоторых специфических областях, которые были определены за многие поколения эволюции (рис. 2.1).

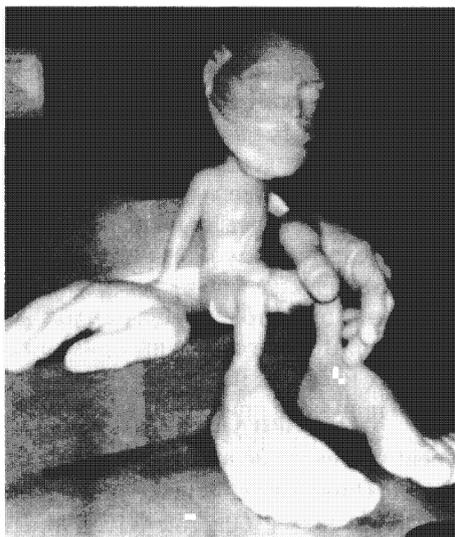


Рис. 2.1. Иллюстрация эволюции нервной системы у людей. Размеры отдельных участков тела соответствуют степени их чувствительности.

Разработчик интеллектуальной структуры, очевидно, должен поступать аналогично и концентрировать датчики в ее наиболее уязвимых частях. Это – существенная особенность проектирования интеллектуальной системы. Алгоритм создания интеллектуальной системы должен использовать и интуицию проектировщика, и накопленный ранее опыт. Подобно естественному отбору в Природе, происходит постепенное развитие интеллектуальных конструкций, и последующие их поколения могут значительно отличаться от предыдущих.

Данная глава посвящена общим принципам функционирования системы датчиков, а не принципам разработки конкретных датчиков. Последняя задача, как правило, решается сравнительно легко. Очевидно, датчики необходимо размещать в местах, в которых максимальны механические нагрузки, скачки температуры или воздействие агрессивной химической среды. В настоящее время происходит постепенная интеграция процессов проектирования и контроля, и в идеале процедура установки датчиков должна стать частью комплексной задачи конструирования и мониторинга механических и других свойств системы. Впрочем, нынешние технологии от этого еще весьма далеки.

2.2. Требования к системам датчиков в интеллектуальных структурах

Полная характеристика контролируемой структуры только с помощью сети сенсоров невозможна. Действительно, в любой измерительной системе всегда имеется шум. Ошибки могут быть уменьшены, если использовать фильтры или усреднять результаты большого количества измерений. Однако полностью избавиться от них нельзя. Кроме того, неизбежно появляется проблема обработки огромного количества данных. В идеале объем получаемых данных должен адекватно описывать контролируемые параметры во всех частях геометрически сложной структуры; кроме того, их должно быть достаточно для создания удовлетворительной модели системы. Однако с усложнением системы быстро растет объем информации, особенно если следить за изменением величины сигнала во времени. Так, для записи данных о поведении конструкции небольшого самолета в течение лишь одной секунды необходим объем нескольких CD-ROMов. Даже если бы это было реально, проанализировать столько информации вряд ли возможно. Кроме того, такая система датчиков имела бы значительный вес и потребляла много энергии.

Таким образом, мы должны создать систему сенсоров, удовлетворяющую некоторым минимальным требованиям. Процесс анализа информации можно разделить на две стадии. Для начала нужно установить, надежен ли результат измерения и не противоречит ли он некоторым критериям оценки точности. Вторая стадия состоит в определении ве-

личины внешнего воздействия и принятия решения, нужно ли на него реагировать. Для этого, во-первых, необходимо иметь систему реагирования. Во-вторых, необходимо измерять следующие виды воздействия:

- механические нагрузки;
- тепловое воздействие, связанное с изменением температуры. Оно может инициировать появление механических напряжений и вести к изменению механической прочности;
- химическое воздействие, связанное с изменением рН среды, утечкой химически активных веществ, присутствием воды и т.д. Во всех случаях система должна адекватно реагировать, что схематически иллюстрируется рис. 2.2.

Технические требования к точности изменений определяются довольно просто. Обычно измерения удлинения с точностью 10 мк и температуры с точностью до десятой доли градуса Цельсия вполне достаточно, поскольку типичные значения удлинения равны нескольким миллиметрам, а рабочий диапазон температур лежит в пределах от -50 до $+150^{\circ}\text{C}$. Имеются, конечно, и исключения, как в случае газовых турбин и нефтяных скважин. В таких случаях пределы измерений и их точность устанавливаются индивидуально. Но обычно подходит стандартный диапазон температур. Есть и еще один момент, связанный с продолжительностью контроля конструкции и, соответственно, продолжительностью измерений. Здесь различия могут быть огромными. Некоторые конструкции, например корпуса ракет, функционируют лишь несколько минут. Другие же конструкции должны работать десятилетия.

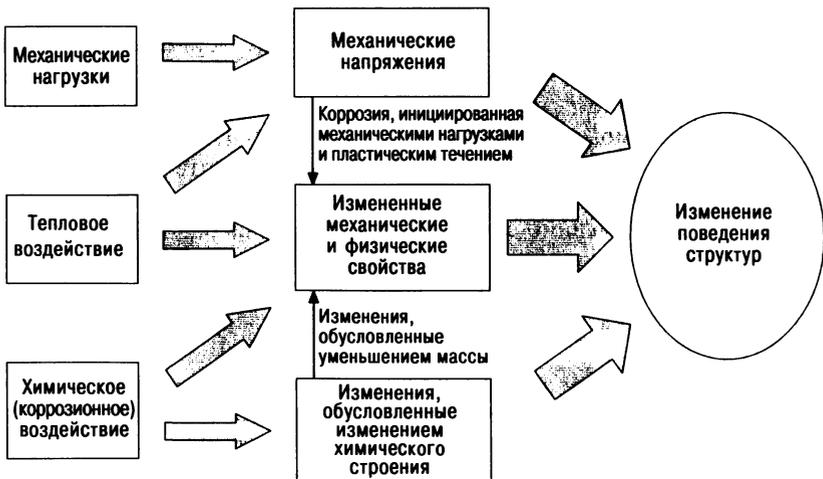


Рис. 2.2. Общие воздействия, испытываемые структурой.

Помимо измерения механических нагрузок, необходимо контролировать степень изношенности конструкции. Такие испытания должны проводиться при отсутствии каких-либо нагрузок, в том числе и температурных. Измерения нужно проводить при фиксированной температуре, или, по крайней мере, ее изменение должно быть учтено. Соответственно, измеряться должны как чисто механические напряжения, так и тепловые эффекты.

В последние годы был достигнут значительный прогресс в развитии систем измерения и анализа механических параметров, но совершенствование самих сенсоров и методов их включения в контролируемые структуры необходимо продолжать. Иная ситуация наблюдается в области контроля химических воздействий. Это связано с тем, что большинство химических реакций необратимо, и поэтому результаты измерений постоянно изменяются (рис. 2.3). Биологические системы справляются с этой проблемой путем непрерывной регенерации сенсорных клеток, но их искусственные аналоги еще не изобретены. Реагенты быстро загрязняются и требуют замены, поскольку в противном случае полученные результаты будут неточными. Скорость химических реакций очень чувствительна к изменению температуры. Эти проблемы еще не решены, и поэтому в дальнейшем мы сосредоточимся на контроле физических, а не химических воздействий.

2.3. Датчики

2.3.1. Требования и возможности

Процедура измерения и обработки данных может быть очень сложной. Прежде всего, необходимо получить электрический сигнал, который требуется передать в систему анализа данных. Методов получения сигнала много, но в любом случае он передается через некоторые поверхности раздела. При пе-

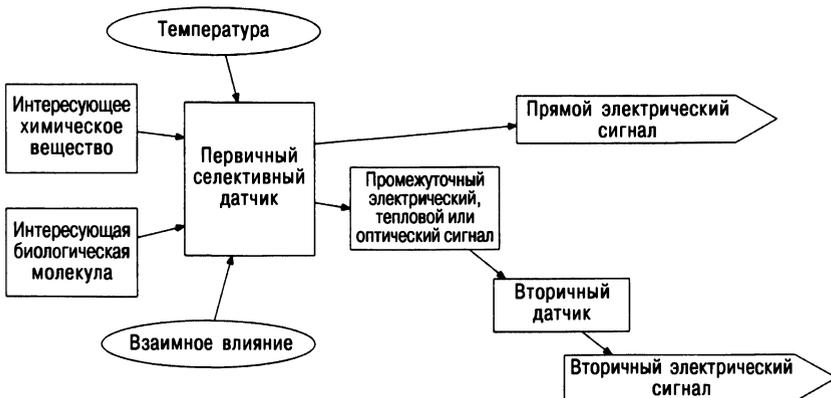


Рис. 2.3. Процедура регистрации механического, химического или биологического воздействия.

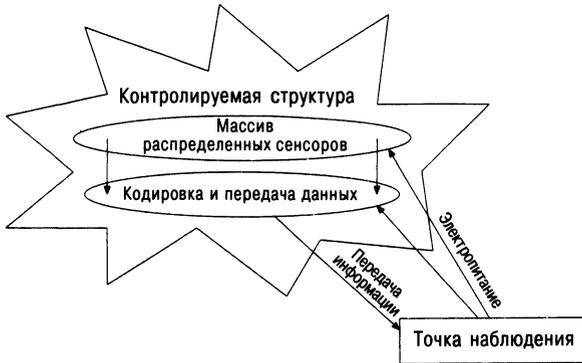


Рис. 2.4. Структура системы датчиков.

редаче сигнала его величина не должна меняться из-за физических или химических причин. Во многих установках, особенно химических, сигнал должен быть передан через две или три поверхности раздела. Поэтому неудивительно, что стабильность и воспроизводимость результатов измерений является серьезной проблемой. Некоторые границы раздела нестабильны во времени и чувствительны к химическим процессам или изменению температуры. Не зря говорят, что первая задача конструктора состоит в компенсации температурной чувствительности датчиков.

Это — общие требования, предъявляемые к измерительным системам. В случае интеллектуальных структур появляются дополнительные требования. Прежде всего, это необходимость размещения множества различных датчиков. Кроме того, необходима достоверная передача сигналов к системе анализа, а потребление энергии датчиком должно быть не слишком высоким. Есть и другие требования, наиболее важное из которых — близость датчика к интересующему нас участку системы (рис. 2.4).

Возможные решения этих проблем состоят в следующем:

- В объединении системы датчиков с мощным вычислительным комплексом.
- В использовании оптоволоконных систем, которые можно включить в контролируемые структуры.
- В использовании миниатюрных микроэлектромеханических датчиков — как кремниевых, так и гибридных.
- В использовании пьезоэлектрических устройств, в том числе гибких пьезоэлектрических полимерных пленок, производящих измерения сразу во множестве точек и имеющих множество выходов. Эти структуры аналогичны жидкокристаллическим телевизионным экранам.
- В использовании активных поверхностных пленок, наблюдение за которыми можно проводить визуально или при помощи фотокамеры.

Это основные сенсорные системы. Кратко они будут рассмотрены ниже. Надо отметить, что из всех перечисленных методов регистрации в настоящее время наиболее развиты традиционные, пьезоэлектрические и оптоволоконные датчики.

2.3.2. Традиционные датчики

К этой группе относятся термопары, экстензометры, инклинометры, тензометрические датчики, датчики, основанные на колебаниях струны, и некоторые другие системы (рис. 2.5). Наиболее успешно они использовались для определения механических нагрузок и смещений. Химические датчики, которые можно использовать в течение длительного времени, так и не были разработаны. Большинство таких датчиков имеют большой размер, что ухудшает эстетику и функциональные характеристики контролируемой структуры. Из-за своих размеров традиционные датчики используются практически лишь в лабораторных исследованиях и в гражданском строительстве. Только там есть достаточное пространство, позволяющее использовать большие датчики, электрокабели, источники питания, вычислительные машины и иные устройства, необходимые для интеллектуальной системы.

Превосходным примером строения, оборудованного традиционными датчиками, является Кингстонский мост в Глазго (рис. 2.6). Более тысячи датчиков, измеряющих деформации, смещения, температуру и углы наклона, распределены по всей длине моста. Цель этой системы

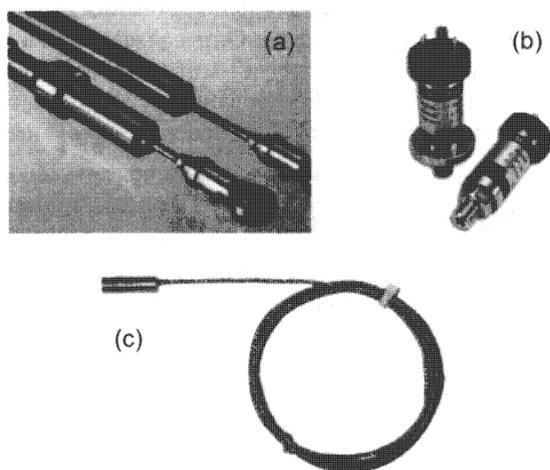


Рис. 2.5. Некоторые традиционные датчики: (а) — экстензометры, измеряющие величину смещения; (б) — датчики давления; (с) — термопара.



Рис. 2.6. Кингстонский мост в Глазго контролируется более чем в 1000 точках системой датчиков на длине более 4 км.

состояла в контроле за состоянием моста при его ремонте, обусловленном необходимостью исправления серьезного смещения одной из опор. Кульминацией операции ремонта стало снятие с неисправной опоры пролета моста весом 50 тысяч тонн. Ремонт был проведен успешно, и с тех пор система датчиков постоянно контролирует состояние моста.

Этот пример очень характерен для использования интеллектуальных систем в гражданском строительстве. Они должны лишь контролировать состояние структуры, не реагируя на изменение ее свойств. В них отсутствует система активного реагирования. В этом смысле исключениями являются системы контроля равновесия зданий в сейсмоопасных зонах.

2.3.3. Оптоволоконные датчики

Использование оптоволоконных датчиков является одним из наиболее перспективных направлений развития интеллектуальных структур. Волоконные датчики обеспечивают новый уровень интеграции сенсорной системы и контролируемой структуры. Они позволяют объединить датчик со структурой; при этом волокно часто вводится внутрь структуры, а не на ее поверхность. К тому же оптоволоконные системы позволяют создать простую схему волоконной сети, охватывающей все изделие, что невозможно другими методами. Одно волокно может обеспечить контроль в десятках и даже сотнях точек вдоль своей длины, таким образом устранив необходимость использования сложной электронной системы связи (рис. 2.7).

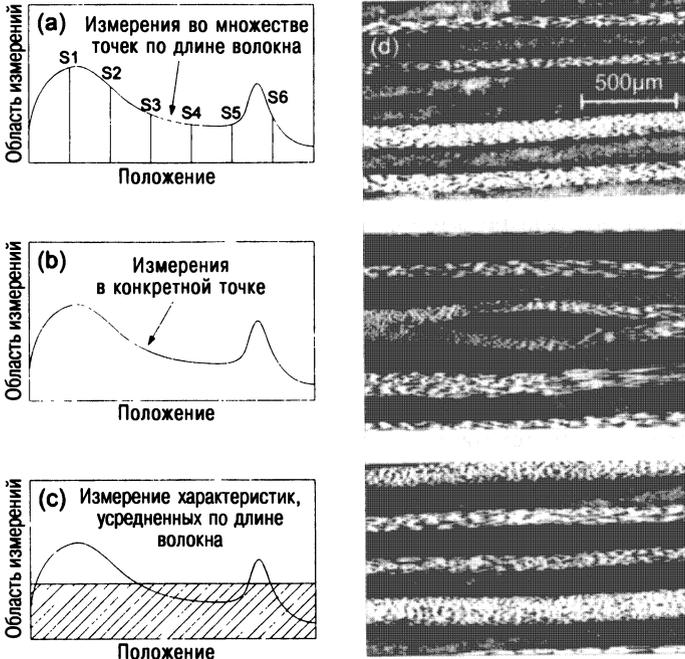


Рис. 2.7. Способы работы оптоволоконных датчиков: (а) – множественные измерения при помощи одного оптического волокна; (б) – оптоволоконный датчик, дающий информацию о конкретной точке; (с) – измерение среднего значения, что особенно ценно при контроле гетерогенных материалов; (д) – оптическое волокно, введенное в структуру углепластика; волокно химически и физически совместимо с композитом.

Из многих возможностей использования оптических волокон для измерений наибольшее развитие получили волоконные дифракционные решетки (ВДР). Основная идея этой методики состоит в создании периодической решетки вдоль оси волокна. Длина решетки может достигать 10000 длин световой волны. Она приводит к интерференционным явлениям, обусловленным отражением света от ее штрихов. Ширина полосы отраженного назад сигнала обычно равна приблизительно 0,01% исходной ширины сигнала (рис. 2.8). При длине световой волны 1,5 мкм расстояние между соответствующими интерференционными максимумами равно приблизительно 0,15 нм. Период решетки зависит от температуры и деформации, что приводит к сдвигу положения интерференционных максимумов. Измерение соответствующего сдвига длины волны дает простой технический метод определения периода решетки. После этого необходимо определить, обусловлено ли изменение периода решетки температурным расширением или механи-

ческими нагрузками. Для измерения деформации результаты обычно сравнивают с данными второй (контрольной) волоконной решетки, в которой в точке измерения отсутствуют напряжения. Динамические деформации измеряют исходя из изменения длины отраженной волны. При этом за период колебаний структуры не должна изменяться температура.

Расстояние между штрихами дифракционной решетки можно изменять. Если по длине волокна нанесено несколько решеток с различным расстоянием между штрихами, то одно волокно может дать информацию о деформации структуры сразу в нескольких точках. Для этого в волокно нужно ввести широкий спектр света и регистрировать отраженный спектр, в котором определенная длина волн соответствует некоторой точке по длине волокна. Для обращения к различным волокнам обычно используют переключатель.

Преимущества использования ВДР очевидны. Период решетки может быть вычислен исходя из длины отраженной волны, которая однозначно определяется и не зависит от интенсивности излучения или чувствительности детектора. Волокно легко прикрепить к поверхности или



Рис. 2.8. Волоконная оптическая дифракционная решетка, измеряющая длину отраженной волны; (а) — геометрия решетки; (б) — режим работы; решетка отражает свет определенной длины волны; (с) — мультисенсорное волокно; каждая решетка работает в различном диапазоне длин волн.

вести в структуру конструкции, и это все, что нужно для установки датчика. Дифракционные решетки имеют и недостатки. Например, для них требуется высокая точность измерения и калибровки длины световой волны. Эта задача усложняется присутствием помех. Кроме того, необходимо стабилизировать температуру, калибровать решетки в отсутствие деформации, калибровать независимый источник света типа гелий-неонового лазера, работающего вблизи края ИК-области. Стабильность длины измеряемой волны должна быть не ниже $\pm 0,1$ нм во всем рабочем диапазоне. Длину волны можно определять различными методами, и наиболее широко для этого используют интерферометр Фабри–Перо. Используют и настраиваемые акустооптические системы детекции и дисперсионные интерферометры. По сути, дешифратор представляет собой упрощенный спектрометр. Наиболее существенным недостатком дешифраторов для волоконных решеток является их большая стоимость. Есть также и чисто технические сложности, связанные с необходимостью стабилизации температуры. Сложность решения этой задачи зависит от требуемой точности измерений. В самом деле, изменение температуры на 1°C приводит к деформации материала, равной примерно 10^{-5} . Поэтому в большинстве случаев, когда необходимо измерять статические деформации, в дополнение к карте распределения деформаций составляется карта температур. Благодаря этому всегда можно определить, связано ли изменение деформации с температурой или с нагрузкой. Монтаж волоконных сенсоров должен проводиться таким образом, чтобы избежать попадание на решетку влаги и обеспечить ее контакт со структурой. На протяжении многих лет пока волокна вводили в структуру вручную это было проблемой. Лишь недавно был изобретен технологический процесс, облегчивший решение этой задачи.

Как уже было сказано, есть несколько практических применений ВДР. Например, их вводят в основание мачт дорогих гоночных яхт. Такие мачты изготавливают из волокнистых композитов, а сенсоры позволяют определить нагрузки и степень поврежденности мачты. ВДР применяют также для контроля поведения мостов и дамб, старых зданий и корпусов скоростных морских кораблей.

Оптическое волокно позволяет провести измерения в одной точке, в нескольких точках или получить среднее значение измеряемого параметра по всей длине волокна. Распределенные измерения облегчают мониторинг измеряемой величины. В этом случае искомая величина рассматривается как функция от длины, а пространственное разрешение обычно имеет порядок нескольких метров. Диапазон таких измерений составляет несколько десятков километров, и это действительно уникальная особенность оптоволоконной технологии; никакой другой метод измерений такой возможности не имеет. Усредненные измерения фактически дают среднее значение величины по всей длине оптического полотна. Этот метод определяется способностью волокна да-

вать усредненную информацию. Такую способность имеют и другие методы измерения, но с учетом общей длины и диапазона измерений данный метод уникален и в этом отношении.

Область применения оптоволоконных методов измерения довольно широка. Они особенно полезны, когда требуется выборка по широкому диапазону данных, а измерения проводятся на большой длине. Чтобы пояснить это, рассмотрим три примера.

В гражданском строительстве часто необходима информация о суммарном удлинении конструкции на базе нескольких метров. Тензометр или брэгговская решетка измеряют лишь локальные удлинения. Они не дают возможности оценить всю ситуацию, так как трещины и другие концентраторы напряжения влияют на местную величину напряжения. При этом волоконные методы имеют точность порядка нескольких микрон при базе измерения в десятки метров. В Европе такие системы были установлены в нескольких тысячах зданий, и они дают информацию об изменении дефор-

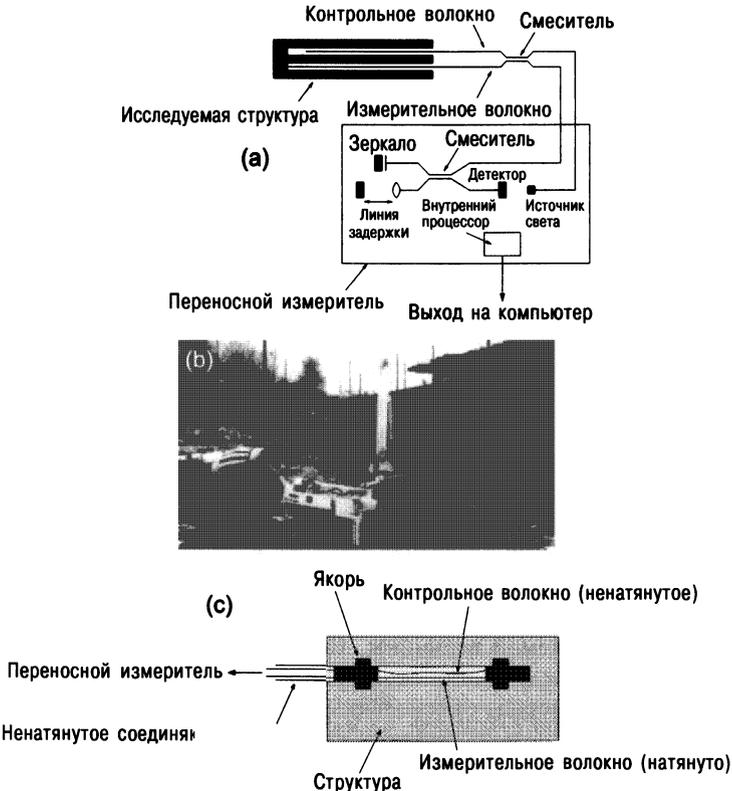


Рис. 2.9. Датчик для контроля конструкций в гражданском строительстве: (а) – общая схема; (б) – фотография работающий в Швеции датчика; (с) – схема чувствительного элемента.

магии (рис. 2.9). Их используют, например, для контроля дополнительной нагрузки на полотно автодороги, обусловленной строительством моста, для исследования роста трещин в древних церквях, для оценки степени сохранности дамб и т.д. Эта система работает на очень простом оптическом методе, а именно интерферометрии белого цвета. Для этого при помощи волоконного интерферометра измеряется разность оптического пути между измерительным волокном и термостабилизированным контрольным волокном. Точность измерения при этом ограничена длиной световой волны. Изменение положения нескольких соседних интерференционных максимумов возникает из-за механической деформации волокна. Измерения в течение нескольких лет подтвердили общую устойчивость систем, деформация которых не превышала нескольких микрон.

Бриллюэновская дифракция света на акустической волне является нелинейным эффектом. Главной особенностью бриллюэновского рассеяния является четкая связь между сдвигом частоты отраженной назад световой волны и длиной акустической волны. Акустическая волна представляет собой фазовую дифракционную решетку. В фазовой решетке период дифрагированной световой волны равен половине длины акустической волны (рис. 2.10). Для большинства оптических волокон, работающих вблизи инфракрасного края излучения, сдвиг по частоте равен 12–15 ГГц. Из величины сдвига и длины оптической волны можно очень точно определить скорость акустической волны. Сдвиг частоты изменяется по длине волокна, и поэтому в конечном счете можно вычислить зависимость скорости звука от длины. Известно, что скорость продольной акустической волны определяется модулем Юнга, плотностью и локальной деформацией, причем первые две характеристики зависят от температуры. В результате мы получаем карту, описывающую температуру и деформацию волокна. Достоинством этой методики является то, что длина контролируемой области может достигать многих

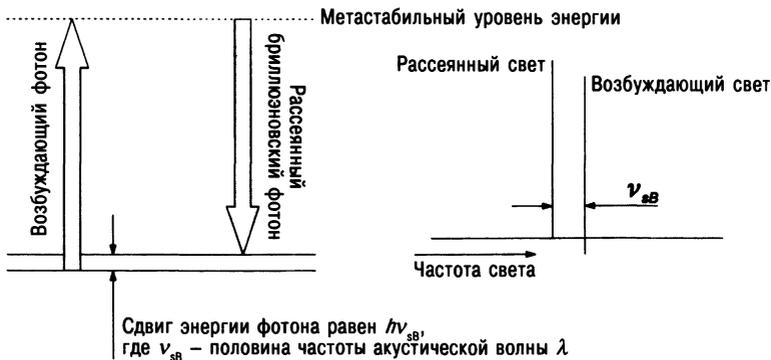


Рис. 2.10. Рассеяние света на интерференционной решетке.

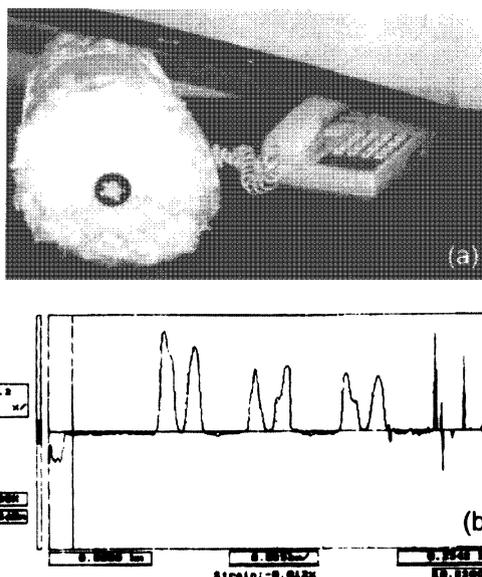


Рис. 2.11. Оптическая кордная нить контролирует степень изношенности морских канатов: (а) — нить введена в 1000-тонный канат; (б) — работа мультислоночного датчика в экспериментальной кордной нити.

километров. Она позволяет, например, контролировать устойчивость грунта в сейсмоопасных областях или определять степень надежности высокопрочных морских канатов, применяемых для крепежа якорей и буксировки судов (рис. 2.11). Бриллюэновский зонд определяет степень поврежденности каната, что позволяет избежать его разрушения. Он также позволяет использовать якорь максимально долго, избегая дорогостоящей замены каната без особой необходимости во время планового технического обслуживания.

Информация, получаемая распределенными датчиками, основанными на интерференции света, находит и другие применения. Например, измерение температуры методом рамановского рассеяния позволяет определить распределение температуры по длине волокна. Этот метод используют в промышленных процессах и в системах пожарной сигнализации в тоннелях.

Возможно использование распределенных датчиков в химической промышленности. Интересным примером является контроль утечки нефти из трубопроводов и баков. В этом случае датчиком является тонкая пленка специального химического состава, которая набухает при контакте с контролируемой жидкостью. Набухание вызывает микроизгиб волокна, который регистрируется методом оптического преломле-

ния (рис. 2.12). Правильный выбор рабочего материала (обычно полимерного), его подготовка и приклеивание к поверхности субстрата позволяют создать систему химического контроля, которая остается стабильной после нескольких лет работы и нескольких сотен циклов смачивания.

Оптические волокна, возможно, являются наиболее удобными датчиками для новых интеллектуальных систем. Это обусловлено легкостью получения множества сигналов при помощи распределенных дифракционных решеток, а также огромными возможностями передачи сигнала через поверхности раздела между контролируемой структурой и волокном. Оптические волокна имеют и дополнительные преимущества, связанные с возможностью контроля различных физических и химических параметров, хотя при этом требуется компенсация температурных эффектов.

Волоконные сенсоры особенно удобны, когда требуется большое количество точек измерения, распределенных по различным участкам конструкции. В конечном счете главным критерием для использования волокон является соотношение цена/свойства, учитывающее специфические особенности контролируемой конструкции. Технические параметры волоконных датчиков чрезвычайно высоки, но немалой является и стоимость такого контроля, и поэтому оценка эффективности их применения достаточно сложна. Тем не менее во многих случаях его применение оправдано, несмотря на относительно большую стоимость.

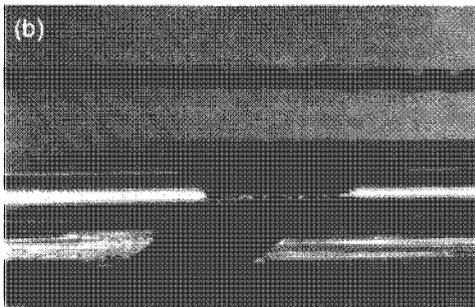
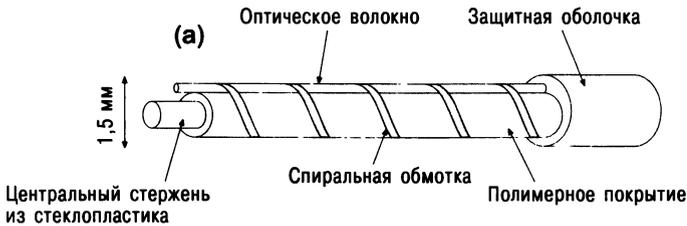
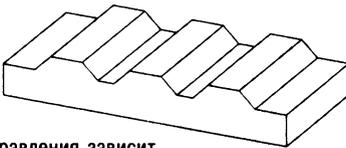


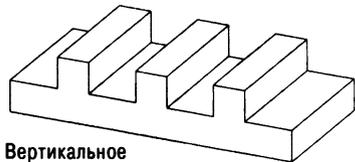
Рис. 2.12. Распределенный датчик, контролирующий утечку углеводородов или воды: (a) — принципиальная схема; (b) — микрофотография.

2.3.4. Микроэлектромеханические системы

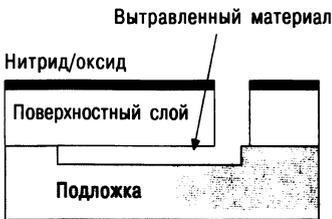
Термин «МЭМС» переводится как «микроэлектромеханические системы». К ним относятся и микромеханические датчики. По существу, их получение основано на модификации метода фотолитографического создания плоских и пространственных структур. Фотолитография – это целая группа процессов, среди которых есть простые типа фотокопирования и более сложные, например лазерная запись. Фотокопирование позволяет создать на обрабатываемом изделии некоторую структуру. Она может быть как двумерной, т.е. представлять собой некоторое изображение, так и трехмерной. Эти структуры обычно получают химическим травлением, однако иногда используют и дополнительные приемы. Например, лазерный, электронный или ионный пучок, ускоряющий скорость химической реакции. Отметим, что скорость травления может сильно зависеть от наличия допирующих добавок. Кроме того, на скорость травления могут влиять свойства кристаллической подложки. Список способов травления можно пополнить влажным и сухим травлением, фотопроцессами и т.д. На практике получаемые травлением структуры обычно являются двумерными и имеют большую площадь в плоскости подложки при относительно небольшой толщине (рис. 2.13). Напротив, методом LIGA, использующим ядерную радиацию, можно создавать неплоские призматические структуры в направлении, перпендикулярном плоскости подложки.



Скорость травления зависит от направления – в плоскости (111) она минимальна. Этот процесс широко используется для изготовления кремниевых диафрагм



Вертикальное травление. Для получения неглубоких канавок (~ 1 мкм) производится облучение ионным пучком, для получения глубоких канавок используется LIGA-процесс, а для получения промежуточных глубин используется анизотропия травления



Наличие легко травимого материала позволяет создать гибкие элементы

Рис. 2.13. Принцип создания МЭМС-структур.

Основой большинства микромеханических изделий является кремний. Кремний имеет прекрасные механические свойства. Он прочнее стали и имеет очень высокую температуру плавления. В последнее время появились полимерные и металлические МЭМС-структуры, но пока они почти не применяются. Потому мы будем рассматривать лишь кремниевые системы. В настоящее время предпринимаются попытки объединения в одном микрочипе миниатюрной механической конструкции и кремниевой электросхемы. Создать в одном технологическом процессе одновременно микромеханическую конструкцию и микросхему удастся очень редко. Как правило, две части детали делают в двух технологических процессах, после чего их объединяют.

Механические датчики должны давать электрический сигнал. Имеется лишь несколько механических явлений, которые могут создать электрический сигнал:

- взаимное смещение двух частей конструкции;
- резонансные колебания структуры.

Реметим, что смещения и колебания могут возникать при изменении температуры или внешней нагрузки (рис. 2.14). До сих пор все описанные в литературе микромеханические датчики основаны лишь на этих двух явлениях, а именно на изменении резонансной частоты или появлении электрического сигнала при смещении двух частей измерительного элемента. Имеется два процесса, приводящих к возникновению электрического сигнала. Первый состоит в изменении электрического сопротивления термопары при изменении деформации или температуры. Этот принцип широко используют в микромеханических датчиках уже более 20 лет. Второй основан на изменении электрической емкости двух параллельных плоскостей, одна из которых может перемещаться. В некоторых ситуациях движение может быть обнаружено оптически, что позволяет комбинировать тензодатчики и оптические волокна. Хотя этот метод кажется привлекательным, на практике он применялся не слишком широко.



Рис. 2.14. Методы модуляции МЭМС-датчиков: модуляция по координате и модуляция резонансной частоты.

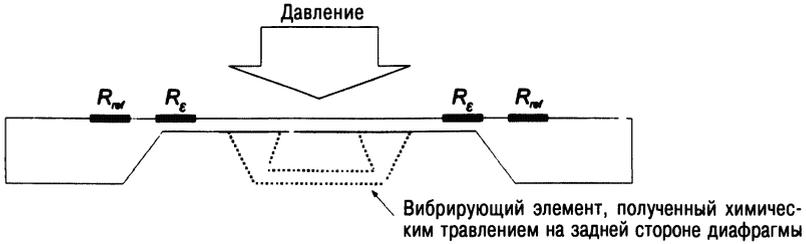


Рис. 2.15. Примеры МЭМС, использующих пьезосопротивление и вибрирующие элементы на диафрагмах давления. Сопротивления $R_{отн}$ и R образуют мостовую схему. $R_{отн}$ — контрольное сопротивление; величина R зависит от деформации. Деформация мостовой перемычки зависит от давления на диафрагму. Резонансная частота зависит также от температуры. Сопротивления имеют температурную компенсацию.

Первый широко используемый сенсор, основанный на кремниевой МЭМС, представлял собой диафрагму, на краю которой, т.е. в области больших деформаций, размещали пьезорезисторы. Во втором методе к измерительной диафрагме крепили механический резонатор в форме мостовой перемычки, как показано на рис. 2.15. Изгиб диафрагмы вызывает изменение силы натяжения перемычки и, как следствие, изменение ее резонансной частоты. Это позволяет достичь более высокой точности и устойчивости работы измерительного элемента по сравнению с пьезорезисторным методом, причем технологические этапы его создания остаются практически теми же.

Измерением резонансной частоты вибратора (рис. 2.15) можно контролировать любой внешний параметр, изменяющий силу растяжения перемычки, в том числе и температуру, поскольку различие коэффициентов теплового расширения вибрирующей перемычки и основания изменяет величину растягивающей силы. С другой стороны, при правильном выборе материалов можно практически полностью избавиться от температурной чувствительности датчика, что увеличивает точность измерения других физических параметров. При помощи такой микроструктуры можно измерять скорость струи газа, действующего на мембрану или измерительную перемычку. Кроме того, измерения можно проводить, нанося на перемычку химически активное покрытие, изменяющее ее размеры или массу под действием химических реакций или адсорбции.

На центральную область вибрирующего чувствительного элемента можно поместить массу. В результате сила натяжения перемычки будет зависеть от величины ускорения в направлении, перпендикулярном плоскости перемычки (рис. 2.16). Акселерометр может определять направление ускорения, если сделать перемычку намного более жесткой в перпендикулярном направлении. Акселерометр можно использовать в системе управления, создав «обратную связь» с источником ускоряю-

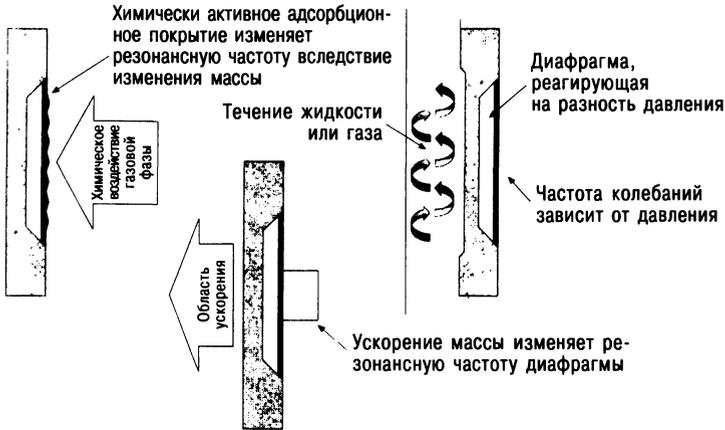


Рис. 2.16. Изменение резонансной частоты моста текущей жидкостью, ускорением, химическими реакциями и т.д.

шей силы. При этом он может иметь также форму балки. Достоинством кремния является исключительная линейность, без сколько-нибудь существенного механического гистерезиса.

Большой интерес представляют также МЭМС на основе гироскопического измерительного элемента. Принцип их работы основан на действии кориолисовой центробежной силы. Эта сила модулирует резонансную частоту колебаний вращающегося элемента в форме кольца или бокала (скорость вращения нужно измерить). Сила Кориолиса приводит к различному изменению резонансных частот по двум направлениям в плоскости вращения, причем разность резонансных частот пропорциональна скорости вращения. Одним из достоинств таких гироскопов является отсутствие вращающихся подшипников. МЭМС с колебательным элементом в форме бокала разрабатывали по крайней мере 25 лет, но несмотря на это он не нашел широкого применения до сих пор. Это обусловлено тем, что для получения высокой чувствительности необходима чрезвычайно высокая точность производства деталей. Производство осуществляется с допусками до сотен или даже тысяч слоев кремния, но чувствительность датчика ограничена малой массой. Тем не менее микромеханический кремниевый гироскоп еще не раскрыл весь свой потенциал.

В интеллектуальных структурах МЭМС дополняют и отчасти конкурируют с волоконными датчиками. МЭМС-датчики очень малы, а их положение точно известно. При этом в одном чипе можно разместить несколько датчиков, выполняющих различные измерения. Эта особенность датчиков используется пока мало, несмотря на очевидный потенциал применения, например в медицине. МЭМС-датчики потенциально недороги, и их стоимость определяется в основном стоимостью

корпуса, необходимостью проведения тестирования и сертификации. Они могут использоваться в разнообразных устройствах, например в акселерометрах и автомобильных воздушных подушках безопасности.

В настоящее время МЭМС используются в интеллектуальных структурах очень редко. Между тем они имеют множество достоинств. В частности, они имеют размеры порядка долей миллиметра и способны работать при очень высоких температурах. Информацию с них можно считывать оптически или передавать по миниатюрному электроканалу связи. Еще одним их преимуществом является возможность обеспечения очень быстрого реагирования, за время порядка долей микросекунды.

Можно отметить, что МЭМС-датчики, в отличие от волоконно-оптических, особенно удобны для контроля поведения небольших устройств. Уже реализованы системы, исследующие отдельные участки поверхности кристаллов. Это возможно благодаря малости МЭМС-датчиков. Они применяются и в медицинских целях. Тем не менее до сих пор используется лишь малая доля их потенциала, и область широкого применения МЭМС-систем еще не найдена. Наиболее перспективным выглядит их применение в медицине, биологии, экологии и производстве высокоточного оборудования.

2.3.5. Пьезокерамики и пьезоэлектрические полимеры

В датчиках из пьезоэлектрических материалов напряжения или деформации приводят к появлению электрического заряда на двух поверхностях, что проявляется в виде разности электрического потенциала (рис. 2.17). Наиболее широко применяют циркониевые и титановые пьезоэлектрические керамики. На втором месте стоят пьезоэлектрические полимеры, как правило ПВДФ. Кроме них, используют пьезоэлектрики из титаната бария, ниобата лития и окиси цинка.

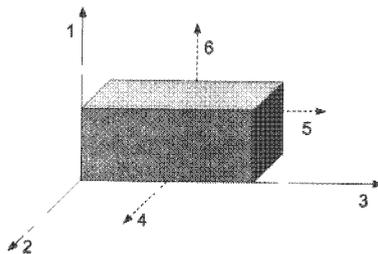


Рис. 2.17. Принцип действия пьезоэлектрика. Оси приложения напряжения (1, 2, 3) и плоскости сдвига (4, 5, 6). Сдвиговые или осевые напряжения приводят к возникновению электрического поля. Механические напряжения и электрическое поле связаны тензором пьезоконстант. Обычно, хотя и не всегда, электрическое поле направлено вдоль оси нагрузки.

Пьезоэлектрические сенсорные системы можно использовать совместно с МЭМС и оптоволоконными датчиками. Отметим, что они могут решать обратную задачу, преобразуя электрическое поле в механическое напряжение, возбуждая ультразвуковую волну. Пьезоэлектрические полимеры наносят на волокна для измерения величины электрического поля, а некоторые материалы, преимущественно окись цинка, используют как источники и датчики ультразвука совместно с МЭМС. Кристаллические пьезоэлектрики вроде ниобата лития и пьезокерамик также использовали в качестве источников и датчиков ультразвука в не слишком маленьких МЭМС.

В интеллектуальных системах пьезоэлектрики применяют в следующем качестве (рис. 2.18):

- детекторов давления или деформации, обычно пьезокерамических;
- датчиков, дающих интегральную информацию о поведении целой области. Как правило, их делают из пьезополимера;
- сенсоров, которые с помощью микроканалов связи информируют о давлении во многих точках поверхности. Для этого используют полимерные пленочные пьезоэлектрики.

Отметим, что в настоящее время область применения пьезоэлектриков интенсивно расширяется.

2.3.6. Поверхностные пленки и нити

Сенсоры в виде поверхностного покрытия известны уже достаточно давно. Например, покрытия, изменяющие цвет под действием внешнего воздействия. Обычно такие покрытия и аналогичные им ткани не позволяют получить точной количественной информации. Однако часто требуется лишь качественная информация о достижении контроли-

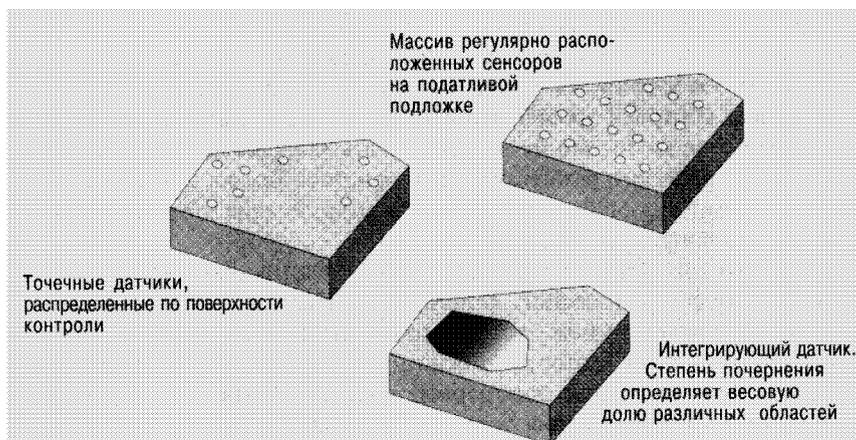


Рис. 2.18. Точечные, регулярно распределенные и усредняющие с учетом веса пьезодатчики.

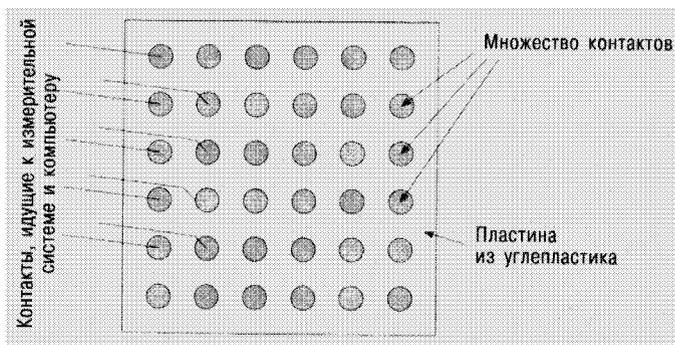


Рис. 2.19. Измерение сопротивления углеродных волокон в углепластике для оценки степени его поврежденности.

руемым параметром порогового значения, а в некоторых случаях соответствующий анализ качественных характеристик может дать количественный результат. В инженерном смысле пленки и нити являются плохими датчиками, но именно так биологические системы получают всю информацию, кроме визуальной и акустической.

Возможно, самый известный пример таких систем – это трикотажная рубашка, которая становится красной, когда ее температура приближается к температуре тела. Этот случай стал объектом многих, не всегда вежливых, комментариев. В технических изделиях специальные краски и покрытия используют для обнаружения места поверхностного воздействия («синяков») и выявления достижения некоторого порога температуры. Большинство так называемых интеллектуальных красок используют химические реакции в полимерах, в результате которых появляются пигменты, изменяющие цвет поверхности после теплового или механического воздействия.

Углеродные волокна изменяют сопротивление под действием деформации, что характерно для пьезорезисторов. Это свойство используют для контроля уровня деформации в углепластике. Использование волокон для контроля уровня напряжения имеет очевидные преимущества несмотря на то, что их нельзя назвать «хорошими» инженерными датчиками в связи с разбросом характеристик. Тем не менее они дают очень полезную качественную информацию, анализ которой характеризует состояние структуры.

Резистивные полимерные нити дают аналогичную информацию о состоянии гибких и жестких конструкций. Полимерные нити вводят в ткани и с помощью множества электродов на концах волокон получают сенсорную систему, которую можно приклеивать к структурам любой формы. Чувствительные полимерные волокна можно вводить и в волокнистые композиты типа углепластиков. Однако в этом случае температура отверждения полимерной матрицы должна быть не слишком высокой, чтобы не испортилось чувствительное полимерное волокно.

Такие датчики по своему действию напоминают биологические сенсоры. В отличие от оптоволоконных датчиков и МЭМС, которые после калибровки имеют одинаковые характеристики, свойства каждой ткани индивидуальны и ее нужно калибровать. Конечно, современные программы систем контроля, по крайней мере в случае тканых и волоконных сенсоров, довольно просты и несовершенны. Для них требуется или предварительная калибровка готового изделия, или дополнительные сенсоры для контроля основных параметров в отдельных точках конструкции. В настоящее время именно эту возможность считают наиболее перспективной, однако используют ее пока мало.

Диапазон применения сенсорных волокон и покрытий огромен. В перспективе они будут использоваться в медицине. Например, при медицинском осмотре вместо системы накладываемых электродов можно одевать интеллектуальный трикотажный костюм или повязку. Аналогично, для лечения поврежденного сустава или конечности в интеллектуальный протез может быть встроена система преобразователей. Это направление исследований имеет большой потенциал (рис. 2.19 и 2.20).

2.4. Заключение

Прежде всего, интеллектуальная структура должна получить информацию. В данной главе мы попытались описать сенсоры, дающие исходные данные. Возможно, дальнейшее развитие сенсорных систем будет ориентировано не на использование компьютеров, а на копирование принципов действия биологических объектов.

Сейчас трудно или даже невозможно определить, какое направление развития будет преобладать. Однако, независимо от особенностей конкретной контролируемой структуры, датчики желательно рассматривать как ее составную часть, а не дополнение к ней. Комплексный подход

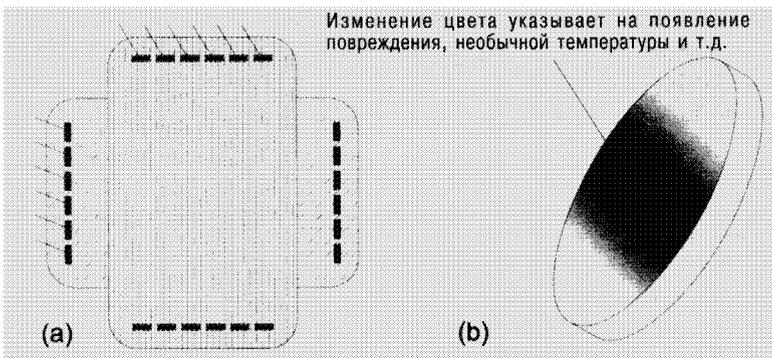


Рис. 2.20. Интеллектуальная ткань (а) и интеллектуальная краска (б) для полуколичественного контроля состояния поверхности.

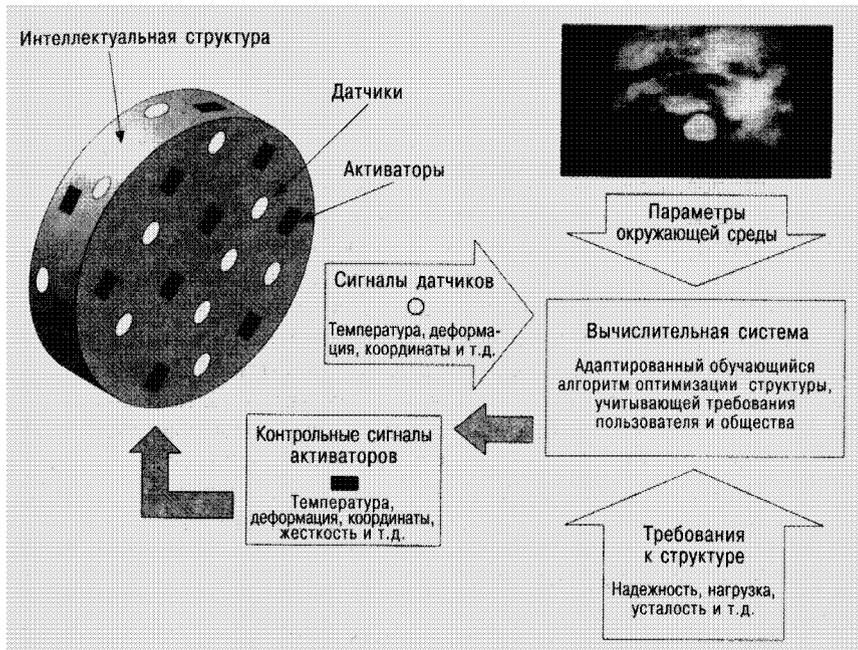


Рис. 2.21. Интеллектуальная структура, способная к обучению и ответным действиям.

важен при проектировании любой структуры, будь то интеллектуальный трикотажный костюм или подвесной мост. При этом считывание информации, принятие решения и действия должны подчиняться некоторому набору простых эксплуатационных критериев.

В этой главе мы попытались представить краткий обзор методов получения информации при помощи сенсорных систем и дали представление о важности процедуры обработки сигнала. Кроме того, мы обсудили перспективы развития сенсорных технологий. И можно надеяться, что в этой области нас ожидают новые открытия и интересные разработки.

М. Фрисвелл

Д. Инман

3.1. Введение

Все конструкции испытывают воздействие вибрации. В робототехнике, автомобилях и особенно космических аппаратах вибрация нежелательна, поскольку она может привести даже к разрушению конструкции. Разрушение может произойти в результате постепенного роста усталостной трещины, а при большой амплитуде колебаний и путем ее быстрого распространения вследствие неспособности материала противостоять возникающим напряжениям. Однако и при отсутствии разрушения вибрация нежелательна из-за возникающего шума. Иногда конструкции делают более жесткими для уменьшения деформаций и смещения резонансных частот структуры за пределы интервала возбуждающих частот. Для подавления вибраций обычно используют демпферы, подобные автомобильным амортизаторам. Однако они тяжелы и имеют слишком большие размеры, вследствие чего в интеллектуальных структурах их применение весьма ограничено.

Общей тенденцией развития техники является создание более легких и энергетически эффективных космических аппаратов, автомобилей и самолетов. При этом снижается жесткость структуры и, как следствие, увеличивается амплитуда колебаний. В этой главе обсуждаются методы уменьшения амплитуды колебаний облегченных конструкций и использование с этой целью интеллектуальных структур.

Что можно считать интеллектуальной структурой и как она может контролировать и бороться с нежелательными колебаниями? В интеллектуальной структуре устройства контроля колебаний должны быть небольшими, чтобы не изменялся внешний вид конструкции. Это ограничивает использование крупных датчиков и амортизаторов. Датчики измеряют реакцию структуры на внешнее воздействие, и после обработки поступающего сигнала система производит электрические сигналы, запускающие силовые приводы (преобразователи) для противодействия колебаниям. В последнее десятилетие значительные усилия были затрачены на разработку интеллектуальных структур и материалов. В этой главе обсуждаются лишь основные направления таких исследований. Более подробную информацию можно получить в прилагаемом списке литературы.

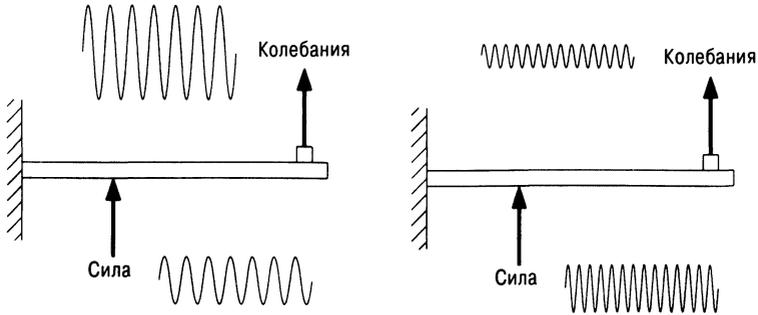


Рис. 3.1. Реакция структуры на синусоидальную возбуждающую силу.

Ниже будут введены основные понятия теории колебаний. Это необходимо для понимания природы колебаний и, как следствие, методов борьбы с ними. Рассмотрены лишь основы, а для более подробного знакомства с теорией колебаний можно использовать монографии [15, 1]. В параграфе 3.2 рассмотрены типичные системы датчиков и силовых преобразователей. Весьма подробно рассмотрены пьезоэлектрические датчики, используемые наиболее широко. Можно использовать и другие типы датчиков, дополнительная информация о которых приведена в следующих главах. Затем приведен обзор методов контроля колебаний. В параграфе 3.4 описаны примеры использования интеллектуальных структур для борьбы с колебаниями.

3.1.1. Динамическое поведение структуры

С колебаниями знакомы все, кто знает, что такое вибрация автомобиля или стиральной машины. Вынужденные колебания обусловлены реакцией системы на действие периодической силы (например, вызываемой двигателем автомобиля или вращением несбалансированного барабана стиральной машины). Удивительно, но при синусоидальной возбуждающей силе (которая имеет единственную частоту) в линейной системе возбуждаются колебания лишь той же самой частоты. Мы рассмотрим лишь линейное поведение конструкций, которое типично для широкого класса космической, автомобильной и другой техники, особенно при небольшой амплитуде возбуждающей силы. Рисунок 3.1 демонстрирует реакцию системы на действие синусоидальной силы. Что произойдет, если частота возбуждающей силы изменится, а ее амплитуда останется прежней? В этом случае частота вынужденных колебаний станет равной новой частоте возбуждающей силы, а амплитуда колебаний изменится. Это иллюстрируется рис. 3.1.

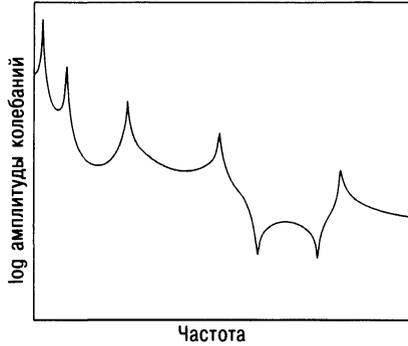


Рис. 3.2. Частотная характеристика структуры.

Предположим теперь, что мы измерили амплитуду возникших колебаний в широком интервале возбуждающих частот. Типичный результат таких измерений показан на рис. 3.2. Зависимости такого типа называют частотными характеристиками. Максимумы на частотной характеристике называют резонансными пиками, а соответствующие им частоты — резонансными или собственными частотами. Если частота возбуждающей силы соответствует резонансной частоте структуры, то даже небольшая возбуждающая сила может вызвать колебания большой амплитуды. Если к структуре приложить некоторую силу, а затем ее убрать, возбуждается набор колебаний собственных частот.

Демпфирование приводит к потере энергии колебаний, в результате чего они постепенно затухают. Демпфирование может быть обусловлено многими причинами, и часто его очень сложно моделировать. Для анализа потерь энергии проще всего рассмотреть вязкое трение, при котором величина демпфирующей силы пропорциональна скорости. Моделью вязкого демпфера описываются автомобильные амортизаторы

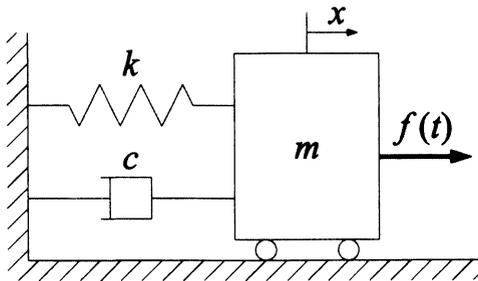


Рис. 3.3. Модель, описывающая реакцию системы с одной степенью свободы на внешнюю переменную силу.

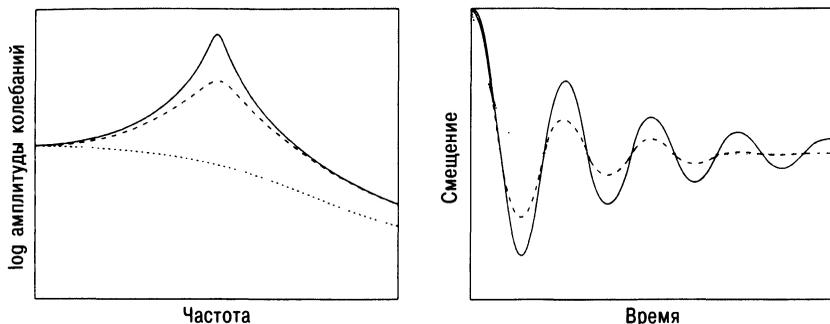


Рис. 3.4. Частотная характеристика колебательной системы при декрементах затухания, равных 10% (сплошная линия), 25% (штриховая) и 100% (пунктирная).

ры. На рис. 3.3 представлена простейшая модель, состоящая из массы, пружины и жидкостного демпфера. Эта модель описывает реакцию системы с одной степенью свободы на внешнюю периодическую силу.

Количество степеней свободы соответствует числу независимых координат, которые требуются для полного определения состояния системы (в данном случае оно равно единице). На рис. 3.4 представлены частотная характеристика и зависимость смещения от времени при трех различных значениях коэффициента затухания. Увеличение потерь приводит к уменьшению амплитуды резонансных колебаний и более быстрому затуханию колебаний. При контроле колебаний демпфирование имеет первостепенное значение. Уровень потерь обычно описывают безразмерным параметром, равным отношению величины потерь к их критическому значению, при котором движение перестает быть колебательным, как показано на рис. 3.4.

3.1.2. Гармонический анализ колебаний

При анализе колебаний важно знать, как структура вибрирует на ее собственных резонансных частотах. Рисунок 3.5 демонстрирует амплитуду колебаний в различных точках консоли (балки, закрепленной на одном ее конце) при трех первых резонансных частотах. Толстые линии демонстрируют величину максимального смещения в зависимости от положения точки измерения. Смещение считается положительным, если точка движется в том же направлении, что и возбуждающая сила, и отрицательным, если в противоположном. Кривые соответствуют частотам, которые немного ниже резонансной. Резонансные колебания различной частоты имеют различную форму смещения и называются гармониками или модами колебаний. Форма гармоники описывает движение структуры в пространстве. Гармоники характеризуются час-



Рис. 3.5. Гармоники колебаний консольной балки.

тотой, декрементом затухания и формой. Они являются элементарными «кирпичиками», из которых состоят колебания системы. Простейшая колебательная система состоит из массы, пружины и демпфера («поршня»), как показано на рис. 3.3. Эта система имеет только одну собственную резонансную частоту. Колебания структуры с несколькими независимыми степенями свободы являются суммой соответствующих колебаний, а движение в каждой из них описывается моделью, состоящей из массы, пружины и демпфера.

Гармонический анализ структуры состоит из трех основных операций. Первая заключается в определении компоненты силы, соответствующей каждой гармонике колебаний, исходя из общей действующей силы. Для этого необходимо знать форму гармоники. Если возбуждающая сила приложена к узлу колебаний (смещение в котором отсутствует), то эта гармоника возбуждаться не будет. Напротив, если сила приложена к пучности, где смещения максимальны, то гармоника будет иметь наибольшую амплитуду. Рисунок 3.6 демонстрирует это утверж-

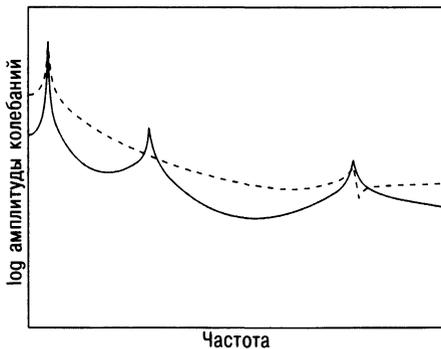


Рис. 3.6. Влияние частоты и положения точки приложения возбуждающей силы на амплитуду колебаний консольной балки. Сила приложена в точке, удаленной на одну четверть (сплошная линия) и три четверти длины балки от точки заделки (штриховая линия).

дение для случая консольной балки. Амплитуда измеряется в конце балки, возбуждаемой на некотором удалении от точки закрепления (сплошная линия) и вблизи узла второй гармоники (штриховая линия). Если балка возбуждается в узле второй гармоники, то резонанса нет, и соответствующий максимум на штриховой кривой отсутствует.

После описанной выше процедуры рассматривают поведение модели, описывающей каждую гармонику. Затем смещения суммируются с учетом формы всех гармоник. Отметим, что нулевые смещения в узле некоторой гармоники не являются доказательством ее отсутствия в спектре колебаний, что иллюстрируется рис. 3.5. Вся процедура *частотного анализа*, состоящая в разложении колебаний на отдельные гармоники, иллюстрируется рис. 3.7.

3.2. Датчики и электромеханические преобразователи

Активные структуры измеряют реакцию системы на внешнее воздействие, производят вычисления, основанные на этих измерениях, и вызывают появление сил, снижающих амплитуду колебаний. Очевидно, датчики, измеряющие амплитуду колебаний, и устройства, вызывающие появление сил (силовые приводы или пьезокерамические электромеханические преобразователи), являются важнейшими частями системы управления интеллектуальной конструкции. В интеллектуальных

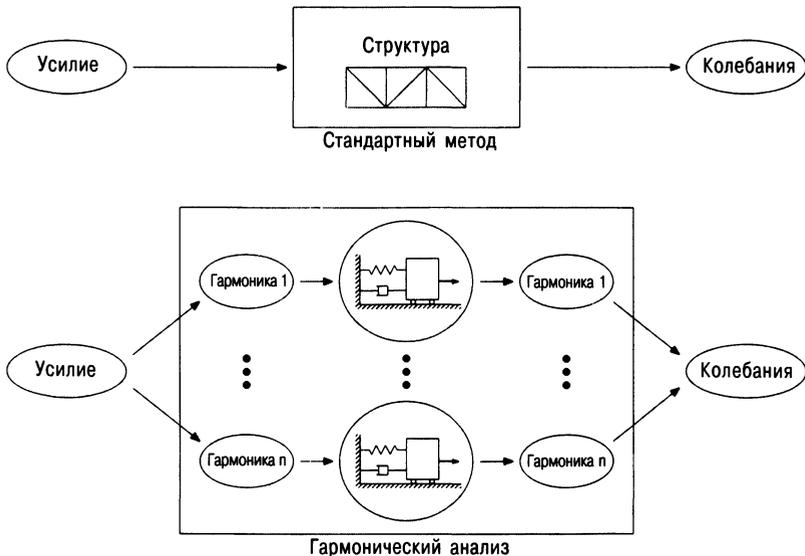


Рис. 3.7. Гармонический анализ колебаний структуры.

структурах датчики и электромеханические преобразователи должны быть небольшими и входить в их конструкцию, что накладывает ограничения на их выбор. Хотя существует множество различных датчиков и механических приводов, которые могут использоваться в интеллектуальных структурах, ниже основное внимание будет уделено пьезодатчикам и пьезопреобразователям. Они относительно просты в эксплуатации и могут быть встроены в конструкцию практически любого изделия. Аналогичные устройства других типов описаны в последующих главах этой книги.

Под действием внешней силы на поверхности пьезоэлектрика появляются электрические заряды. Если пьезоэлектрик в отсутствие внешних сил поместить в электрическое поле, его размеры изменятся. Таким образом, пьезоэлектрик можно использовать и как датчик, и как силовой привод, выполняющий обратное действие. Реакция датчика на электрическое поле и механическое воздействие зависит от его размеров и физических характеристик материала (в частности, пьезоконстант, описывающих связь механических и электрических характеристик). Главной проблемой при использовании пьезоэлектрических преобразователей является малая величина удлинения. Поэтому тонкие пластинки пьезоэлектрика желательно размещать вдали от средней плоскости изгибаемой балки так, чтобы деформация пьезопреобразователя привела к ее максимальному изгибу. Это схематически показано на рис. 3.8. Для создания электрического поля на поверхность пьезоэлектрической пластины наносят два тонких слоя проводящего металлического покрытия. Электромеханические преобразователи обычно делают из пьезокерамики, а датчики могут быть сделаны из керамического или полимерного материала.

Выше рассматривалось использование пьезоэлектриков в качестве электромеханических преобразователей. Размещение датчиков и преобразователей (пары сенсор – привод) в одном и том же месте структуры имеет несколько преимуществ. Главным является устойчивость работы регулируемой системы для всех гармоник (в широком диапазоне собственных частот). В случае плоских структур датчик можно

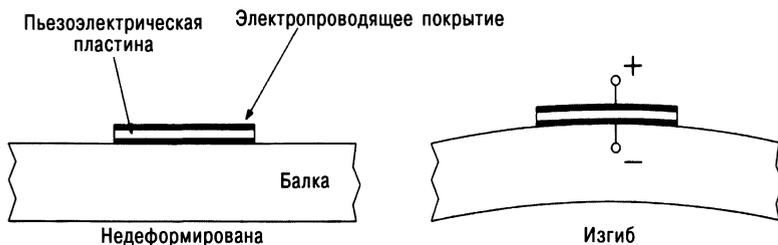


Рис. 3.8. Действие пьезоэлектрического преобразователя.

монтировать на одной поверхности, а электромеханический преобразователь — на противоположной. Однако датчики и преобразователи можно размещать и в различных местах. Еще одна возможность состоит в использовании одного элемента и в качестве датчика, и в качестве привода. Такие элементы называют *самосчитывающими пьезопреобразователями* [3].

3.3. Активный контроль структур

Выше отмечалось, что конструкция может иметь сложное динамическое поведение, и для активного воздействия на нее необходим набор датчиков и электромеханических преобразователей. Датчики измеряют деформацию структуры, а электромеханические преобразователи создают силы, подавляющие колебания. Если силы являются следствием произведенных датчиками измерений, то мы имеем систему управления с *обратной связью*. Эти силы влияют на поведение системы, изменяя показания датчиков. Про такие системы говорят, что они имеют *замкнутый контур управления* или просто *замкнутый контур*. В отсутствие обратной связи их называют системами управления с *открытым контуром*.

Простейшей иллюстрацией системы управления может служить автомобиль, движущийся по прямой улице. Датчиками являются глаза водителя, которые следят за дорогой, а силовым приводом — руки. В открытом контуре управления руль должен быть установлен так, чтобы колеса автомобиля были строго параллельны улице. Если в начальный момент времени автомобиль двигался вдоль улицы, то и дальше он будет двигаться вдоль нее. Однако маловероятно, что начальное положение автомобиля было строго параллельно улице. Кроме того, улица может иметь боковой наклон, возможен боковой ветер, а улицы практически никогда не являются прямыми. По этим причинам без замкнутого контура управления автомобиль довольно быстро столкнется с фонарным столбом. Управление в данном случае осуществляет водитель. Он следит за положением автомобиля и поворачивает руль, чтобы автомобиль оставался на дороге. Такая система управления с обратной связью обеспечивает успешное движение автомобиля по дороге, несмотря на наличие поворотов и внешние воздействия.

Как сильно нужно повернуть руль, если датчик выдает некоторый сигнал, указывающий на отклонение от правильного направления? Отношение величины управляющей силы к величине сигнала датчика называют *коэффициентом усиления* системы управления. Если руль поворачивают *несильно* (небольшой коэффициент усиления), для коррекции ошибки потребуется большое время. С другой стороны, если его повернуть *излишне сильно* (большой коэффициент усиления), реакция системы будет очень резкой, и угол отклонения колес от нулевого положения изменит знак. В результате движение автомобиля станет колебательным.

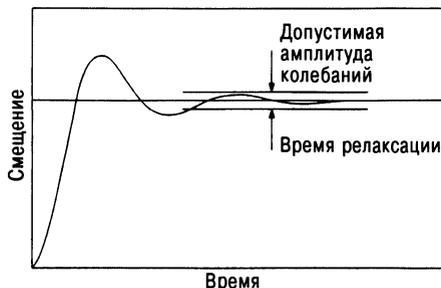


Рис. 3.9. Переходная характеристика замкнутой системы.

Рисунок 3.9 демонстрирует реакцию автомобиля на внезапное ступенчатое изменение его направления в этом случае. Поведение является колебательным вследствие очень резкой реакции системы на изменение внешних параметров. Характеристикой скорости реакции системы является *время релаксации*, за которое при ступенчатом изменении координаты отклонение снижается в заданное количество раз (обычно до 2 или 5% от исходной величины). Если продолжать увеличивать коэффициент усиления, то в некоторый момент амплитуда колебаний начнет расти. Такое поведение системы, называемое неустойчивым, иллюстрируется рис. 3.10. Неустойчивое поведение замкнутой системы управления, очевидно, крайне нежелательно и его следует избегать любой ценой.

3.3.1. Контроль отдельных гармоник колебаний

Существует множество параметров, влияющих на рабочие характеристики активной системы управления. Очень важно, чтобы датчики точно измерили амплитуду колебаний структуры, а электромеханические преобразователи создали соответствующую управляющую силу. Для их характеристики вводят понятия наблюдаемости и *управляемости* [14]. Для контроля системы необходимо знать, как ведет себя система при резонансных частотах. В параграфе 3.1.2 отмечалось, что датчик, помещенный в узел некоторой гармоники, не может влиять на ее амплитуду. Поэтому для описания поведения всех гармоник необходимо увеличивать количество датчиков. Кроме того, если балка может изгибаться в горизонтальной плоскости, такой изгиб не регистрируется датчиками, измеряющими деформацию в вертикальной плоскости. Аналогично, если электромеханический преобразователь создает силу в узле некоторой гармоники, то она гасится не будет, и при помощи этого преобразователя управлять данной гармоникой невозможно. В то же время использование двух или нескольких правильно размещенных преобразователей позволяет управлять большинством гармоник. Очевидно, что для замкнутого контура управления большое значение имеет форма гармоники.

Работа системы управления основана на анализе влияния управляющих сил на отдельные гармоники колебаний структуры. Обычно на основании сигнала датчиков определяют амплитуду отдельных гармоник, а управление основано на воздействии создаваемых электромеханическими преобразователями сил на каждую гармонику. Управляющие усилия создают систему сил, действующих на структуру. Амплитуды гармоник вычисляют, исходя из сигналов нескольких датчиков, учитывая форму гармоник и местоположение датчиков. Альтернативный способ состоит в обработке сигналов, полученных при различных частотах колебаний. Вместо множества датчиков можно использовать один датчик, сделанный из пьезоэлектрической пленки, способной производить пространственное фильтрование сигнала [7].

После размещения датчиков и электромеханических преобразователей необходимо определить алгоритм создания управляющих сил, вычисленных на основе измеренных амплитуд колебаний. Если датчики и преобразователи сгруппированы в пары, то самый простой способ управления состоит в создании преобразователем силы в ответ на величину получаемого сигнала (одноприводный регулятор). Второй путь состоит в анализе сигнала нескольких датчиков и определении управляющих сил для всей системы преобразователей, что называют мультиприводным регулированием. Очевидно, что первый способ регулирования гораздо проще, а второй, если он работает правильно, должен быть более эффективным.

3.3.2. Демпфирование

В принципе одноприводный регулятор аналогичен амортизатору, в котором энергию поглощает вязкая жидкость. Если датчик и преобразователь расположены в одном месте, а в качестве управляющего сигнала используется математическая производная координаты (или деформации) датчика, которая преобразуется в управляющую силу, система действует аналогично жидкостному демпферу. Достоинством однопривод-

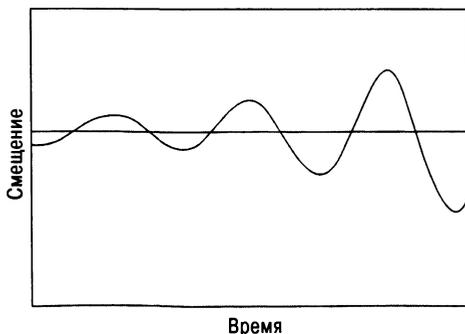


Рис. 3.10. Неустойчивое поведение системы.

ного регулятора является то, что он демпфирует все частоты колебаний. Увеличение коэффициента усиления приводит к увеличению степени демпфирования. Если датчик и преобразователь расположены в разных точках и некоторые гармоники не демпфируются, то в системе может возникнуть неустойчивость. Вероятность этого особенно высока, если для некоторой гармоники фазы колебаний датчика и преобразователя имеют противоположный знак.

Обратная связь, определяемая величиной скорости смещения (производной), эффективно демпфирует колебания. Если имеется дополнительный канал управления, в котором управляющая сила пропорциональна величине смещения, устойчивость системы увеличивается еще больше.

3.3.3. Обратная связь по координате

Для обеспечения высокой устойчивости слоистого материала к динамическим воздействиям желательно иметь закрытую систему управления. Систему управления, реагирующую на смещение определенных точек [19], называют регулятором с обратной связью по координате [11, 6]. Однако и в этом случае желательно дополнительно использовать жидкостной демпфер.

Работа регулятора с отрицательной обратной связью основана на предположении, что колебания структуры могут быть описаны суммой независимых гармонических колебаний. Колебания структуры раскладываются на сумму независимых колебаний, и каждое гармоническое колебание описывают моделью из пружины, демпфера и массы. Регулятор создает силы, подавляющие колебания. Силы, соответствующие каждой гармонике колебаний, создаются электромеханическими преобразователями. Рассмотрим работу регулятора с отрицательной обратной связью по координате для одной гармоники. Регулятор вводит в электрическую схему прибора вторую степень свободы. Он эквивалентен массе, пружине и демпферу и *управляется* колебаниями структуры. Сила, создаваемая электромеханическим преобразователем, пропорциональна амплитуде колебаний. Коэффициент пропорциональности между

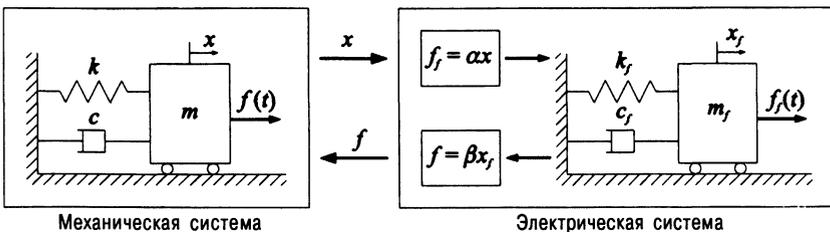


Рис. 3.11. Схема регулятора с отрицательной обратной связью по координате.

координатой (амплитудой колебаний) и контролирующей силой называют жесткостью фильтра. Эквивалентная схема регулятора приведена на рис. 3.11. Жесткость фильтра может быть как постоянной, так и изменяться системой управления.

Заметим, что собственную частоту колебаний и степень демпфирования электрической части регулятора можно изменять с помощью системы управления. Работа фильтра нуждается в знании амплитуд всех гармоник колебаний. Пока частота фильтра ниже частоты колебаний структуры, регулятор работает стабильно. Из этого следует несколько выводов.

Для устойчивой работы системы контроля необходимо знать лишь собственные частоты системы и не требуется определять тип гармоник и декремент затухания. Согласно работам [5, 15], единственными характеристиками структуры, которые необходимо измерять достаточно точно, являются частоты собственных колебаний структуры. Декременты затухания и формы гармоник точно определить очень трудно, однако эти параметры также влияют на поведение структуры с замкнутой системой управления.

Поскольку для одной степени свободы колебания механической и электрической систем связаны, увеличение затухания электрического фильтра увеличивает демпфирование механических колебаний структуры. Кроме того, увеличение потерь не приводит к снижению устойчивости системы.

Потенциальным недостатком регуляторов с отрицательной обратной связью по координате является предположение о независимости различных мод колебаний, что обосновано лишь при небольшой амплитуде и частоте колебаний. Однако этот недостаток компенсируется тем, что амплитуда высокочастотных колебаний, как правило, бывает небольшой. Тем не менее о нем следует помнить. Сравнение регулятора с отрицательной обратной связью по координате с регуляторами, основанными на других принципах, дано в работах [16, 4].

3.3.4. Другие регуляторы

Выше были рассмотрены методы регулировки, основанные на величине смещения и ее производной. Однако имеются и другие способы регулирования, на которых может быть основан контроль колебаний интеллектуальных структур. Рассмотрим принцип работы линейного квадратичного стабилизатора (ЛКС). Его работа основана на предположении, что управляющее усилие является линейной комбинацией так называемых состояний системы. Состояниями называют характеристики, однозначно описывающие поведение системы, и обычно они включают комбинацию смещений и скоростей. Хотя количество состояний может быть очень большим, в интеллектуальных структурах легко можно использовать требуемое количество датчиков. Параметром оптими-

зации в ЛКС-регуляторе является взвешенная сумма требуемой и реальной управляющей силы. Эта процедура позволяет достичь компромисса между взаимнопротиворечивыми требованиями снижения амплитуды колебаний и энергетических затрат на контроль.

3.4. Примеры контроля колебаний

В этом параграфе приведены простейшие примеры контроля колебаний в интеллектуальных структурах. В первом примере рассматривается изгиб консольной балки, на поверхности которой установлена пьезокерамическая пара датчик/преобразователь. В следующих примерах рассматриваются более сложные конструкции. В частности, анализируется контроль колебаний, возникающих при повороте гибкой балки электродвигателем. Такие движения типичны для робототехники. Применение системы управления с *замкнутым контуром*, использующей пьезокерамические датчики и электромеханические преобразователи, значительно увеличивает эффективность работы электродвигателя.

В следующем примере исследуется демпфирование колебаний, возникающих при повороте рамы, моделирующей конструкцию спутниковых солнечных батарей. При повороте таких структур появляется вибрация, обусловленная изгибными и крутильными модами колебаний. Крутильные колебания не удастся подавить лишь при помощи управления двигателем. Пьезокерамический регулятор, установленный на корпусе рамы, увеличивает затухание крутильных колебаний примерно в 10 раз. Таким образом, использование подхода интеллектуальных структур решает задачу подавления колебаний, чего не удастся добиться при помощи обычных демпферов. Увеличение потребления мощности при этом оказывается минимальным.

В третьем примере моделируется демпфирование колебаний спутниковой антенны. В таких структурах легко возникают колебания большой амплитуды. Использование концепции интеллектуальных структур и в этом случае является недорогим и естественным способом борьбы с колебаниями.

В последнем примере рассмотрены плоские пластины, широко применяемые в панелях фюзеляжа самолетов и пола автомобилей. С такими колебаниями обычно борются, вводя дополнительные внутренние или поверхностные демпфирующие слои. Недостатками демпфирующих слоев из вязкоупругих материалов являются их вес, зависимость эффективности работы от температуры эксплуатации и создаваемые ими экологические проблемы. Использование интеллектуальных структур решает все три проблемы.

Эти примеры демонстрируют эффективность использования интеллектуальных структур для подавления колебаний в случаях, когда стандартные демпферы малоэффективны. С точки зрения теории управле-

ния использование интеллектуальных структур имеет дополнительные преимущества, поскольку позволяет конструктору оценить реакцию структуры на прикладываемую нагрузку сразу во многих точках. Кроме того, всегда лучше создавать управляющие усилия при помощи большого количества распределенных по структуре электромеханических преобразователей. Они могут быть размещены практически в любой точке, что улучшает управление системой. Использование интеллектуальных структур позволяет уменьшить время затухания колебаний примерно в 10 раз величины и снизить расход энергии.

3.4.1. Консольная балка

Консольная балка представляет собой элемент, входящий в состав разнообразных конструкций (балок, пластин и оболочек). Рассмотрим консоль, контролируруемую системой управления с *замкнутым контуром* и состоящую из датчика, электромеханического преобразователя и логического устройства управления с регулируемыми параметрами. Такие балки входят в сложные модульные структуры типа стропильных ферм. При использовании модульных элементов облегчена замена одной или нескольких секций фермы. Если конструкция, состоящая из множества программируемых элементов, имеет запас прочности, потеря одного элемента не обязательно приводит к выходу из строя всей конструкции. На рис. 3.12 показана управляемая консольная балка, состоящая из восьми слоев стеклопластика. Вблизи заделанного конца балки во второй и седьмой слой стеклопластика введен пьезокерамический материал, как показано на рис. 3.13.

Данный пример иллюстрирует эффективность использования интеллектуальных конструкций. Система контроля включает датчики, электромеханические преобразователи, усилитель мощности и электрическую схему, введенные внутрь и установленные на поверхности балки.

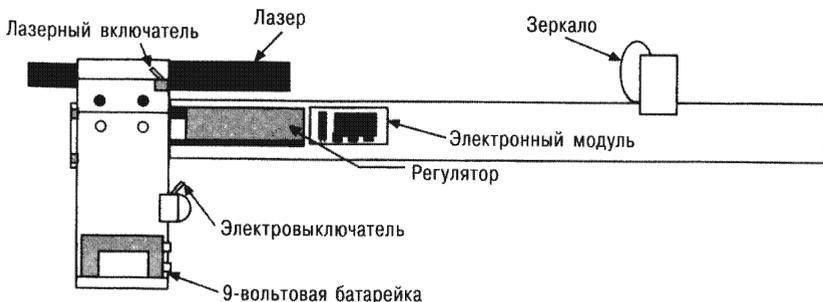


Рис. 3.12. Схематическое изображение балки с программируемой системой управления. Длина, ширина и толщина балки равны 479, 33 и 2 мм соответственно.

Источником питания является обычная девятивольтовая батарея, что подчеркивает малое потребление мощности. Толщина одного слоя стекловолокон равна толщине пьезокерамической пластины, являющейся одновременно датчиком и электромеханическим преобразователем. Поэтому введение пьезокерамики в слой стекловолокон не изменяет форму балки.

На обе поверхности пьезокерамической пластинки наложены плоские медные выводы с клеящейся нижней поверхностью, функция которых состоит в передаче электрического сигнала. Выводы приклеены к пластинке на всей ее длине, и электрический контакт сохраняется, даже если она раскалывается. Во втором и седьмом слоях стекловолокон делаются прямоугольные вырезы, размер которых соответствует размеру пьезокерамической пластинки. Пьезокерамика с выводами помещается в этот вырез и закрывается слоями стекловолокон. Поскольку выводы очень тонкие, для них вырезы в слоях стекловолокон не делаются.

Регулятор установлен на поверхность балки. Он состоит из электронной аппаратуры, управляющей его работой, как описано в параграфе 3.2. Поскольку механические характеристики слоев стеклопластика имеют разброс, система управления должна обеспечивать эффективное демпфирование колебаний и быть устойчивой по отношению к их вариации.

Система управления контролирует отдельные гармоники колебаний, используя обратную связь по координате (параграф 3.3.3). Рисунок 3.14 демонстрирует колебания кончика балки, положение которого измерялось расположенным вблизи нее зондом. Введение системы контроля уменьшило время затухания от 30 до 3 с, что соответствует увеличению эффективности демпфирования примерно в 10 раз. Дополнительное потребление энергии составило лишь 0,038 Вт.

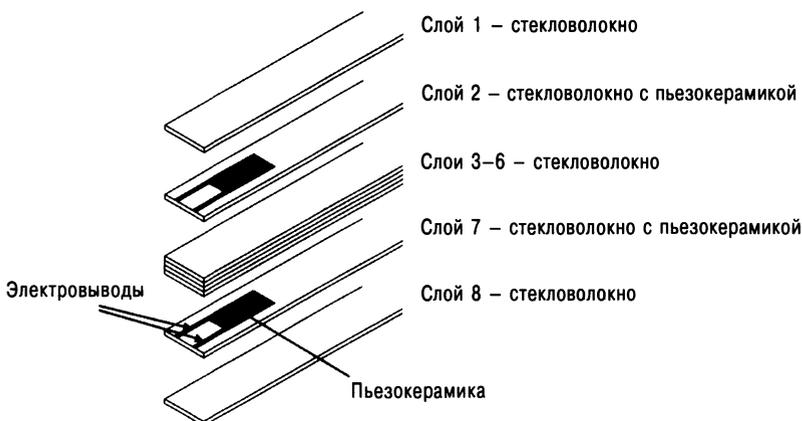


Рис. 3.13. Схематическое изображение конструкции балки.

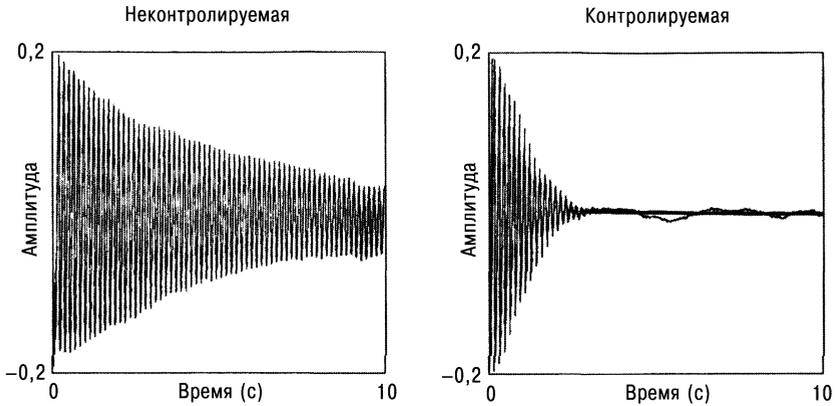


Рис. 3.14. Поведение неконтролируемой консольной балки и балки с замкнутой системой управления.

Имеются и другие методы демпфирования колебаний. Похожие рабочие характеристики могут быть достигнуты и с помощью слоя вязкоупругого материала. Однако следует иметь в виду, что активные консольные балки могут подавлять колебания и в более сложных конструкциях, когда другие методы борьбы с колебаниями оказываются значительно менее эффективными.

3.4.2. Поворачиваемая балка

Хотя эта задача является относительно простой, изучение влияния системы управления на поведение гибкой балки при ее повороте приводит к очень интересным выводам. Поворот производится вокруг некоторой оси аналогично повороту двери. Отметим, что такие движения широко встречаются в робототехнике, космической технике (например, в солнечных батареях) и авиации (рулевые плоскости). Поворот осуществляется при помощи электродвигателя, который приводит в движение механический привод и перемещает балку в нужном направлении. Направление поворота совпадает с направлением изгиба балки, как показано на рис. 3.15.

В этом параграфе рассмотрено влияние пьезокерамической пары датчик/преобразователь на колебания, возникающие при повороте балки. Пьезокерамический регулятор был установлен на поверхность балки. Исследование привело к двум важным выводам. Во-первых, активный элемент позволил снизить потребление энергии мотора приблизительно на 30%. Во вторых, система контроля повышает точность угла поворота.

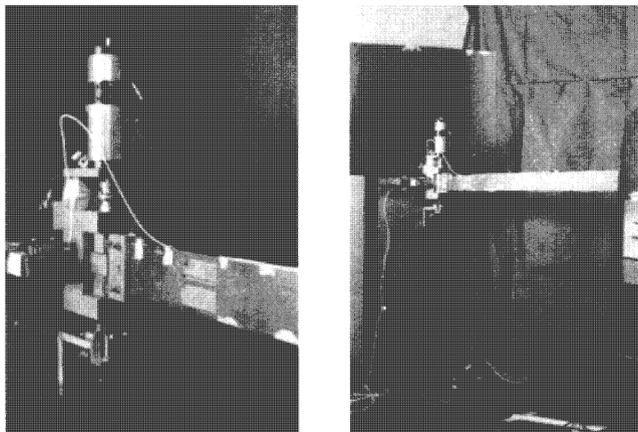


Рис. 3.15. Поворачиваемая балка с приклеенными пьезокерамическими накладками.

Рассматривается тонкая алюминиевая балка, поворачиваемая электродвигателем, управляемым с помощью пьезокерамического регулятора. Значительное улучшение рабочих характеристик достигается за счет точного контроля угла поворота пьезоэлектрическим датчиком и использования системы подавления колебаний. Контроль осуществляли при помощи линейно-квадратичного стабилизатора, описанного в параграфе 3.3.4. Похожая активная балка описана в работе [6].

Результаты экспериментов приведены на рис. 3.16. Управление мотором при помощи пьезокерамического регулятора позволяет снизить необходимое усилие двигателя, что дает возможность уменьшить его мощность при сохранении скорости поворота. Использование еще одного регулятора позволяет не только значительно увеличить демпфирование колебаний (рис. 3.16), но и улучшить управляемость процессом.

Этот результат неувидителен, если рассмотреть проблему управляемости. Система с двумя контролирующими сигналами управляется лучше, чем с одним. В идеальном случае система управления с обратной связью должна контролировать все основные гармоники колебаний. Однако и при помощи небольшого количества пьезокерамических регуляторов можно хорошо контролировать колебания. Эта мысль иллюстрируется в следующих параграфах.

3.4.3. Поворачиваемая рама

Рассмотрим поворот рамы, имеющей большую податливость при кручении. Система управления с обратной связью (замкнутая система управления) значительно улучшает функциональные характеристики конструкции при таком действии, причем выигрыш увеличивается по мере

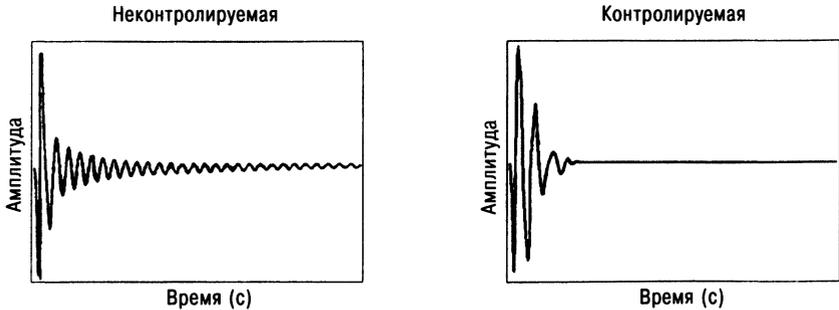


Рис. 3.16. Влияние пьезоэлектрической системы контроля на колебания балки.

ее усложнения. Поворот вызывает появление изгибных и крутильных колебаний. В раму вставлены два активных элемента, которые используются одновременно как датчики и электромеханические преобразователи в замкнутом контуре системы управления. Система управления одновременно поворачивает раму и подавляет ее колебания. Результаты показали, что управление лишь двигателем без активного демпфера повышает эффективность поворота и подавляет изгибные колебания рамы, но не позволяет подавить крутильные колебания. С крутильными колебаниями можно активно бороться с помощью активных элементов. Подробное описание такого регулятора дано в работе [16].

Рама состоит из тонкостенных алюминиевых трубок диаметром 6,35 мм и толщиной стенки 1,24 мм. Трубки соединены алюминиевыми болтами, как показано на рис. 3.17. Рама крепится на стальном валу. Тахометр, измеряющий угловую скорость поворота рамы, находится в корпусе мотора. На вал установлен потенциометр, сигнал которого пропорционален углу поворота. Вся конструкция крепится к бетонному блоку, обеспечивающему жесткость конструкции, как показано на рис. 3.17.

Таблица 3.1. Собственные частоты и декременты затухания поворачивающейся рамы при одновременном управлении двигателем и регулятором

Колебания	Расчет		Эксперимент	
	Частота (Гц)	Затухание (%)	Частота (Гц)	Затухание (%)
Торсионные	4,37	0,41	4,32	0,82
Изгибные	8,87	11,24	7,68	9,18
Торсионные	15,47	0,50	14,11	1,26
В плоскости	19,79	0,53	20,76	0,94
Изгибные	27,53	5,10	26,25	1,32

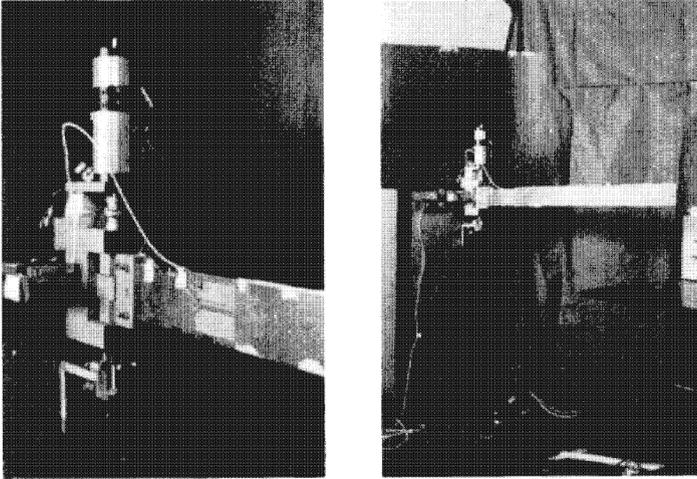


Рис. 3.17. Испытания поворачиваемой рамы. Показано размещение активных элементов и датчиков.

Испытания позволили определить, где следует располагать электромеханический преобразователь, чтобы добиться лучшего поведения рамы. В частности, плохая управляемость поведением рамы при некоторых положениях преобразователя указывает на необходимость дополнительных преобразователей. В табл. 3.1 приведены результаты теоретических расчетов и экспериментальные значения частот и декрементов затухания колебаний рамы с замкнутой системой управле-

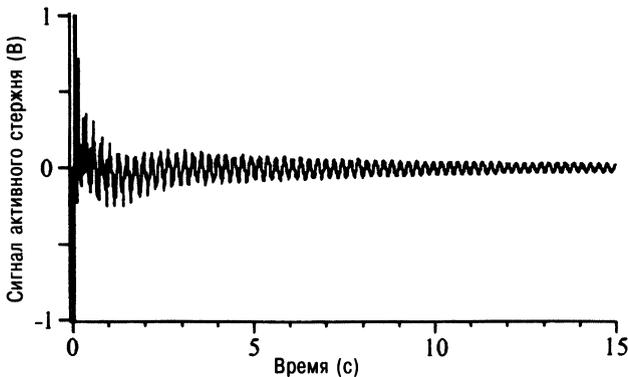


Рис. 3.18. Колебания, возникающие в активном стержне при повороте рамы с системой управления, следящей лишь за двигателем.

ния, действие которой определяется величиной скорости смещения, как описано в параграфе 3.3.2. Результаты показывают хорошее согласие теоретических расчетов и экспериментальных данных. Обращает на себя внимание низкое демпфирование торсионных и плоскостных колебаний. Качество работы замкнутой системы управления характеризуется декрементом затухания. В случае управления лишь двигателем декремент затухания мал для трех мод колебаний, а именно двух крутильных мод и колебаний в плоскости пластины. Это показывает, что управление одним лишь двигателем не позволяет эффективно подавить колебания, что иллюстрируется рис. 3.18, на котором видны слабозатухающие торсионные колебания с большим временем релаксации.

Из-за невозможности эффективно бороться с крутильными колебаниями рамы лишь при помощи управления мотором на корпус рамы установили второй пьезокерамический регулятор. Это сильно улучшило поведение системы, что иллюстрируется табл. 3.2, сравнивающей поведение рамы, управляемой только двигателем и двигателем вместе с пьезоэлектрическим регулятором. Таблицы 3.1 и 3.2 иллюстрируют высокую эффективность дополнительного пьезоэлектрического регулятора. Поворот рамы вызывает появление торсионных и плоскостных колебаний. Попытка управлять ими лишь при помощи двигателя оказалась неэффективной. Однако введение второго пьезокерамического регулятора позволило эффективно демпфировать эти колебания, что иллюстрируется рис. 3.19.

Таблица 3.2. Управляемость колебаниями рамы при ее повороте

Мода колебаний	Коэффициент управляемости	
	Управление двигателем	С регулятором
1-я торсионная	8,62	109,55
1-я изгибная	155,16	156,42
2-я торсионная	1,11	39,81
1 в плоскости	17,28	54,31
2 изгибная	80,29	91,61

Важно отметить, что столь значительное улучшение рабочих характеристик не потребовало больших затрат энергии, и полная потребляемая мощность увеличилась с 121,53 до 121,84 Вт. Декремент затухания увеличился в 15 раз для первой гармоники торсионных колебаний, в 2,3 раза для второй гармоники торсионных колебаний и в 6 раз для первой гармоники колебаний в плоскости пластины. Таким образом, незначительное усложнение системы привело к огромному улучшению рабочих характеристик, что демонстрирует эффективность использования интеллектуальных структур.

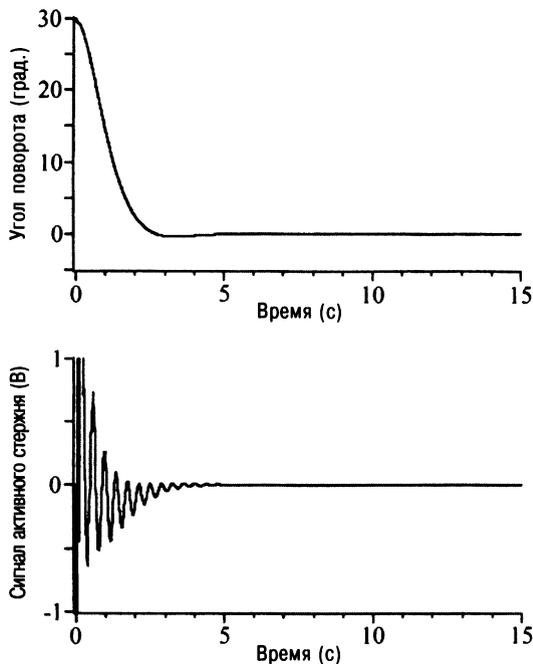


Рис. 3.19. Поведение рамы при ее повороте, контролируемом двигателем и активным пьезоэлектрическим регулятором.

3.4.4. Антенна

В этом параграфе представлены теоретические и экспериментальные результаты исследования системы контроля колебаний спутниковой антенны, форма которой показана на рис. 3.20. Антенна имеет восемь гибких ребер, в структуру которых встроены активные пьезоэлектрические датчики и преобразователи. Колебания антенны характеризуются рядом близких собственных частот, причем две гармоники являются вырожденными, т.е. их резонансные частоты совпадают. Система управления такой антенны должна иметь несколько активных регуляторов. Периодичность структуры антенны приводит к тому, что малые неточности при производстве элементов структуры могут привести к большим изменениям ее динамического поведения [18]. В то же время симметричность структуры антенны является неидеальной, что затрудняет моделирование ее поведения методом конечных элементов. Поведение антенны описывалось моделью, основанной на экспериментальных частотных характеристиках [4]. Эта модель необходима для создания системы управления с отрицательной обратной связью по координате, которая, как отмечалось выше, одновременно демпфирует все гармо-

ники колебаний. Благодаря точности теоретической модели, результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными. Этот пример представляет собой уникальное решение проблемы контроля систем, имеющих близкие собственные частоты колебаний.

Геометрическая форма антенны показана на рис. 3.20. В пятое и восьмое ребра встроены плоские пьезокерамические датчики прямоугольной формы. Противоположные поверхности пьезокерамики служат электродами. Каждое ребро крепится к основанию антенны при помощи жесткой втулки и гибкой проволоки, создающей необходимое натяжение. Ребра первоначально были плоскими, но в процессе сбора они приобрели изогнутую форму.

Частотные характеристики антенны в интервале 9–19 Гц показаны на рис. 3.21. В этом интервале частот имеются семь близких резонансных пиков. Второй набор резонансов имеется в области 30 Гц. Эти наборы резонансов соответствуют первой и второй гармоникам собственных колебаний отдельных ребер. Антенна имеет восемь ребер, и естественно было бы ожидать появления восьми резонансных пиков. Однако на рис. 3.21 наблюдается лишь семь пиков, и это означает, что один из них является вырожденным, т.е. имеется два независимых гармонических колебания одинаковой частоты. Существование вырожденного резонансного пика (частотой 11,01 Гц) означает, что для управления и контроля системы требуются по меньшей мере два независимых регулятора [13].

Для выбора активных ребер, обеспечивающих лучшую управляемость системой, определяли коэффициенты управляемости, значения которых приведены в табл. 3.3 для различных пар ребер. Эти коэффициенты аналогичны коэффициентам, приведенным в табл. 3.2 для поворачиваемой рамы, однако в табл. 3.3 приведены нормированные значения коэффи-

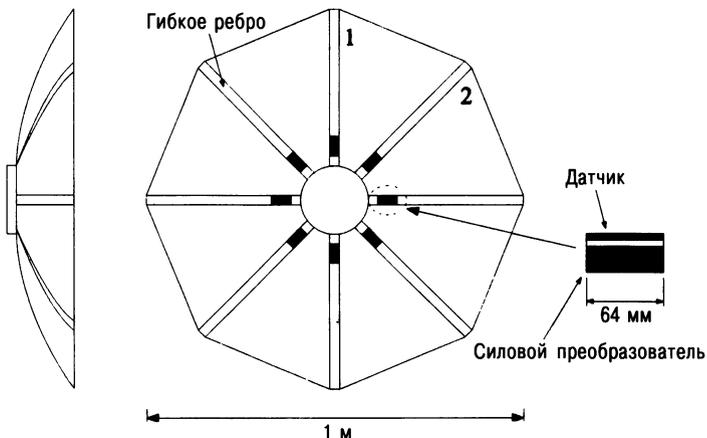


Рис. 3.20. Схематическое изображение активной антенны.

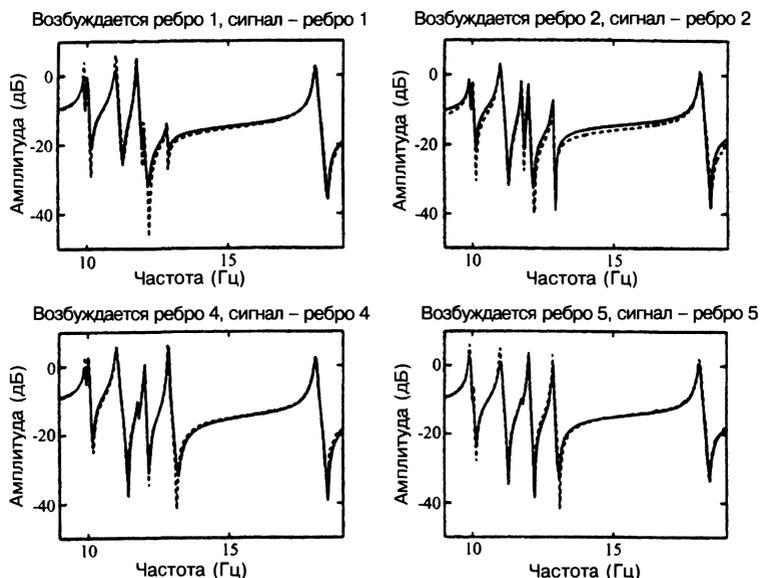


Рис. 3.21. Частотные характеристики активной антенны с отрицательной обратной связью (сплошные линии – расчет, штриховые – эксперимент).

циентов управляемости, максимальное значение которых равно единице. Коэффициенты определяются методом, описанным в работах [12, 13] для случаев одиночных и вырожденных резонансов. В таблице выделены минимальные значения коэффициента управляемости для каждой пары активных ребер. При размещении регуляторов на первом и пятом ребрах наименьшее значение коэффициента управляемости максимально. Таким образом, использование этих активных ребер гарантирует наилучшие характеристики системы управления.

Таблица 3.3. Коэффициенты управляемости для различных пар активных ребер

Частота колебаний (Гц)	Коэффициент управляемости				
	Ребра 1 и 2	Ребра 1 и 4	Ребра 1 и 5	Ребра 2 и 4	Ребра 2 и 5
18,0480	0,9102	0,9419	0,9067	0,9071	0,8705
12,8800	0,3089	0,5455	0,4188	0,5919	0,4777
12,0143	0,3662	0,4319	0,5034	0,5244	0,5848
11,7736	0,6661	0,5806	0,5770	0,3822	0,3766
10,0326	0,5493	0,6626	0,4829	0,6043	0,3991
9,9087	0,5372	0,5122	0,6944	0,4909	0,6788
11,0103	0,3678	0,1654	0,4379	0,3202	0,2640

Здесь не обсуждается влияние на работу регулятора неконтролируемых высокочастотных гармоник, поскольку по мере увеличения коэффициента усиления регулятора нестабильность возникает именно для первых наиболее низких резонансных частот [6]. Программа оптимизирует работу регулятора для получения наилучших функциональных характеристик. Она снижает сумму затрат на реакцию антенны на единичное импульсное воздействие и затрат на систему контроля. Ниже приведены данные для системы с первым и пятым активными ребрами. Преобразователи имеют несколько фильтров, соответствующие различным частотам. Использование нескольких фильтров не приводит к заметному увеличению стоимости системы. Отметим, что резонансные пики являются близкими, а система управления не контролирует высокочастотные гармоники. Поэтому для каждого резонансного пика используется только один фильтр. Предположив, что затраты на реагирование и контроль имеют одинаковый вес, определяем, что оптимальный фильтр имеет собственную частоту $70,2 \text{ радиан}^{-1}$ и декремент затухания $0,56$.

На рис. 3.22 приведено сравнение экспериментальных данных, описывающих поведение антенны при наличии активной системы управления и без нее. Приведены также результаты теоретических расчетов. Значительное увеличение демпфирования было достигнуто для всех гармоник лишь с помощью регуляторов на двух активных ребрах.

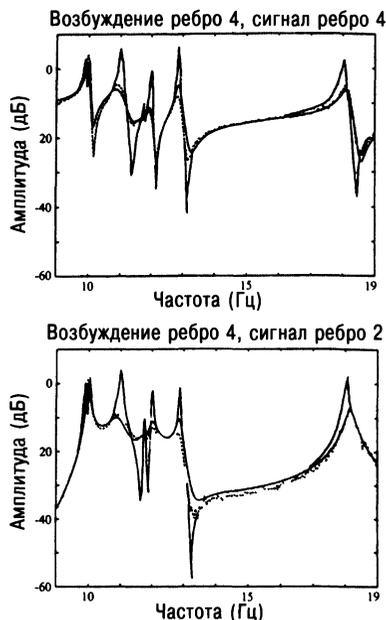


Рис. 3.22. Сравнение систем управления с открытым и замкнутым контурами (эксперимент — штриховая линия, расчет — сплошная линия)

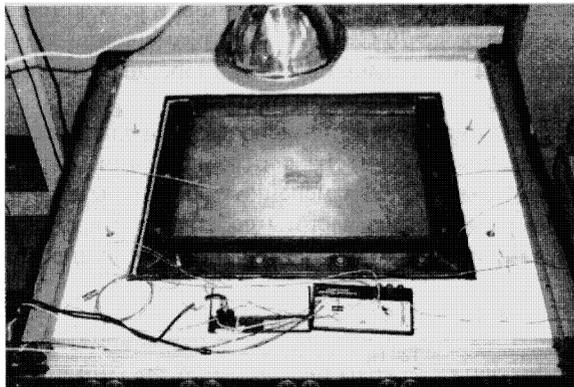


Рис. 3.23. Испытательный стенд для исследования эффективности демпфирования колебаний пластины в условиях неоднородного распределения температуры.

3.4.5. Пластина

Этот пример иллюстрирует эффективность использования интеллектуальных структур для подавления колебаний в условиях изменения температуры окружающей среды. Рассматривается адаптивная система управления с обратной связью по координате, которая использует пьезокерамическую пару датчик/преобразователь и температурный датчик (термистор). Особенность адаптивной системы контроля состоит в возможности регулирования коэффициента усиления [20]. Для демпфирования колебаний в автомобильных и авиационных панелях обычно используют внутренние или внешние слои вязкоупругого материала, недостатком которых является снижение их эффективности при повышенных температурах. Описанный ниже пример демонстрирует преимущество систем активного демпфирования колебаний в случае изменения температуры окружающей среды.

Работу системы управления исследовали при помощи стандартного испытательного стенда, используемого в автомобильной промышленности. Испытывали пластину из оцинкованной листовой стали размером 500×600 мм, контроль которой осуществляли при помощи 20 датчиков. Пластину крепили к основанию стенда 14 болтами, после чего к ней приложили изгибающий момент величиной 25 Н·м. С учетом размера области крепления размер полезной площади пластины составлял 400×500 мм. Рисунок 3.23 демонстрирует метод испытания. Гашение колебаний производили при помощи коммерчески производимого регулятора размером $72,4 \times 72,4 \times 0,267$ мм. Регулятор разместили в центре пластины, поскольку опасными являются лишь первые три - четыре гармоники колебаний. Пластину нагревали лампой мощностью 250 Вт,

размещенной на высоте 300 мм от пластины и способной поднять температуру в ее центре до 70°C. При таком размещении лампы распределение температуры в пластине было неоднородным, причем она постепенно уменьшилась при удалении от центра.

Для демпфирования колебаний использовали адаптивную систему управления на основе регулятора с отрицательной обратной связью. Рисунок 3.24 показывает, что изменение температуры пластины приводит к значительному изменению частоты собственных колебаний. Для ряда температур с интервалом 2,5°C были заранее определены три возможных

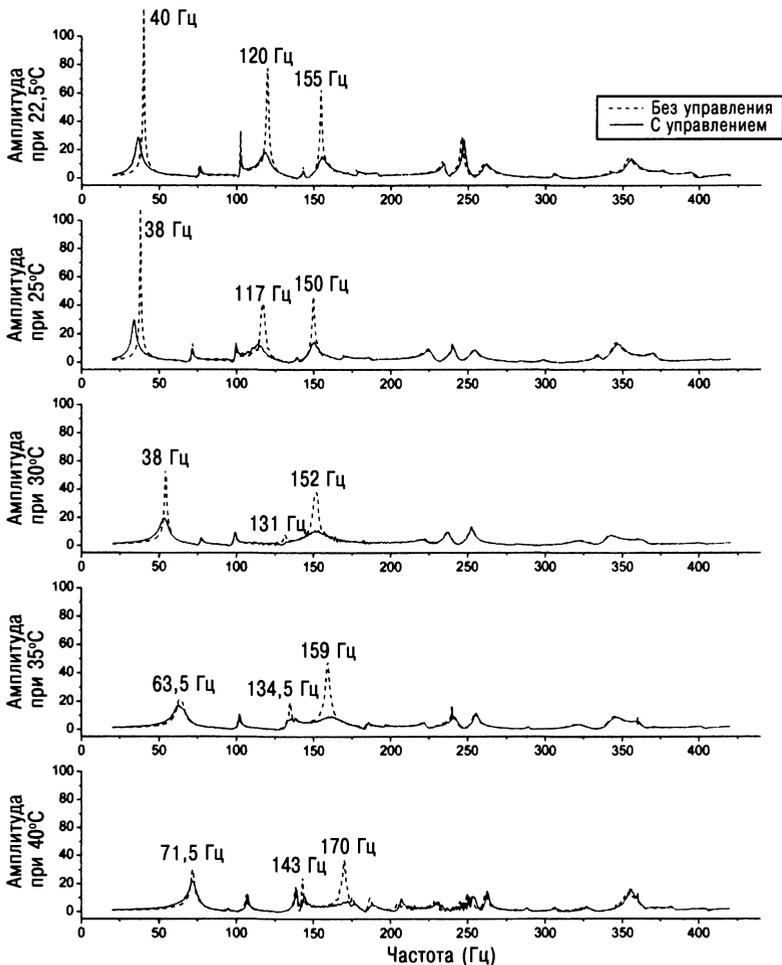


Рис. 3.24. Замкнутая система контроля пластины для пяти различных температур.

значения коэффициента усиления регулятора. Коэффициент усиления изменяли согласно изменению температуры в центре пластины. Результаты исследования приведены на рис. 3.24. Заметим, что амплитуды первых трех гармоник колебаний остаются невысокими при всех температурах.

Вязкоупругие материалы ориентированы на демпфирование колебаний при фиксированной температуре эксплуатации и обычно неэффективны в случаях сильного изменения температуры. Использование активной адаптивной системы контроля позволяет устранить этот недостаток даже при весьма значительных изменениях температуры.

3.5. Заключение

В этой главе описаны активные методы борьбы с колебаниями легких и гибких конструкций. Описаны основы теории колебаний. Даны примеры использования интеллектуальных структур для решения задачи контроля колебаний. В интеллектуальных структурах используется система управления с обратной связью, которая позволяет бороться с колебаниями без утяжеления конструкции и увеличения потребления энергии. Эффективность активного способа борьбы с колебаниями превосходит все другие способы.

Литература

1. Avitabile, P. (1998) «Modal Space: Back to Basics», in *Experimental Techniques*, also available at www.eng.uml.edu/mac1/umlspac/mspace.
2. Dosch, J. J., Inman, D. J. and Garcia, E. (1992) «A Self-Sensing Piezoelectric Actuator for Collocated Control», *J. Intel. Mat. Sys. & Struct.*, **3**, 166–185.
3. Dosch, J., Leo, D. J. and Inman, D. J. (1993) «Modeling and Control for Vibration Suppression of a Flexible Smart Structures», *Dynamics and Control of Structures in Space II* (ed. C. L. Kirk and P. C. Hughes), 603–618.
4. Dosch, J. J., Leo, D. J. and Inman, D. J. (1995), Modeling and Control for Vibration Suppression of a Flexible Active Structure, *J. Guidance, Control & Dynamics*, **18**, 340–346.
5. Ewins, D. J. (2000) *Modal Testing*, Research Studies Press.
6. Fanson, J. L. and Caughey, T. K. (1990) «Positive Position Feedback Control for Large Space Structures», *AIAA Journal*, **28**, 717–724.
7. Friswell, M. I. (2001) «On the Design of Modal Actuators and Sensors», *J. Sound & Vib.*, **241**, 361–372.
8. Garcia, E. and Inman, D. J. (1990) «Advantage of Slewing an Active Structure», *J. Intel. Mat. Sys. & Struct.*, **1**, 261–272.
9. Garcia, E., Dosch, J. J. and Inman, D. J. (1991) «The Application of Smart Structures to the Vibration Suppression Problem», *Proc. of 2nd Joint Japan-US Conf. on Adaptive Structures*.
10. Garcia, E., Dosch, J. and Inman, D. J. (1992) «The Application of Smart Structures to the Vibration Suppression Problem», *J. Intel. Mat. Sys. & Struct.*, **3**, 659–667.

11. Goh, C. L. and Caughey, T. K. (1985) «On the Stability Problem Caused by Finite Actuator Dynamics in the Collocated Control of Large Space Structures», *Int. J. Control*, **41**, 787–802.
12. Hamden, A. M. A. and Nayfeh, A. H. (1989) «Measures of Modal Controllability and Observability for First- and Second-Order Linear Systems», *J. Guidance, Control & Dynamics*, **12**, 421–428.
13. Hughes, P. C. and Skelton, R. E. (1980) «Controllability and Observability of Linear Matrix Second Order Systems», *J. Appl. Mech.*, **47**, 415–420.
14. Inman, D. J. (1989) *Vibration with Control, Measurement and Stability*, Prentice Hall.
15. Inman, D. J. (1994) *Engineering Vibration*, Prentice Hall.
16. Leo, D. J. and Inman, D. J. (1993) «Modeling and Control of a Slewing Frame Containing Self-Sensing Active Members», *Smart Mat. & Struct.*, **2**, 82–95.
17. Leo, D. J. and Inman, D. J. (1994) «Pointing Control and Vibration Suppression of a Slewing Flexible Frame», *J. Guidance & Control*, **17**, 529–536.
18. Levin-West, M. B. and Salama, M. A. (1992) «Mode Localization Experiments on a Ribbed Antenna», *Proc. 33rd AIAA Structures, Structural Dynamics and Materials Conf.*, pp. 2038–2047.
19. Meirovitch, L. and Baruh, H. (1982) «Control of Self-Adjoint Distributed Parameter Systems», *J. Guidance & Control*, **5**, 59–66.
20. Slotine, J.-J. E. and Li, W. (1991) *Applied Nonlinear Control*, Prentice Hall.

К. Уорден

В. Д. Сташевски

4.1. Введение

Идеальная *интеллектуальная структура* на основании показаний датчиков оценивает внешние условия и учитывает свое собственное состояние. Она способна обнаружить появление неисправности или повреждения и принять меры для устранения или смягчения их последствий, изменяя свое статическое и динамическое поведение с помощью системы управления с обратной связью. Необходимыми условиями такого поведения являются способности получать информацию и реагировать, что аналогично способности живых организмов чувствовать и двигаться. Эти возможности обеспечивают сенсоры и электромеханические преобразователи (силовые приводы), которые должны быть встроены в конструкцию, что нужно учитывать уже на стадии проектирования.

В настоящее время разработано множество сенсоров, одни из которых измеряют значения параметров в отдельных точках, а другие — их средние значения в целой области. Каждый тип датчиков имеет свои преимущества и недостатки, и универсальная интеллектуальная структура должна использовать датчики обоих типов. Например, датчики, измеряющие локальные напряжения, необходимы для оценки запаса прочности, а при необходимости и для включения алгоритмов управления, позволяющих избежать разрушения конструкции. Эти датчики необходимы также для определения положения повреждения.

Для эффективного использования информации, получаемой различными датчиками, необходима адекватная методика обработки сигналов. В частности, требуются сложные алгоритмы *распознавания образов*. Для использования телеметрических данных необходима аналитическая система, дающая оценку степени опасности внешних условий и принимающая решение об ответных действиях. Для военной техники критической проблемой часто является нахождение цели, которую решают методами *распознавания образов*. Если информацию получают от нескольких датчиков, так называемый «вектор данных» преобразуют в информацию о местоположении и степени опасности дефекта. В ситуациях, когда информация поступает от датчиков различных типов, не-

обходимую информацию получают при помощи методов *анализа данных*. В этой главе описаны самые общие принципы анализа информации, получаемой от датчиков различного типа.

Интеллектуальная система использует сеть различных датчиков и процессор, который анализирует данные и принимает решение об определенных действиях. С анализом данных связаны проблемы создания систем автоматического контроля и искусственного интеллекта. Животные способны к обучению на основе своего опыта, и это свойство было бы желательно и для интеллектуальных структур. Создание *искусственных нейронных сетей*, аналогичных нервным сетям, является одним из подходов к решению этой задачи. Нейронная сеть может эффективно распознавать образы и играть значительную роль в интерпретации данных. Принципы работы одной из нейронных сетей описаны в Приложении.

Слово «интеллектуальный» применяют и к некоторым материалам. Хотя материал сам по себе действительно интеллектуальным согласно данному выше определению быть не может, он может быть адаптивным, что весьма желательно для интеллектуальных структур. Отметим также, что при моделировании поведения интеллектуальных структур важную роль играют компьютеры.

Целью настоящей главы является краткий обзор методов обработки и анализа информации применительно к интеллектуальным структурам и материалам. Описаны различные методы комплексного анализа информации в условиях разброса данных. Обсуждаются проблемы, которые возникают при создании интеллектуальных структур военного и гражданского назначения. В частности, анализ сигналов, получаемых от датчиков при *общем контроле* и *контроле поврежденности* интеллектуальных систем.

В случае интеллектуальных структур возникает проблема совместной работы датчиков и *электромеханических преобразователей и приводов*. Как отмечалось в работе [1], одно из наиболее простых решений задачи автоматического выявления цели состоит в передаче управления от широкодиапазонного датчика низкого разрешения к узкодиапазонному датчику высокого разрешения. Датчик с низким разрешением должен выявить участок поиска и передать управление другому датчику, имеющему более высокое разрешение и ищущему цель в области, выявленной на предыдущей стадии поиска. Аналогичная проблема возникает в интеллектуальных системах, в которых сигналы датчиков, характеризующих внутренние параметры системы или условия внешней среды, после обработки преобразуются в команды, передаваемые электромеханическим преобразователям, обеспечивающим реакцию на внешнее воздействие.

Так или иначе, перед обсуждением проблемы обработки и анализа сигналов желательно иметь представление о том, что представляют собой датчики и как они работают. Этот вопрос обсуждается в следующем параграфе.

4.2. Датчики

Под термином *датчик* может пониматься любой источник данных. В системах военного назначения информация может поступать по целому ряду каналов, в том числе и от людей, причем в этом случае анализ полученных данных наиболее сложен. В этой главе будет принято более узкое определение датчика, под которым мы будем понимать некоторую материальную конструкцию, которая характеризует внешние условия и внутренние параметры структуры некоторым количественным электрическим сигналом. В большинстве случаев сигналы датчиков обрабатываются некоторым устройством или компьютерной программой и используются для принятия решения. Это решение может состоять в необходимости выполнения действия самой системой, ее починки или замены.

Последовательность операций обработки сигнала в случае одного датчика приведена на рис. 4.1. Они могут быть охарактеризованы следующим образом.

Датчик. Выдает электрический сигнал, величина которого пропорциональна некоторому измеряемому параметру, характеризующему структуру или внешние условия. В некоторых случаях сигнал может быть акустическим или тепловым. Примером датчика может быть малоинерционный акселерометр, размещенный на корпусе коробки передач автомобиля в целях определения ее работоспособности.

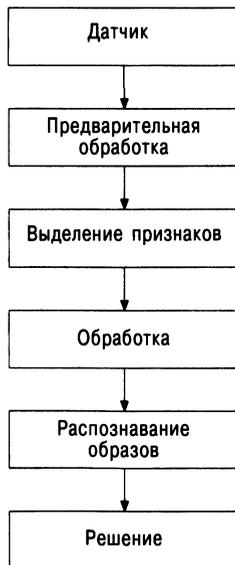


Рис. 4.1. Последовательность операций обработки сигнала для одного датчика.

Предварительная обработка. Как правило, изменяющийся во времени сигнал датчика (величина напряжения) дает слишком большое количество данных, большая часть которых не нужна. Цель предварительной обработки сигналов состоит в разумном уменьшении количества сигналов, т.е. в уменьшении размерности вектора данных. В случае коробки передач эта стадия может состоять в преобразовании набора точек в зависимости от времени в спектр, описывающий доминирующие частоты колебаний коробки передач. Усреднение и выбор частотного интервала значительно уменьшают количество точек, описывающих спектральную кривую по сравнению с количеством точек временного ряда. Этот шаг обычно проводят на основе опыта и суждения технического работника. На этой стадии размер вектора данных уменьшается от многих тысяч до приблизительно ста.

Выделение признаков. Цель этой стадии обработки данных снова состоит в уменьшении размерности вектора данных и устранении избыточной информации. Несмотря на общность цели, эту стадию отличают от предыдущей, поскольку применяемые методы основаны на статистических методах и теории информации, а не на субъективном решении работника. На этой стадии обработки сигнала число координат вектора данных уменьшается примерно до десяти. Отметим, что определение небольшого количества значащих признаков является основной задачей любой программы распознавания образов, поскольку количество необходимой информации катастрофически растет с числом признаков. В случае коробки передач этот шаг состоит в выборе определенной линии частотного спектра, свидетельствующей о зацеплении соседних шестерен. Информацию могут содержать и дополнительные линии спектра, соответствующие более высоким гармоникам колебаний.

Обработка. Эта стадия является подготовительной к распознаванию образов и состоит в *нормализации* вектора данных относительно характерных признаков распознаваемого образа. Для нейронных сенсорных сетей значения всех *характеристик* должны лежать в интервале от -1 до $+1$. Однако могут использоваться и более сложные алгоритмы обработки. К примеру, информационные данные могут быть подвергнуты нелинейному преобразованию для описания их распределением Гаусса в целях оценки степени достоверности.

Распознавание образов. Эта стадия является самой главной. Характеристические векторы анализируют при помощи алгоритма обработки, который может классифицировать образ на основе проведенных измерений. Примером является компьютерная программа, определяющая тип неисправности и степень ее серьезности на основе спектральных данных, характеризующих поведение коробки передач.

Решение. Это заключительный этап, который может управляться компьютером или требовать человеческого вмешательства. На нем принимается решение о необходимых действиях. В случае коробки передач это решение, необходимо ли останавливать машину в зависимости от степени неисправности.

Из анализа рис. 4.1 следует вывод, что использование лишь одного датчика может привести к ошибкам. Если цепь обработки сигнала обрывается или возникает ошибка хотя бы на одной из стадий, принять правильное решение невозможно. Это является одной из основных причин желательности использования множества датчиков.

4.3. Анализ информации множества датчиков

Анализ информации независимых источников сейчас превратился в самостоятельную науку, возникшую в результате попытки Министерства обороны Великобритании формализовать процедуру обработки информации, получаемой из различных источников. В качестве примера будет анализироваться ситуация на поле боя и оцениваться степень угрозы по данным, поступающих по различным каналам. *Датчиком* в этом случае является источник, который может быть физическим датчиком типа микроволновой антенны или просто человеком, принесшим некую информацию. Уже давно было понято, что *основные принципы* анализа независимых данных имеют не только военное применение. Первоначально их начали использовать в метеорологии и управлении движением транспорта, а затем в медицине и при неразрушающем контроле конструкций.

Таким образом, основная цель *анализа информации* состоит в обобщении данных, поступающих от нескольких датчиков, в целях принятия более надежного и уверенного решения, чем в случае одного датчика. Имеется несколько причин, по которым предпочтительнее использовать несколько датчиков [2].

- Более высокое отношение сигнал/шум. Обработка информации в этом случае может состоять в простом усреднении сигналов нескольких идентичных датчиков. Отметим, что сигнал может усредняться и по времени.
- Устойчивость к наличию ошибок и надежность. Для высокой надежности нужно иметь избыточное количество датчиков. Система должна работать, даже если некоторые датчики вышли из строя, а излишнюю информацию всегда можно устранить при обработке сигналов.
- Может быть получена информация о независимых характеристиках системы. При контроле работоспособности системы нужно измерять все жизненно важные для ее функционирования параметры. Измеряемые переменные должны быть чувствительными к повреждениям.
- Увеличение количества контролируемых параметров дает более полное представление о состоянии системы.
- Улучшается разрешающая способность (усреднение уменьшает погрешность измерений).

- Увеличивается надежность результатов. Например, сравнением нескольких независимых измерений или уменьшением погрешности измерений.
- Уменьшается количество предположений.
- В некоторых случаях уменьшается время измерений.

Имеется несколько способов анализа данных, поступающих от нескольких датчиков. Общим для них является то, что представленная на рис. 4.1 цепь операций для одного датчика повторяется для каждого из них, и все цепи объединяются. На рис. 4.2 приведена принципиальная схема анализа, которую называют *централизованной* [1].

Информация с каждого датчика поступает на центральный модуль, который устраняет избыточную информацию, поступающую от датчиков одного или различных типов. На рис. 4.3 приведена схема анализа информации, в которой выделение характерных признаков образа проводится независимо для каждого датчика.

Очевидно, что описанным выше способом неудобно описывать *архитектуру* методов анализа данных, поскольку такая схема слишком вдается в детали, не выявляя их основные черты. Логические цепи индивидуальных датчиков могут пересекаться в различных точках, и это означает, что имеется огромное количество конкретных схем анализа информации (рис. 4.4).

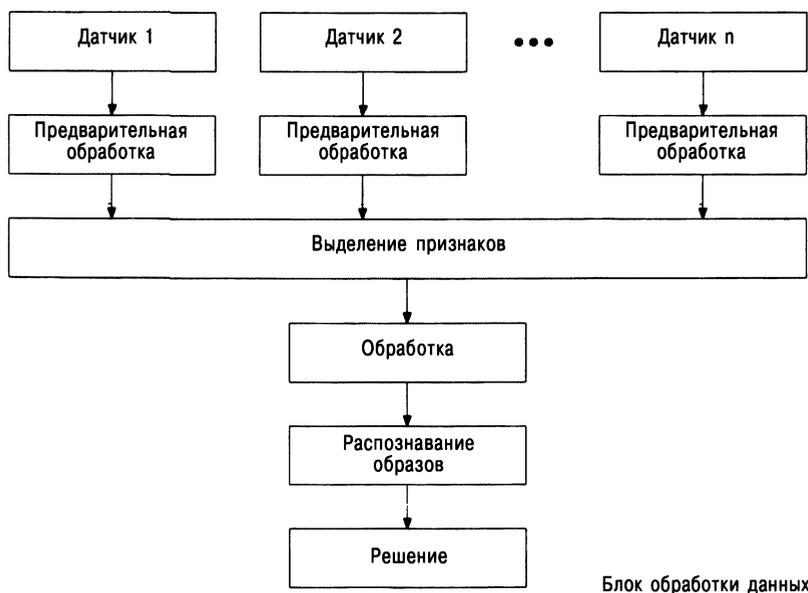


Рис. 4.2. Схема централизованного анализа данных

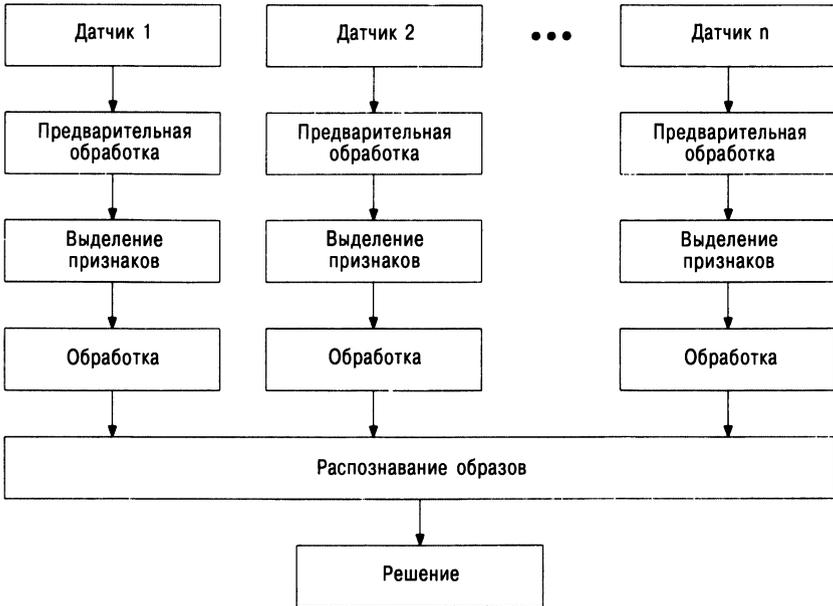


Рис. 4.3. Схема анализа информации.

Операцию анализа поступающей информации можно описать ориентированным графом, в котором входные линии соответствуют датчикам, а выходные линии – принятым решениям. Информация, полученная при помощи датчиков, по мере прохождения через граф уплотняется и очищается на каждом уровне, становясь все более надежной. Как следствие, она изменяет свою природу. В вершинах графа происходит синтез и обработка информации различными методами, зависящими от положения и уровня вершины. Синтез информации проводится на следующих уровнях.

Синтез на уровне отдельных точек. Данные об отдельных точках (пикселях) от нескольких датчиков объединяются до предварительной обработки данных.

Синтез на уровне характерных признаков. Два или более предварительно обработанных сигнала комбинируются, в результате чего образуется вектор, описывающий некоторый характерный признак изображения. Комбинирование может состоять в простом увеличении размерности вектора данных или включать сложный нелинейный анализ.

Синтез на уровне изображения. Два или более вектора, описывающих некоторый характерный признак, объединяются и передаются на алгоритм распознавания образов.

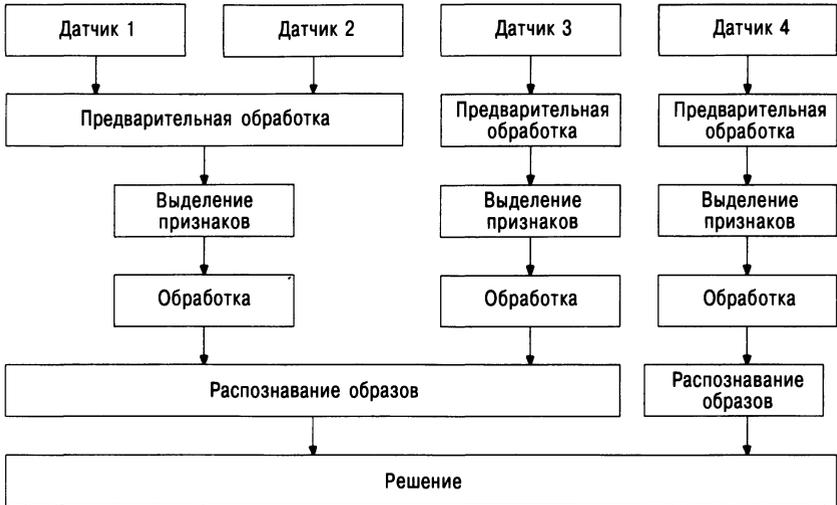


Рис. 4.4. Произвольная схема процесса анализа информации.

Синтез на уровне принятия решения. Два или более решения или характеристики объединяются для принятия более надежного решения. Для этого можно использовать методы, описанные в работе [1] (рис. 4.5).

Для решения проблемы опознавания образов необходимо разработать общую терминологию, но не менее важно рассмотреть принципы работы стандартных моделей анализа данных. Термин *модель* здесь понимается как целостная методика, которая использует некие принципы комплексного анализа поступающих данных, принимая исходя из них решения, а затем предпринимает действия. Она может иметь обратную связь с принятыми решениями, вплоть до изменения принципов анализа. Это определение модели согласуется с приведенным в работе [3].

4.4. Модель СЗЛ

Первые попытки формализации процедуры анализа информации были предприняты в военной науке для решения проблем командования, проверки информации, связи и разведки. Эти усилия относятся к концу 70-х – началу 80-х годов. Первые публикации [4, 5] описывают *иерархические структуры, архитектуру методов анализа и проверку предположений*, т.е. все основные компоненты современных методов анализа данных. Главный шаг был сделан в 1990 году, когда отдел информации Североамериканского Совета заведующих лабораторий (СЗЛ) стандартизировал процедуру анализа данных и сформулировал



Рис. 4.5. Анализ информации на уровне принятия решения.

стратегию обмена технической информацией [6, 7]. Позднее эта процедура была расширена [8] и включила обнаружение цели как одну из своих задач. Было дано следующее определение процедуры анализа данных: «Многоуровневый, многоцелевой процесс, направленный на автоматическое обнаружение цели, определение связей, взаимных корреляций и оценку информации, поступающей от одного или нескольких источников».

Структура предложенной процедуры анализа данных схематически представлена на рис. 4.6. Она представляет собой многоуровневую систему, состоящую из четырех (пяти, включая предварительную обработку) уровней [1].

Уровень 1. Уточняет положение и оценивает надежность идентификации цели посредством анализа информации, поступающей от отдельных датчиков.

Уровень 2. Оценивает ситуацию в частично или полностью враждебных или дружественных условиях.

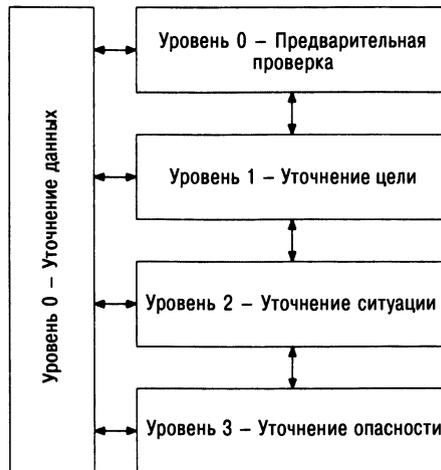


Рис. 4.6. Модель СЗЛ [16].

Уровень 3. Работает в условиях угрозы полного или частичного применения силы.

Уровень 4. Непрерывно уточняет оценку ситуации, оценивает необходимость дополнительных источников информации и изменения процедуры оценки.

Для описания этой процедуры используются термины военной науки. Необходимо отметить ее схожесть с методикой Риттера, используемой для контроля степени поврежденности системы [9].

Уровень 1 (ДЕТЕКЦИЯ). Информировывает о возможном повреждении структуры.

Уровень 2 (ЛОКАЛИЗАЦИЯ). Информировывает о вероятном положении повреждения.

Уровень 3 (ОЦЕНКА). Оценивает степени поврежденности.

Уровень 4 (СЛЕДСТВИЯ). Информировывает о степени поврежденности, например оценивая остаточный ресурс системы.

Уровень 1 модели Риттера соответствует уровню 1 модели СЗЛ; он обнаруживает возможную угрозу безопасности. Уровни 2 и 3 модели Риттера соответствуют уровню 2 модели СЗЛ; они определяют положение и степень повреждения. Наконец, уровень 4 модели Риттера аналогичен уровню 3 модели СЗЛ; он оценивает вероятные последствия угрозы.

В схеме Риттера отсутствует аналог уровня 4 модели СЗЛ, что является ее недостатком. При создании своей структуры Риттер старался описать различные уровни информации, поступающей от системы датчиков. Его целью не являлось создание целостного подхода к контролю степени поврежденности. Следуя модели СЗЛ, эту схему можно расширить и включить в нее уровень оценки степени работоспособности и активной замены датчиков.

Отметим, что при введении уровня 4 модели СЗЛ неявно предполагалось, что начальные условия процедуры анализа данных были выбраны удачно. Специалистам в области контроля динамического поведения структур хорошо известно, что выбор точек расположения датчиков и электромеханических преобразователей имеет критическое значение для решения проблем динамики. Вопрос оптимального размещения датчиков и активных элементов будет обсуждаться ниже.

Еще одной особенностью модели СЗЛ является то, что «датчиками» могут быть люди [10]. В случае же интеллектуальной структуры ими обязательно являются материальные устройства. Это означает, что их перемещение нужно осуществлять механически. Решение этой проблемы состоит в размещении избыточного количества датчиков, что, естественно, приводит к удорожанию системы. Проблему контроля и замены работающих датчиков можно решить при помощи самопроверки датчиков [11–13] или введения специальных датчиков, контролирующей степень работоспособности основной сети [14].

4.5. Модель Бойда

Модель Бойда, называемая также *циклом*, первоначально была разработана для моделирования военного командования, и поэтому она, подобно модели СЗЛ, использует военные термины [15]. Однако область ее применимости гораздо шире. Четыре уровня этой модели называются *наблюдение*, *ориентировка*, *решение* и *действие*.

Наблюдение. На этом уровне накапливается сигнал датчиков, что соответствует нулевому уровню модели СЗЛ.

Ориентировка. Накопленная информация используется для оценки ситуации и потенциальных источников угрозы. Этот уровень охватывает сразу три уровня модели СЗЛ (1, 2 и 3). На нем объединяются сигналы различных датчиков, в том числе и разведанные.

Решение. Оцениваются возможные действия и делается выбор. Эти действия включают передислокацию датчиков и т.д. Очевидно, этот уровень включает уровень 4 модели СЗЛ, но на нем рассматривается также возможность действий за пределами системы.

Действие. Реализуются решения, принятые на предыдущей стадии. Модель СЗЛ не имеет аналогичного уровня, и поэтому модель Бойда является более общей. Последствия действий необходимо оценить, и система возвращается к фазе наблюдения, что замыкает цикл.

На практике, все четыре фазы цикла выполняются параллельно и непрерывно. Происходит непрерывное накопление данных, чтобы уточнить возникающую обстановку; решения и планы непрерывно изменяются и приводятся в действие. Как отмечено в работе [16], при выполнении боевой операции могут развиваться одновременно несколько связанных циклов. В этой работе также описывается приложение реального цикла к действию флота.



Рис. 4.7. Модель Бойда.

Модель Бойда может служить основой процедуры анализа поступающей от датчиков информации применительно к интеллектуальным структурам. При контроле структуры решения, принятые на основе показаний датчиков, могут воздействовать на структуру, которая по отношению к системе датчиков является внешним объектом. Примером является использование сплавов с эффектом памяти формы для изменения профиля крыла в ответ на изменения параметров окружающей среды. Если система управления не предпринимает активных действий, как, например, при контроле жизнеспособности конструкции, для ее описания можно использовать модель СЗЛ. Если же система предпринимает активные действия, например чинит или включает исправные датчики, для ее описания больше подходит модель Бойда.

4.6. Модель водопада

Эта модель была предложена в работе [17] и «широко использовалась при анализе информации британским министерством обороны, но не была принята в других местах» [3]. Ее структура приведена на рис. 4.8.

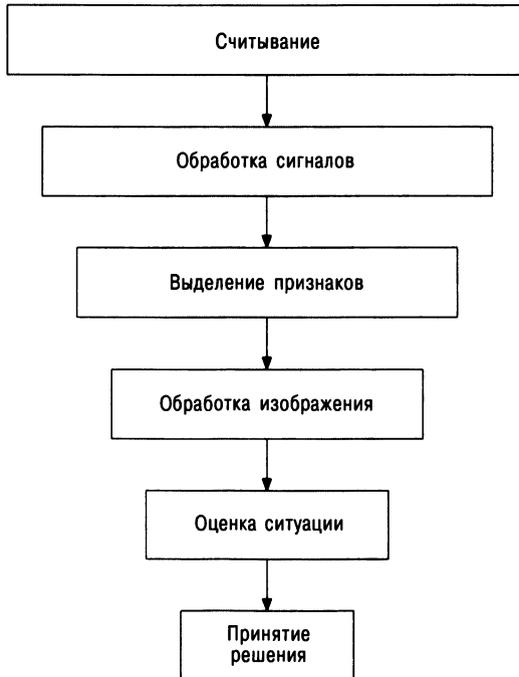


Рис. 4.8. Модель водопада.

На первый взгляд, модель напоминает схему работы одного датчика, приведенную на рис. 4.1. Однако это лишь видимость вследствие ее простого схематического изображения. Уровень считывания в модели водопада включает несколько датчиков. Также следует отметить стадию *исследования ситуации*, которая аналогична первым трем уровням модели СЗЛ. Как отмечено в работе [3], ее недостатком является отсутствие обратной связи, соответствующей уровню 4 модели СЗЛ. Таким образом, она является менее общей. В этой главе она обсуждается в связи с тем, что является одной из основных составляющих компонентов для описанной ниже общей модели.

4.7. Общая модель

В работе [3] приведен обзор описанных выше моделей анализа данных и отмечается, что каждая из них имеет недостатки. Пытаясь разработать модель, которая включила бы в себя общие черты существующих моделей анализа информации и преодолела бы их недостатки, авторы составили следующий список предъявляемых к ней требований. Идеальная модель анализа информации должна:

- определять порядок обработки информации;
- иметь явный замкнутый цикл;
- иметь возможность анализировать информацию, поступающую от источников различного типа;

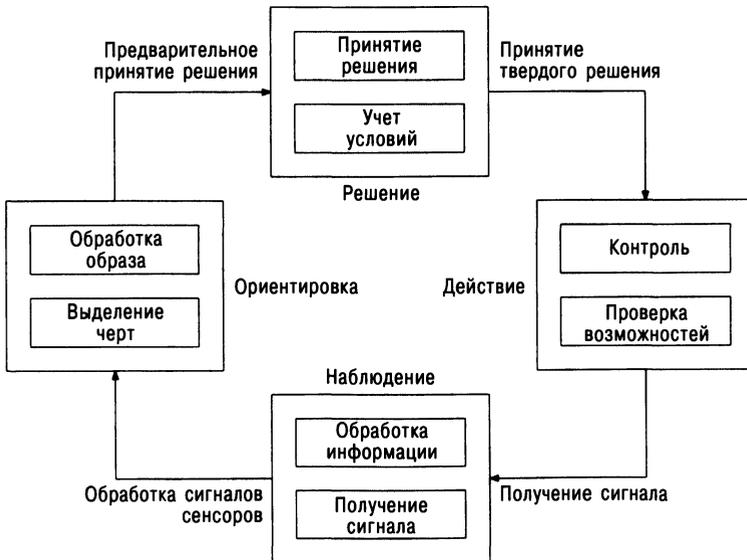


Рис. 4.9. Общая модель.

- идентифицировать преимущества и недостатки различных методов анализа;
- иметь характеристику, оценивающую точность определения цели;
- использовать общую и понятную терминологию;
- не иметь явной ориентации на решение оборонных задач.

Предложенное в работе [3] решение этой задачи представляет собой *общую модель*. Эта модель имеет уровни, аналогичные имеющимся в модели водопада, и циклическую структуру, напоминающую цикл Бойда. Схема этой модели изображена на рис. 4.9. Она синтезирует все описанные выше модели. Общая модель не ориентирована на решение оборонных проблем, что характерно для описанных выше моделей, не использует военной терминологии и включает лучшие особенности моделей СЗЛ, Бойда и водопада. Поэтому она лучше всего подходит для описания работы большинства интеллектуальных структур. Наличие уровня *проверки* обеспечивает анализ работоспособности датчиков и электромеханических преобразователей.

4.8. Анализ данных в интеллектуальных структурах

Выше мы обсудили структуру процедуры анализа данных. Теперь мы рассмотрим, как связаны разработка и эффективность работы интеллектуальных структур.

Первое, что следует понять на основании изучения процедуры анализа данных, — это необходимость иметь целостное представление рассматриваемой проблемы. Интеллектуальная система должна разрабатываться с учетом всех особенностей ее функционирования.

- Нужно выбрать подходящие датчики. При необходимости для контроля физически различных параметров следует использовать датчики различного типа.
- Количество и способ размещения датчиков должны быть оптимальными. Не нужно использовать слишком много датчиков. Количество датчиков может быть ограничено весом и потребляемой мощностью системы контроля. В то же время желателен некоторый избыток датчиков, которые можно включать в случае отказа. Возможна проверка самих датчиков. Это можно делать при помощи самопроверки или ввода специальных контролирующих датчиков. Размещение активных и неактивных модулей также должно быть оптимальным.
- Получаемая информация должна быть надежной, а ее анализ — устойчивым вплоть до получения верного решения. По мере возможности, нужно использовать оптимальные алгоритмы обработки информации.

- Если требуется активно влиять на работу интеллектуальной структуры, электромеханические преобразователи нужно размещать оптимальным образом. При этом должно работать минимально возможное количество активных элементов. Как и в случае датчиков, для компенсации отказов можно зарезервировать часть преобразователей.
- Система должна иметь обратную связь. Если программа решает, что для принятия решения недостает данных, система должна изменять положение датчиков и преобразователей. Это может быть сделано включением неактивных модулей и физическим перемещением работающих элементов.
- Должна иметься процедура плановой починки. При наличии запасной системы контроля может производиться ее замена.
- Контроль работоспособности нужно проводить максимально часто, допуская возможность усовершенствования системы, насколько это позволяют финансовые и технические возможности.

Можно возразить, что эти требования в значительной степени являются всего лишь здравым смыслом и описывают лишь то, что должны делать системы, осуществляющие обработку поступающей информации. Эти требования написаны для формализации требований к широкому ряду систем, работающих в зависимости от поступающей информации. В некотором смысле они походят на программы, ориентированные на объект, в отличие от традиционных программ, направленных на решение специфических задач.

Второй вывод, который следует из сопоставления различных методов обработки данных, состоит в том, что должны иметься операции проверки и анализа информации. Эти операции являются алгоритмами, соответствующими вершинам графа анализа информации. Ниже будет дан обзор некоторых наиболее общих методов такого анализа.

Сейчас в продаже имеются программы, предназначенные для автоматической обработки сигнала датчиков. В обзоре [18] приведен анализ таких программ вплоть до 1993 года. Хотя в нем описаны несколько устаревшие программы, он дает ясное представление о принципах их работы.

4.9. Детекция расслоений при помощи акустических волн

4.9.1. Лэмбовские волны

Как отмечено выше, Риттер описал четыре уровня детекции поврежденных [9]. Для начала опишем первый уровень, называемый детекцией. Процедура, называемая *детекцией аномалий*, является развитием классического метода контроля, в котором непрерывно наблюдают за неко-

торым параметром системы и сообщают о его значительных изменениях. Модернизация состоит в использовании современных методов обработки сигнала.

Рассмотрим проблему поиска расслоений в пластине из композиционного материала при помощи ультразвуковой волны. В этом случае данные представляют временной ряд значений амплитуды ультразвуковых *лэмбовских волн*, характерных для распространения звука в тонких пластинах. Для более подробного знакомства с физическими принципами распространения таких волн можно рекомендовать работу [19]. Акустические методы детекции различных дефектов, включая расслоения, разрыв волокон и растрескивание матрицы в пластинах из композиционных материалов, описаны многими авторами [20–25]. Одна из сложностей данного метода неразрушающего контроля связана с особенностями распространения упругих волн. Распространение волны в пластине можно охарактеризовать произведением частоты волны на толщину образца ($f t$). При низких значениях этого параметра (для алюминия $f t < 1$ МГц·мм) в материале могут распространяться волны только двух типов, а именно основная симметричная (S_0) и антисимметричная (A_0).

Акустическая волна излучается стандартным пьезокерамическим преобразователем, а ее амплитуда (или интенсивность) после прохождения через образец регистрируют оптоволоконным интерферометром. Схема испытаний пластины из композиционного материала приведена на рис. 4.10. Расслоение было создано при помощи тонкой тефлоновой пленки, помещенной между двумя слоями композита перед прессованием. Подробности могут быть найдены в работе [26]. Использование оптоволоконных интерферометров для контроля лэмбовских волн подробно опи-

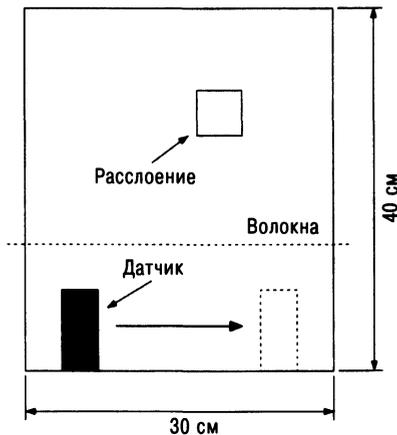


Рис. 4.10. Схема испытаний пластины из композиционного материала.

сано в работе [25]. Вследствие периодического изменения коэффициента преломления возникают интерференционные явления и изменяется интенсивность ультразвуковой волны. Таким образом, распределение интенсивности акустической волны можно изучать при помощи чувствительного датчика.

Информацию о дефектах несет рассеянная акустическая волна. Интенсивность волны имеет весьма сложную временную зависимость вследствие отражения от границ образца и дефекта, и поэтому для детекции аномалии полезен метод автоматического распознавания образов. Анализ значительно упрощается, если распространяется волна лишь одного типа, например симметричная S_0 .

4.9.2. Детекция аномалии

Нейронные сети являются чрезвычайно мощным инструментальным средством распознавания образов [27]. Они используются и для детекции дефектов. Более подробно этот метод описан в Приложении. Искусственные нейронные сети (ИНС) аналогичны предельно упрощенной нервной системе. Они имеют *прямую связь*, т.е. сигналы распространяют сквозь них в одном направлении, от точек входа до точек выхода. Их используют для *классификации* и придания некоторого числового значения целому набору результатов измерений.

Если известна геометрическая форма и положение дефектов, можно предсказать распределение интенсивности рассеянной волны. При наличии таких *исходных данных* нейронная сеть может классифицировать дефекты. Эта возможность здесь не описана вследствие сложного характера взаимодействия акустической волны с расслоениями. Вместо этого часто используют метод, основанный на *детекции аномалии*. Сеть настраивают на форму сигналов при отсутствии дефектов, и программа при появлении дефекта сигнализирует о серьезном отклонении сигнала от исходного состояния. Этот метод не может классифицировать появляющиеся дефекты. Его достоинством является то, что исходная форма сигнала может определяться в предварительных экспериментах, что устраняет необходимость в сложной *априорной* теории. Примеры детекции аномалий в медицинской диагностике описаны в работе [28], а детекция дефектов в инженерных конструкциях – в работах [29, 30].

Принцип работы такой системы вполне очевиден. Дефект изменяет форму рассеянной волны. Отметим, что идентифицировать нужно лишь *значительные* изменения, которые не могут быть обусловлены флуктуациями или шумом измеряемого параметра.

Принятый здесь подход, описанный в работе [31], должен настроить сенсорную сеть на заданное распределение интенсивности. Он использует многослойную прямую сеть [32], которая способна воспроизвести на выходе распределение интенсивности, подаваемой на вход. Эта задача тривиальна, если сеть не имеет внутренних слоев с меньшим количе-

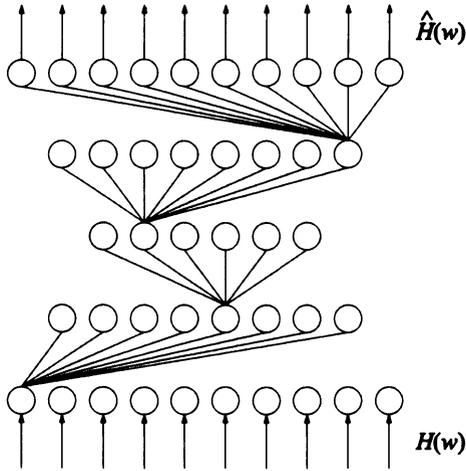


Рис. 4.11. Автоассоциативная нейронная сеть.

ством каналов, чем на входе (рис. 4.11). В противном случае сеть должна принимать во внимание существенные особенности распределения интенсивности. Тренировка сети осуществляется путем подачи на нее распределения интенсивности, соответствующей нормальным условиям, на которые накладываются шум, и на ее выходе запоминается сигнал.

Индекс новинки $\nu(\vec{z})$, соответствующий вектору $\vec{z} = \{z_1, z_2, \dots, z_N\}$ длине вектора в евклидовых координатах между точкой изображения \vec{z} и его представлением $\hat{\vec{z}}$:

$$\nu(\vec{z}) = \left| \vec{z} - \hat{\vec{z}} \right|. \quad (4.1)$$

Если тренировка прошла успешно, то $\vec{z} = \hat{\vec{z}}$ для всех данных, полученных в процессе тренировки, и $\nu(\vec{z}) = 0$. Если появилось расслоение, длина вектора $\nu(\vec{z})$ становится ненулевой. Заметим, что ν возрастает не обязательно монотонно при увеличении степени повреждения, а методика детекция аномалии работает в режиме да/нет.

4.9.3. Результаты

Первая стадия тренировки детектора новинки состоит в создании одного или нескольких контрольных сигналов. В самом простом случае получают сигнал, характеризующий распределение амплитуды сигнала по координате. Рисунок 4.12 демонстрирует волну, записанную в 500 точках при крайнем левом положении источника сигнала. Первый импульс не содержит информации о дефектах. Второй импульс соответствует волне, отраженной от задней стенки пластины. Он содержит полезную информацию, поскольку волна дважды прошла через дефект. Между этими событиями приходит сигнал, рассеянный дефектом. Для

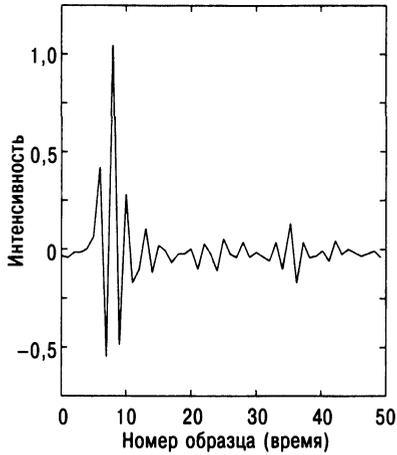


Рис. 4.12. Типичная волна при отсутствии дефекта.

компенсации изменения площади контакта между источником ультразвука и пластиной сигналы, соответствующие различным положениям источника, нормировали на амплитуду импульса в отсутствие дефекта. Из сигнала вычли средние значения сигнала, а также все случайные пики. Заключительный этап предварительной обработки состоял в уменьшении количества сигналов в 5 раз, в результате чего получили характеристический вектор с 50 независимыми координатами.

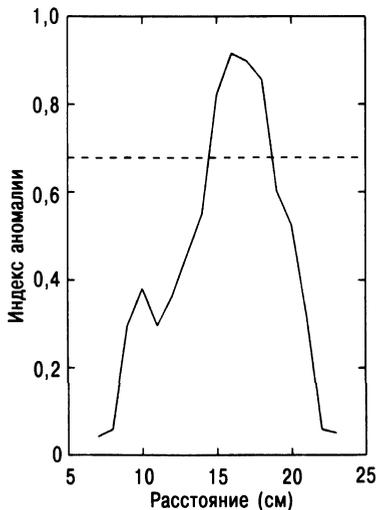


Рис. 4.13. Индекс аномалии испытываемой пластины.

Вторая стадия состоит в тренировке сети. Два крайних левых и крайних правых вектора данных принимались в качестве нормальных условий. Затем приступили к созданию процедуры детекции, нечувствительной к влиянию помех. Для этого создали обучающую последовательность, содержащую 250 вариантов каждой кривой, соответствующей сумме нормальных условий с нормально распределенным шумовым сигналом. Типичный сигнал бездефектной структуры показан на рис. 4.12.

После тренировки сенсорной сети источник последовательно перемещали слева направо с интервалом 5 мм. Зависимость полученного индекса аномалии от координаты источника приведена на рис. 4.13. Наличие дефекта вполне очевидно. Пунктиром на графике отмечен пороговый уровень, превышение которого свидетельствует о появлении дефекта. При определении порога предполагали, что шум характеризуется нормальным распределением, а порог полагали равным четырехкратному среднеквадратичному отклонению. Положение дефекта определяется областью превышения этого уровня.

Выше отмечалось, что детектор аномалии является диагностикой поиска повреждения первого уровня. Однако в некоторых случаях с его помощью можно получить и дополнительную информацию. Поскольку индекс аномалии зависит от координаты, диапазон надпороговых значений указывает на размер и положение дефекта. На рис. 4.13 четыре точки превышают пороговое значение, что соответствует ширине дефекта 40 мм. Реальная ширина была равна 15 мм. Слишком большое значение размера расслоения объясняется расхождением фронта волны при ее распространении через пластину.

4.10. Оптимизация расположения датчиков и их контроль

4.10.1. Оптимальное расположение датчиков

В этом параграфе обсуждается оптимизация размещения датчиков. Эти же методы используют и для контроля работоспособности датчиков. Исследуемый метод описан в работах [33, 34]. Для описания поведения металлической пластины, моделирующей внешнюю обшивку самолета, применяли метод конечных элементов.

Рассмотрим пластину, в которой два края заделаны (С), а два других свободно оперты (SS), как показано на рис. 4.14. Приложенная нагрузка представляет комбинацию изгиба и нагружения в плоскости пластины. При моделировании поведения пластины методом конечных элементов использовали программу ABAQUS. При вычислениях брали регулярную решетку размером 30 × 30, состоящую из 900 прямоугольных элементов.

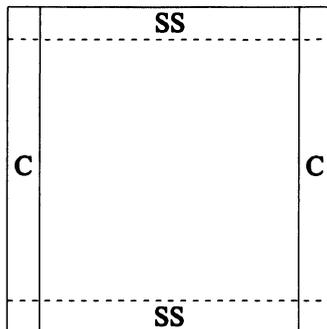


Рис. 4.14. Граничные условия нагружения пластины.

Для определения положения расслоения пластина была разделена на 36 областей, как показано на рис. 4.15. Модуль Юнга поврежденных элементов считали равным нулю. Количество дефектных элементов было равно девяти. Отметим, что размер дефекта мог быть и меньше, но цель работы состояла в оптимизации расположения датчиков, а не в диагностике дефекта.

Как было установлено в работе [33], наиболее легко детектируются деформации сдвига, которые для моделирования наиболее сложных условий нагружения не включали в условия нагружения. Места возможного расположения датчиков в субрешетке из 5×5 элементов показаны на рис. 4.16.

Структура нейронной сети подробно описана в работе [33]. Она имеет 36 выводов, по одному на каждую точку контроля повреждения. Вначале провели тренировку системы, проверили сенсорную сеть и оценили вероятность ошибки в определении положения дефекта.

31	32	33	34	35	36
25	26	27	28	29	30
19	20	21	22	23	24
13	14	15	16	17	18
7	8	9	10	11	12
1	2	3	4	5	6

Рис. 4.15. Возможные области расслоения. Черным цветом отмечены девять конечных элементов с нулевой жесткостью.

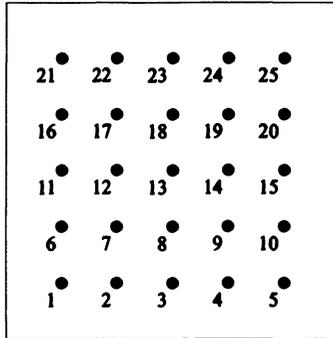


Рис. 4.16. Возможные области размещения датчиков.

Для определения наилучшего расположения датчиков использовали алгоритм, подробно описанный в работе [36]. Использовали три датчика. Алгоритм работы программы аналогичен механизму естественного отбора в природе. Сначала генерировали некоторую популяцию положений датчиков. Из них выбирали распределения, работающие наилучшим образом. После этого производили набор мутаций посредством случайного сдвига одного из датчиков на одно положение и случайного добавления новых положений. После этого вновь оценивали эффективность работы датчиков и сравнивали ее с результатами предыдущей итерации.

Как показано в работе [34], два датчика не позволяют надежно определить местоположение дефекта. Расположение датчиков характеризовали векторами типа (2, 14, 23), где каждая цифра описывает положение одного из трех датчиков. В данном случае датчики расположены в квадратах 2, 14 и 23. Эффективность работы датчиков оценивали коэффициентом надежности, который равен величине, обратной вероятности ошибки определения положения дефекта.

Алгоритм характеризовали следующими параметрами: размер популяции был равен 50, а количество генераций — также 50. При каждой последующей итерации оставляли единственный элемент с наибольшим коэффициентом надежности и добавляли пять новых элементов. Более подробно с работой программы можно ознакомиться в работах [36, 37].

Наилучшее распределение датчиков описывается координатами (4, 16, 25). Это распределение характеризуется коэффициентом надежности 3,155, что соответствует вероятности неверного определения координаты расслоения 0,317. Это распределение представлено на рис. 4.17.

Для оценки эффективности работы алгоритма произвели полный перебор всех возможных комбинаций расположения датчиков, и оказалось, что идеальное распределение имеют координаты (8, 16, 25). Это распределение (рис. 4.18) близко к распределению, полученному с помощью описанного алгоритма. Вероятность ошибки при идеальном рас-

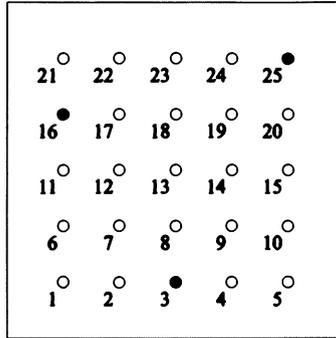


Рис. 4.17. Лучшее распределение трех датчиков, определенное описываемым алгоритмом.

положении равна 0,321. То, что коэффициент надежности описанного алгоритма выше, чем в случае полного перебора, на первый взгляд кажется ошибкой. Однако это связано со статистической природой коэффициента надежности и его зависимостью от выбора начальных условий. По этой причине оптимальное расположение датчиков согласно описываемому алгоритму несколько отличается от распределения, определенного полным перебором. Тем не менее эффективность работы алгоритма весьма высока.

4.10.2. Определение отказов

Тот же метод оптимизации можно использовать и для нахождения расположения датчиков, при котором легче определить отказ одного из них. Однако метод оптимизации несколько изменили. Исходя из заданного *материнского* распределения N датчиков, после отказа одного из

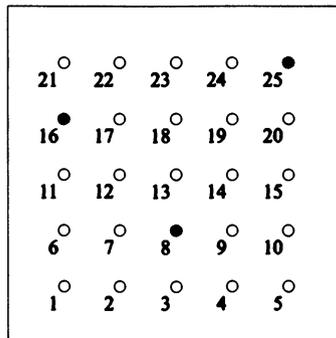


Рис. 4.18. Лучшее распределение трех датчиков согласно методу полного перебора.

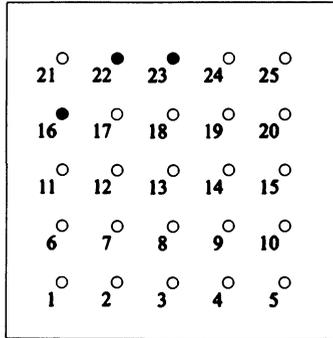


Рис. 4.19. Определенное полным перебором распределение трех датчиков, при котором легче всего определяется отказ.

них генерировали все возможные *дочерние* распределения из $N - 1$ датчиков. Надежность определения отказа материнского распределения датчиков охарактеризовали, найдя *самую высокую* вероятность ошибки определения отказавшего датчика и вычислив обратную ей величину. Эту величину назвали *коэффициентом отказоустойчивости*.

Данный алгоритм использовали для различных распределений из трех датчиков. Наибольший коэффициент *отказоустойчивости*, равный 1,704, имеет распределение, показанное на рис. 4.19. Это означает, что вероятность ошибки самого плохого дочернего распределения из двух датчиков равна 0,587. Особенностью этого распределения является то, что датчики расположены близко друг к другу. Определенный полным перебором коэффициент *отказоустойчивости* оказался равен 1,75, и результат, полученный разработанной процедурой, очень хорош.

Как показал метод полного перебора, самый высокий коэффициент надежности определения положения дефекта при помощи двух датчиков все же ниже минимального коэффициента надежности для трех датчиков (16, 22, 23). Однако коэффициент надежности родительского распределения при этом недостаточно высок. Причина этого в том, что оптимизация по принципу максимально надежного определения отказа не учитывает эффективность работы материнской конфигурации. На практике, искомое расположение датчиков должно быть компромиссным и учитывать оба требования.

Самопроверка датчиков

В этом разделе обсуждаются два способа самопроверки сенсорных сетей. Во-первых, можно использовать дополнительные датчики и программное обеспечение, позволяющие перед измерениями оценить *коэффициент надежности* датчиков. Такой подход использует программа SEVA [11–13].

Второй подход использует лишь основную сеть датчиков, и проверка работоспособности выполняется самой сетью без привлечения дополнительных средств. Это можно сделать четырьмя способами.

Активный способ 1. Центральный датчик посылает опорный сигнал, который принимается всеми датчиками сети, и полученный сигнал сравнивается с формой ожидаемого сигнала. Результаты характеризуют коэффициентом аномалии.

Активный способ 2. Сами датчики, например пьезоэлектрические, возбуждают акустический сигнал и опрашивают другие датчики. Это позволяет провести перекрестную проверку датчиков.

Пассивный способ 1. Вычисляется распределение вероятности реакции датчика (методика описана в работе [38]) и сравнивается с контрольным распределением для надежно работающего датчика.

Пассивный способ 2. Часть датчиков используется для определения распределения вероятности реакции, а затем используется предыдущий пассивный подход.

Создание самопроверяющихся сенсорных сетей является заключительным этапом построения методики детекции повреждений. Компьютеры используются на всех стадиях этой технологии, от моделирования дефекта при тренировке и построения метода распознавания образов и диагностики датчиков и до оптимизации распределения датчиков и контроля их работоспособности.

4.11. Заключение

В принципе все перечисленные во введении требования к свойствам интеллектуальных структур на практике могут быть реализованы с помощью адекватных методов анализа данных, обработки сигналов и вычислений. В этой главе не обсуждались активные действия интеллектуальных систем, поскольку это является самостоятельной проблемой, которая обсуждается в других главах этой книги. Разработки оптоэлектронных и компьютерных вычислительных методов в будущем могут еще больше усилить мощность методов анализа данных.

Приложение А. Многослойная нейронная сеть

В Приложении рассматривается пример многослойной нейронной сети (МНС). Здесь дается краткое описание этого метода, а подробное описание можно найти в работах [39, 32].

МНС – это совокупность взаимосвязанных элементарных вычислительных процедур, называемых нейронами или узлами графа и размещаемых в различных слоях. Сигналы подаются на узлы *входного уровня*, в которых они обрабатываются и отправляются через сеть на *промежуточные уровни*, а конечный результат выдается через *уровень выхода*. Связь i -го узла графа со всеми j узлами предшествующего уровня описывается весовыми коэффициентами w_{ij} . При этом все узлы сети связаны со всеми узлами последующего уровня. Для всех сигналов величиной x_j , поступающих с предшествующего уровня, в i -м узле вычисляется взвешенная сумма сигнала z_i . Это значение является аргументом нелинейной функции f , которая определяет значение сигнала на выходе из узла графа и передается на следующий уровень:

$$x_i = f(z_i) = f\left(\sum_j w_{ij}x_j\right). \quad (\text{A.1})$$

Функции f могут иметь различный вид, но здесь мы будем считать, что она представляет собой гиперболический тангенс $\text{tg } x$. Один из узлов графа, называемый *определяющим узлом*, связан со всеми узлами внутренних и выходного уровней. Сигнал на выходе из определяющего узла постоянен, чтобы обеспечить нормировку сигнала z_i во всех узлах сети.

Первый этап настройки сети состоит в определении значений весовых коэффициентов w_{ij} . Эту стадию называют *тестированием* или *тренировкой*. Тестирование будет состоять в подаче на вход сети ряда сигналов, для которых известны сигналы на ее выходе. Если отклонение результата от контрольной величины достаточно мало, величину весовых коэффициентов не регулируют. Если же отклонение является значительным, ее величину направляют *в обратном направлении* и применяют некоторый алгоритм для корректировки весовых коэффициентов. Использованный в этой работе алгоритм может быть кратко описан следующим образом. Для каждой процедуры тестирования оценивают величину ошибки (отклонения от истинного значения) J :

$$J(t) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{n(t)} \left[y_j(t) - \hat{y}_j(t) \right]^2, \quad (\text{A.2})$$

где n^0 – количество узлов на уровне вывода. J является неявной функцией параметров $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$, где θ_i – вес соединений, упорядоченных некоторым способом. Целое число t описывает номер теста. После введения тестирующей последовательности стандартный алгоритм состоит в регулировании параметров:

$$\Delta\theta_i = -\eta \frac{\partial J}{\partial \theta_i} = -\eta \nabla_i J, \quad (\text{A.3})$$

где ∇_i – оператор градиента. Параметр η называют коэффициентом тренировки. В работе [39] приведено следующее выражение для пересчета весов в процессе тестирования:

$$u_y^{(m)}(t) = u_y^{(m)}(t-1) + \eta \delta_i^{(m)}(t) x_j^{(m-1)}(t) \quad (\text{A.4})$$

где $\delta_i^{(m)}$ – величина ошибки на выходе i -й точки на уровне m . Эта погрешность *априорно* не известна, но ее можно вычислить исходя из известных погрешностей $\delta_i^{(l)} = y_i - \hat{y}_i$ на уровне выхода. Исходя из этих ошибок должны регулироваться весовые коэффициенты, перемещаясь от уровня вывода в обратном направлении.

Если коэффициент тренировки η слишком мал, сходимость к правильным параметрам может быть слишком медленной. Если он слишком велик, настройка будет быстрой, но веса могут колебаться или даже расходиться. Один из способов решения этой проблемы состоит во введении коэффициента *инерции*, в результате чего предыдущие весовые коэффициенты изменяются не слишком быстро:

$$\Delta u_y^{(m)}(t) = \eta \delta_i^{(m)}(t) x_j^{(m-1)}(t) + \alpha \Delta u_y^{(m)}(t-1), \quad (\text{A.5})$$

где α – коэффициент инерции. Его роль состоит в уменьшении амплитуды высокочастотных колебаний в процессе регулировки весовых параметров.

Как только погрешность уменьшается до приемлемого уровня, процесс тестирования заканчивается, и сеть считают установленной. Для процедуры тренировки использовался пакет программ MLP [40].

Литература

1. Klein, L. A. (1999) *Sensor and Data Fusion: Concepts and Application*, SPIE Press.
2. Esteban, J. and Starr, A. G. (1999) «Building a Data Fusion Model» *Proc. Int. Conf. on Data Fusion – EuroFusion 99, Stratford-upon-Avon, UK*, pp. 187–196.
3. Bedworth, M. and O'Brien, J. (1999) «The Omnibus Model: A New Model of Data Fusion» (preprint).
4. Sandell, N. R., Lauer, L. C. and Kramer, L. C. (1980) «Research Issues in Surveillance for C³» *Proc. 19th IEEE Conf. on Decision and Control*, pp. 201–213.
5. Athans, M. (1980) «System Theoretic Challenges and Research Opportunities in Military C³ Systems» *Proc. 19th IEEE Conf. on Decision and Control*, pp. 12–16.
6. White, F. E. Jr. (1990) *Technical Proceedings of the Joint Service Data Fusion Symposium, I-DFS-90*, Joint Directors of Laboratories Data Fusion Subpanel report: SIGINT session, pp. 469–484.

7. Data Fusion Development Strategy Panel (1991) *Functional Description of the Data Fusion Process*, Office of Naval Technology.
8. Waltz, E. and Linas, J. (1990) *Multisensor Data Fusion*, Artech House.
9. Rytter, A. (1993) *Vibration Based Inspection of Civil Engineering Structures*, PhD thesis, Department of Building Technology and Structural Engineering, University of Aalborg, Denmark.
10. Gatepaille, S., Brunessaux, S. and Abdulrab, H. (1999) «Data Fusion Multi-Agent Framework» *Proc. Int. Conf. on Data Fusion – EuroFusion 99, Stratford-upon-Avon, UK*, pp. 97–102.
11. Henry, M. P. and Clarke, D. W. (1993) «The Self-Validating Sensor: Rationale, Definitions and Examples», *Control Eng. Practice*, **1**, 585–610.
12. Henry, M. P. (1994) «Validating Data from Smart Sensors», *Control Eng.*, **41**, 63–66.
13. Henry, M. P. (1995) «A Self-Validating Coriolis Meter», *Control Eng.*, **42**, 81–86.
14. Side, S., Staszewski, W. J., Wardle, R. and Worden, K. (1997) «Fail-safe sensor distributions for damage detection» *Proc. Int. Workshop on Damage Assessment Using Advanced Signal Processing Procedures – DAMAS 97, Sheffield, UK*, pp. 135–146.
15. Boyd, J. (1987) *A Discourse on Winning and Losing*, Maxwell AFB lecture.
16. Bosse, E. and Bertrand, S. (1999) «R&D Perspectives on Data Fusion and Decision Support Technologies for Naval Operations» *Proc. Int. Conf. on Data Fusion – EuroFusion 99, Stratford-upon-Avon, UK*, pp. 85–95.
17. Bedworth, M. (1994) «Probability Moderation for Multilevel Information Processing», DRA technical report DRA/CIS(SE1)/651/8/ M94.AS03BP032/1.
18. Hall, D. L. and Linn, R. J. (1993) «Survey of Commercial Software for MultiSensor Data Fusion» *Proc. SPIE Conf. on Sensor Fusion and Aerospace Applications*, **1956**, pp. 98–109.
19. Viktorov, I. A. (1967) *Rayleigh and Lamb Waves: Physical Theory and Applications*, Plenum Press.
20. Alleyne, D. N. and Cawley, P. (1992) «The Interaction of Lamb Waves with Defects», *IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, **39**, 381–397.
21. Alleyne, D. N. and Cawley, P. (1992) «Optimisation of Lamb Wave Inspection Techniques», *NDT&E Int.*, **25**, 11–22.
22. Cawley, P. and Alleyne, D. N. (1996) «The Use of Lamb Waves for the Long Range Inspection of Large Structures», *Ultrasonics*, **34**, 287–290.
23. Guo, N. and Cawley, P. (1994) «Lamb Wave Reflection for the Quick Non-Destructive Evaluation of Large Composite Laminates», *Mat. Eval.*, **52**, 404–411.
24. Jansen, D. P., Hutchins, D. A. and Mottram, J. T. (1994) «Lamb Wave Tomography of Advanced Composite Laminates Containing Damage», *Ultrasonics*, **32**, 83–89.
25. Pierce, S. G., Philp, W. R., Culshaw, B., Gachagan, A., McNab, A., Hayward, G. and Lecuyer, F. (1996) «Surface-Bonded Optical Fibres for the Inspection of CFRP Plates Using Ultrasonic Lamb Waves», *Smart Mat. & Struct.*, **5**, 776–787.
26. Staszewski, W. J., Pierce, S. G., Worden, K., Philp, W. R., Tomlinson, G. R. and Culshaw, B. (1997) «Wavelet Signal Processing for Enhanced Lamb Wave Defect Detection in Composite Plates Using Optical Fibre Detection», *Optic. Eng.* (to appear).
27. Bishop, C. M. (1995) *Neural Networks for Pattern Recognition*, Oxford University Press.
28. Tarassenko, L., Hayton, P., Cerneaz, N. and Brady, M. «Novelty Detection for the Identification of Masses in Mammograms» (preprint).

29. Surace, C, Worden, K. and Tomlinson G. R. (1997) «A Novelty Detection Approach to Diagnose Damage in a Cracked Beam», *Proc. 15th Int. Conf. on Modal Analysis, Orlando, Florida*, pp. 947–953.
30. Worden, K. (1997) «Structural Fault Detection Using a Novelty Measure», *J. Sound & Vib.*, **201**, 85–101.
31. Pomerleau, D. (1993) «Input Reconstruction Reliability Estimation», *Advances in Neural Information Processing Systems 5* (ed. S. J. Hanson, J. D. Cowan and C. L. Giles), Morgan Kaufman.
32. Rumelhart, D. E. and McClelland, J. L. (1988) *Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition*, MIT press.
33. Staszewski, W. J., Worden, K. and Tomlinson G. R. (1996) «Optimal Sensor Placement for Neural Network Fault Diagnosis», *Proc. Adaptive Computing in Engineering Design and Control 96*, pp. 92–99.
34. Worden, K. and Burrows A. P. (1997) «Optimal Sensor Location for Fault Detection», *Eng. Struct.* (to appear).
35. Richard, M. D. and Lippmann, R. P. (1991) «Neural Network Classifiers Estimate Bayesian a Posteriori Probabilities», *Neural Computation*, **3**, 461–483.
36. Goldberg, D. E. (1989) *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley.
37. Staszewski, W. J. (1995) «Optimal Sensor Distributions for Fault Diagnostics Part II: Neural Network Analysis», report DCRG-BAe-2/95, Department of Mechanical Engineering, University of Sheffield, Sheffield, UK.
38. Silverman, B. W. (1986) *Density Estimation for Statistics and Data Analysis*, Chapman and Hall.
39. Billings, S. A., Jamaluddin, H. B. and Chen, S. (1991) «A Comparison of the Backpropagation and Recursive Prediction Error Algorithms for Training Neural Networks», *Mech. Sys. & Signal Process.*, **5**, 233–255.
40. Worden, K.” (1996) *MHC 3.4 – A User’s Manual* (obtainable via k.worden@sheffield.ac.uk).

СПЛАВЫ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ

Н. Б. Морган
К. М. Френд

5.1. Введение

Сплавы с памятью формы – общее название, данное сплавам, которые имеют необычное свойство помнить о деформациях. Этот эффект состоит в каучукоподобном поведении, при котором восстанавливаются большие деформации при постоянной температуре (эффект суперупругости), а также в полном восстановлении деформации в результате изменения температуры. Такое поведение обусловлено изменением структуры кристаллической структуры, состоящем в появлении микрокристаллов *мартенситной фазы*. *Мартенситный переход* обусловлен полиморфным переходом кристаллической структуры от исходной («родительской») фазы к мартенситной. Этот переход схематически иллюстрируется рис. 5.1. Такие переходы не связаны с диффузией или изменением химического состава и являются основной высокотемпературных методов обработки многих металлов, включая известный переход аустенита в мартенсит в сплавах железа. Термически инициированный переход в мартенситную фазу происходит при снижении температуры (рис. 5.2). Постепенный переход начинается при температуре M_s (температуре инициации мартенситного перехода), и доля мартенситной фазы возрастает при снижении темпе-



Рис. 5.1. Схематическое изображение термоупругого мартенситного перехода.

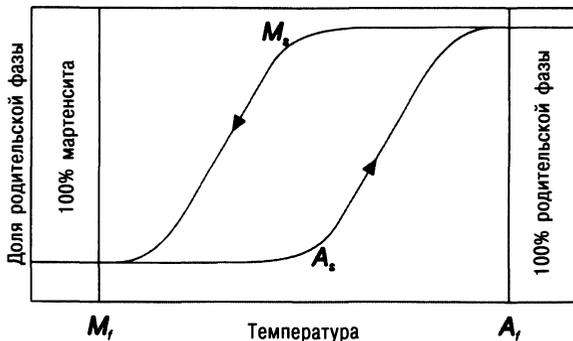


Рис. 5.2. Гистерезисная кривая термоупругого мартенситного перехода.

ратуры вплоть до полного завершения перехода при температуре M_r . При нагревании мартенситные зерна, сформированные последними в процессе перехода, первыми начинают возвращаться к родительской фазе, и обратный переход продолжается вплоть до температуры A_r , при которой полностью восстанавливается исходная высокотемпературная фаза. Ширина гистерезисной кривой между прямым и обратным переходами в сплавах с эффектом памяти формы (СЭП) невелика, обычно между 10 и 50°C. Отметим, что в мартенситной стали этот переход гораздо шире. Если температура нагрева не слишком высока, термостимулированный мартенситный переход может быть повторен сколько угодно раз.

5.2. Структурная природа эффекта памяти

Особенностью всех мартенситных переходов является наличие множества эквивалентных сдвиговых направлений, в которых может формироваться мартенсит в пределах родительской области. Это приводит к формированию так называемых мартенситных *вариантов* в микроструктуре сплава. Схематически это иллюстрируется двумерной моделью, показанной на рис. 5.1.

На этом рисунке показаны два кристаллографически эквивалентных мартенситных микрокристалла, создаваемых различными сдвигами микрокристаллов родительской фазы. Если сдвиги в противоположных направлениях скомпенсированы, материал сохраняет свою макроскопическую форму. Микроструктуру, в которой сдвиг в одном направлении компенсируется сдвигом в противоположном направлении, называют аккомодированной. Она является основой эффекта памяти формы, хотя трехмерная аккомодация требует большого количества вариантов (во многих сплавах до 48).

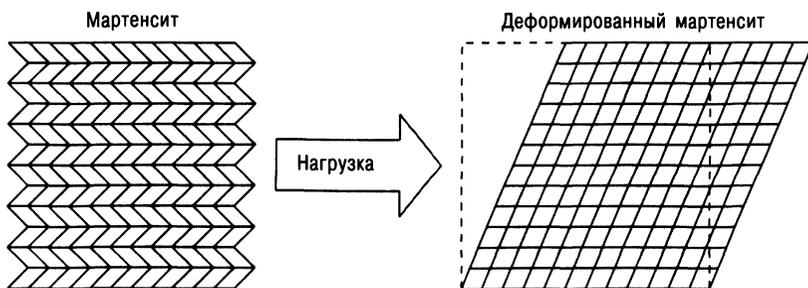


Рис. 5.3. Переориентация вариантов в термоупругом мартенсите.

Очевидно (рис. 5.1), что родительская фаза имеет более высокую симметрию, чем мартенсит. Как следствие, хотя имеется много способов перехода в мартенситное состояние, существует лишь несколько возможных путей обратного перехода, часто сводимых дополнительными ограничениями до единственного пути возврата. Как следствие, возвращение назад от мартенсита к родительской фазе ведет к полному восстановлению исходной микроструктуры (рис. 5.1). В сплавах с эффектом памяти формы границы раздела между мартенситными вариантами могут смещаться, и их положение можно изменять внешними воздействиями, например при помощи механической нагрузки. Это иллюстрируется рис. 5.3, на котором показано изменение формы под действием приложенного напряжения. Границы раздела между вариантами сдвигаются таким образом, чтобы «вырастить» наиболее благоприятно ориентированные и сжать наименее благоприятно ориентированные варианты (по отношению к нагрузке). Именно ориентирование вариантов мартенсита под действием приложенного напряжения и возвращение к родительской структуре формируют основу так называемого одностороннего эффекта памяти формы.

5.3. Односторонняя память формы

На рис. 5.4 схематически изображена диаграмма деформирования, демонстрирующая макроскопическое поведение металлов с односторонней памятью формы. Если такой сплав деформируют в мартенситном состоянии, после разгрузки остается значительная пластическая деформация. Это является следствием переориентации мартенситной микроструктуры, которая сохраняется после снятия внешнего напряжения, как показано на рис. 5.3. Если сплав будет нагрет до температуры, превышающей температуру мартенситного перехода, то остаточная деформация полностью восстановится и образец вернет свою первоначальную макроскопическую форму.

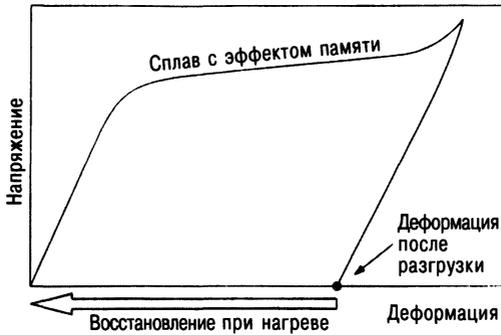


Рис. 5.4. Диаграмма деформирования «напряжение–деформация», демонстрирующая макроскопическое поведение металлов с односторонней памятью формы.

Это называют односторонним эффектом памяти. Пока деформация не слишком высока и еще не началось макроскопическое пластическое течение, возврат формы может происходить также под действием растяжения, сжатия, изгиба или их комбинации.

Внутренние структурные изменения можно описать моделью, изображенной на рис. 5.5. При нагружении материала в самоаккомодированном мартенситном состоянии происходит перестройка вариантов, приводящая к макроскопическому изменению формы. После разгрузки сплава он сохраняет остаточную деформацию. Однако, если сплав нагреть выше температуры мартенситного перехода, будет восстановлена первоначальная микроструктура родительской фазы и, как следствие, первоначальная форма. Это происходит из-за того, что, независимо от распределения остаточных деформаций мартенситных вариантов, имеется только один путь возвращения к родительской фазе. Когда сплав охлаждается ниже температуры перехода, формируется самоаккомодированная мартенситная микроструктура и возвращается первоначальная форма образца. Максимальная деформация, восстанавливаемая в ходе этого процесса, зависит от типа металла, однако обычно для поликристаллических сплавов она находится в диапазоне от 1 до 7%.

5.4. Эффект двусторонней памяти

Сплавы, для которых характерен эффект односторонней памяти, запоминают только одну, так называемую горячую форму родительской фазы. Однако металлы с эффектом памяти можно обработать так, чтобы они восстанавливали форму и в горячем, и в холодном состоянии. Это явление называют эффектом двусторонней памяти, и деталь может циклически изменять свою форму без приложения внешней нагрузки.

Двусторонние изменения формы основаны на микроструктурных изменениях мартенситной структуры, которые происходят под действием приложенного напряжения [1]. При двустороннем эффекте самоаккомодация мартенситной микроструктуры нарушается из-за наличия внутренних напряжений и появляется преобладание вариантов определенной формы. В этом случае при охлаждении происходит изменение формы вследствие перехода к холодной фазе, а при нагревании форма восстанавливается путем обратного перехода. Такой цикл иллюстрируется рис. 5.5. Отметим, что в подобных сплавах мартенситная форма восстанавливается охлаждением ниже температуры M_s из-за наличия внутренних напряжений. Внутренние напряжения могут появиться вследствие различных воздействий, которые называют «тренировкой». Области существования микронапряжений должны быть устойчивыми при циклических изменениях температуры, и обычно это связано с наличием дефектов структуры. Такие дефекты могут представлять собой инородные частицы и зародыши новой фазы [4], возникающие при специальной термомеханической обработке [5]. Кроме того, они возникают при предварительном деформировании [2, 3]. Двусторонняя память, связанная с появлением массива дислокаций, может возникнуть после следующих процедур «тренировки».

- Циклического деформирования при температуре ниже M_f и последующего нагревания до температуры выше A_f в условиях механического стеснения формы.
- Циклического изменения формы от «горячего» до «холодного» состояния при температуре выше A_f [6].

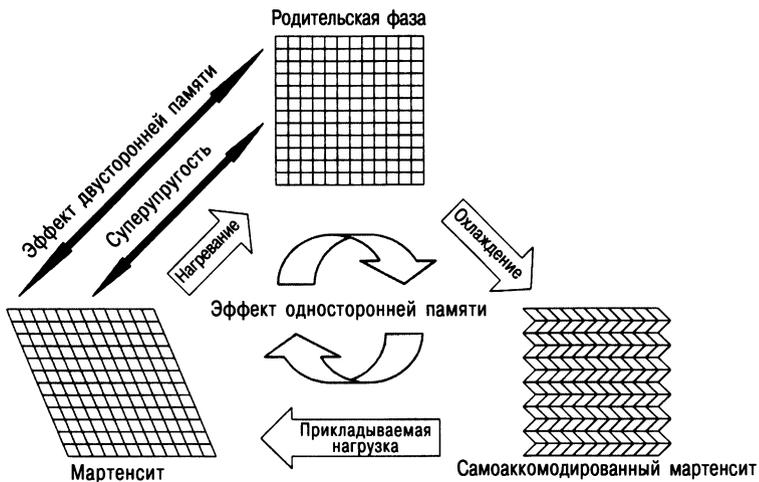


Рис. 5.5. Микроструктурные изменения при эффекте тепловой памяти и суперупругом поведении.

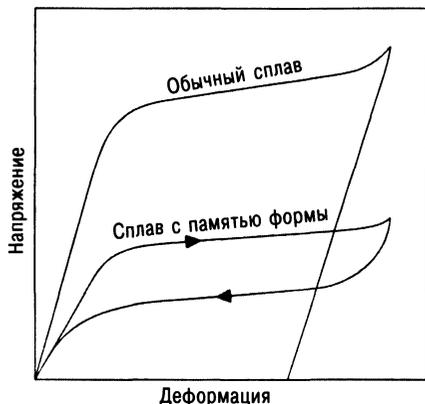


Рис. 5.6. Диаграммы деформирования «напряжение–деформация», демонстрирующие поведение обычных и суперупругих сплавов.

5.5. Эффект суперупругости

Путем механического деформирования мартенситный переход в сплаве с эффектом памяти формы может быть инициирован даже при температуре выше A_c . Образовавшаяся мартенситная фаза устойчива лишь под действием напряжения, а при разгрузке она превращается в исходную родительскую фазу. На рис. 5.6 сравнивается механическое поведение суперупругого материала в сравнении с обычным металлическим сплавом. Суперупругие материалы могут полностью восстанавливать деформации, достигающие 6–7%. Рисунок 5.6 показывает, что деформирование такого сплава характеризуется гистерезисной кривой, причем верхняя кривая соответствует мартенситному переходу, инициированному механическим напряжением, а нижняя — обратному переходу при разгрузке. На практике используют как большую деформацию усадки при эффекте суперупругости, так и постоянство напряжения при восстановлении.

Эти эффекты объясняются тем, что инициированный нагрузкой переход приводит к появлению избытка одного из вариантов мартенситной фазы («деформированной мартенситной структуры») (рис. 5.5). В результате появляется макроскопическая деформация, которая восстанавливается при обратном мартенситном переходе. Гистерезис деформационной кривой связан с гистерезисом мартенситных переходов (рис. 5.2).

5.6. История исследования сплавов с памятью формы

Впервые суперупругое поведение, являющееся основой эффекта памяти формы, в сплаве Au-Cd наблюдал в 1932 году Оландер, назвавший его каучукоподобным поведением [7]. В 1938 году такое же пове-

дение сплавов Cu-Zn наблюдали Гренингер и Мурадян [8]. Однако термин «восстановление формы» был введен гораздо позже Чангом и Ридом, исследовавшими поведение сплавов Au-Cd [9]. Понятие эффекта памяти как свойства материала ввели в 1963 году Бюлер с соавторами, изучавшие сплавы NiTi [10]. Их открытие инициировало лавинообразный рост интереса к эффекту памяти. В 1960-х годах началось смещение акцентов от чисто научного интереса к техническому использованию, что подпитывало исследования в этом направлении. Дюриг делит практические применения материалов с эффектом памяти в соответствии со следующими термическими проявлениями эффекта суперупругости [11].

Восстановление формы вследствие суперупругости. После деформирования последующий высокотемпературный нагрев приводит к восстановлению первоначальной формы, сохраняемой и при охлаждении. Функция сплава в этом случае состоит в создании движения или деформации.

Ограниченное восстановление. Сплав восстанавливает форму не полностью, приводя к появлению напряжений в элементах и микрокристаллах, ограничивающих восстановление.

Термостимулированное восстановление. При нагревании сплав восстанавливает форму, в результате чего производится механическая работа.

Дюриг [11] рассматривает применение следующих проявлений эффекта суперупругости в изотермических условиях.

Суперупругое восстановление. Использование эффекта памяти при постоянной температуре связано только с суперупругим восстановлением (называемым иногда псевдоупругостью). В этом случае используется сравнительно большая величина восстанавливаемой деформации и, соответственно, запасенной энергии.

В некоторых случаях делить условия проявления эффекта на термостимулированные и изотермические невозможно, а суперупругое восстановление происходит в условиях смешения свободного и стесненного изменения формы. Иными словами, восстановление формы суперупругих элементов может как происходить свободно, так и быть механически ограниченным другими элементами в зависимости от условий. Поэтому деление эффектов на тепловые и изотермические не полностью описывает явление. Однако такой способ классификации все же полезен для классификации практического применения эффекта памяти в технических системах.

Хотя сплав NiTi применяется во всех четырех описанных Дюригом категориях [11], наиболее широко используется его суперупругость. В медицинской промышленности было сконструировано множество уникальных инженерных устройств из сплава NiTi, причем область их применения продолжает быстро расширяться. Это обусловлено биологической совместимостью данного сплава с живыми тканями [12–14],

а также простотой проектирования устройств, основанных на явлении суперупругости.

Из суперупругого сплава NiTi делали проволоку, используемую при неповреждающей хирургии [15] и лечении артерий и пищевода [19, 20], ортодонтические скобки [16, 17], очень гибкие хирургические инструменты [18] и т.д. Помимо медицинских изделий, из суперупругих сплавов успешно делали потребительские изделия, например оправы очков [21], бюстгалтеры [22] и антенны мобильных телефонов [23].

Термостимулированное восстановление формы использовали гораздо реже. Наиболее успешно его применяли для соединения труб, впервые использованного фирмой Raychem Corporation в конструкции самолета Grumman F-14 [24]. Для этого использовали кольцо из сплава NiTiFe, диаметр которого увеличили при низкой температуре и затем поместили в место соединения труб. При постепенном нагреве кольца до комнатной температуры оно стремится вернуть свой первоначальный размер, сильно сжимая трубы, что обеспечивает прочное и надежное сцепление. Из сплавов с памятью формы делали также различные электрические соединения и контакты, в которых использовался эффект ограниченного восстановления [25, 26].

Восстановление в отсутствие стеснения применяется очень редко. В настоящее время оно используется на практике только в противопожарных устройствах защиты и тепловых предохранителях [27]. В этих устройствах сплавы работают одновременно как тепловые датчики и предохранительные перекрывающие клапаны. Например, газовые клапаны фирмы Proteus отключают газовый поток при возникновении пожара [28]. В этом изделии пружина, сделанная из сплава CuZnAl, расширяется при достижении некоторой температуры и стальной шар входит в предохранительное кольцо. После срабатывания такой клапан можно открыть вручную при температуре ниже мартенситного перехода. Такие клапаны являются одноразовыми и они не должны испытывать постоянные противодействующие нагрузки.

Для интеллектуальных изделий наибольший потенциал использования имеет эффект термостимулированного изменения формы [29, 30]. Опубликовано большое количество патентов, в которых описаны приспособления с памятью формы, работающие в качестве механических приводов, которые при нагреве преобразуют электрическую или тепловую энергию в механическую работу. Однако из-за сложностей, связанных с необходимостью сочетания нужного направления движения, долговечности и температуры активации, количество таких реально созданных устройств невелико [31, 32]. Коммерческий успех имели лишь устройства, которые были разработаны с учетом особенностей работы привода. Хорошим примером являются приводы в кондиционерах компании Matsushita [33]. Стоимость разработки таких устройств довольно высока, и поэтому многие предложения использования материалов с эффектом памяти остаются на бумаге.

5.7. Почему бы не использовать биметаллические пластины?

Этот вопрос часто задают при использовании СЭП. Ответ на него вполне очевиден. Предельная деформация биметаллических пластин намного меньше, чем у СЭП. Величина их деформации линейно зависит от температуры, в отличие от поведения материалов с эффектом памяти, работа которых напоминает выключатель. Кроме того, СЭП могут иметь различную форму, например пружины или отрезка трубы, и нужное направление деформации при изменении температуры. Наконец, что особенно важно для тепловых устройств, восстанавливающее усилие СЭП-материалов может быть в 100 раз выше, чем у биметаллических пластин.

5.8. Сплавы с памятью формы

Несмотря на все большее количество сообщений о сплавах, в которых наблюдается эффект памяти формы, практически используются лишь материалы на основе меди и NiTi, причем наиболее широкое коммерческое использование имеет последний. Это обусловлено большой величиной восстанавливаемой деформации и отличной коррозионной устойчивостью NiTi [34], что делает его чрезвычайно перспективными для коммерческих применений. Тщательное соблюдение технологии получения NiTi позволяет контролировать температуру фазового перехода, создаваемое напряжение и величину производимой работы.

СЭП на основе меди имеют более высокую по сравнению с NiTi температуру перехода (в диапазоне от -200 до $+200^\circ\text{C}$), что позволяет использовать их при температурах выше 100°C . Восстанавливаемая деформация в поликристаллическом СЭП на основе меди лежит в пределах от 3% для Cu-Al-Ni до 4% для сплава Cu-Zn-Al. Недостатками медных сплавов являются низкие прочность и коррозионная стойкость.

Сплавы NiTi имеют наибольшую восстанавливаемую деформацию, но их недостатком остается невысокая температура фазового перехода (от -200 до $+100^\circ\text{C}$). Восстанавливаемая деформация достигает 7%, что в сочетании со сравнительно высокой прочностью и превосходной коррозионной стойкостью является основой их успешного применения. Невысокая электрическая проводимость сплавов NiTi позволяет использовать их в деталях, изменяющих свою форму при нагревании электрическим током. Поэтому в последнее время интенсивно велись исследования, направленные на разработку новых NiTi-сплавов. В следующем параграфе сплавы NiTi будут рассмотрены более подробно.

5.9. Никель-титановые сплавы

5.9.1. Введение

Явление памяти формы сплава NiTi было открыто Бюлером с соавторами [35, 36] в Военно-морской артиллерийской лаборатории (NOL) США, и этот сплав часто называют нитинолом. Эффект памяти наблюдается в сплавах NiTi в узком интервале концентраций, соответствующем 50 атомных процентов никеля и 50% титана. Изменение состава лишь на 0,1 атомный процент может изменить температуру перехода на 20 или более градусов. По этой причине технологические условия получения сплавов NiTi должны выполняться очень строго. Для обеспечения однородности сплава, позволяющей контролировать температуру перехода в пределах 5°C, часто используют индукционное плавление металла. К сожалению, эта технология малопроизводительна, из-за чего сплав NiTi считают сравнительно дорогим.

5.9.2. Механические характеристики

Механическое поведение NiTi сильно зависит от температуры, фазового состава сплава и температуры перехода, как схематически иллюстрируется рис. 5.7. Различные стадии деформационного поведения на этом рисунке показаны цифрами от 1 до 4.

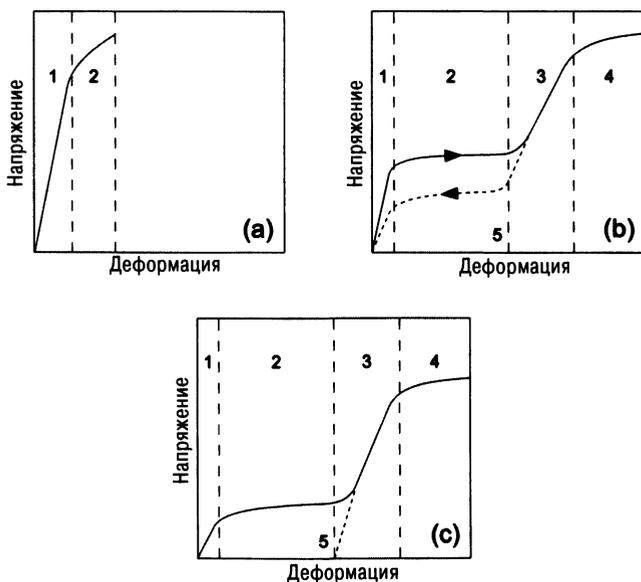


Рис. 5.7. Деформационное поведение сплава NiTi при температурах: выше M_d (a); выше A_p , но ниже M_d (b); ниже M_f (c).

Рисунок 5.7, *a* демонстрирует поведение сплава NiTi при температурах выше M_d , когда все кристаллиты находятся в родительской фазе и вынужденный мартенситный переход не происходит даже под напряжением. Сплав деформируется линейно-упруго до деформации 0,5% (в области 1), после чего начинается пластическое течение (в области 2). Такое поведение типично для обычных металлов.

Поведение сплава при температуре выше A_r , но ниже M_d показано на рис. 5.7, *b*. В области 1 металл находится в родительской фазе и ведет себя упруго. При некотором напряжении начинается вынужденный мартенситный переход, и дальнейшее деформирование сопровождается увеличением доли мартенситной фазы. Если сплав разгрузить, происходит суперупругое восстановление формы, показанное штриховой линией. Однако, если его деформировать и далее, мартенситная фаза начинает деформироваться сначала упруго (в области 3), а затем и пластически в области 4.

На рис. 5.7, *c* представлена диаграмма деформирования сплава при температуре ниже M_r , когда он находится в самоаккомодированном мартенситном состоянии. После упругого деформирования (в области 1) мартенситные варианты начинают переориентироваться при постоянном напряжении (в области 2). Дальнейшее нагружение приводит к упругому деформированию мартенситной фазы (в области 3), после чего начинается пластическое деформирование (4). Если сплав разгрузить в области 3, материал сохраняет остаточную деформацию (5), которая может быть восстановлена путем нагревания. Таким образом, механическое поведение СЭП зависит от соотношения между температурой испытания и температурой перехода.

5.9.3. Коррозионная стойкость

Одно из преимуществ NiTi по сравнению с другими сплавами с памятью формы состоит в их замечательной коррозионной стойкости. Защитная поверхностная пленка диоксида титана (TiO_2) обеспечивает этому сплаву коррозионную стойкость, сравнимую с нержавеющей сталью. Такая же пленка образуется и на поверхности чистого титана. Эта пленка очень устойчива к действию большинства химически активных веществ, однако в случае повреждения поверхности на ее восстановление может потребоваться некоторое время.

Коррозионная стойкость NiTi обусловила исследование его биосовместимости с живыми тканями в целях определения возможности использования в медицине. Испытания показали, что сплав имеет очень хорошую биосовместимость, и не было найдено никаких признаков отравления живых организмов металлом. Считается, что поверхностная пленка окиси титана не позволяет ядовитому никелю проникать в живые ткани. Это инициировало интенсивные работы, направленные на использование этого сплава в медицинской технике.



5.9.4. Тройные сплавы

Введение третьего химического элемента в NiTi может изменять некоторые характеристики материала, что расширило его практическое использование.

- Из сплава NiTiFe с пониженной температурой перехода M_s делают соединительные трубы самолета F-14 Grumman.
- В последнее время все шире используют сплав NiTiCu, имеющий пониженную величину гистерезиса и более высокие усталостные свойства при многократных циклических переходах.
- Введение палладия в NiTi увеличивает температуру перехода, что позволяет использовать его при более высоких температурах, например в автомобилестроении.
- Сплавы NiTiNb имеют широкую область гистерезиса, что можно использовать в соединительных трубах и других элементах. Соединительную трубу можно деформировать при температуре жидкого азота (-196°C) и хранить в деформированном состоянии при комнатной температуре. После нагревания она уменьшает свой диаметр, что обеспечивает появление сжимающей силы после охлаждения до комнатной температуры.

5.9.5. Механические и физические свойства

Сплавы NiTi обладают уникальными свойствами. К сожалению, сравнительно высокая стоимость и невысокая работоспособность часто влияют на решение вопроса о целесообразности их применения. В табл. 5.1–5.4 приведены физические и механические свойства, а также стоимость NiTi и СЭП на основе меди.

5.10. Использование сплава NiTi

Первые попытки применить эффект памяти NiTi появились сразу после его открытия Бюлером. Поскольку природа этого эффекта в NiTi была понята уже в 1960-х годах, основные усилия были направлены на попытки его практического использования. В течение этого и последующего десятилетий провозглашалось, что новые материалы являются ключом экономического роста и коммерческого успеха во многих секторах индустрии. Появление новых полимеров, полупроводников и металлических сплавов привело к тому, что этот период назвали временем революции в материаловедении. Отчасти поэтому открытие металла, который изменяет свою форму, было воспринято как появление еще одного материала, «формирующего» будущее промышленности. К тому времени данный эффект уже был известен в сплавах на основе меди, но его рассматривали лишь как любопытное физическое явление, которое иллюстрирует особенности мартенситных переходов.

Таблица 5.1. Физические свойства сплавов памяти формы

	NiTi	Сплавы меди
Плотность (г/см ³)	6,4...6,5	7,1...8,0
Температура плавления (°C)	1250	950...1050
Теплопроводность (Вт·м/°C)		
Мартенсит	8,6...10	–
Родительская фаза	18	79...120
Электропроводность (x10 ⁻⁶ Ом)		
Мартенсит	0,5...0,6	0,14
Родительская фаза	0,82...1,1	0,07
Коефф. теплового расширения (x10 ⁻⁶ /°C)		
Мартенсит	6,6	16...18
Родительская фаза	10...11	–
Удельная теплоемкость (Дж·кг/°C)	470...620	390...440
Энтальпия перехода (Дж/кг)	19...28	7...9
Температурная область перехода (°C)	–200...–120	–200...+120
Коррозионная стойкость	Прекрасная	Плохая
Биосовместимость	Прекрасная	Плохая

Помимо того, что открытие сплавов NiTi произошло во время «революции в материаловедении», дополнительный интерес к ним был обусловлен географическим местом открытия этого явления. В 1960-х годах Калифорния была и, возможно, еще остается мировым центром, в котором совершается большинство открытий. Исследования сплавов NiTi проводились на волне индустриального оптимизма, и в 1960-х годах инженеры во многих отраслях техники настойчиво искали области их применения.

Однако к 1971 году, когда соединения труб фирмы Grumman наконец поступили на рынок, стратегия технического развития изменилась. Сформировалась новая экономическая модель, в которой акценты сместились в сторону роли рынка. В результате этого внедрение инноваций определялось стратегией «рыночных интересов» [37]. В это время было осознано, что наиболее успешные инновации обусловлены ясным пониманием запросов потребителей, что ведет к точно направленным исследованиям и разработкам. Однако разработчики СЭП продолжали следовать стратегии «технологического толчка» и в 1980-е годы, в результате чего появилось немало неудачных проектов вроде термически активизируемого замка для оранжерей [38].

Наконец, в начале 1980-х годов требования рынка начали преобладать и в индустрии СЭП. Постепенно было осознано, что индустрию интересует медицинское применение этих сплавов. Производители материалов с памятью формы и медицинские компании, осознавшие потенциальные преимущества таких материалов, начали интенсивно разрабатывать и патентовать изобретения, которые обеспечили бы уникальные решения медицинских проблем. Потребность рынка в изделиях из СЭП-материалов постепенно усиливалась в 1980-х гг. вплоть до первой Международной конференции по технологиям на основе материалов с памя-

тью формы и суперупругости, проведенной в 1994 году. Спрос со стороны медицинского рынка проявился в большом количестве статей, исследующих биосовместимость и медицинские применения данных материалов. Эта Конференция стала регулярной, а первая Европейская сессия состоялась в 1999 году.

Таблица 5.2. Механические свойства сплавов памяти формы

	NiTi	Сплавы меди
Модуль Юнга (ГПа)		
Мартенсит	28–41	70
Родительская фаза	70–97	70–100
Предел текучести (МПа)		
Мартенсит	70–140	80–300
Родительская фаза	195–690	150–350
Предел прочности (МПа)		
Полностью отожженный	895	400
Деформационно-упрочненный	1900	1000
Удлинение при разрыве (%)		
Полностью отожженный	25–50	8–15
Деформационно-упрочненный	5–10	8–15
Свойства при повышенной температуре	От плохой до хорошей	Очень хорошая
Свойства при пониженной температуре	Плохие	Очень хорошие
Механическая обрабатываемость	Плохая	Очень хорошая
Коэффициент Пуассона	0,33	–
Устойчивость к износу	Хорошая	–

С начала 1990-х появилось новое направление использования сплавов с эффектом памяти, а именно интеллектуальные материалы и интеллектуальные структуры. Потребность рынка в интеллектуальных технологиях, подобно медицинской промышленности, уже привела к значительной интенсификации исследований этих сплавов.

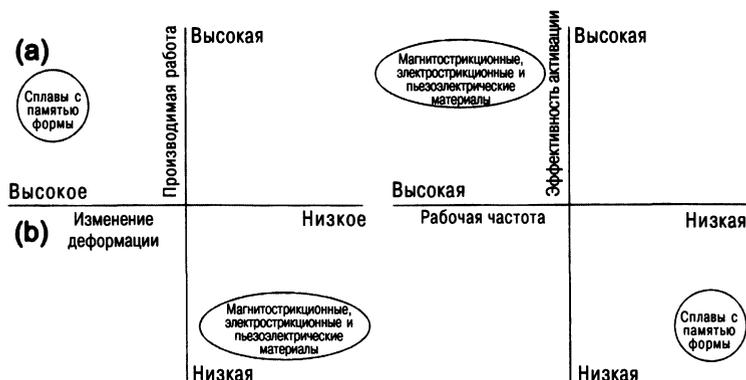


Рис. 5.8. Характеристики сплавов с эффектом памяти формы: (а) – преимущества; (б) – недостатки.

Развитие интеллектуальных технологий стимулировало появление специализированных научных журналов и конференций и привело к всплеску интереса к использованию СЭП в качестве силовых приводов. По этой причине это направление стало стратегически важным для производителей сплавов с памятью формы и важнейшим направлением исследований.

5.11. Сплавы с эффектом памяти формы как «интеллектуальные» силовые преобразователи

Главное направление использования сплавов с памятью формы в интеллектуальных технологиях – это приводы, преобразующие тепловую энергию в движение или механическую работу.

Силовые приводы из СЭП имеют ряд преимуществ [39]:

- высокую действующую силу;
- большие восстанавливаемые деформации;
- различные виды деформации (растягивающие, сжимающие, изгибающие и крутящие);
- большую удельную величину работы в расчете на единицу массы.

Возможно, именно большие величины деформации и совершаемой работы представляют наибольшие перспективы изделий из СЭП. Физическая основа эффекта памяти отличает его от других способов приведения материала в движение, например от пьезоэлектрического эффекта и магнитострикции, что иллюстрируется рис. 5.8, *a*. Однако СЭП имеют не только преимущества, но и недостатки. Рисунок 5.8, *b* демонстрирует, что в сравнении с другими способами приведения в движение такие сплавы имеют низкую эффективность (например, высокие энергетические потери и большое время задержки или малую частоту повторения). Для успешного применения СЭП нужно использовать их преимущества и пытаться обойти их недостатки.

Использование сплавов NiTi в интеллектуальных структурах находится пока еще на начальной стадии. Исследователи пытаются применить NiTi в качестве источников движения в интеллектуальных структурах, но проблемы их коммерческого использования остаются нерешенными. В их числе – проблемы точного контроля состава и термомеханической усталости. Несмотря на это, конструкторы и академические институты продолжают работы в этой области. Если будет найдена новая область их широкого применения, последует следующий скачок в развитии интеллектуальных сплавов с памятью формы.

Много говорилось о потенциале промышленного использования интеллектуальных материалов. Например, Томпсон и Ганди [40] предсказывают: «Интеллектуальные материалы и структуры произведут ре-

волюцию в широком секторе международного рынка в военной, космической, автомобильной и других отраслях... Прогнозируется, что объем рынка интеллектуальных материалов и структур к 2010 году превысит 65 миллионов долларов».

На процесс развития рынка интеллектуальных материалов и структур будут влиять политические, экономические, социальные и технологические факторы, которые в конечном счете и определяют, смогут ли СЭП стать козырем, обеспечивающим преимущество в создании конкурентоспособных интеллектуальных изделий. Обзор этих факторов приведен ниже [41–43].

5.11.1. Политические факторы

Сокращение оборонных бюджетов в целом приведет к сокращению финансируемых правительствами исследовательских и конструкторских работ во всем мире. Это может иметь как положительное, так и отрицательное влияние на исследования сплавов с эффектом памяти формы. Несмотря на вероятное сокращение финансирования оборонных проектов, имеется общая тенденция к увеличению финансирования исследований интеллектуальных материалов. В настоящее время эта тенденция стимулирует новый интерес к использованию СЭП в оборонной промышленности. Правительственное финансирование космических исследований также продолжится. Развитие беспилотных летательных аппаратов и спутников обеспечит возможности для развития силовых приводов на основе СЭП.

5.11.2. Экономические факторы

Объемы продажи авиакосмической техники сокращаются, и это приводит к экономическому давлению на производителей космической техники. Традиционно эти компании проводили инновационные разработки интеллектуальных структур, в том числе и использующих СЭП. Если основанные на них интеллектуальные структуры не начнут покупаться в ближайшем будущем, финансирование исследований СЭП в этой отрасли в следующие 5–10 лет резко сократится. Однако непрерывное увеличение срока службы и уменьшение цены этих материалов может привести к расширению их использования в интеллектуальных конструкциях.

Таблица 5.3. Свойства сплавов с памятью формы

	NiTi	Сплавы на основе Cu
Диапазон температур перехода (°C)	–200...–120	–200...+200
Гистерезис (°C)	20...50	15...20
Эффект односторонней памяти (%)	8	4...6
Эффект двусторонней памяти (%)	3...5	1...4
Суперупругая деформация (%)	8	2
Производимая работа (Дж/г)	1...4	1

5.11.3. Социальные факторы

Все время ужесточающиеся требования к безопасности изделий, вероятно, приведут к дальнейшему росту интереса к датчикам и источникам движения и, следовательно, к металлам с памятью формы. Расширение контроля за окружающей средой также окажет значительное влияние на развитие этих материалов. Тенденция к разработке диалоговых компьютерных систем и виртуальных сред стимулирует развитие конструкционных материалов, заставляя их поспевать за развитием аппаратной части компьютеров и программного обеспечения. Интеллектуальные материалы могут оказаться одним из путей развития способов контроля за окружающей средой.

Таблица 5.4. Экономические характеристики сплавов с эффектом памяти формы

	NiTi	Сплавы на основе Cu
Контроль состава	Очень строгий	Хороший
Цена материала	Высокая	Хорошая
Цена формовки	Высокая	Хорошая

5.11.4. Технологические факторы

Технологический прогресс в развитии сенсоров и силовых приводов может облегчить управление и расширить применение интеллектуальных структур. В частности, управляемое действие активаторов из СЭП расширит их использование в интеллектуальных структурах. В последние пять лет был достигнут значительный прогресс в разработке и применении тонких пленок и труб из сплава NiTi. Появление этих «новых» форм изделий приведет к большей свободе при проектировании адаптивных структур и приводов.

5.12. Применение сплавов с памятью формы в интеллектуальных конструкциях

Подробное обсуждение того, что является интеллектуальным материалом или структурой, выходит за пределы этой главы. Тем не менее для определения таких материалов можно принять следующие соображения, основанные на докладах Министерства торговли Великобритании.

Интеллектуальные материалы. Ими называются материалы со специфическими функциональными характеристиками на молекулярном уровне.

Интеллектуальные структуры. Ими можно считать системы, имеющие специальные функциональные свойства, включающие элементы типа датчиков или силовых преобразователей в комбинации с неактивными материалами.



Очевидно, СЭП удовлетворяют обоим определениям. Согласно данному определению интеллектуальные материалы должны быть структурно-целостностными на молекулярном уровне, а сенсорные или приводящие функции в них должны формироваться на микроуровне, а не на макроуровне, как у интеллектуальных структур.

5.12.1. Являются ли сплавы с памятью формы интеллектуальными материалами?

Интеллектуальные материалы состоят из молекул, которые обеспечивают их способность работать в качестве датчиков или силовых преобразователей. В этом смысле интеллектуальные материалы на молекулярном уровне являются интеллектуальными структурами. Способность СЭП на автономный ответ при внешнем воздействии является их внутренним свойством, и поэтому они удовлетворяют данному выше определению интеллектуальных материалов, хотя диапазон их функциональных возможностей относительно ограничен.

Интеллектуальный материал должен реагировать на внешнее воздействие контролируемым образом, задаваемым в процессе изготовления и обработки. В случае СЭП это достигается сравнительно просто. Тщательный контроль состава и последующая обработка позволяют производить «точную настройку» температуры перехода (когда сплав используют в качестве датчика), силы и восстанавливаемой деформации (когда он используется в качестве силового преобразователя) и прочности (если он используется в качестве конструкционного материала).

Еще одно требование к интеллектуальным материалам состоит в том, что они должны действовать, только когда это необходимо. На первый взгляд, распределение силовых преобразователей на микроуровне в пределах монокристаллической структуры является весьма сложной задачей. Однако появление нового метода записи и считывания информации с дискретных областей при помощи лазера означает, что монокристаллические устройства памяти формы могут иметь и распределенные по матрице микроактиваторы. При помощи этой технологии был изготовлен коммерчески производимый микрозахват, который явился одним из первых реальных применений СЭП в качестве «интеллектуального материала» [44].

5.12.2. Сплавы с памятью формы в интеллектуальных структурах

В интеллектуальных структурах материалы с эффектом памяти формы используют двумя способами. Во-первых, в качестве механических и силовых преобразователей, создающих движение. В интеллектуальных структурах СЭП заменяет сложные механические устройства приведения в движение, причем в этом случае движение задается электричес-

ким сигналом системы управления, действующей на основании показаний датчиков. Этот класс изделий включает в себя и «интеллектуальные механизмы», к которым относятся, например, летательные аппараты с изменяемой геометрией крыла [45]. В этих «механизмах» активаторы из материалов с памятью формы изменяют геометрическую форму «гибких» структур подобно действию человеческих мускул. Действие силового преобразователя из СЭП состоит в постепенном изменении размеров в процессе нагрева вследствие фазового перехода.

СЭП часто используют для создания движения в более сложных системах. Примером являются стропильные фермы, в которых активные элементы демпфируют резонансные колебания [46]. Главную проблему обычно представляют собой низкочастотные колебания, и включение в структуру балок узкополосных силовых преобразователей из СЭП решает эту проблему. В активных стропильных балках СЭП находятся в состоянии частично стесненного восстановления и в действие приводятся электрическим сигналом.

Второй подход к использованию СЭП в интеллектуальных структурах отличается от обычных технологий более радикально. В этом случае силовые преобразователи из СЭП распределяют по объему или по поверхности конструкции. Например, силовые преобразователи в виде проволоки из СЭП вводят в структуру композиционных материалов. Такие преобразователи эффективно демпфируют вибрацию и изменяют форму деталей из композиционных материалов. Кроме того, уже первые исследования выявили потенциал подобных активаторов для контроля степени поврежденности композита.

5.12.2.1. Пассивные композиционные структуры

В пассивных композиционных материалах используется высокая демпфирующая способность СЭП. Примером являются горные лыжи, разработанные компанией EPFL (Швейцария), в которых сплав CuZnAl подавляет вибрацию [47]. Демпфирование основано на поглощении энергии при обратимой перестройке мартенситных вариантов благодаря наличию гистерезиса при нагрузке-разгрузке. По мере понижения окружающей температуры поверхность снега становится более жесткой, и, соответственно, возрастает величина гистерезиса при мартенситном переходе, что увеличивает демпфирование. Аналогичная идея используется для демпфирования сейсмических колебаний суперупругими сплавами NiTi , вводимыми в конструкции зданий [48].

К сожалению, пассивное демпфирование колебаний ограничено лишь определенными эксплуатационными режимами. Поэтому значительно больший интерес представляют интеллектуальные структуры с активным контролем колебаний, имеющие намного более высокую эффективность демпфирования, а как следствие, и более широкую область применения.

5.12.2.2. Контроль формы структуры

Ниже описана возможность изгиба балки путем включения в ее структуру силового преобразователя из СЭП. В этом случае изменение размеров активного элемента из сплава как бы управляет «формой» балки. Если силовые преобразователи размещены симметрично относительно нейтральной оси балки, они могут работать друг против друга, изгибая ее в нужном направлении. Были продемонстрированы также два дополнительных способа управления формой, не связанные с деформацией преобразователей. Они были названы методами активного изменения свойств (АИС) и активного изменения упругой энергии (АИУЭ).

В методе АИС изменяется не форма, а жесткость при нагревании до температуры перехода. Например, переход от мартенситной к родителеской фазе приводит к увеличению эффективной жесткости СЭП более чем на 200%. Такие изменения могут влиять на жесткость контролируемой конструкции и, как следствие, на величину изгиба под нагрузкой. Моделирование показало, что с помощью СЭП прогиб балки из квазиизотропного углепластика может быть уменьшен на 6%, хотя объемная доля сплава для этого должна быть весьма высокой (~50%). Для получения максимального эффекта активатор в этом случае должен быть правильно ориентирован.

В случае АИУЭ в композите появляются микродеформации, однако изменения формы не происходит, так как небольшие преобразователи распределены макрооднородно по объему композита. Это приводит к появлению внутренних напряжений. Моделирование продемонстрировало, что таким способом может быть уменьшен прогиб опертой балки, причем при этом требуется гораздо меньшая объемная доля СЭП, чем в случае АИС. Например, в квазиизотропной пластине из углепластика прогиб может быть уменьшен примерно на 80% при использовании только 10 об.% материала с памятью формы. Величина прогиба зависит также и от восстанавливающей силы в активном материале.

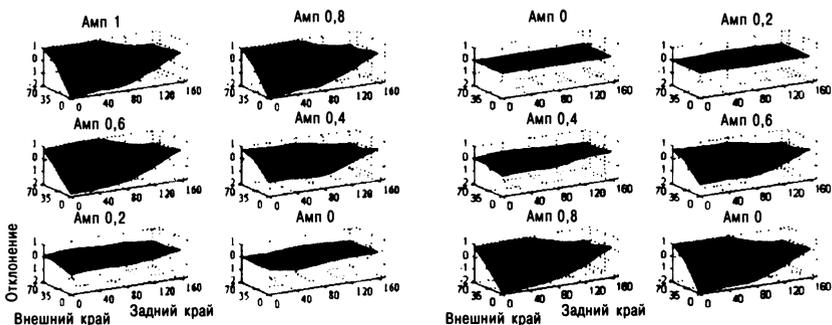


Рис. 5.9. Активное управление формой крыла.

Пример активного управления формой иллюстрируется рис. 5.9. Управление используется для изменения угла атаки крыла из стеклопластика. Введение лишь двух силовых преобразователей из СЭП в верхнюю плоскость крыла (под углом 45° к главной оси) позволяет активно регулировать угол атаки в реальном масштабе времени.

Эти примеры иллюстрируют не только различные принципы приведения в движение, но и возможности размещения преобразователей в композите.

5.12.2.3. Контроль вибрации

Еще одной областью применения сплавов с памятью формы в интеллектуальных композитах является контроль вибрации. Основной упор при разработке интеллектуальных композитов делался на использовании пьезоэлектрических широкополосных преобразователей с низким уровнем деформации. Однако имеется потребность и в узкополосных силовых преобразователях с высоким уровнем деформации (для управления низкочастотными колебаниями). Управление вибрацией в интеллектуальных структурах требует измерения амплитуды вибрации и создания противодействующей силы с помощью системы контроля. С этой целью успешно использовали СЭП и соответствующую программу управления. Эта технология хорошо отработана и применяется сейчас уже достаточно широко. Однако имеются и другие возможности использования СЭП в композиционных материалах.

Обычные системы управления позволяют создать обратную связь тензодатчиков и пьезоэлектрических преобразователей, но не могут создать адаптивные материалы. Это можно сделать, вводя в структуру композиционного материала СЭП, например если резонансные частоты колебаний можно регулировать посредством изменения некоторого внешнего параметра. Принцип действия состоит не в реагировании на деформацию (чтобы подавить вибрацию), как в случае пьезоэлектрических преобразователей, а в изменении свойств композиционного материала и смещении резонансной частоты за пределы возбуждающих частот. Было показано, что эффективную жесткость при изгибе можно изменить при помощи методов АИС и АИУЭ, причем для управления резонансной частотой можно использовать оба метода. АИС позволяет сдвигать наиболее низкие резонансные частоты колебаний углепластиковой пластины. Резонансная частота зависит от способа активации, ориентации активного материала и его объемной доли. Композиты с введенными в них СЭП при использовании АИС изменяют не только частоту резонанса, но и тип колебаний.

Неудивительно, что и АИУЭ может управлять частотой резонанса и типом колебаний. Сообщалось об изменении моды колебаний и удвоении первой собственной частоты колебаний за счет введения лишь 10 об.% СЭП в квазиизотропную углепластиковую пластину.

5.12.2.4. Контроль потери устойчивости

АИС и АИУЭ приводят к появлению напряжений в плоскости композиционной структуры, которые изменяют не только их жесткость при изгибе и вызывают сдвиг резонансных частот, но и условия потери устойчивости пластины при сжатии. Например, введение АИС в композит [49] увеличивает сжимающую нагрузку при потере устойчивости благодаря более высокому модулю упругости NiTi по сравнению с исходным композитом. Моделирование АИУЭ продемонстрировало наличие широких возможностей управления, зависящих от ориентации внедренных активных элементов относительно направления приложенной силы.

Рассматривалась также потеря устойчивости структур, используемых в космической технике. В частности, методом конечных элементов исследовали потерю устойчивости пластин и Т-образных панелей. Введение NiTi-преобразователей обеспечивает увеличение нагрузки при потере устойчивости [50]. При высоких деформациях мартенситного перехода критическая нагрузка возрастает на 12% для Т-образных панелей и на 4% для плоских пластин. Если в пластину вводится множество активных элементов, напряжение при потере устойчивости может быть увеличено еще больше.

5.12.2.5. Акустический шум

Помимо управления формой, вибрацией и напряжением потери устойчивости, АИС и АИУЭ могут изменять характер излучаемого акустического шума [49, 43]. Композиты, армированные проволокой из СЭП, могут изменять акустическую прозрачность, затухание и направленность излучаемого и проходящего звука. Процессы управления в этом случае состоят в сдвиге минимальной частоты в спектре потерь, а также в изменении затухания различных гармоник. Это весьма перспективно для управления величиной излучаемой звуковой энергией и «регуливки» акустических характеристик панели.

5.12.2.6. Контроль степени поврежденности

Еще одним направлением использования СЭП является активный контроль степени поврежденности. Для обнаружения трещин и других дефектов используют датчики, а функция СЭП состоит в снижении степени их опасности. Для решения этой задачи используют два подхода. В первом нагреванием активируют введенные в структуру композиционного материала проволоки из СЭП. В результате нагрева они сокращаются и изменяется поле внутренних напряжений. Теоретический анализ показал, что в этих условиях восстанавливающая сила действует как сосредоточенная сила на свободной кромке композита [52, 53]. Для снижения концентрации напряжения в вершине трещины данный подход не очень

эффективен из-за малости возникающих внутренних напряжений [54], если только проволоки не соединяют противоположные плоскости трещины. В последнем случае проволоки несут растягивающую нагрузку, уменьшая интенсивность напряжения в кончике трещины.

Второй подход также связан с введением в композит проволоки из СЭП. При постепенном приближении кончика трещины к проволоке начинается ее пластическое течение. Когда проволоки активируют, они восстанавливают свою длину и напряжение в композите снижается. Этот подход основан на большой величине деформации матрицы около проволоки, что инициирует ее пластическое течение, а эффект односторонней памяти используют для восстановления формы. Согласно работе [55] этот механизм должен быть более эффективным для композитов на основе высокодеформативных термопластичных матриц по сравнению с хрупкими терморезистивными матрицами.

5.13. Заключение

В этой главе обсуждалось использование сплавов с памятью формы в интеллектуальных конструкциях. Некоторые свойства СЭП обеспечивают возможность их инновационного применения. Однако для успешного использования СЭП нужно учитывать как их технологические свойства, так и рыночные возможности. Основной интерес к СЭП связан с использованием двух проявлений эффекта памяти. В медицинском секторе основные применения и патенты связаны с суперэластичностью, а в интеллектуальных структурах — с возможностью многократного изменения формы активных приводящих элементов.

Производители медицинского оборудования и разработчики интеллектуальных структур нуждаются в более высоких эксплуатационных характеристиках материалов. Достижения в этих областях уже обусловили интенсивные исследования, направленные на разработку СЭП, которые, вероятно, усилятся еще больше с ростом потребности в интеллектуальных технологиях.

Литература

1. Perkins, J. (1974) *Mat. Sci. & Eng.*, **51**, 182.
2. Schroeder, T. A. and Wayman, C. M. (1977) *Scr. Metal*, **11**, 225.
3. Saburi, T. and Nenno, S. (1974) *Scripta Met.*, **8**, 1363.
4. Oshima, R. and Naya, E. (1975) *J. Japan. Inst. Met.*, **39**, 175.
5. Takezawa, T. and Sato, S. (1976) *Proc. 1st JIM Int. Symp. on New Aspects of Martensitic Transformations*, pp. 233.
6. Zhu and Yang (1988) *Scripta Met.*, **22**, 5.
7. Olander, A. (1932) *Z. Krystall*, **83A**, 145.
8. Greninger, A. B. and Mooradian, V. G. (1938) *Trans. AIME*, **128**, 337.
9. Chang, L. C. and Read, T. A. (1951) *Trans. AIME*, **189**, 47.

10. Buehler, W. J. and Wiley, R. C. (1965) US Patent 3 174 851.
11. Duerig, T. W. (1990) *Engineering Aspects of Shape Memory Alloys*, Butterworth-Heinemann.
12. Wever, D. J., Veldhuizen, A. G., Sanders, M. M., Schakenraad, J. M. and van Horn, J. R. (1997) *Biomat.*, **18**, 1115.
13. Dutta, R. S., Madangopal, K., Gadiyar, H. S. and Banerjee S. (1993) *Brit. Corr. J.*, **28**, 217.
14. Ryhanen, J. (1999) PhD thesis, Department of Surgery, Oulu University, Finland.
15. Fernald, R., Fritz, D., Sievert, C. and Stice, J. (1994) *Proc. 1st Int. Conf. on Shape Memory and Superelastic Technologies, Pacific Grove, California*, pp. 341.
16. Finander, B. V. and Liu, Y. (1994) *Proc. 1st Int. Conf. on Shape Memory and Superelastic Technologies, Pacific Grove, California*, pp. 151.
17. Andraesen, G. F. (1980) *Am. J. Orthod.*, **78**, 528.
18. Shape Memory Applications Inc., USA, (1996) *Shape Your Future with....*, product brochure.
19. Duerig, T., Pelton, A. and Stockel, D. (1999) *Mat. Sci. & Eng. A*, **273–275**, 149.
20. Cwikiel, W., Stridbeck, H. and Trandberg, K. G. (1993) *Radiology*, **187**, 661.
21. Purukawa Electric Co. Ltd., Japan, product brochure.
22. Molloy, K. (1995) *The Mail on Sunday*, 28th May 1995, pp. 42.
23. Thomas Bolton Ltd., UK, *SMA The Metal With a Mind*, product brochure.
24. Kagan, M. and Melton, K. N. (1990) *Engineering Aspects of Shape Memory Alloys*, Butterworth-Heinemann.
25. Raychem, USA, *Unilok™ Rings*, product brochure.
26. Harrison, J. D. and Hodgson, D. E. (1975) *Shape Memory Effects in Alloys* (ed. J. Perkins), Plenum Press, pp. 517.
27. Michael, A. D. (1994) *Proc. 1st Int. Conf. on Shape Memory and Superelastic Technologies, Pacific Grove, California*, pp. 283.
28. van Moorlegham, W. and Otte (1990) *Engineering Aspects of Shape Memory Alloys*, Butterworth-Heinemann.
29. Kao, M., Schmitz, D., Thoma, P., Klaus, M. and Angst, D. (1996) *Proc. 5th Int. Conf. on New Actuators — Actuator 96, Bremen, Germany*, pp. 124.
30. Hashimoto, M., Takeda, M., Sagawa, H., Chiba, I. and Sato, K. (1985) *J. Robotic Sys.*, **2**, 3.
31. Guenin, G. and Gaudez, P. (1996) *Proc. 3rd Euro. Conf. on Smart Structures and Materials and Int. Conf. on Intelligent Materials, Lyon, France*, pp. 493.
32. Benzaoui, H., LExcellent, C., Chaillet, N., Lang, B. and Bourjault, A. (1997) *J. Intell. Mat. Sys. & Struct.*, **8**, 619.
33. Tamura, H., Suzuki, Y. and Todoroki, T. (1986) *Proc. Int. Conf. on Martensitic Transformations, Nara, Japan*, pp. 736.
34. Melton, K. N. and Harrison, J. D. (1994) *Proc. 1st Int. Conf. on Shape Memory and Superelastic Technologies, Pacific Grove, California*, pp. 187.
35. Buehler, W. J., Gilfrich, J. W. and Wiley, R. C. (1963) *J. Appl. Phys.*, **34**, 1475.
36. Buehler, W. J. and Wiley, R. C. (1965) US Patent 3 174 851.
37. Myers, S. and Marquis, D. G. (1969) *Successful Industrial Innovation*, National Science Foundation.
38. Beta Metals, company brochure.

39. Stoeckel, D. (1990) *Adv. Mat. & Processes*, Oct. 1990, 33.
40. Thompson, B. S. and Gandhi, M. V. (1990) *Smart Materials and Structure Technologies: The Impending Revolution*, Technomic.
41. Chamberlain, G. (1995) *Design News*, 50, 70.
42. Sheehan, T. (1995) *The Architects Journal*, 202, 37.
43. Rogers, C. A. (1995) *Scientific American*, Sep. 1995, 122.
44. Bellouard, Y., Lehnert, T., Bidaux, J. E., Sidler, T., davel, R. and Gotthardt, R. (1999) *Mat. Sci. & Eng. A*, 273–275, 795.
45. Wield, D. N. and Gillam, E. (1972) *Scripta Met.*, 6, 1157.
46. Maclean, B. J., Draper, J. L. and Misra, M. S. (1991) *Proc. 1st Joint US-Japan Conf. on Adaptive Structures, Hawaii*, pp. 1038.
47. Gotthardt, R., Scherrer, P. and Stalmans, R. (1999) *Proc. Int. Symp. on Shape-Memory Materials, Kanazawa, Japan*, pp. 475.
48. Casciati, F., Faravelli, L., and Petrini L. (1998) *Proc. 4th Euro. Conf. on Smart Structures and Materials and 2nd Int. Conf. on Micromechanics, Intelligent Materials and Robotics, Harrogate, UK*, pp. 321.
49. Liang, C., Jia, J. and Rogers, C. (1989) *Proc. 30th AIAA/ASME/ASCE/ AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conf.*, pp. 1504.
50. Thompson, D.H. and Griffin, O.H. (1992) *Proc. Conf. Recent Advances in Adaptive and Sensory Materials and their Applications, Blacksburg, Virginia*, pp. 377.
51. Rogers, C. A., Fuller, C. R. and Liang, C. J. (1990) *J. Sound & Vib.*, 136, 164.
52. Dasgupta, A., Wan, Y. and Sirkis, J. S. (1992) *Smart Mat. & Struct*, 1, 101.
53. Rogers, C. A., personal communication.
54. Jensen, D. W., Pascaul, J. and August, J. A. (1992) *Smart Mat. & Struct*, 1, 31.

*Т. Кинг
М. Поцци*

6.1. Понятие пьезоэффекта

Пьезоэлектрический эффект известен уже более столетия. В 1880 году Жак и Пьер Кюри сделали сообщение в Академии наук Франции о новом открытии: при сжатии кристалла с полярной осью (несимметричного относительно изменения направления) они наблюдали проявление электрического заряда на его поверхностях. В таких кристаллах ранее уже наблюдался пирозлектрический эффект, состоящий в появлении поверхностного электрического заряда при нагревании кристалла. Братья Кюри поняли, что причина эффекта та же: изменение температуры приводит к изменению размера, которое в конечном счете оказывается ответственным за появление электрических зарядов.

6.1.1. Кристаллография и пьезоэффект

Пьезоэлектрический эффект может наблюдаться в кристаллах, не имеющих центра симметрии. Если элементарная ячейка кристаллической решетки такова, что «центр тяжести» положительных ионов не совпадает с центром тяжести отрицательных зарядов, то создается постоянный «диполь», и ячейка становится электрически асимметричной, как показано на рис. 6.1. Пьезоэлектрический эффект может наблюдаться и при отсутствии исходного диполя решетки, поскольку диполь может появиться вследствие поляризации под действием внешнего электрического поля или механической нагрузки. Так ведут себя кристаллы кварца. Макроскопическая поляризация появляется, если диполи ориентированы преимущественно в одном направлении. Внешняя механическая нагрузка изменяет поляризацию диполей, и на поверхности кристалла появляются электрические заряды. Это называют *прямым пьезоэлектрическим эффектом* (рис. 6.2, *a*). Наоборот, приложение к кристаллу внешнего электрического поля деформирует диполи, в результате чего появляется деформация кристалла, которая изменяет его размеры. Это явление называют *обратным пьезоэлектрическим эффектом* (рис. 6.2, *b*).

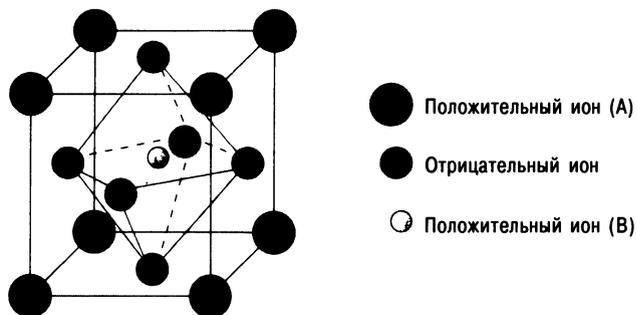


Рис. 6.1. В элементарной ячейке некоторых кристаллов «центры» положительных и отрицательных зарядов не совпадают, в результате чего образуется электрический диполь.

Пьезоэлектрический эффект наблюдается во многих природных материалах – кварце, турмалине, сульфате лития и тартрате калия. В этих кристаллах пьезоэлектрический эффект, однако, проявляется не слишком сильно.

Важным классом пьезоэлектриков являются сегнетоэлектрики, элементарная ячейка которых представляет собой электрический диполь, который при некоторых обстоятельствах может быть «включен» или переориентирован. При высоких температурах эти кристаллы имеют высокую симметрию, но при *температуре Кюри* в них происходит изменение кристаллической структуры. Низкотемпературная кристаллическая структура (соответствующая сегнетоэлектрическому состоянию) имеет симметрию, которая является подгруппой высокотемпературной структуры (соответствующей параэлектрическому состоянию). Стоит отметить, что этот переход аналогичен изменению магнитных свойств от ферромагнитных к парамагнитным.

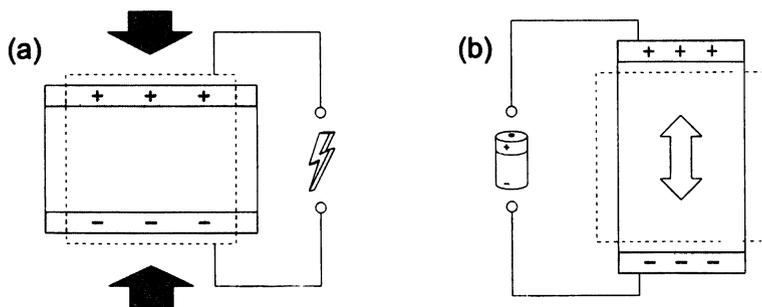


Рис. 6.2. Схематическое изображение прямого (а) и обратного (б) пьезоэлектрического эффекта.



Примером сегнетоэлектрика, сыгравшего важную роль в изучении этого явления, является титанат бария (BaTiO_3). Этот кристалл имеет структуру перовскита. При высоких температурах он имеет симметричную кубическую структуру. Атомы кислорода находятся в вершинах пирамиды, в центре которой находится атом Ti , как показано на рис. 6.3, *a*. Когда температура снижается до 120°C (температуры Кюри), симметрия кристалла понижается и решетка становится тетрагональной. В результате перехода элементарная ячейка становится вытянутой вдоль одной из осей, и положительно и отрицательно заряженные ионы смещаются в противоположных направлениях. Наиболее значительно перемещается атом титана, который приближается к одному из атомов кислорода в направлении растяжения (рис. 6.3, *b*). Смещение ионов противоположного знака вызывает появление электрического диполя.

Сегнетоэлектрический переход наблюдается и в других материалах. Важной особенностью сегнетоэлектрического состояния является ориентация в одном направлении электрических диполей в некоторой микроскопической области кристалла, называемой *доменом*. Домены ориентированы в различных направлениях. Поэтому, хотя в каждом домене диполи ориентированы в одном направлении, на макроскопическом уровне кристалл изотропен. Приложение внешнего электрического поля во время охлаждения ориентирует диполи в одном направлении (этот процесс называют поляризацией). Как следствие, кристалл в целом становится пьезоэлектрически активным. Хотя кристалл имеет внутреннюю поляризацию, в условиях равновесия она отсутствует, поскольку поверхностные электрические заряды компенсируются ионами противоположного знака, поступающими из воздуха или самого кристалла. Как следствие, внутренние диполи гасятся. Приложение внешнего механического напряжения изменяет поляризацию до достижения нового равновесного состояния (за счет диффузии внутренних или адсорбции внешних зарядов). Как следствие, на поверхности появляется электрический заряд, что является прямым пьезоэлектрическим эффектом.

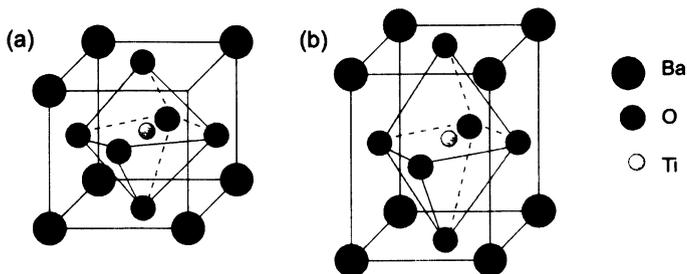


Рис. 6.3. Кристаллическая структура BaTiO_3 выше (а) и ниже (б) температуры Кюри. Кубическая элементарная ячейка удлинится и становится тетрагональной.

6.1.2. Влияние поверхностного заряда на механическое поведение

Уникальность пьезоэлектриков состоит в сильной связи их механических и электрических характеристик. Вследствие этого механическое поведение пьезоэлектрика тесно связано с электрическими параметрами внешней цепи. Например, когда на пьезоэлектрик действует сжимающая сила, на поверхности появляются электрические заряды вследствие прямого пьезоэлектрического эффекта. Наведенные заряды приводят к появлению деформации вследствие обратного пьезоэлектрического эффекта. Как следствие, увеличивается модуль упругости материала за счет вклада электрических зарядов. С другой стороны, если на поверхность образца нанести электроды и замкнуть их, заряды компенсируют друг друга, и жесткость материала будет ниже, определяясь лишь механическими эффектами. Как будет показано в следующем параграфе, это можно проверить экспериментально, определив собственную частоту колебаний пьезоэлектрического кристалла в разомкнутом и замкнутом состояниях.

6.1.3. Некоторые пьезоэлектрики

Братья Кюри исследовали естественные кристаллы типа турмалина, топаза, диоксида кремния и сегнетовой соли, причем в двух последних пьезоэлектрический эффект является достаточно сильным. Еще сильнее эффект проявляется в искусственных кристаллах. Особенно силен он в семействе перовскита: титанате бария (BaTiO_3), титанате свинца (PbTiO_3) и особенно титанате циркониевокислого свинца $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$ и титанате цирконата лантана. Аналогичную кристаллическую структуру имеет также ниобат лития (LiNbO_3) и танталат лития (LiTaO_3).

Вырастить большие монокристаллы сегнетоэлектрического материала достаточно трудно, и поэтому их используют в виде керамики. Керамики представляют собой агрегаты микрокристаллов (*зерен*) размером от нескольких нанометров до микрометра. Обычно их получают обжигом уплотненного порошка тонко размолотых компонентов. Этот процесс называется спеканием. Так как зерна имеют случайную ориентацию, для придания керамике пьезоэлектрических свойств ее нужно поляризовать.

Поскольку спекание происходит при очень высоких температурах, при охлаждении до температуры Кюри образующиеся диполи не имеют преимущественной ориентации. Как следствие, керамика не проявляет пьезоэлектрического эффекта. Таким образом, сегнетоэлектрики нужно поляризовать. Этому достигают воздействием сильного электрического поля, ориентирующего диполи в нужном направлении. Идеальной ориентации диполей достичь невозможно, так как они могут быть ориентированы лишь в некоторых специфических направлениях относительно направления ориентации зерен, которая фиксируется в процес-

се спекания. Тем не менее можно добиться уровня поляризации 80% и даже немного выше. Полученные таким способом пьезокерамики используют в электромеханических преобразователях. При этом керамике можно придать нужную форму.

После открытия сильного пьезоэлектрического эффекта в титанате циркониевоокислого свинца (*ТЦС*) целенаправленные исследования привели к разработке целого ряда пьезокерамик, основанных на $Pb(Zr_{0,55}Ti_{0,45})O_3$ и добавках оксидов различных металлов (Nb, Sr, La и Fe). Их делят на два типа: *мягкие ТЦС* (например, «ТЦС-5Н») и *жесткие ТЦС* («ТЦС-8»). Первые характеризуются более высоким пьезоэлектрическим эффектом и поэтому имеют большие деформации, но их недостатком является значительный гистерезис и вследствие этого значительное тепловыделение. Поэтому их лучше использовать в качестве квазистатических преобразователей. Жесткие ТЦС имеют меньшую деформацию, но их преимущество состоит в значительно меньших потерях энергии из-за меньшей величины гистерезиса, что делает их привлекательными для использования при высоких частотах.

Пьезоэлектриками являются не только неорганические вещества, но и полимеры, в том числе и природные типа шерсти и шелка. Сильные пьезоэлектрические свойства имеют лишь полярные вещества, молекулы которых имеют диполи. Примером служит искусственно синтезированный полимер поливинилидендифторид (ПВДФ), дипольный момент мономерного звена которого, $-CF_2-CH_2-$, превышает дипольный момент диоксида кремния (кварца). Хотя он менее активен, чем керамические перовскиты, и действующая сила относительно невелика, его преимуществом является низкий удельный вес и легкость формования изделий различной формы. Для получения максимального пьезоэффекта ПВДФ ориентируют методом экструзии и последующей вытяжкой. Из-за низкого значения показателя диэлектрической проницаемости пьезоконстанта g для ПВДФ выше, чем у керамики. По этой причине данный полимер прекрасно подходит для получения датчиков. Он предпочтительнее керамики так же и как источник ультразвука в медицинских устройствах, поскольку имеет низкую плотность и модуль упругости при растяжении, что обеспечивает лучшую акустическую связь с человеческим телом.

Пьезоэлектрические свойства характеризуют при помощи набора пьезоконстант, описывающих связь величины приложенного электрического поля и возникающую механическую деформацию. Удлинение материала в некотором направлении вызывает сокращение его поперечных размеров. Аналогично, в пьезоэлектриках электрическое поле может вызвать появление не только растягивающей, но и сдвиговой деформации. По этой причине мы должны определить набор значений пьезоконстант d , связывающих величину электрического поля со всеми возможными деформациями, появляющимися в раз-

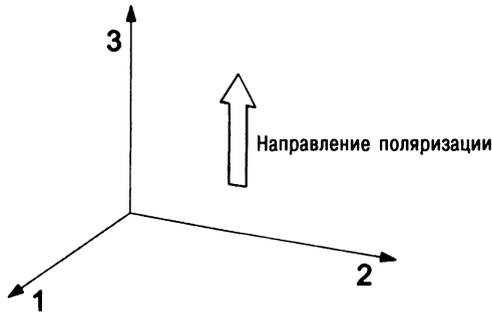


Рис. 6.4. Система координат.

личных направлениях. В общем случае материал характеризуется 18 независимыми пьезоэлектрическими константами. Однако вследствие симметрии одни из них равны нулю, а другие эквивалентны, что значительно уменьшает число независимых констант. Например, из-за симметрии d_{32} равно d_{31} , и поэтому ниже этот коэффициент описываться не будет. Нижние индексы 4, 5 и 6 описывают величину появляющихся сдвиговых напряжений. Для пьезокерамических преобразователей пьезоконстанты с этими индексами большого значения не имеют.

Введем систему координат, как показано на рис. 6.4. Пусть пьезокерамический материал поляризуется вдоль оси 3. Для описания полного набора пьезоконстант обычно используют нижние индексы. Например, константа d_{33} связывает электрическое поле в направлении 3 с величиной создаваемой в этом же направлении деформации. Константа d_{31} связывает электрическое поле в направлении 3 и деформацию в ортогональном направлении 1. Пьезоэлектрические устройства почти всегда приводятся в движение теми же самыми электродами, с помощью которых они поляризуются, и поэтому будем считать, что электрическое поле всегда направлено вдоль оси 3. На практике наиболее важное значение имеют константы d_{33} и d_{31} . Значения этих констант для некоторых пьезоэлектриков приведены в табл. 6.1.

6.2. Использование прямого пьезоэлектрического эффекта

Как описано выше, прямой пьезоэлектрический эффект состоит в появлении электрических зарядов под действием механической нагрузки. Величина этих зарядов пропорциональна прилагаемой силе, что может быть использовано для измерения ее величины.

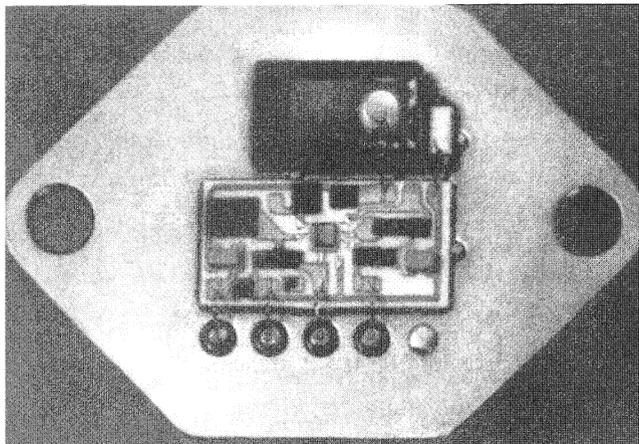


Рис. 6.5. Прямой пьезоэлектрический эффект используют для измерения величины ускорения. На фотографии показан пьезоэлектрический элемент, смонтированный на одной интегральной схеме вместе с электронным устройством обработки сигнала [12]

Благодаря своей высокой резонансной частоте датчики силы, основанные на пьезоэффекте, имеют очень малое время реагирования и очень хороши для измерения быстро меняющихся сил. С другой стороны, они плохо работают на низких частотах из-за электропроводности. Одно из основных применений таких датчиков — акселерометры, в которых измерение силы позволяет определить ускорение тела известной массы. Производство пьезоэлектрических акселерометров развито настолько хорошо, что они имеют вид миниатюрной интегральной схемы, содержащей датчик и электронное устройство обработки сигнала (рис. 6.5).

Прямой пьезоэлектрический эффект в высокотехнологичных изделиях применяется менее широко. Разность потенциала, возникающего в пьезоэлектрике при деформации, достигает нескольких тысяч вольт. Это используется для зажигания горючего при помощи маломощной искры.

Важной областью совместного применения прямого и обратного пьезоэлектрического эффекта являются пьезоэлектрические трансформаторы. Идея, предложенная Розеном в 1950-х годах, заключается в том, чтобы возбудить пьезоэлектрик электрическим сигналом в одной точке, а принять его в другой точке, механически связанной с первой [13]. Такие устройства работают очень эффективно в резонансном режиме и широко используются, например, для питания подсветки портативных компьютеров.

Таблица 6.1. Значения пьезоконстант

Материал	d_{33} ($\times 10^{-12}$ м/В)	d_{31} ($\times 10^{-12}$ м/В)
ВаTiO ₃	191	-78
ПВДФ	-33	2-14
ТЦС-4	289	-123
ТЦС-5А	374	-171
ТЦС-5Н	593	-274

6.3. Акустические преобразователи

Впервые явление пьезоэлектричества было использовано в технических целях в годы Первой мировой войны Полем Ланжевром, который построил первый пьезоэлектрический сонар для военно-морского флота. Благодаря сочетанию электрической и механической систем и высокой резонансной частоте, кристаллы кварца, помещенные между двух стальных листов, оказались эффективными источниками ультразвука. Пьезоэлектрические сонары с тех пор были значительно усовершенствованы. В частности, было улучшено их акустическое согласование с водной средой, а вместо диоксида кремния стали использовать пьезокерамики. Пьезоэлектрики, особенно ПВДФ, используют в высокочастотных акустических динамиках, а также во многих отраслях медицины, от эхографии до ультразвуковой хирургии.

6.4. Пьезоэлектрические преобразователи

Для мехатронных устройств и *микроэлектромеханических систем* (МЭМС) непрерывно разрабатываются новые пьезоэлектрические силовые преобразователи с улучшенными рабочими характеристиками. Пьезоэлектрические преобразователи имеют высокое быстродействие, точность и большую плотность энергии. В различных областях техники использовали самые разные пьезоэлектрические преобразователи. Это обусловлено их непревзойденным быстродействием и точностью, но иногда используют и их специфические особенности, например, для работы в условиях сверхвысокого вакуума. На пьезоэлектрических преобразователях основаны целые области техники. Например, без системы пьезоэлектрического сканирования трудно представить себе атомно-силовой микроскоп.

Пьезоэлектрические преобразователи основаны на обратном пьезоэлектрическом эффекте, преобразующем электрическую энергию в механическую нагрузку или перемещение. Как было описано выше, это происходит на уровне кристаллической решетки и преобразова-

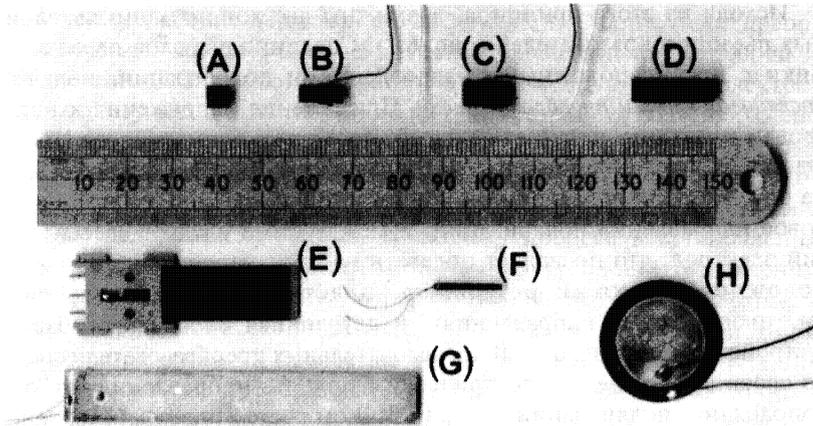


Рис. 6.6. Промышленно производимые пьезоэлектрические силовые преобразователи: (A–D) – многослойные; (E–G) – двуслойные; (H) – однослойный.

ние является прямым, в отличие от соленоидов и магнитоэлектрических преобразователей, в которых электрическая энергия сначала преобразуется в энергию магнитного поля, а в случае сплавов с памятью формы – в тепловую энергию. Это обеспечивает преимущества таких преобразователей, как, например, низкий уровень электромагнитных помех и высокая плотность энергии.

Ниже пойдет речь об использовании пьезоэлектриков в качестве источника механического движения и будут описаны некоторые схемы таких пьезопреобразователей.

6.4.1. Двуслойные пьезопреобразователи в виде изгибающейся балки

По принципу действия двуслойный пьезопреобразователь напоминает биметаллическую пластину. В обоих случаях изгибающий момент возникает вследствие различного сокращения или удлинения двух соединенных вместе пластин. Если биметаллическая пластина изгибается за счет разности коэффициентов теплового расширения, то в двуслойных пьезопреобразователях – разности поперечных пьезоэлектрических коэффициентов d_{31} , связывающих величину электрического поля с деформацией в перпендикулярном направлении. Прикладывая постоянное электрическое поле к двум соединенным друг с другом пластинам с различными знаками поляризации, в одной из них вызывается сокращение, а в другой – удлинение и, как следствие, изгиб всей системы.

Исходя из этого принципа, возможны две конструкции двуслойных пьезопреобразователей (рис. 6.7). Соединив два слоя пьезокерамики с противоположными направлениями поляризации, получим *последовательный преобразователь*. Приложение напряжения к электродам пластины вызывает ее изгиб, поскольку один из слоев сокращается, а другой удлиняется. Например, так работает устройство F на рис. 6.6. При параллельной конфигурации два слоя имеют одинаковое направление поляризации, и между ними следует ввести третий электрод, что позволяет подавать на слои напряжение противоположного знака. В результате, пластины деформируются в противоположных направлениях, и двуслойная система изгибается (устройство G на рис. 6.6). В последовательных преобразователях один из слоев возбуждается электрическим полем в направлении, противоположном поляризации, что в конечном счете приводит к их деполяризации. При параллельной конфигурации пластин для преодоления этого недостатка можно прикладывать различное напряжение (как в устройстве E на рис. 6.6).

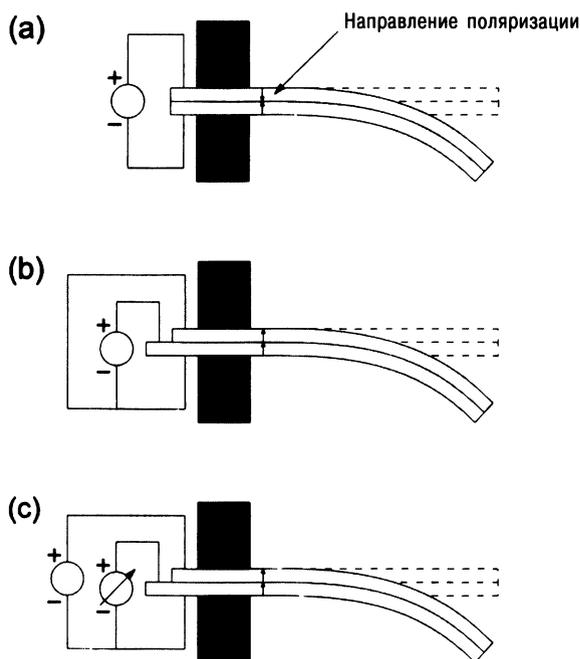


Рис. 6.7. Пьезоэлектрические двуслойные преобразователи: (а) – последовательный двуслойный преобразователь; (б) – параллельный двуслойный преобразователь; (с) – параллельный двуслойный преобразователь с различными управляющими напряжениями.

Похожие рабочие характеристики присущи и одиночным преобразователям, в которых один из активных слоев заменен металлической пластиной. Такая конфигурация обычно используется в электромагнитных гудках и эхолотах. Одно из таких устройств (Н) изображено на рис. 6.6.

Многослойные преобразователи изготавливают путем химического восстановления одной из поверхностей керамической пластины с высоким содержанием свинца. Поскольку процесс восстановления обычно проводят при повышенной температуре, при охлаждении пластина приобретает изогнутую форму. Восстановленная поверхность пьезоэлектрически неактивна, что ограничивает величину изгиба при подаче напряжения на невосстановленную активную часть пластины. Поэтому такие преобразователи в чем-то подобны однослойным преобразователям. Их преимущество состоит в том, что электрод изготавливается из той же пластины, что и активная часть, что снимает проблему обеспечения адгезионной связи между ней и электродом.

Действие преобразователя обусловлено появлением несимметрии и смещением активной части пластины к одной из ее поверхностей. Радиальное сжатие/удлинение активного слоя под действием электрического поля приводит к изгибу пластины.

Преобразователи градиентного типа способны создавать большие смещения и развивают более высокую действующую силу, чем однослойные или двуслойные преобразователи. Их преимуществом является также то, что в целях увеличения суммарного смещения их можно собрать в последовательно соединенный пакет. Хертлинг [1] сообщает о достижении смещения в 1 мм и развитии силы в 100 Н при толщине пластин толщиной 0,2 мм (рис. 6.8).

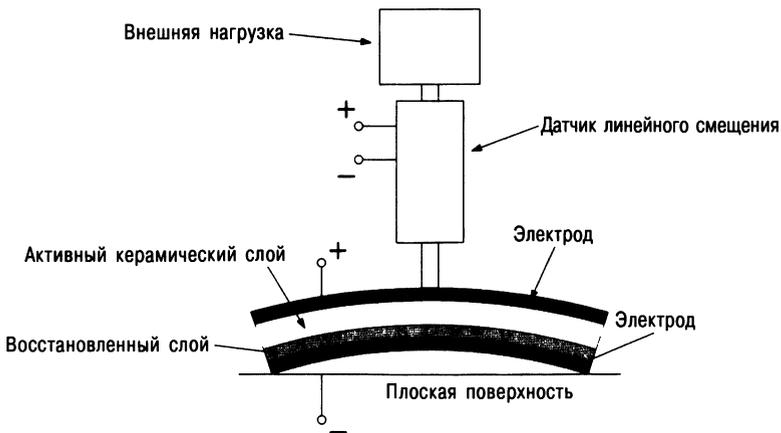


Рис. 6.8. Механический преобразователь gainbow с измерителем линейного смещения [12].

6.4.2. Однослойные преобразователи

Преимуществом монокристаллических пьезоэлектрических приборов является возможность наиболее полного использования сложного характера электромеханического взаимодействия. Соответствующей обрезкой пьезоэлектрического кристалла под действием электрического поля можно получить растяжение, изгиб или кручение. Этим способом было создано множество преобразователей для микропозиционирования. Недостатком таких преобразователей является небольшая величина смещения. Гораздо большее смещение достигается на устройствах из твердых пьезокерамик. Например, существует держатель для образцов, имеющий вид керамической трубки, продольно разрезанной на четыре части, с электродами на каждом квадранте. Пропуская ток через нужные электроды, при помощи такого устройства можно наклонять и перемещать образец.

Так как для достижения значительных смещений необходимы электрические поля порядка 1 МВ/м, пьезоэлектрические устройства нуждаются в источниках высокого напряжения. В преобразователях с поступательным движением эту проблему обычно решают путем его деления на тонкие слои, в результате чего получают *многослойные* устройства. Однако для специальных приложений перспективу имеют и однослойные преобразователи. Их примерами являются преобразователь, названный *Moonie*, и разработанный на его основе преобразователь *Symbal*.

6.4.2.1. Преобразователи *Moonie* и *Symbal*

Принцип действия, лежащий в основе преобразователя *Moonie*, впервые был применен в акустическом преобразователе океанографического назначения, запатентованном в 1991 году и описанном в статье [2]. Основная идея состоит в наложении жестких металлических наконечников на обе поверхности пьезоэлектрического диска, как показано на рис. 6.9, а. Сжимающая сила, направленная перпендикулярно плоскости диска, вызывает радиальное расширение диска вследствие эффекта Пуассона и, как следствие, появление сжимающих радиальных напряжений. При такой конфигурации устройства эффективное значение константы d_{33} , определяющей связь электрического поля и деформации, которые в данном случае перпендикулярны плоскости диска, увеличивается вследствие появляющихся напряжений в плоскости диска и увеличения вклада соответствующей константы d_{31} . Можно показать, что при этом выполняется соотношение [2]:

$$d_{33}^{\text{eff}} = K_1 d_{33} + K_2 d_{31}, \quad (6.1)$$

где обе константы K_1 и K_2 положительны и зависят от геометрических размеров и свойств материалов диска и наконечников. Увеличение диаметра полости в центре захвата приводит к увеличению значения эффективной величины константы d_{33}^{eff} и уменьшению частоты резонанса [2].

Развивая данную идею, несколькими годами позже те же исследователи разработали преобразователь Мооние, схематически изображенный на рис. 6.9, *b* [3]. Преобразователь Мооние изготавливается из керамических ТЦС-5А дисков с латунными накладками. Его диаметр равен приблизительно 1 см, а толщина изменяется от 2 до 7 мм. Эффективное значение константы d_{33}^{eff} этого устройства достигает 3×10^{-9} м/В (позже она была увеличена до 10×10^{-9} м/В), что эквивалентно коэффициенту усиления 5. Было обнаружено, что увеличение толщины накладки приводит к возрастанию резонансной частоты за счет уменьшения смещения и уменьшению коэффициента d_{33}^{eff} . С другой стороны, уменьшение толщины накладки приводит к снижению действующей силы, хотя с накладками толщиной 0,4 мм величина сила достигает 20 Н. Попытки улучшить рабочие характеристики преобразователя Мооние предпринимались в различных работах. Самое важное усовершенствование состояло в создании канавки в металлических накладках вблизи области их контакта с пьезоэлектрическим диском. Поскольку в этой области имеется значительная концентрация механического напряжения, канавка уменьшает жесткость структуры, в результате чего увеличивается смещение и умень-

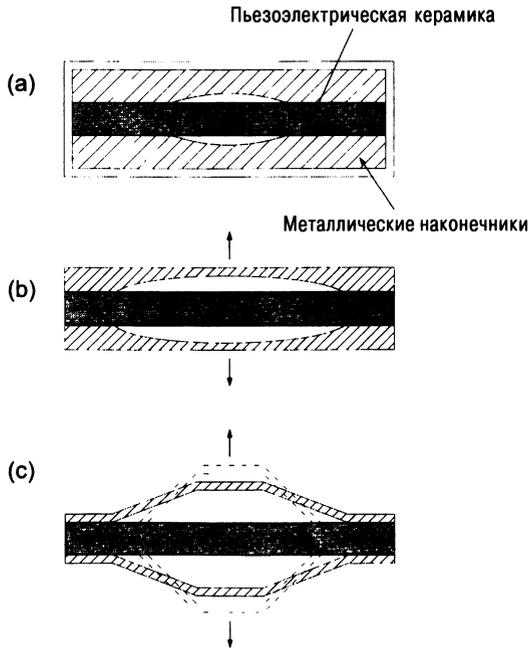


Рис. 6.9. Преобразователи Мооние и Сымбал: (a) — акустический преобразователь Мооние; (b) — преобразователь Мооние; (c) — преобразователь Сымбал [6].

шается энергия упругой деформации, запасаемая накладками [4]. Следующее усовершенствование преобразователя Moonie было осуществлено его изобретателями несколько лет спустя [5], в результате чего появился преобразователь Symbal (рис. 6.9, с). Главными недостатками предыдущей разработки были зависимость смещения от положения точки контакта (накладки в деформированном состоянии не являются плоскими) и сложная технология производства из-за необходимости токарной обработки накладок для создания кольцеобразного паза. Преобразователь Symbal имеет штампованные накладки, которые в середине имеют плоскую форму, что упрощает процесс производства и создает более надежный контакт с поверхностью керамики. В то же время толщина накладки в области контакта уменьшена, что увеличивает гибкость и уменьшает механические потери. Преобразователь Symbal имеет лучшие рабочие характеристики по сравнению с Moonie, и коэффициент d_{33}^{eff} достигает величины 15×10^{-9} м/В [5]. Кроме того, плоская форма поверхности накладки упрощает последовательное использование преобразователя для увеличения суммарного смещения.

В работе [1] описана программа оптимизации геометрической формы преобразователя, сделанного из пьезоэлектрической керамики и некоторого неактивного материала, обычно металла. Оптимизация проводится для получения максимальной силы или смещения. Интересно, что эта процедура была применена для оптимизации свойств преобразователя Moonie и была получена оптимизированная структура, напоминающая преобразователь Symbal.

6.4.3. Последовательное соединение и многослойные преобразователи

Необходимость в высоком напряжении управляющего сигнала является серьезным недостатком пьезоэлектрических силовых преобразователей. Напряжение может быть уменьшено, если использовать ряд последовательно соединенных пьезоэлектрических слоев. В этом случае на несколько слоев тонкой пьезокерамики наносят индивидуальные электроды, а затем их накладывают друг на друга, как показано на рис. 6.10. Полученная структура представляет собой последовательность керамических элементов. Соединение этих электродов через один позволяет создать параллельную электрическую цепь пьезоэлектрических элементов, в то время как механически они размещены последовательно, и смещения суммируются. Преимущество этой схемы состоит в том, что величина электрического поля равна отношению разности потенциалов к толщине одного слоя, и при небольшой толщине слоя достигаются высокие величины электрического поля.

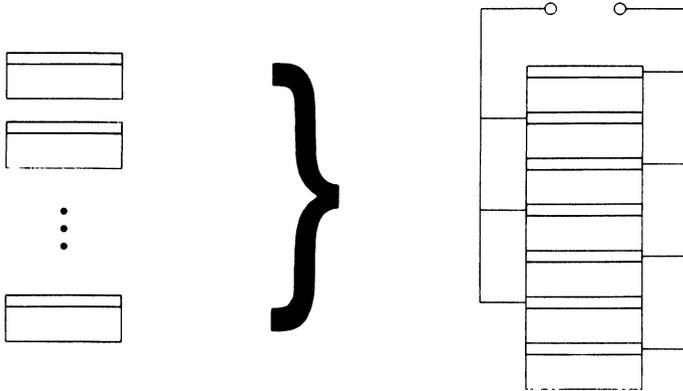


Рис. 6.10. Последовательное соединение нескольких пьезоэлектрических элементов с нанесенными электродами.

Дальнейшее усовершенствование преобразователей состояло в разработке многослойных устройств, аналогичных конденсаторам. Пьезоэлектрики укладывают тонкими слоями, на которые методом шаблонной печати наносят электроды. Затем слои накладывают один на другой и после обжига получают многослойный керамический преобразователь. Схема такой структуры изображена на рис. 6.11, а на рис. 6.6 (А–D) представлены фотографии таких устройств. Эта методика снижает издержки производства и увеличивает надежность. После обжига преобразователь поляризуют (как в многослойных, так и в последовательных структурах смежные слои имеют противоположную поляризацию).

6.4.3.1. Многослойные преобразователи

Многослойные преобразователи развивают наибольшую величину действующей силы по сравнению с преобразователями других типов. По этой причине их используют в качестве механических устройств, создающих поступательное перемещение. Их недостатком является довольно низкое сопротивление сжатию, изгибу и кручению. Рабочие напряжения лежат в пределах от 60 до 150 В в зависимости от толщины слоев и типа материала. Недавно были получены устройства с очень тонкими слоями пьезоэлектрика (толщиной 30 мкм). Это позволяет уменьшить величину управляющего напряжения, но при этом растет относительная доля неактивного материала электродов. Производство очень тонких слоев усложняет технологию, поскольку приходится бороться с пористостью материала; пустоты в подобной структуре могут вызывать растрескивание и образование электрической дуги.

Пусть максимальная действующая сила, которая появляется в многослойном преобразователе при нулевом смещении кромки, равна F_0 . Если длина преобразователя возрастает, величина этой силы линейно уменьшается до нуля при изменении его длины от l до максимального значения l_0 .

$$F = F_0 \left(1 - \frac{l}{l_0} \right) \quad \text{при } 0 < l < l_0. \quad (6.2)$$

Действующая сила пропорциональна поперечному сечению силового преобразователя, и поэтому ее лучше характеризовать максимальным сжимающим напряжением:

$$F_0 = A\sigma_0, \quad (6.3)$$

где A – площадь поперечного сечения. Типичные значения напряжения σ_0 лежат в интервале 35–50 МПа. Если модуль упругости материала E приводится изготовителем вместе с площадью поперечного сечения и длиной L , константу упругости k преобразователя можно вычислить по формуле

$$k = E \frac{A}{L}. \quad (6.4)$$

Величина силы F может быть выражена формулой

$$F = k (l_0 - l) \quad \text{при } 0 < l < l_0, \quad (6.5)$$

где l_0 – смещение при отсутствии внешней силы.

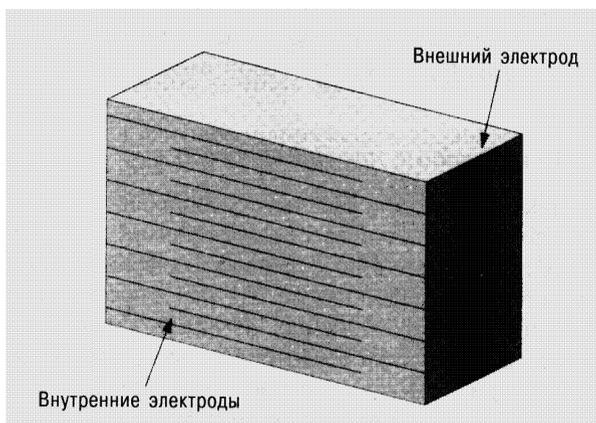


Рис. 6.11. Структура многослойного пьезоэлектрического силового преобразователя. Друг на друга наложено множество слоев «электрод–керамика–электрод», так что различные слои пьезоэлектрика соединены в параллельную электрическую цепь, а механически они соединены последовательно.

6.4.3.2. Динамические характеристики многослойных структур

Фирмы-производители обычно не приводят динамических характеристик пьезоэлектрических преобразователей. Динамические характеристики можно исследовать, возбуждая пьезопреобразователь переменным напряжением и измеряя величину смещения в зависимости от времени. При проведении таких испытаний необходима осторожность, чтобы не перегрузить внутренние электроды и не вызвать высоких растягивающих нагрузок. Простой метод испытаний состоит в использовании электронной схемы с переменными сопротивлением и индуктивностью и электрическим управляющим сигналом.

Имеется несколько параметров силовых пьезопреобразователей, которые влияют на их динамические характеристики. Одним из них является резонансная частота, определяемая модулем упругости материала и длиной преобразователя. Функциональные характеристики преобразователя зависят и от электрических параметров. Например, электрическая емкость пьезопреобразователя вместе с сопротивлениями электродов и внешней цепи определяют время, за которое напряжение на электродах достигает номинального значения. Как отмечалось выше, резонансная частота преобразователя зависит от величины пьезоэлектрического эффекта и, следовательно, от соответствующих пьезоконстант.

Рисунок 6.12 демонстрирует реакцию двух различных преобразователей на скачок напряжения при одинаковых условиях испытаний. Поперечное сечение преобразователей равно 2×3 и 5×5 мм² соответственно, а длина – 10 и 18 мм. Эти рисунки демонстрируют влияние резонансной частоты и емкости на поведение преобразователей.

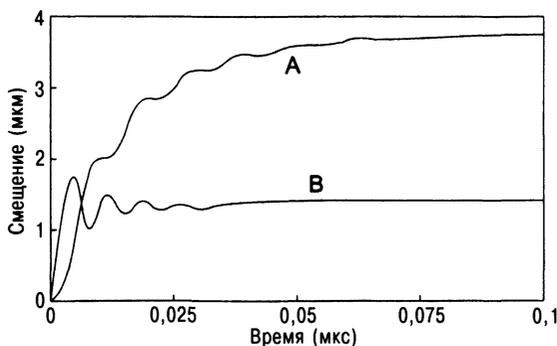


Рис. 6.12. Динамические характеристики двух пьезоэлектрических преобразователей. Размеры преобразователей $2 \times 3 \times 10$ мм (А) и $5 \times 5 \times 18$ мм (В). Индуктивность схемы пренебрежительно мала, а ее сопротивление равно 5Ω .

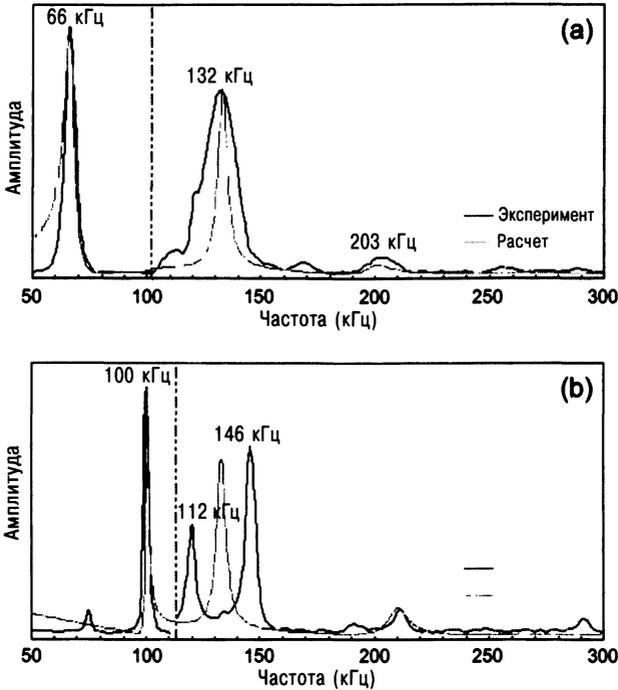


Рис. 6.13. Результаты расчетов на основе модели и экспериментальные частотные характеристики свободных колебаний многослойного пьезоэлектрического преобразователя. Электрическая цепь разомкнута (а) и замкнута (б). Для наглядности амплитуды при высоких частотах колебаний увеличены.

Поведение силового пьезопреобразователя можно описать при помощи модели, связывающей механическое и электрическое поведение системы. Для описания различных гармоник колебаний такая модель должна учитывать распределение массы по объему преобразователя. Отметим, что резонансная частота пьезоэлектрика зависит от его электрических характеристик.

Экспериментально колебания можно возбудить механически или при помощи импульса напряжения. На рис. 6.13 показана частотная характеристика механически возбуждаемого многослойного пьезоэлектрика при отсутствии механического стеснения. Резонансные частоты зависят от параметров электрической цепи.

Рисунок 6.13 иллюстрирует свободные колебания многослойного преобразователя. Некоторые области многослойной структуры могут колебаться в противофазе. Рисунок 6.14 демонстрирует, что при первой гармонике колебаний деформация всего объема преобразователя имеет один

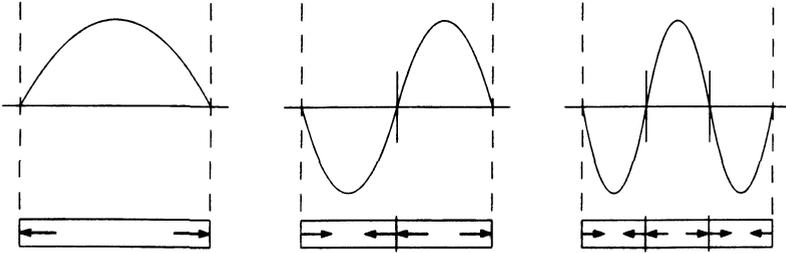


Рис. 6.14. Первые три гармоники колебаний многослойного преобразователя. Графики показывают деформацию в зависимости от координаты внутри преобразователя. Схематически показан знак деформации растяжения/сжатия.

и тот же знак (сжатие или растяжение). Напротив, при второй гармонике одна половина преобразователя растянута, а другая сжата. Это означает, что смещения в одной части положительные, а в другой — отрицательные. Эти смещения компенсируют друг друга. Полная взаимная компенсация смещений происходит только для четных гармоник, а для нечетных уменьшается величина смещения по мере возрастания их номера, поскольку уменьшается доля некомпенсированного материала.

6.5. Увеличение смещения

Главными преимуществами многослойных пьезоэлектрических преобразователей являются исключительно высокая скорость, большая действующая сила, высокая плотность энергии и точность действия. Это связано с физической природой явления, т.е. с тем, что преобразование электрической энергии в механическую происходит вследствие растяжения кристаллической решетки. Естественно, что эта деформация ограничена и на практике возможны лишь незначительные смещения. Относительная деформация обычно не превышает 0,1%, а удлинение при обычной длине преобразователя имеет порядок десятков микрон. Это является серьезным недостатком, поскольку часто требуются гораздо большие смещения. Кроме того, при этом требуется малая величина механических допусков. По этой причине исследования концентрировались как на разработке новых материалов с улучшенными рабочими характеристиками, так и на проектировании вспомогательных устройств, позволяющих максимально использовать существующие материалы. Увеличение смещения пьезопреобразователя может быть достигнуто различными способами. В зависимости от принципа усиления такие устройства можно разделить на три группы. В механических усилителях используются главным образом рычаги и шарниры; «интегрирующие» усилители суммируют смещения отдельных элементов. Наконец, усилители ударного типа

используют быструю реакцию многослойного преобразователя для придания кинетической энергии снаряду, который может преодолеть большие расстояния. Иногда эти принципы действия комбинируются для преодоления недостатков, свойственных каждому из этих методов.

6.5.1. Механическое усиление

К этому классу отнесены устройства, в которых «статическое» увеличение смещения пьезоэлектрического элемента достигается посредством использования механических устройств различной сложности. Усиление носит статический характер в том смысле, что все части конструкции находятся в постоянном контакте друг с другом.

Механические усилители, в свою очередь, можно разделить на два типа. В простейших усилителях используется принцип рычага, так что движение пьезоэлектрического элемента (с большим развиваемым усилием и малым смещением) передается на выход устройства с меньшей силой, но большим смещением. Второй метод усиления смещения основан на изгибе тонкой балки.

Некоторые из этих механических усилителей имеют оси вращения, вокруг которых поворачиваются их элементы. Из-за малых величин смещения недопустимо наличие люфта, и поэтому вместо обычных подшипников используют изгибающиеся элементы [7], что обеспечивает решение проблем трения, но повышает риск усталостного разрушения.

Действие рычажного усилителя иллюстрируется рис. 6.15, а. Теоретически они позволяют добиться высоких коэффициентов усиления. Их недостатками является то, что длинный рычаг имеет большую массу, что уменьшает резонансную частоту и быстродействие преобразователя. Кроме того, требования технологичности и концентрация напряжений в шарнирах налагают ограничения на габариты рычага и коэффициент усиления. Коэффициент усиления может быть увеличен

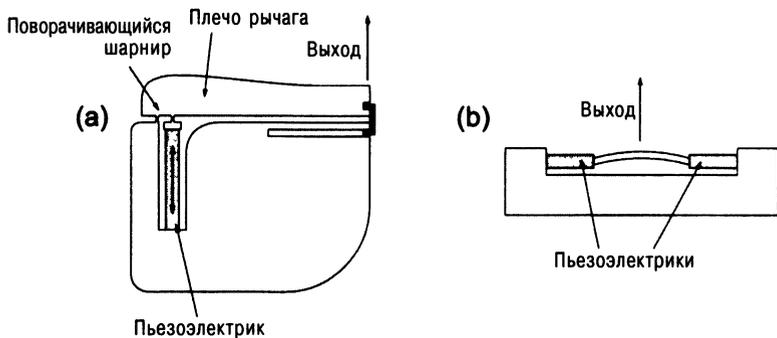


Рис. 6.15. Принцип действия рычажных усилителей (а) и преобразователей с гибким растяжением (б).

при помощи двухступенчатого усиливающего рычага, сделанного из легких материалов. Эффективность простых рычажных усилителей высока, поскольку для них необходимы всего два шарнира, однако величина смещения обычно является нелинейной, что может быть нежелательно в прецизионных устройствах.

Для увеличения смещения используются также изгиб балки под действием сжимающей силы, которую создает одно или несколько пьезоэлектрических устройств, как показано на рис. 6.15, *б*. Средняя часть балки движется перпендикулярно перемещению приводящего пьезопреобразователя. На этом принципе можно построить самые различные устройства. В самом простом варианте такого усилителя используется гибкий шарнир, соединяющий два стержня. В других преобразователях шарниры отсутствуют, и происходит упругий изгиб эллиптической оболочки. Геометрические параметры оболочки и, в частности, ее эксцентриситет могут быть подобраны в соответствии с предъявляемыми требованиями.

6.5.2. Суммирование множества малых смещений

Методика усиления, которая позволяет получить «неограниченное» выходное смещение, состоит в суммировании множества малых смещений. Ниже кратко обсуждаются конструкции такого типа, а именно шаговый двигатель и *инерционный ползун*, а также *ультразвуковой двигатель бегущей волны*, в которых используется динамическая интеграция непрерывного движения.

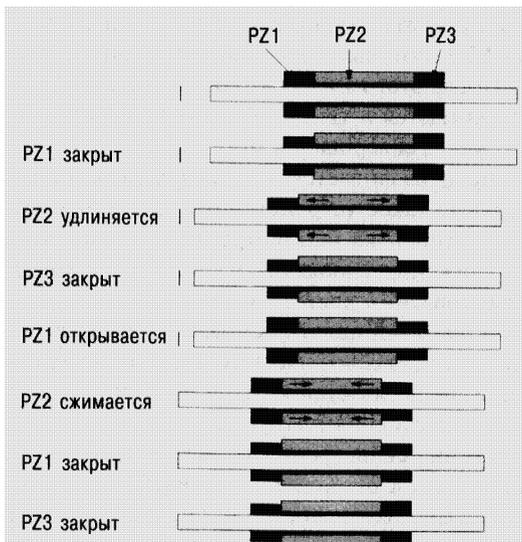


Рис. 6.16. Принцип работы шагового ползункового двигателя.

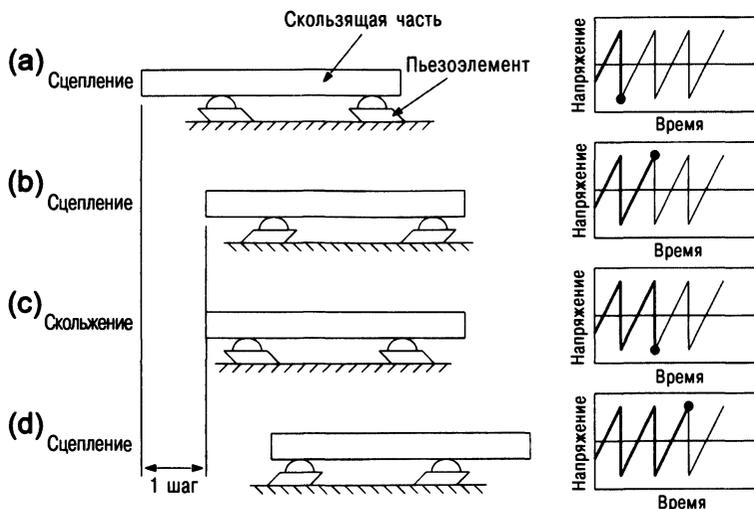


Рис. 6.17. Схема работы инерционного преобразователя и вид управляющего сигнала [8].

Принцип работы шагового двигателя показан на рис. 6.16. Активными компонентами в нем являются три связанных пьезоэлектрических преобразователя. Средний (PZ2) деформируется в продольном направлении, в то время как два других (PZ1 и PZ3) поочередно зажимают и отпускают вал, по которому перемещается ползун. Когда преобразователь PZ1 зажимает стержень (в это время он неподвижен), PZ2 растягивается и толкает PZ3 (который свободен). На этой стадии вал не двигается (стадия 1). После этого PZ1 ослабляет захват, а PZ3 зажимает вал, после чего PZ2 сжимается и тянет PZ3 вместе с тягой по направлению к PZ1 (стадия 2). Когда совершается много таких шагов, создается очень плавное движение и развивается высокая действующая сила (около 10 Н). Одновременно такое устройство имеет очень высокую разрешающую способность (порядка нанометров). Его недостатками являются малая скорость движения (порядка 10^{-3} м/с) и необходимость малых допусков при изготовлении двигателя.

Инерционный шаговый ползун основан на чрезвычайно малом времени реагирования пьезоэлектрических преобразователей. пилообразное напряжение прикладывается к пьезоэлектрическим элементам, на которые опирается массивная платформа (рис. 6.17). Во время линейного роста напряжения силы трения хватает для того, чтобы платформа двигалась направо (от *a* к *b*). Когда электрическое поле внезапно падает, сила трения оказывается недостаточной, и происходит проскальзывание, при котором платформа не двигается, а пьезоэлектрические элементы быстро перемещаются налево (от *b* к *c*). Типичная средняя

скорость движения платформы в этом случае равна примерно 10^{-4} м/с при перемещении на несколько сантиметров и длине шага порядка десятков нанометров. При тщательном контроле управляющего напряжения на стадии линейного роста разрешающая способность такого устройства может достигнуть долей нанометра. Его недостатком является малая величина действующей силы (десятки миллиньютонов). Этот принцип широко использовали для микропозиционирования в микроскопах (например, просвечивающих). Отметим, что импульс может иметь не только треугольную, но и более сложную форму [9].

В ультразвуковых двигателях бегущей волны в тонкой упругой пластине создаются две стоячие волны, имеющие сдвиг фаз так, чтобы при их наложении точки поверхности двигались по эллиптической траектории. Если на поверхность поместить предмет, он будет перемещаться. На этом принципе были созданы двигатели, с круговым и линейным движением. Такие двигатели создают высокий вращающий момент даже на низких скоростях и имеют нулевую потребляемую мощность в стационарном состоянии. Кроме того, их преимуществом является то, что на них не действуют электромагнитные помехи.

Очевидно, главным преимуществом интегрирующих устройств является фактически неограниченная величина смещения. Недостаток таких систем состоит в малой скорости и величине создаваемой силы.

6.5.3. Метод ударного воздействия

Основной принцип работы импульсного преобразователя состоит в передаче кинетической энергии от пьезоэлектрического элемента к некоторому снаряду. Из-за высокого быстродействия пьезоэлектрического преобразователя передача импульса носит характер удара. Следует заметить, что после получения импульса снаряд находится в «свободном полете», двигаясь независимо от пьезоэлемента. Вследствие этого в преобразователях ударного типа невозможно активно управлять смещением выхода. До некоторой степени можно контролировать только первоначальную скорость. С другой стороны, расстояние перемещения снаряда может быть достаточно большим.

Чанг с соавторами разработали и запатентовали привод ударного типа для точечных принтеров [10]. Пьезоэлектрический элемент зажимается в середине E-образной рамы и удерживается в сжатом состоянии, чтобы избежать появления растягивающих нагрузок (рис. 6.18). Благодаря высокому быстродействию пьезоэлектрический преобразователь создает ударную волну, которая распространяется по центральной балке и затем фокусируется коническим волноводом, после чего передается на молоточек. Получив импульс, молоточек вместе с прикрепленной к нему печатающей проволокой наносит удар по листу бумаги. После столкновения печатающей нити с бумагой молоточек возвращается в первоначальное положение. Возврат молоточка осуществляется пластинчатой пружиной,

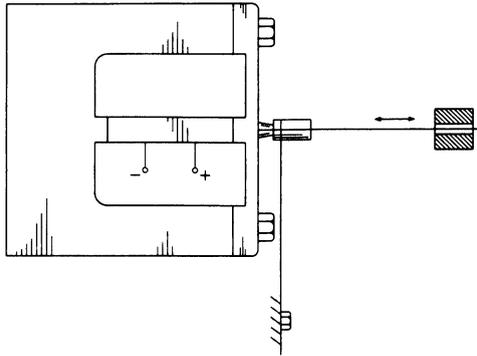


Рис. 6.18. Преобразователь импульсного действия для точечного матричного принтера.

которая также обеспечивает контакт молоточка и волновода в промежутке между очередными рабочими циклами. Сообщается о смещениях длиной до 0,38 мм с начальными скоростями, превышающими 2,5 м/с [10]. Следует отметить, что в настоящее время применение устройств, основанных на ударном воздействии, в основном ограничивается данной областью. Одной из причин ограниченного интереса к усилителям этого типа является невозможность контроля за процессом их действия, что ограничивает их использование системами «дискретного» действия.

6.6. Другие применения

Пьезоэлектрики, обычно диоксид кремния, используются для создания резонаторов, обладающих высокой стабильностью частоты колебаний. Их применяют в самых различных устройствах, от кварцевых часов до радиопередатчиков и радиоприемников. В настоящее время крупные кристаллы кварца выращивают искусственно при повышенных температурах, что гарантирует большой объем производства и более высокое качество по сравнению с естественными кристаллами.

Литература

1. Haertling, G. H. (1994) «Rainbow Ceramics – A New Type of Ultra-High-Displacement Actuator», *Am. Ceramic Soc. Bull.*, **73**, 93–96.
2. Xu, Q. C., Yoshikawa, S., Belsick J. R. and Newnham R. E. (1991) «Piezoelectric Composites with High Sensitivity and High Capacitance for Use at High Pressures», *IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, **38**, 634–639.
3. Newnham, R. E., Xu, Q. C. and Yoshikawa, S. (1997) «Metal-Electroactive Ceramic Composite Actuators», US Patent 5 276 657.
4. Shih, W. Y., Shih, W. H. and Aksay, I. A. (1997) «Scaling Analysis for the Axial Displacement and Pressure of Flextensional Transducers», *J. Am. Ceramic Soc.*, **80**, 1073–1078.



5. Dogan, A., Uchino, K. and Newnham, R. E. (1997) «Composite Piezoelectric Transducer with Truncated Conical End-Caps Cymbal», *IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, **44**, 597–605.
6. Newnham, R. E. and Dogan, A. (1998) «Metal-Electroactive Ceramic Composite Transducer», US Patent 5 729 077.
7. Xu, W- and King, T. G. (1996) «Flexure Hinges for Piezo-Actuator Displacement Amplifiers: Flexibility, Accuracy and Stress Considerations», *Precision Eng.*, **19**, 4–10.
8. Breguet, J.-M. and Clavel, R. (1998) «New Designs for Long Range, High Resolution, Multi-Degrees-of-Freedom Piezoelectric Actuators», *Proc. 6th Int. Conf. on New Actuators – Actuator 98, Bremen, Germany*.
9. Smith, W. F., Abraham, M. C., Sloan, J. M. and Switkes, M. (1996) «Simple Retrofittable Long-Range x-y Translation System for Scanned Probe Microscopes», *Rev. Sci. Instr.*, **07**, 3599–3604.
10. Chang, P. S. H. and Wang, H. C. (1990) «A High Speed Impact Actuator using Multilayer Piezoelectric Ceramics», *Sensors & Actuators A*, **24**, 239–244.
11. Silva, E. C. N., Nishiwaki, S. and Kikucbi, N. (2000) «Topology Optimization Design of Flexensional Actuators», *IEEE Trans. Ultrasonics, Ferro-electrics and Frequency Control*, **47**, 651–656.
12. Waanders, J. W. (1991) «Piezoelectric Ceramics: Properties and Applications», *Philips Components*, ISBN: 9398 651 80011.
13. Rosen, C. A. (1956) «Ceramic Transformers and Filters», *Proc. Electronic Components Symp.*, pp. 205–211.

А. Г. Дженнер

Д. Г. Лорд

7.1. Введение

Интеллектуальные материалы способны «чувствовать» и реагировать на внешнее воздействие (например, электрическое или магнитное). По этой причине их все шире и шире применяют в промышленности и военной технике. Всемирный сбыт интеллектуальных материалов уже сейчас превышает 1 млрд долларов в год.

Выбор интеллектуального материала зависит от характера поведения, которое требуется от него в зависимости от условий эксплуатации. В этой главе описываются свойства и применения нового поколения магнитострикционных материалов.

Магнитострикционные и пьезоэлектрические материалы создают механическое перемещение под действием магнитного и электрического поля соответственно. Из обоих материалов делают активные преобразователи. В последнее время появились магнитострикционные материалы на основе редкоземельных элементов, магнитострикция в которых является очень сильной. Магнитострикционные материалы последнего поколения представляют собой интерметаллические соединения, содержащие железо, тербий и диспрозий. Их потенциал начинает постепенно реализовываться в различных изделиях, например сонарах, активных клапанах и системах активного контроля колебаний конструкций [1, 2].

Один из лучших новых магнитострикционных материалов известен под промышленной маркой Терфенол-Д, основным компонентом которого является $Du_{0,7}Tb_{0,3}Fe_{1,95}$. Этот материал способен развивать магнитострикционную деформацию до 0,14%. Он появился в результате исследования магнитного поведения редкоземельного элемента тербия (Tb), деформация которого при температуре ниже 200 К достигает 1%. Легирование тербия железом (Fe) позволило поднять рабочую температуру до комнатной, а введение диспрозия (Dy) – снизить величину магнитного поля [3]. В течение многих лет значительные усилия были потрачены на разработку этих материалов в форме аморфных лент, проволок и тонких пленок. Поведение такого материала определяется физической природой явления магнитострикции.

7.1.1. Природа магнитострикции

Эффект магнитострикции, называемый также эффектом Джоуля, состоит в изменении размеров при намагничивании или изменении магнитного состояния [4]. Различают линейный и объемный магнитострикционный эффекты. Линейный эффект состоит в изменении длины образца из ферромагнитного материала под действием магнитного поля, а объемный – в изменении его объема. Поскольку изменение объема обычно невелико, под магнитострикцией, как правило, понимают именно линейную магнитострикцию.

Магнитострикционное поведение часто путают с механострикционным. Их различие заключается в том, что механострикционное поведение является более общим и включает изменение не только длины, но и модуля упругости. Оба эффекта обусловлены связью упругой и магнитной энергии.

Магнитострикция состоит в самопроизвольном деформировании атомной решетки ферромагнитного материала под действием магнитного поля вследствие снижения при этом общей энергии, равной сумме энергий упругого деформирования и энергии магнитного поля.

Теории механострикции учитывают межатомные взаимодействия [5]. При этом следует различать магнитострикционную и механострикционную связь плотности магнитной энергии $\frac{\mu H^2}{2}$ и упругой энергии $\frac{E\varepsilon^2}{2}$ (μ – магнитная проницаемость, H – напряженность магнитного поля, E – модуль Юнга, ε – деформация).

Явление магнитострикции открыл Джоуль в 1842 году [4]. Он обнаружил, что при намагничивании железо удлиняется в направлении магнитного поля и сокращается в перпендикулярном направлении. В 1882 году Берет [6] показал, что при приложении магнитного поля никель сжимается и при этом изменяется его объем. В течение первой половины XX столетия при различных температурах изучали поведение железа, кобальта, никеля и других сплавов в магнитном поле. Исследовали как монокристаллы, так и поликристаллические материалы. Однако интерес к исследованию магнитострикции постепенно угас [7], что было обусловлено малой величиной эффекта. Величину линейной магнитострикции описывают параметром l_s (магнитострикционной постоянной), равной $(\Delta l/l)_s$ – отношению максимального изменения длины к начальной длине при насыщении в зависимости от величины магнитного поля. Магнитострикционные постоянные в это время имели порядок 10^{-5} . Их значения для первых поликристаллических и монокристаллических материалов приведены в табл. 7.1.

Для прикладных целей до последней четверти XX столетия наиболее перспективными считали никель и сплавы на его основе. Это было обусловлено относительно высокой развиваемой деформацией и низкой

анизотропией магнитных свойств. Однако в последнее время эти материалы оказались в тени более мощных пьезоэлектриков и магнитоупругих композитов. Их примером является титанат циркониевокислого свинца (ТЦС) (табл. 7.1).

В этот период появились и другие магнитоупругие материалы, например керамические ферромагнетики на основе кобальта. Их достоинствами являются повышенная деформация и высокое электрическое сопротивление, приближающееся к диэлектрикам, а недостатками — большая анизотропия магнитных свойств и низкая механическая прочность.

Таблица 7.1. Магнитоупругие постоянные монокристаллических (λ_s) и поликристаллических (λ_{100} и λ_{111}) материалов [11, 12]

	λ_{100} ($\times 10^6$)	λ_{111} ($\times 10^6$)	λ_s ($\times 10^6$)
Монокристаллы			
Железо (Fe)	21	-21	-
Никель (Ni)	-46	-24	-
Поликристаллы			
Никель (термообработанный)	-	-	300
Пермаллой 45	-	-	120
Пермендюр 2V	-	-	1540
Сегнетоэлектрики			
ТЦС III	-	-	<1000

Ситуация резко изменилась в начале 60-х годов, когда было обнаружено, что тяжелые редкоземельные элементы Gd, Tb, Dy, Ho, Er и т.д. имеют очень большие магнитные моменты и проявляют сильное магнитоупругое поведение [8–10]. Тем не менее на практике эти материалы применялись очень мало, поскольку редкоземельные элементы проявляют сильную ферромагнитную намагниченность лишь при очень низких температурах (<50 K), а при комнатной температуре выше точки Кюри они являются парамагнетиками. Кроме того, эти материалы имеют очень сильную анизотропию магнитных свойств и, как следствие, для их намагничивания требуется очень большое магнитное поле. По этим причинам использовать магнитоупругое поведение данных материалов на практике оказалось очень трудно. Для решения этих проблем начали интенсивно исследовать возможность использования интерметаллических соединений и сплавов редкоземельных и других металлов типа R-Zn, R-Al и R-Fe.

На процесс намагничивания влияют температура и внешняя нагрузка. Магнитоупругий эффект называют положительным, если при одноосном сжатии материал намагничивается перпендикулярно оси сжатия. Если к такому материалу прикладывается растягивающая сила, он намагничивается вдоль направления действия силы. Для магнитоупругих материалов с отрицательным эффектом направление намаг-

ничивания является обратным. Поскольку направление приложения нагрузки изменяет направления «легкого» и «тяжелого» намагничивания, в выражение магнитной энергии ввели дополнительное слагаемое, которое для поликристаллического материала имеет вид:

$$E_o = -\frac{3}{2} \lambda_s \sigma \cos^2 \phi, \quad (7.1)$$

где λ_s – магнестрикционная постоянная (соответствующая насыщению), σ – приложенное механическое напряжение и ϕ – угол между осью силы и направлением легкого намагничивания. Для рассматриваемых материалов напряжение σ является сжимающим, а магнестрикционное поведение – положительным. Вдоль оси приложения силы образец намагнитить очень трудно. Отметим, что до достижения насыщения величина намагничивания возрастает с величиной напряжения, а влияние напряжения становится особенно сильным при больших магнестрикционных постоянных.

В механострикционном материале при изменении магнитного поля изменяется длина образца (или жесткость), и наоборот. Материалы, используемые в качестве магнитомеханических преобразователей и датчиков, характеризуют коэффициентом магнитомеханической связи k . Этот коэффициент определяют как отношение подводимой магнитной энергии к механической энергии упругой деформации, или наоборот. Из уравнения состояния при малой величине магнитного поля можно получить:

$$k^2 = \frac{d^2}{\mu^o S_H}, \quad (7.2)$$

где d – пьезомодуль, μ^o – коэффициент магнитной проницаемости при постоянном напряжении и S_H – податливость материала при постоянной величине магнитного поля. Обычно величину k измеряют, исходя из резонансных частот [13]. Недостатком этого подхода является то, что он не рассматривает механические потери, связанные с внутренним трением. Потери в магнестрикционных материалах изучали методом плоской волны [14].

7.2. Редкоземельные интерметаллические материалы

В 1963 году при низких температурах исследовали магнестрикционное поведение редкоземельных элементов тербия (Tb) и диспрозия (Dy), имеющих гексагональную кристаллическую решетку. Оказалось, что магнестрикционный эффект в этих материалах в 100–100 000 раз сильнее, чем в переходных металлах. Однако вследствие низкой температуры Кюри использовать эти материалы при комнатной температуре нельзя. В 1970-х

годах была предпринята попытка разработать материалы с сильной магнитострикцией при комнатной температуре. Для этого редкоземельные элементы (R) объединили с магнитными элементами и компаундами, сохраняющими ферромагнитные свойства при комнатной температуре.

В сплавах группы R-Zn самую большую магнитострикционную постоянную по направлению легкого намагничивания имеют монокристаллы DyZn, и поэтому данный материал очень перспективен для применения при низких температурах (<77 К). В отличие от большинства интерметаллических соединений на основе редкоземельных элементов, материалы группы R-Fe₂ при высоком содержании железа имеет высокие температуры перехода (намного выше комнатной). Как следствие, при комнатной температуре они демонстрируют сильное магнитострикционное поведение. Их недостатком является большая анизотропия свойств. Магнитные свойства сплавов группы R-Fe₂ представлены в табл. 7.2.

Согласно данным табл. 7.2, при комнатной температуре самую высокую магнитострикционную постоянную имеет TbFe₂. К сожалению, он имеет очень сильную анизотропию магнитных свойств, характеризуемую коэффициентом $k_4 = -7,6 \times 10^6$ Дж/м³. Как следствие, для достижения насыщения требуется магнитное поле величиной 10 МА/м. В отличие от компаундов DyFe₂ и Ho-Fe₂, направлением легкого намагничивания в TbFe₂ является ось [001], и, как следствие, магнитострикционный эффект является положительным. В DyFe₂ величина магнитострикционной постоянной втрое ниже, чем в TbFe₂, а анизотропия энергии больше ($k_4 = 2,1 \times 10^6$ Дж/м³), чем в системах на основе переходных металлов.

Таблица 7.2. Магнитострикционные постоянные в направлении легкого намагничивания λ_s при напряженности магнитного поля 2 МА/м и коэффициенты анизотропии k_4 для некоторых поликристаллических компаундов на основе редкоземельных элементов [7, 15]

	Направление легкого намагничивания	λ_s при комнатной т-ре ($\times 10^6$)	k_4 ($\times 10^6$ Дж/м ³)
SmFe ₂	[011]	-1560	-
TbFe ₂	[111]	1753	-7,6
DyFe ₂	[001]	433	2,1
Ho-Fe ₂	[001]	80	0,6
ErFe ₂	[111]	-300	-0,33
TmFe ₂	[111]	-125	-0,05

На первый взгляд, малая анизотропия кажется несовместимой с сильным магнитострикционным эффектом. Однако Кларк [3] показал, что использование двух легирующих редкоземельных металлов с противоположными знаками анизотропии магнитной энергии и одним знаком магнитострикции позволяет создать псевдобинарные соединения, ани-

зотропия которых оказывается очень малой. Tb и Dy представляют собой практически идеальную пару редкоземельных элементов, что позволило создать трехкомпонентный сплав $Tb_{0.27}Dy_{0.73}Fe_2$. Этот сплав стал известен под торговой маркой Терфенол-Д.

Поведение магнестрикционных материалов определяется величиной магнитного поля, механической нагрузкой и температурой. Терфенол-Д имеет поликристаллическую структуру с преимущественной ориентацией зерен. Зонной плавкой сплава Tb, Dy и Fe выращивают зерна, ориентированные преимущественно вдоль кристаллографической оси $[1\bar{1}\bar{2}]$. Монокристаллы в промышленных объемах получить пока не удастся. В материалах с осью легкой поляризации $[111]$ и положительным магнестрикционным эффектом в результате ориентации зерен поведение зависит не только от величины поля, но и от проекции механического напряжения на направление роста зерен [16].

Рисунок 7.1 демонстрирует зависимость величины появляющейся в Терфеноле-Д деформации от величины напряженности магнитного поля при различных значениях сжимающего усилия. Под действием магнитного поля материал растягивается в направлении поля ($\lambda_{\text{паралл}}$). Величина λ зависит от величины предварительного сжимающего напряжения. Поскольку в Терфеноле-Д магнестрикционный эффект является положительным, сжатие приводит к более резкой зависимости развиваемой деформации от величины магнитного поля. Этот рисунок демонстрирует, как сжимающее усилие изменяет деформационную характеристику (кривую « λ -H»). Как следствие, при наличии внешнего сжатия материал работает весьма эффективно при небольших гистерезисных потерях. При высоких сжимающих усилиях величина

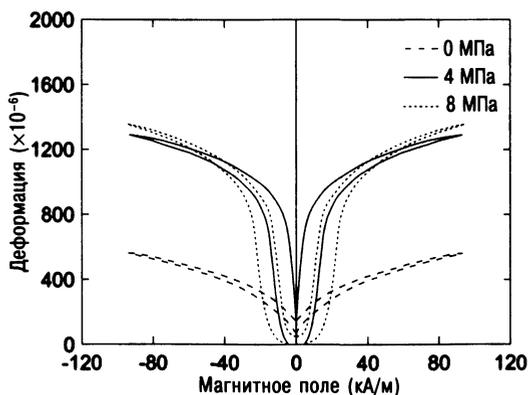


Рис. 7.1. Типичные зависимости магнестрикционной деформации Терфенола-Д от напряженности магнитного поля при различных механических нагрузках.

магнитоупругого эффекта ($d_{32} = \frac{\partial \lambda}{\partial H}$) снижается, что иллюстрирует рис. 7.2. Отметим также, что магнитоупругие свойства зависят от условий эксплуатации и технологии получения материала [17–19].

При применении магнитоупругих материалов нужно учитывать потери энергии, связанные с нелинейной зависимостью деформации от напряжения и их гистерезисным поведением (рис. 7.1). Для получения оптимальных рабочих характеристик необходимо регулировать и величину магнитного поля, и предварительную нагрузку. Оптимальные магнитоупругие постоянные (k и d_{33}) достигаются при некоторых величинах механического напряжения и магнитного поля (рис. 7.2). Коэффициент магнитоупругой связи равен примерно 0,7, что соответствует ~50%-ному преобразованию магнитной энергии в механическую. Экспериментальные значения величины k примерно на 15% выше теоретических значений, рассчитанных на основании резонансных данных даже с учетом токов Фуко. Это различие объяснили влиянием потерь, действующих на форму резонансной кривой, высоту и положение резонансов.

Для современных магнитоупругих материалов верхний предел прочности при одноосном сжатии равен ~350 МПа, но прочность увеличили вдвое после добавления к Терфенолу-Д алюминия, что иллюстрируется табл. 7.3 [20]. По своей природе магнитоупругие устройства идеально подходят для работы при предельно низких частотах. Верхнюю рабочую частоту определяют токи Фуко (потери). Величину потерь можно снизить, используя Терфенол-Д в виде многослойных пластин, и теоретически он способен действовать до частоты

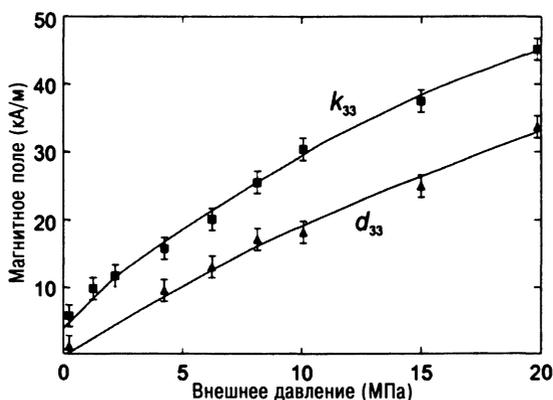


Рис. 7.2. Связь величины магнитного поля и сжимающего напряжения при максимальных значениях магнитоупругой связи (k_{33}) и магнитоупругой постоянной (d_{33}) для образца из Терфенол-Д [12].

Таблица 7.3. Сравнение исходного Терфенола-Д и материалов, содержащих добавки алюминия

	$Tb_{0,3}Dy_{0,7}Fe_{1,95}$	$Tb_{0,3}Dy_{0,7}(Fe_{0,9}Al_{0,1})_{1,95}$
λ_{\max} при 120 кА/м ($\times 10^{-6}$)	1380	1160
K_{\max}	0,7	0,63
Сопротивление	63,1	97,2
Прочность при сжатии (МПа)	320	735

80 кГц. При очень высоких нагрузках может потребоваться охлаждение, компенсирующее нагрев, обусловленный вихревыми токами. Отметим, что модификация состава композиции многократно увеличила ее удельное электрическое сопротивление (табл. 7.3).

Изменение температуры влияет на анизотропию материала и, как следствие, его поведение, поскольку от температуры зависит степень ориентации магнитных моментов. В работе [20] теоретически исследовали влияние добавок алюминия на магнитную анизотропию Терфенола-Д. Рисунок 7.3 демонстрирует температурную зависимость магнитострикции $Tb_{0,3}Dy_{0,7}Fe_2$ при сжимающем напряжении 18,9 МПа [21]. При температуре 20°C величина $\frac{\partial \lambda}{\partial T}$ равна 5,6/°C. В зависимости от состава композиции рабочая температура находится в интервале от -10°C до +120°C. При небольших добавках церия рабочая температура может быть увеличена еще больше [22].

Рисунок 7.4 демонстрирует зависимость модуля упругости Терфенола-Д от напряженности магнитного поля [23]. Поскольку магнитострикционная деформация связана с вращением магнитных моментов под дей-

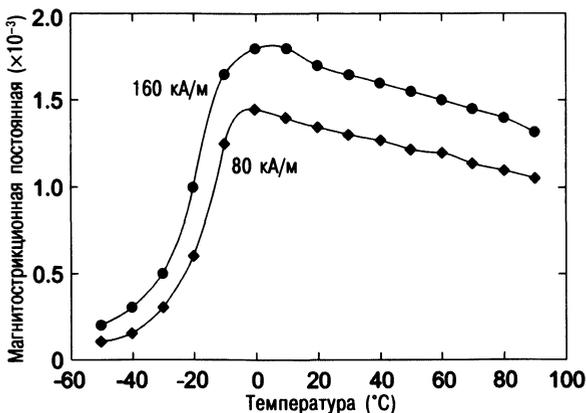


Рис. 7.3. Влияние температуры на магнитострикционную постоянную в Терфеноле-Д при двух величинах напряженности магнитного поля [20].

ствием магнитного поля, после приложения поля деформирование материала перестает описываться законом Гука. Это явление называют ΔE -эффектом [24]. При приложении больших магнитных полей модуль Юнга достигает верхнего предела. Рисунок 7.5 демонстрирует зависимости смещения от величины создаваемой механической силы для двух приводов одинакового размера, сделанных из Терфенола-Д и многослойного ТЦС [25]. В случае Терфенола-Д и смещение, и создаваемая сила заметно выше, чем в случае ТЦС. Производимые в настоящее время приводы позволяют получить смещение до 100 мкм под нагрузкой величиной 1800 Н.

В 1996 году Пиджапати с соавторами [25, 26] обнаружили, что после 10^6 циклов одноосного нагружения амплитудой 1000 МПа при средней нагрузке 120 МПа, направленной вдоль оси выращивания образца, магнитоупругостная постоянная d_{33} Терфенола-Д увеличилась на 56%. После 29×10^6 циклов эта постоянная достигла максимального значения 1660×10^{-6} . Максимальные значения коэффициента магнитной проницаемости и магнитоупругостной постоянной достигаются при одной величине магнитного поля. Такое поведение является аномальным и нетипично для обычных пьезоэлектрических и сегнетоэлектрических материалов типа ТЦС. Циклическая нагрузка обычно приводит к ухудшению магнитоупругостных и механических свойств, а иногда и к механическому разрушению материала. Таким образом, в случае циклического нагружения магнитоупругостные устройства из Терфенола-Д имеют преимущества по сравнению с ТЦС-керамикой. Праджапати предположил, что причиной этого эффекта является исключительно высокая магнитоупругая связь в Терфеноле-Д. Отметим, что этот эффект наблюдается только в монокристаллах и поликристаллических материалах с преимущественной ориентацией зерен.

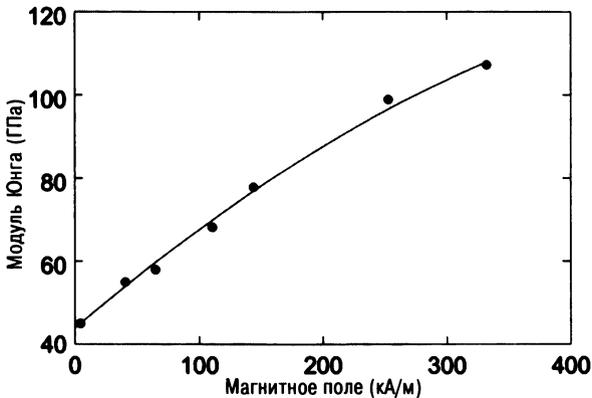


Рис. 7.4. Зависимость модуля Юнга Терфенола-Д от напряженности магнитного поля [23].

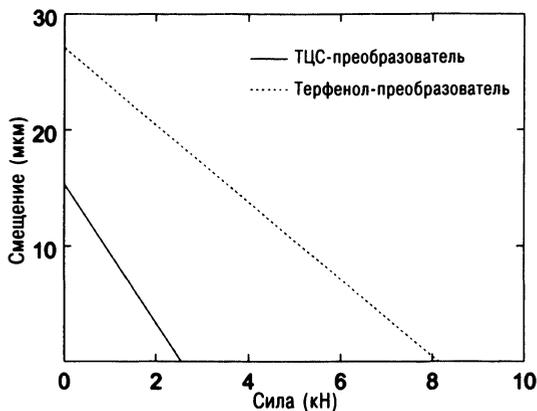


Рис. 7.5. Зависимость смещения от величины создаваемой силы для преобразователей на основе ТЦС и Терфенола-Д одинакового размера [24].

7.3. Приведение в действие

Терфенол-Д является наиболее мощным материалом, развивающим высокую деформацию и силу в широком диапазоне рабочих частот при быстродадействии порядка микросекунды. В настоящее время магнито-стрикционные материалы занимают приблизительно 10% рынка активных материалов. Свойства магнито-стрикционных приводов в последние годы были значительно улучшены благодаря появлению материалов на основе редкоземельных элементов. Потенциал этих материалов можно использовать в различных приложениях.

7.3.1. Универсальные преобразователи

Рабочие характеристики Терфенола-Д должны соответствовать требованиям, предъявляемым к устройствам, в которых его планируют применять. Как указывалось выше, проблемы могут быть связаны с гистерезисным поведением этого материала, особенно при высоких статических и динамических нагрузках. В идеале, устройство нужно конструировать так, чтобы он создавал максимальную деформацию при минимальном потреблении электроэнергии. Для этого необходимо создавать постоянное магнитное поле, смещающее рабочую точку. Смещение позволяет работать в области линейной связи деформации и поля, а также получать максимальную величину постоянной d_{33} . Это поле обычно создается постоянными магнитами. В результате уменьшается величина гистерезиса и потребление энергии. Рабочее магнитное поле создается управляющей катушкой, расположенной вблизи активного компонента. Кроме того, к активному материалу необходимо прикладывать смещающее механическое напряжение, при котором достигаются оптимальные магнито-стрикционные характеристики (рис. 7.6).

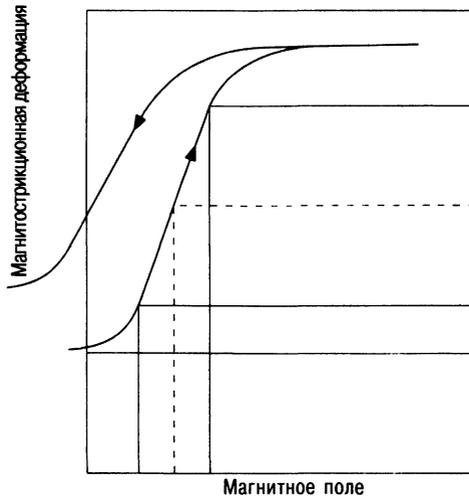


Рис. 7.6. Диаграмма, иллюстрирующая смещение рабочей точки для достижения оптимальных характеристик магнитострикционного материала.

Привод обычно состоит из активного стержня из Терфенола-Д, устройства типа пружины, создающего смещающее механическое напряжение, постоянного магнита или катушки постоянного тока, управляющей катушки, системы охлаждения (если требуется), корпуса и контактов (рис. 7.7). Были разработаны и другие конструкции приводов, например «двухтактный» привод, использующий пару действующих в противоположном направлении симметрических стержней из Терфенола-Д [27]. Стоимость привода всегда имеет большое значение, и необходимо учитывать, что Терфенол-Д является весьма дорогим материалом. Хотя в настоящее время проводится работа, направленная на упрощение технологии производства Терфенола-Д, рассчитывать на сильное снижение стоимости редкоземельных металлов не следует.

С учетом данных замечаний были разработаны приводы, увеличивающие эффективность сверления камня типа песчаника, известняка или гранита. Эти приводы получают смещение в несколько сотен микрон при развиваемой силе 12 кН (рис. 7.8 и 7.9) [29].

7.3.2. Магнитострикционные двигатели

Было предпринято множество попыток создать двигатели, основанные на магнитострикционном эффекте. Достоинством таких двигателей является компактность, точность и мощность активного элемента. На уровне разработки имеется уже несколько таких моторов. По сравне-

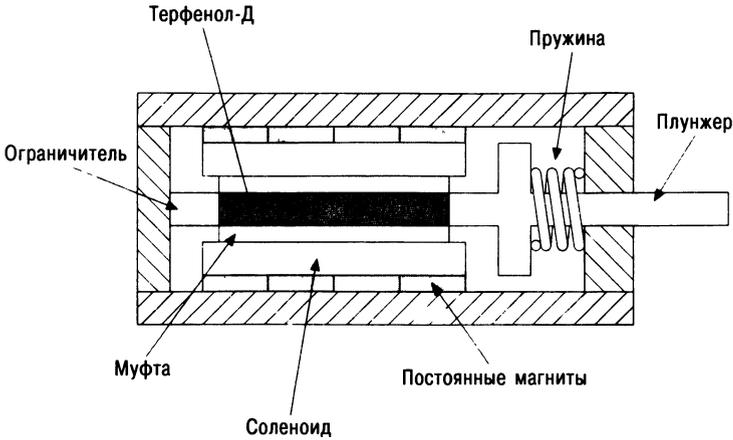


Рис. 7.7. Общая схема магнестрикционного привода [28].

нию с электромагнитными сервомоторами эти двигатели имеют два главных преимущества – меньший люфт и увеличенный вращающий момент благодаря наличию редуктора, а также отсутствие автоблокировки, отключающей источник питания.

Первый тип двигателя называют линейным или двигателем Киссеветтера [30]. Он состоит из трех основных частей. Статор (1 на рис. 7.10) является жесткой цилиндрической трубой из нержавеющей стали. Вторым элементом является вал из Терфенола-Д (2), который вставляется в статор и помещается в магнитное поле. Третьим элементом являются несколько магнитных катушек (3), которые создают магнитное поле на небольшой части

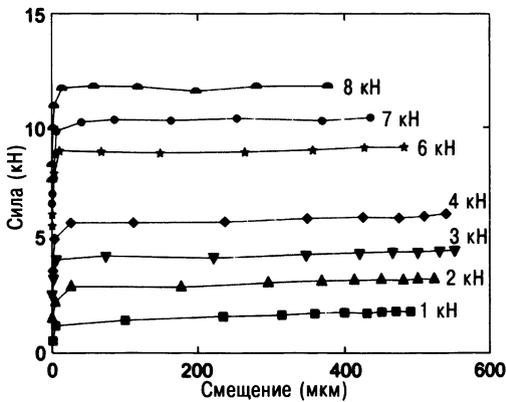


Рис. 7.8. Диаграммы смещение–сила, развиваемые при наличии пружины с жесткостью $k = 3 \times 10^5$ Н/м [29].

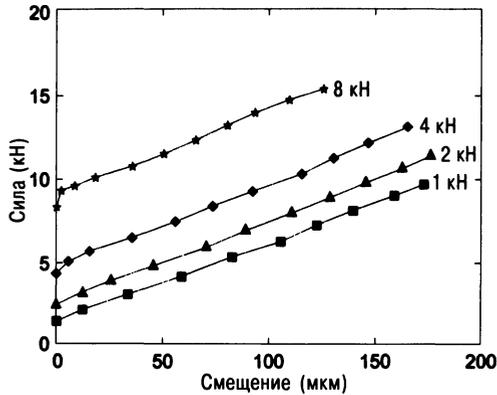


Рис. 7.9. Сила в зависимости от смещения (с пружиной жесткостью $k = 3 \times 10^7 \text{ Н/м}$) при различных уровнях смещающего напряжения [29].

стержня. Ряд катушек поочередно «разжимает» и «зажимает» некоторую часть активного компонента, что приводит к поступательному движению активного элемента. Такой двигатель развивает высокую силу, большую величину и высокую точность смещения. Их можно использовать в производстве, при измерении сил, в устройствах авиационного контроля и т.д.

Второй тип двигателя называют гибридным Терфенол-ТЦС двигателем. Он использует зажимающее устройство, многослойный ТЦС и активный привод из Терфенола-Д [31]. Его преимуществом является высокая рабочая частота, достигающая 300 Гц.

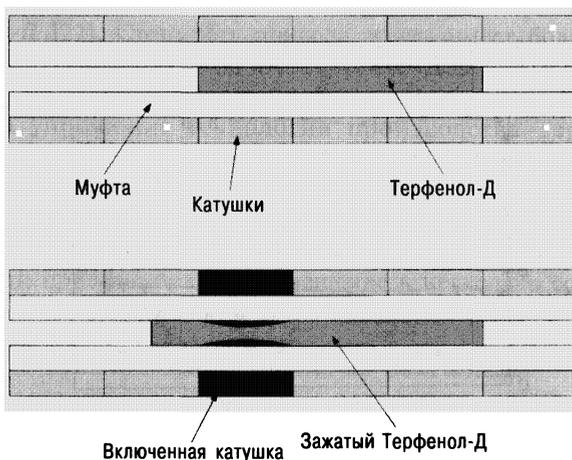


Рис. 7.10. Схема и принцип действия мотора Киссеветтера.

Третьим типом магнитострикционного мотора является прямой безредукторный привод. Он был разработан для авиакосмической промышленности, в которой требуются двигатели с высокой плотностью энергии и более высоким вращающим моментом при низких рабочих скоростях [12, 32].

7.3.3. Акустические и ультразвуковые излучатели

В военной технике в излучателях акустических волн, например в сонарах, все более активно используется Терфенол-Д. В традиционных излучателях используют пьезопреобразователи. На высоких частотах эти излучатели удовлетворяют большинству предъявляемых к ним требованиям. Однако для увеличения радиуса действия необходимо работать при более низких частотах, и в этом случае проблемой становится большой размер пьезопреобразователя. Благодаря сильному магнитострикционному эффекту, большой плотности энергии и более низкому модулю Юнга Терфенол-Д является очень перспективным активным материалом. При тех же размерах пьезопреобразователя Терфенол-Д позволяет значительно увеличить мощность сигнала. Обычно такие излучатели функционируют в резонансных условиях [33, 34].

7.3.4. Контроль колебаний и абсорберы

Магнитострикционные элементы можно использовать для активного демпфирования колебаний. При этом значительную роль играет способность контроля даже при гистерезисном поведении материала привода.

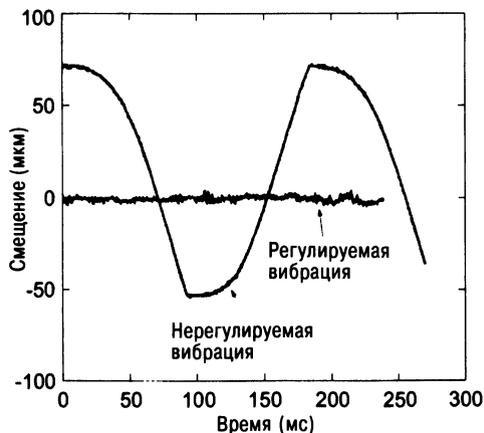


Рис. 7.11. Влияние активной системы контроля на амплитуду колебаний частотой 5 Гц [38, 39].

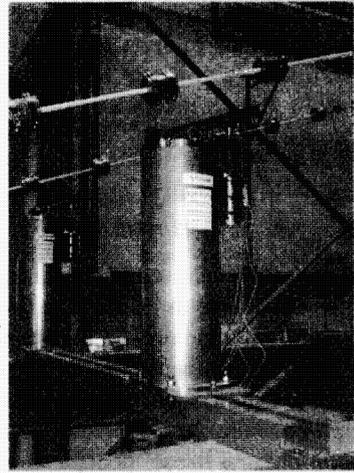
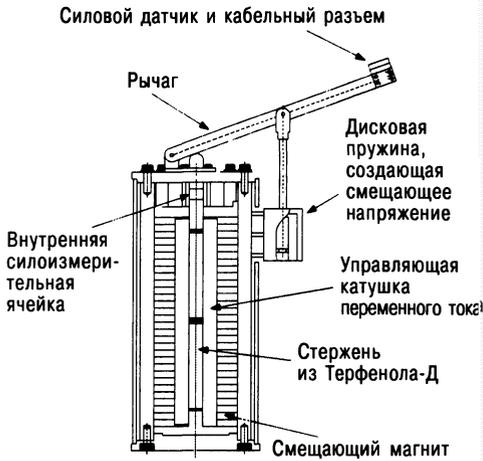


Рис. 7.12. Модель мощного магнитоэлектрического привода, демпфирующего колебания силовых тросов в модели подвесного моста [40].

В 1999 году Прайт с соавторами разработали нелинейный вибропоглотитель из несмещенного Терфенола-Д [35], эффективно поглощающий нелинейные колебания. Используя простоту, надежность, низкую массу, небольшое управляющее напряжение и нечувствительность к центростремительному ускорению, из Терфенола-Д разработали демпферы, эффективно снижающие вибрацию лопастей вертолета [36]. Магнитоэлектрическая система контроля составляет менее 1% общего веса вертолета и потребляет лишь 0,7% общей мощности. В продаже имеются и другие системы демпфирования колебаний. Благодаря прекрасным характеристикам активатора и индивидуальному контролю лопастей удалось снизить амплитуду колебаний лопастей более чем на 90%.

В 1998 году Шоу продемонстрировал адаптивную систему контроля колебаний, использующую активаторы из Терфенола-Д [37]. Активаторы создавали силы, противодействующие внешним воздействиям. Результаты показали, что в полосе частот 50–70 Гц амплитуду колебаний удается снизить более чем на 96,6% (29,3 дБ).

Система активного контроля учитывает вариацию характеристик отдельных приводов из Терфенола-Д и изменение их поведения при совместном действии статической и динамической нагрузок. Амплитуду колебаний частотой 5 Гц удалось снизить на 32 дБ (рис. 7.11) [38, 39].

Для исследования эффективности демпфирования колебаний тросов в подвесных мостовых конструкциях была разработана и изготовлена крупномасштабная модель моста, использующая мощные приводы [40]. Исследование подтвердило эффективность демпфирования коле-

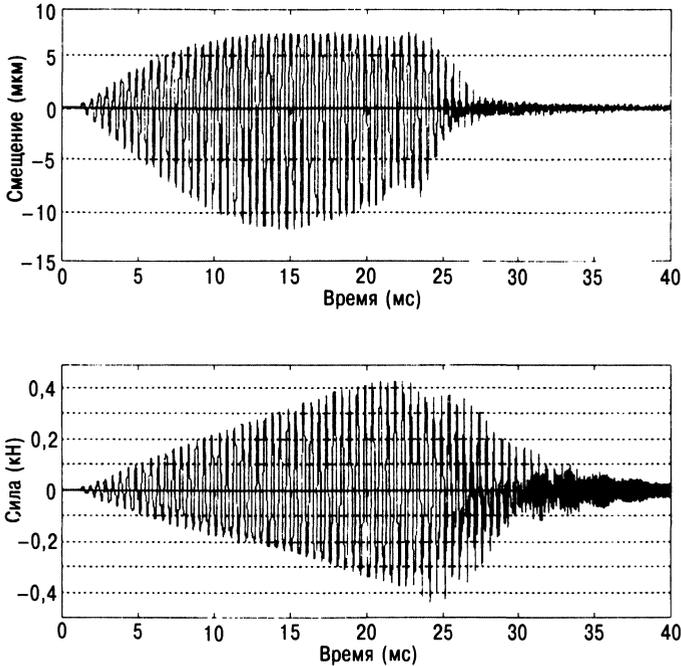


Рис. 7.13. Смещение и сила в датчиках системы контроля колебаний в модели моста (система включена на 25-й секунде) [40].

баний при помощи системы активного контроля с обратной связью. Возбуждая модель на резонансных частотах, в тросах развивались колебания амплитудой 46 мм (0,8 кН). Эти колебания успешно подавлялись при помощи активных элементов, увеличивающих коэффициент демпфирования примерно на порядок величины при минимальном потреблении энергии (рис. 7.12 и 7.13). Исследование также выявило большой потенциал использования таких приводов для диагностики работоспособности конструкций в гражданском строительстве.

7.4. Заключение

Успешное развитие магнестрикционной активаторной техники зависит от нескольких факторов. Прежде всего для этого необходимо улучшать технологию производства приводов, управляющих усилителей и регуляторов. Кроме того, такие системы должны проектироваться с учетом специфических условий их применения, размера, величины смещения и силы, скорости, потребляемой мощности и т.д. Для учета этих факторов критическое значение имеет знание того, как материал реагирует на внешнее воздействие.

Литература

1. Greenough, R. D., Jenner, A. G., Schulze, M. and Wilkinson, A. J. (1991) *J. Magn. & Magn. Mat.*, **101**, 75–80.
2. Greenough, R. D., Jenner, A. G., Schulze, M. and Wilkinson, A. J. (1991) *IEEE Trans, on Magnetics*, **27**, 5346–5348.
3. Clark, A. E. (1974) *AIP Conf. Proc.*, **18**, 1015.
4. Joule, J. P. (1842) *Phil. Mag.*, 930, 30, 76 and 225.
5. Kittel, C (1949) *Rev. Mod. Phys.*, **21**, 555.
6. Barret, W. F. *Nature*, **26**, 585–586.
7. Lacheisserie, E. de T. (1993) *Magnetostriction – Theory and Applications of Magnetoelasticity*, CRC Press.
8. Corner, W. D. et al. (1960) *Proc. Phys. Soc.*, **75**, 781.
9. du Plessis et al. (1968) *Phil. Mag.*, **18**, 145.
10. Rhyn, M. (1965) *Phys. Rev. A*, **140**, 2143.
11. Greenough, R. D. and Schulze, M. P. (1994) *Intermetallic Compounds* (ed. J. H. Westbrook and R. L. Fleisher), vol. 2, Wiley.
12. Jenner, A. G., Smith, R. J. E. and Greenough, R. D. (2000) *Mechatronics*, **10**, 457–466.
13. Savage, H. T., Clark, A. E. and Powers. J. (1975) *IEEE Trans, on Magnetics*, **11**, 1355.
14. Reed, I. M. (1994) PhD Thesis, University of Hull, UK.
15. Clark, A. E. (1980) *Ferromagnetic Materials* (ed. E. P. Wohlfarth), vol. 1, North Holland.
16. Clark, A. E., Teter, J. P., and McMasters, O. D. (1988) *J. Appl. Phys.*, **63**, 3910.
17. Verhoven, J. D., Gibson, E. D., McMasters, O. D. and Baker, H. H. (1987) *Metall. Trans. A*, **18**, 223.
18. Galloway, N., Greenough, R. D., Schulze, M. P. and Jenner, A. G. (1993) *J. Magn. & Magn. Mat.*, **119**, 107.
19. Sandlund, L. and Cedell, T. (1992) *Proc. 3rd Int. Technology Transfer Congress, Actuator 92, Bremen, Germany*.
20. Jenner, A. G., Prajapati, K. and Greenough, R. D. (1993) *IEEE Trans, on Magnetics*, **29**, 3514.
21. Clark, A. E. (1992) *Proc. 3rd Int. Conf. on New Actuators, Berlin, Germany*, pp. 127.
22. Patent Pending, Jenner, A. G. et al., University of Hull, Hull, UK.
23. Clark, A. E. and Savage, H. T. (1975) *IEEE Trans, on Sonics and Ultrasonics*, **22**, 50.
24. Akuta, T. (1989) *Proc. 10th Int. Workshop on Rare Earth Magnets and their Applications, Kyoto, Japan*.
25. Prajapati, K., Greenough, R. D. et al. (1996) *IEEE Trans, on Magnetics*, **32**, 4761–4763.
26. Prajapati, K., Greenough, R. D. et al. (1997) *J. Appl. Phys.*, **81**, 15. [27] Kvarnsjo, H. et al. (1992) *Proc. 3rd Int. Conf. on New Actuators, Berlin, Germany*.
28. Halkyard, P. and Holiday, P. (2001) Private Communication, Newlands Technology Ltd.
29. Aston, M., Greenough, R. D., Jenner, A. G., Metheringham, W. J. and Prajapati, K. (1997) *J. Alloys & Compounds*, **258**, 97–100.

30. Int. Patent W088/05618.
31. Butler, J. L., Butler, A. L., Butler, S. C. (1993) *J. Acoust. Soc. Am.*, **94**, 636–641.
32. Claeysen, F., Lhermet, N., LeLetty, R. and Bouchilloux, P. (1997) *J. Alloys & Compounds*, **258**, 61–73.
33. Moffet, M. B., Clarke, A. E. et al. (1991) *J. Acoust. Soc. Am.*, **89**, 1448.
34. Moffet, M. B., Powers, J. M. and Clake, A. E. (1991) *J. Acoust. Soc. Am.*, **90**, 1184.
35. Pratt, J. R., Oueini, S. S. and Nayfeh, A. H. (1999) *J. Intel. Mat. Sys. & Struct*, **10**, 29–35.
36. Fenn, R. C., Doener, D. A. et al. (1996) *Smart Mat. & Struct*, **5**, 49–57. [37] Shaw, J. (1998) *J. Intel. Mat. Sys. & Struct*, **9**, 87–94.
38. Jenner, A. G., Greenough, R. D., Allwood, D. and Wilkinson, A. J. (1994) *J. Appl. Phys.*, **76**, 7160.
39. Smith, R. J. E., Jenner, A. G., Wilkinson, A. J. and Greenough, R. D. (1997) *J. Alloys & Compounds*, **258**, 101–106.
40. ACE (Active Control in Civil Engineering) Project funded by the European Community under the Industrial & Materials Technologies Programme Brite Euram 3, proposal N.BE96-3334, contract BRPR-CT97-0402 (1998).
41. Wickenden, D. K., Kistenmacher, T. J., Osiander, R. et al. (1997) *Johns Hopkins APL Technical Digest*, **18**, 271–278.
42. Dooley, J. and DeGraef, M. (1997) *Ultramicroscopy*, **67**, 113–131. [43] Geng, Z. J., Pan, G. G., Haynes, L. S., Wada, B. K. and Garba J. A. (1995) *J. Intel. Mat. Sys. & Struct*, **6**, 787–800.
44. Hardee, H. C and Hardee, N. L. (1997) *J. Alloys & Compounds*, **258**, 83–86.

ГЛАВА 8

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

У. А. Балло

8.1. Введение

Эта глава посвящена гидравлическим интеллектуальным устройствам. В ней описаны принципы работы таких устройств, методы получения цифрового сигнала, усилия, развиваемые гидравлическими машинами, и области их применения. Затем кратко описаны некоторые гидравлические интеллектуальные устройства с электронным управлением.

8.2. Основные понятия и принципы

С помощью программного управления интеллектуальный механизм может изменять свои характеристики. Это свойство называют *гибкостью*. При этом, поскольку аппаратные средства остаются неизменными, не тратится время на изменение конфигурации машины. Характер и скорость движения изменяются переключением усиливающих рычагов, ведущих шкивов, при помощи коробки передач и т.д.

Основными характеристиками гидравлической машины являются максимальные величины развиваемой силы F , скорости U и смещения e . В принципе механические устройства имеют очень высокую скорость и мощность. Их достоинствами являются также высокая точность и жесткость, а недостатком — отсутствие гибкости. Электромагнитные механизмы могут изменять скорость, но развивают меньшую силу. Новейшие модели могут гибко изменять рабочие характеристики благодаря цифровому или аналоговому управлению и использованию сервомоторов и шаговых двигателей. Их конкурентоспособность значительно возросла после появления новых магнитных материалов и устройств, позволяющих быстро изменять ток в соленоидах, создающих магнитное поле.

Работа любого механизма ограничена выделением тепла, достижением предельного электрического и магнитного поля и т.д. Отношение создаваемого усилия к ускоряемой массе определяет быстроту изменения рабочей скорости гибкого устройства. Гибкие устройства не имеют времени остановки или запуска в их стандартном понимании. Этот процесс иллюстрируется моделью работы электрогенератора, приведенной на рис. 8.1.

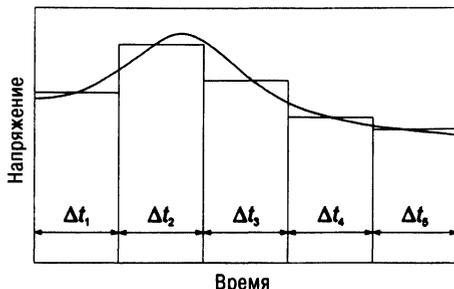


Рис. 8.1. Модель, иллюстрирующая принцип работы гибких устройств.

Электрическое напряжение на выходе гибкого генератора постоянно в течение некоторого заданного времени Δt , после чего оно изменяется. При этом нагрузка должна успеть отреагировать на уменьшение или увеличение управляющего напряжения. Интеллектуальное гидравлическое устройство типа предохранительного клапана, как правило, управляется при помощи электроники. Такие устройства имеют преимущества, присущие обычным гидравлическим устройствам. Прежде чем переходить к обсуждению того, зачем нужны интеллектуальные гидравлические клапаны, на примере некоторых низкоскоростных устройств обсудим предъявляемые к ним требования.

Смесь жидкокристаллического (ЖК) нематика (70 об.%) и полисилоксана (30 об.%) изменяет свою вязкость под действием электрического поля. Она используется в адаптивных ходунках, изображенных на рис. 8.2, *a*. Этот пример демонстрирует свойства жидкости, используемой в адаптивных машинах. Когда на управляющие пластины (рис. 8.2, *b*) подается напряжение величиной ~ 2 кВ/мм, ЖК домены поляризуются и выстраиваются вдоль поля вместе с полимером, в результате чего между доменами образуется жесткая связь. Вследствие малого размера доменов и высокой вязкости смеси ~ 10 Па·с, после подачи напряжения вязкость изменяется не слишком быстро, за время ~ 20 – 80 мс. Величина регулируемого с помощью электроники предела текучести равна ~ 10 кПа при скорости сдвига 300/с, что соответствует скорости движения пешехода 0,3 м/с (рис. 8.3, *a*) [2].

Ходунки корпорации Asahi Kasei принимают на себя вес человека и ограничивают его скорость, чтобы он не споткнулся при движении по наклонной дороге. Величина сопротивления определяется импульсами высокого напряжения, длительность которых регулирует датчик скорости, установленный на колесе ходунков. Тормозящий момент силы зависит от величины управляющего напряжения. Такое поведение сильно отличается от поведения обычных ньютоновских жидкостей (рис. 8.3, *b*). Поскольку плотность тока в смеси ЖК с полисилоксаном равна лишь ~ 1 мА/см², потребляемая мощность составляет доли ватта.

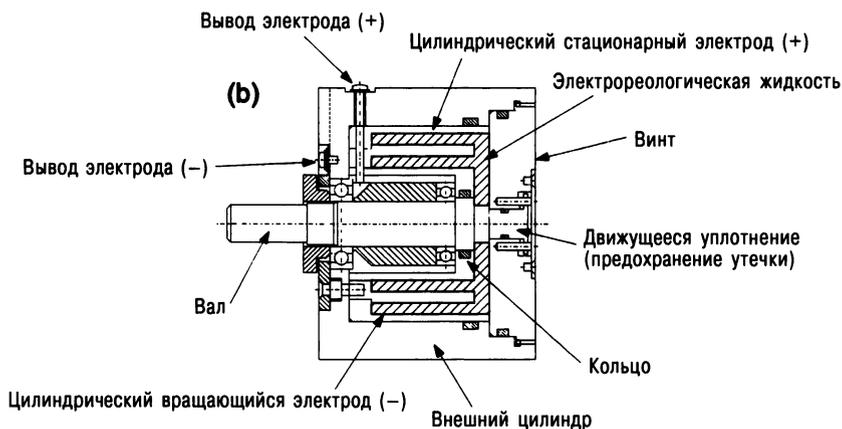
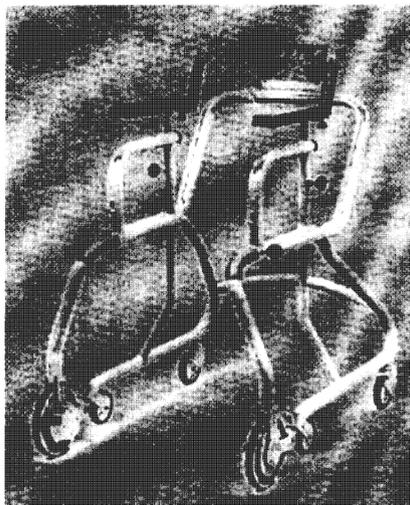


Рис. 8.2. (а) – Ходунки с интеллектуальным тормозом; (б) – электрореологический тормоз, состоящий из двойного цилиндра и электрода.

Тормоз размером 15×100 мм на дороге с наклоном 15° обеспечивает человеку весом 60 кг устойчивость, как на ровной поверхности. Он также заменяет жесткую опору при вставании с кровати. Несмотря на сравнительно невысокую скорость реакции смеси ЖК жидкости с полисилоксаном, в данном случае она оказывается вполне достаточной. И хотя увеличение температуры может сильно ослабить электрореологический эффект, выделяемое при торможении тепло успевает рассеяться, не влияя на рабочие характеристики тормоза [1].

Ходунки с автоматическим тормозом используют пациенты, страдающие болезнью Паркинсона. Возможно, в будущем такие тормоза будут использоваться в инвалидных креслах и устройствах, применяемых при восстановлении конечностей и помогающих подниматься по лестнице.

В продаже скоро появится интеллектуальный протез, объединяющий протез ноги компании Biedermann OT (Германия) с демпфером, разработанным корпорацией Lord (США) (рис. 8.4) [3]. Протез имеет несколько тензометров в области голени для определения осевых усилий и датчиков перемещения в коленном узле для измерения угла, направления и угловой скорости сустава. Основываясь на этих данных,

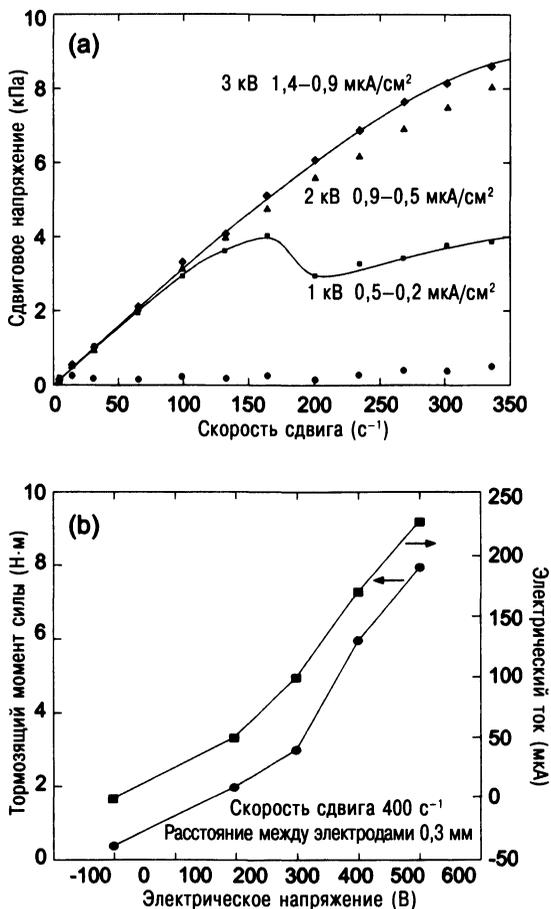


Рис. 8.3. (а) – Зависимость сдвигового напряжения от скорости сдвига для электрореологической жидкости при различных уровнях управляющего напряжения; (б) – характеристики тормоза фирмы Asahi.

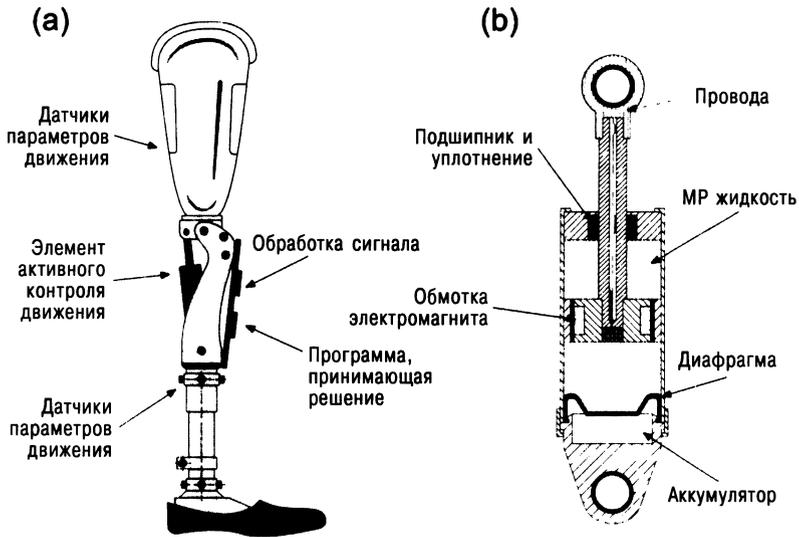


Рис. 8.4. (а) – Протез ноги с амортизатором на основе магнитореологической жидкости; (б) – схема амортизатора.

микропроцессор определяет состояние человека (скорость хода, наклон, положение и т.д.) и принимает решение о приведении в действие гидравлического амортизатора. Его вязкость жидкости в рабочем цилиндре зависит от величины магнитного поля (магнитореологическая жидкость), это позволяет оптимизировать движение человека. Время действия системы и управляющего компьютера равно примерно 40 мс и сопоставимо со скоростью реакции живого колена. Без дозарядки аккумулятор служит приблизительно два дня.

Приведенные примеры позволяют сформулировать основные требования, которым должна удовлетворять жидкость. Для легкого движения протеза необходимо, чтобы вязкость жидкости μ_0 была низкой в одном состоянии (рис. 8.5, а) и высокой в другом. В последнем случае механическое поведение жидкости напоминает поведение полимера. Она не течет, если механическое напряжение ниже некоторого критического значения, называемого пределом текучести, как показано на рис. 8.5, б. Величина предела текучести зависит от напряженности магнитного поля, определяющего степень поляризации частиц. Если механическое напряжение становится выше предела текучести, начинается течение. Такими свойствами в магнитном поле обладают растворы твердых дисперсных частиц размером >1 мкм в некоторой жидкости. Величина предела текучести зависит от концентрации частиц, которая на практике лежит в интервале 20–60 об. %.

Включение электрического или магнитного поля приводит к появлению линейных структур, состоящих из взаимодействующих поляризованных частиц, как показано на рис. 8.8. Скорость формирования этих структур возрастает при уменьшении размера частиц. Отметим, что электропроводность жидкости должна быть достаточно низкой. Образующиеся под действием поля кластеры весьма стабильны, и увеличение скорости сдвига $\dot{\gamma}$ приводит к возрастанию предела текучести смеси $\tau_c + \mu_p \dot{\gamma}$, как на рис. 8.5.

На основе электроструктурирующихся жидкостей можно создавать гидравлические устройства с линейным ходом силового штока. Это является их преимуществом по сравнению с аналогичными механическими и электромагнитными устройствами (соленоидами и т.д.). Размер регулятора определяется его механическими характеристиками [4], причем жидкость может смазывать цилиндр, а ее малая сжимаемость обеспечивает устойчивость движения поршня при изменении нагрузки. Внешняя нагрузка приводит к появлению в жидкости сдвиговых напряжений, равных напряжению текучести, зависящему от величины управляющего поля и скорости течения.

Тепло, выделяемое при течении жидкости, равно произведению $\rho c_v \Delta T$, где ρ – плотность, c_v – удельная теплоемкость и ΔT – возрастание температуры жидкости. Помимо быстродействия и возможности развить большую силу сопротивления, достоинством обсуждаемых жидкостей является высокое значение произведения плотности на удельную теплоемкость ρc_v , благодаря чему выделяемое тепло легко поглощается, а разогрев ΔT оказывается не слишком сильным. В этом отношении лучшими жидкостями являются вода, нефть, расплавы платины, золота и серебра. К счастью, две первые жидкости недороги и исключительно доступны. Поскольку в жидкости давление действу-

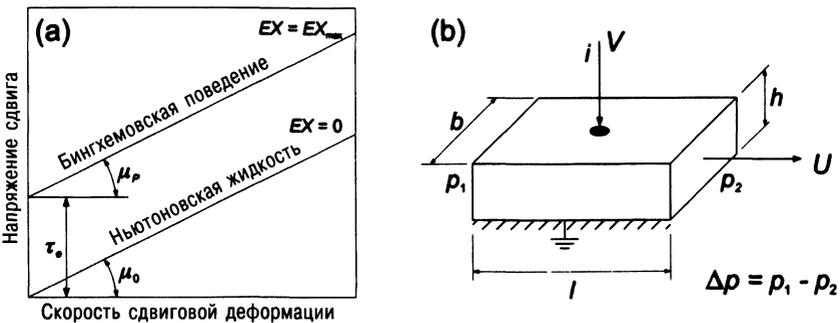


Рис. 8.5. (а) – Зависимость напряжения текучести идеальной магнетили электрореологической жидкости от скорости сдвига; (б) – плоский распределительный клапан на основе электрореологической жидкости.

ет во всех направлениях, для гидравлических систем не характерна значительная концентрация напряжения. Это является их достоинством по сравнению с механическими деталями вроде шестерен, рычагов и кулачков, в которых при регулярном переключении постепенно растут усталостные трещины.

Простейший анализ условий равновесия приводит к уравнению баланса сил, действующих на поршень регулятора (рис. 8.5, *b*):

$$\Delta p b h = 2\tau b l. \quad (8.1)$$

Хотя и относительно небольшое, но контролируемое изменение сдвигового напряжения τ приводит к модуляции силы, действующей на поршень:

$$F = \Delta p \frac{\pi d^2}{4}, \quad (8.2)$$

где d – диаметр поршня. Используя формулу (8.1), получаем:

$$F = 2\tau \frac{l}{h} \frac{\pi d^2}{4}. \quad (8.3)$$

При $h = 0,5$, $l = 100$, $d = 100$ мм и $\tau_e = 100$ кПа получаем оценку силы:

$$F \sim 4 \times 10^5 \text{ Н.}$$

При нестационарном течении ускорение жидкости в клапане и ее сжимаемость могут ухудшить его работу. Отметим, что сжимаемость гидравлического масла приблизительно в 150 раз выше, чем у стали.

Исходя из приведенных примеров, можно выдвинуть требования, которым должна удовлетворять интеллектуальная жидкость:

- 1) жидкость не должна течь при небольших механических напряжениях;
- 2) предел текучести должен зависеть от величины управляющего сигнала, которая должна определяться компьютерной программой.

Вполне вероятно, что экономно и логично выполнить эти требования при помощи только электрических или только механических устройств не удастся. В настоящее время исследуется возможность решения этой задачи, используя метод электрорегулирования.

8.3. Немного философии

В табл. 8.1 предпринята попытка классифицировать машины с гибким управлением, осуществляемым электрическим сигналом (рис. 8.1).

В истории технического прогресса часы всегда отражали уровень развития человечества [6]. В различные эпохи они отличались принципами работы, соответствующими машинам своего времени.

1. Эпоха механических и гидравлических машин. Все функциональные изменения в часовых механизмах осуществлялись за счет различий в конфигурации пружин и маятников.

2. Эпоха электромагнитных машин. Появилась возможность изменения скорости без изменения геометрии машины. Электрические часы приводятся в действие электродвигателем.

3. Эпоха информационных технологий. Функциональное изменение производится путем шелчка выключателя! Электронные часы.

Парадигма развития современной техники состоит в дополнении механизмов первого и второго поколений компьютерами, сенсорами и методами интеллектуальной техники. В технике третьего поколения (интеллектуальной) и, в частности, в силовых устройствах используются интеллектуальные жидкости. В твердотельных полупроводниковых устройствах серьезной проблемой является их охлаждение, так как выделяемая в них теплота пропорциональна кубу их характерного размера, а площадь поверхности пропорциональна его квадрату. Отметим, что электрореологическая жидкость является истинным жидким полупроводником. В частности, она реагирует на электрическое поле и имеет отрицательный температурный коэффициент сопротивления. Жидкость может быть выведена из зоны разогрева, охлаждена и опять введена в рабочую зону, что является важной особенностью конструкции жидкостных машин. При этом цифровое управление относительно недорого.

Таблица 8.1. Таблица, иллюстрирующая различные типы машин

Устройства	Статические	Кинематические	Динамические
Механические	Рычаг	Вращающиеся машины, переключающиеся скорости	Ткацкий станок и ковочная машина
Терможидкости	Горение и нагревание	Вода, теплота, пневматические трансмиссионные системы	Локомотив, сервоприводная гидравлика
Электромагнитные	Электромагнитный трансформатор, магнитостриктор	Телеграф, радар	Шаговый двигатель, соленоид и т.д.
Электронные	Пьезоэлектрики	Телевидение, компьютер	?

Анализируя возможности объединения гибких жидкостных устройств с полупроводниками и системой обратной связи, на основании теории размерностей управляющий элемент интеллектуального устройства в общем виде можно описать следующим уравнением:

$$\Delta p, \tau = f(\rho, \mu, U, d, D), \quad (8.4)$$

или:

$$\frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho U^2}, \frac{\tau}{\frac{1}{2}\rho U^2} = f\left(\frac{\rho U d}{\mu}, \frac{d}{D}\right). \quad (8.5)$$

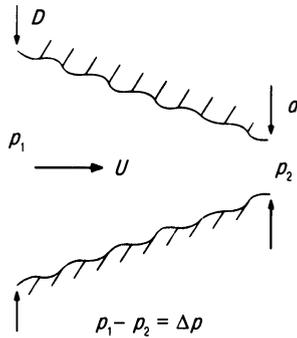


Рис. 8.6. Обобщенная модель жидкостного регулятора.

Все рабочие жидкости имеют примерно одинаковую плотность ρ . Давление и сдвиговое напряжение при средней скорости течения U можно модулировать изменением или геометрической формы, или коэффициента вязкости μ . И геометрическую форму, и коэффициент вязкости нужно изменять с помощью электроники. Геометрической формой управляют при помощи пропорционального сервомоторного клапана или соленоида.

Недостатком сервомоторного клапана является высокая цена из-за строгих требований к его размерам, а достоинством — возможность получения на выходе колебания частотой до 100 Гц. Соленоид работает методом включения-выключения, и ток рабочей катушки приводит к движению штока. Эти примеры демонстрируют общую проблему электрогидравлических устройств. Они являются или маленькими и маломощными, но быстрыми, или мощными, но инерционными. Потребность в быстрых гидравлических регуляторах очень велика, и сейчас используются как управляемые шаговым двигателем клапаны, так и соленоидные приводы.

8.4. Управляемый жидкостный клапан

Одна из возможностей состоит в управлении клапаном пьезоэлектрическим элементом, как показано на рис. 8.7 [7].

В настоящее время изменение размера пьезоматериала на 0,1% позволяет достигать открытия сечения рабочего канала лишь приблизительно до 25% от сечения входного отверстия. Однако улучшение характеристик пьезоматериалов (за счет уменьшения пористости, улучшения электроизоляционных свойств и увеличения рабочего напряжения) позволяет надеяться на возможность увеличения рабочего сечения до полного сечения входного отверстия при длине набора пьезоэлементов $10d$. Состав, характеристики и принципы работы пьезоэлектрических и магнитострикционных материалов описаны в гл. 6 и 7.

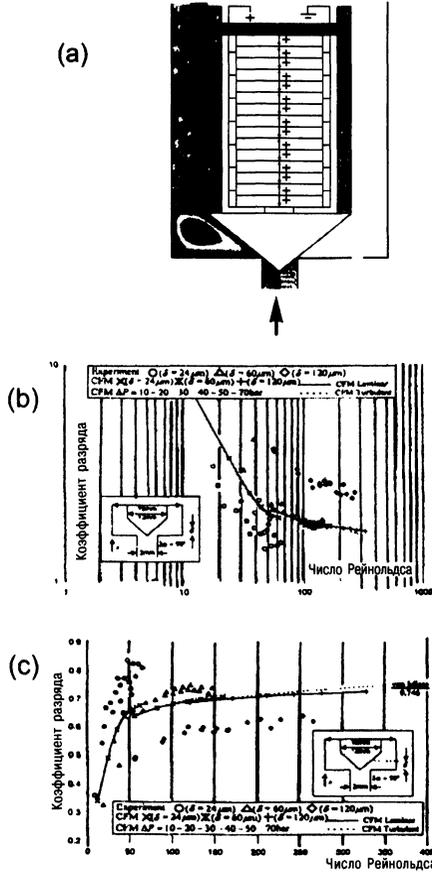


Рис. 8.7. (а) – Жидкостный пьезоклапан; (б) – скачок давления в зависимости от числа Рейнольдса для конуса с углом $2\alpha = 90^\circ$; (с) – коэффициент разряда в зависимости от числа Рейнольдса для $2\alpha = 90^\circ$.

8.5. Электроструктурируемые жидкости

Рассмотрим принципы модуляции вязкости рабочей жидкости, что иллюстрируется приведенной на рис. 8.6 моделью. Появление предела текучести жидкости обусловлено формированием жесткими частицами линейных структур (рис. 8.8) под действием поля, поляризующего частицы и вызывающего их дипольное взаимодействие. При достижении предела текучести, определяемого величиной поля, начинается течение жидкости. Если используют частицы железа, поляризацию производят магнитным полем. Если частицы являются полупроводящими полимерными, поляризацию осуществляют электрическим полем.

В электрореологической жидкости (ЭРЖ) поляризация может быть обусловлена переносом ионов или электронов в электрическом поле напряжением нескольких тысяч вольт на миллиметр, возникающим между плоскопараллельными электродами. Частицы могут быть полупроводящими или содержать в своих порах электропроводящую воду. Для появления силы важное значение имеет различие диэлектрических свойств частиц и жидкости, а также величина электрического тока. В магнитореологической суспензии (МРС) частицы карбонильного железа обычно имеют разброс по размерам. Химический состав жидкости не столь важен, как в случае ЭРЖ. Она может иметь вязкость в пределах от вязкости воды до меда в зависимости от того, важны ли испарение и скорость оседания частиц. Благодаря этому МРС можно использовать в значительно более широком диапазоне температур. Кроме того, МРС менее чувствительны к присутствию загрязнений, воды, воздуха и т.д. Это связано с тем, что в них напряженность управляющего магнитного поля не слишком высока, хотя для достижения $\hat{\tau}_e \sim 10$ кПа его величина должна быть ~ 1 Т при токе 250 кА/м [8].

Концентрация дисперсной фазы в ЭРЖ и МРС может варьироваться довольно значительно. Скорость структурирования в обеих средах высока, и характерное время равно ~ 1 мс, причем в ЭРЖ электрический ток сильно зависит от температуры (он удваивается на каждые 5°C от обычных 1 мА/см² при $\hat{\tau}_e \sim 3$ кПа). Часто приходится увеличивать величину поля, причем проблема влияния материала стенок и внешних условий на особенности течения полностью не решена.

Рисунок 8.9 демонстрирует работу зажимного устройства на основе ЭРЖ, специфической особенностью которой является наличие небольшой утечки тока. При включении поля это устройство работает аналогично предохранительному воздушному клапану, сбрасывающему воз-

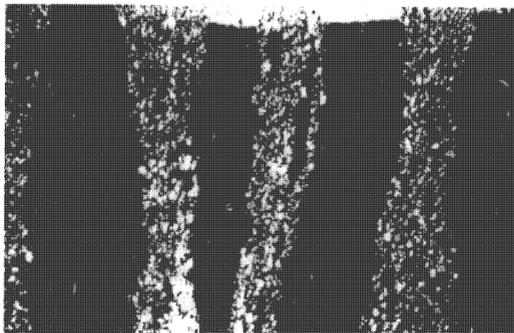


Рис. 8.8. Микроструктура частиц в ЭРЖ при отсутствии течения в поле напряжением 2,5 кВ/мм; моторное масло, отношение массы масла и частиц крахмала 20 : 1; увеличение 63х, поляризованный свет.

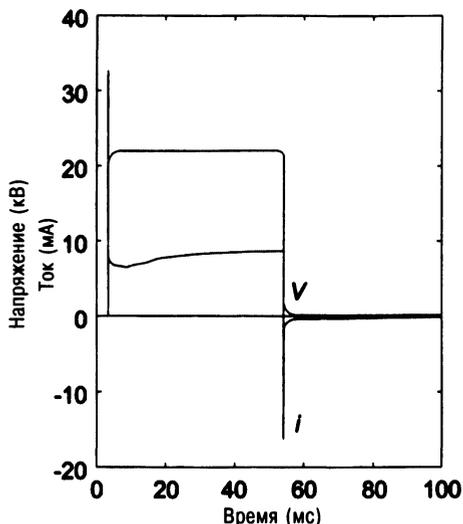


Рис. 8.9. Работа электрозахвата на основе ЭРЖ.

дух из шины автомобиля при достижении некоторого давления. Зажим работает путем попеременного перехода от фазы к нулевому контакту с помощью переключателя.

Эти системы, особенно МРС, не имеют гистерезиса в традиционном смысле, во всяком случае при малых скоростях течения, пока сохраняется ориентированная микроструктура частиц. Отметим, что частицы в процессе службы могут изменять свою форму и размер.

Распад микроструктуры, образовавшейся под действием внешнего поля, обычно происходит внезапно. В гистерезисной области влияние изменения внешнего поля является малым. Эта особенность течения жидкости усиливает роль цифрового управления. Например, при включении и выключении внешнего поля быстрое действие позволяет избежать нелинейности поведения, снизить роль тепловых эффектов и избежать необходимости стабилизации источника питания, а цикличность процесса позволяет улучшить рабочие характеристики устройства.

Выбор размера частиц, как правило, бывает не очень широк, поскольку он ограничен необходимостью предотвращения броуновского движения частиц, с одной стороны, и оседания и избежания закупорки потока — с другой. Расстояние между электродами из-за ограниченной величины управляющего напряжения обычно лежит в интервале 0,5–1,5 мм, что лимитирует размер частиц диапазоном от 1 до 10 мкм. Одновременное использование частиц различного размера позволяет снизить вязкость при отсутствии внешнего поля.

8.6. Прогноз эксплуатационных характеристик

Наука о поведении электроструктурируемых жидкостей является мультидисциплинарной. Их микроструктура оказывает сильное влияние на скорость потока жидкости и распределение электрического поля. Они ведут себя не как обычные непрерывные среды, а их макросвойства определяются микроструктурой.

Поскольку в малом объеме жидкости может быть совершена большая механическая работа, выделение тепла может привести к нежелательно сильному разогреву, который необходимо учитывать при проектировании регулятора. При оптимизации конструкции регулятора необходимо учитывать, что течение жидкости может быть двумерным и неадиабатическим, а скорость сдвиговой деформации в различных областях может изменяться от нуля до десятков тысяч в секунду. При разработке регулятора приходится учитывать специфику термической, электрической и динамической эксплуатации изделия, а также технологические особенности его изготовления. Удовлетворить всем этим требованиям, как правило, не удается, и поэтому характеристики регулятора далеки от оптимальных. Для оптимизации предпринимаются попытки разработки вычислительной программы, позволяющей рассчитать динамическое поведение ЭРЖ с учетом теплообмена и появления крутящих усилий. Однако эти работы находятся лишь на начальной стадии. Тем не менее уже первые результаты удивляют близким согласием результатов расчетов и эксперимента.

Выше обсуждалась стационарная задача. В интеллектуальных устройствах с компьютерным управлением изменяются силы и смещения. Для адекватного теоретического описания работы регулятора необходимо учитывать динамическое поведение жидкости в условиях изменяющегося сечения и скорости потока жидкости. В отличие от стационарного случая, в этом случае согласие результатов расчетов и эксперимента не очень хорошее. Это означает, что особенности динамического течения жидкости выяснены пока не до конца.

Некоторое время назад утверждалось, что из-за влияния геометрии клапана на микроструктуру частиц зависимость механического сдвигового напряжения от величины магнитного или электрического поля не является общей и определяется особенностями конструкции устройства. При этом при теоретических расчетах предполагалось, что жидкость является ньютоновской. Это предположение не выполняется, поскольку поведение жидкости гораздо лучше описывается моделью Бингхэма (рис. 8.5). По этой причине при определении $\dot{\gamma}$ и t_c предпринимались попытки описать ламинарное течение жидкости уравнением Бингхэма.

Высокоскоростные испытания, в которых измеряется величина крутящего момента в зависимости от времени, позволяют определить зависимость сдвигового напряжения от скорости течения $\tau_e(\dot{\gamma})$, если удастся учесть тепловые эффекты. Исходя из этих данных можно предсказать рабочие характеристики регулирующего клапана или гидродинамического подшипника.

Для магнитореологических суспензий экспериментальные зависимости t_e от $\dot{\gamma}$ выглядят похоже на рис. 8.5, а. Течение ньютоновской жидкости может быть описано, полагая, что предел текучести равен нулю:

$$T = 2\pi\rho^2 L \tau, \quad (8.6)$$

где $\tau = \tau_e + \tau_o$ и $\tau_o = \mu_o \dot{\gamma}$, или

$$\dot{q} = \frac{bh^3}{12\mu_o} \frac{\Delta p_o}{L} \quad (8.7)$$

и
$$\Delta p_e = 2\tau_e \frac{L}{h} \quad (8.8)$$

для регулирующей муфты и клапана соответственно.

При определении параметров этих уравнений нужна большая осторожность. Для неустановившегося потока эффекты сжимаемости могут наложиться на эффект перестройки структуры жидкости. Помимо изменения профиля скорости, может замедлиться скорость реакции микроструктуры на внешнее поле. В принципе управляющее поле должно изменяться примерно на порядок быстрее, чем время подъема сдвигового напряжения, а последнее – на порядок быстрее, чем движение жидкости.

Влияние размеров на поведение ЭРЖ

Предположим, что показанный на рис. 8.4 протез ноги сталкивается с телом, имеющим кинетическую энергию $E = 15\,000$ Дж, которую нужно поглотить при ходе протеза $d = 0,1$ м.

Усредним силу, действующую на поршень:

$$\frac{E}{\delta} = \frac{15\,000}{0,1} = 150\,000 \text{ Н.} \quad (8.9)$$

Перепад давления на клапане:

$$\Delta p = \frac{150\,000}{A}. \quad (8.10)$$

Считая, что активная площадь поршня $A = 0,01$ м²,

$$\Delta p = \frac{150\,000}{0,01}. \quad (8.11)$$

Из уравнения (8.8) при напряжении текучести $\tau_c = 100$ кПа, $L = 100$ мм и $h = 0,5$ мм получаем:

$$\Delta \bar{p}_c = 2\bar{\tau}_c \frac{L}{h} = 2 \times 100 \times 10^3 \times 200 = 400 \text{ атм.} \quad (8.12)$$

Для скорости поршня $U = 10$ м/с время соударения равно:

$$\Delta t = \frac{\delta}{U} = \frac{0,1}{10} = 10 \text{ мс.} \quad (8.13)$$

Скорость течения:

$$\dot{q} = UA = 10 \times 0,01 = 0,1 \text{ м}^3/\text{с.} \quad (8.14)$$

Для ламинарного потока неструктурированной жидкости имеем:

$$\dot{q} = \frac{bh^3}{12\mu} \frac{\Delta p_0}{L}. \quad (8.15)$$

Предполагая, что течение жидкости является ньютоновским, а вязкость равна ее исходному значению в отсутствие внешнего поля $\mu_0 = 0,1$ Па·с, при номинальной ширине вентиля $b = 1$ м получаем:

$$\Delta p_0 \sim 2\bar{\tau}_c \frac{0,1 \times 12 \times 0,1 \times 0,1}{1 \times (0,5 \times 10^{-3})^3} = 1000 \text{ атм.}$$

Это значение должно быть снижено, в результате чего увеличивается отношение амплитуд возбужденного/невозбужденного состояний. Этому требованию удовлетворяют только МРЖ. Такая жидкость имеет высокую вязкость ~ 300 мПа·с. Межэлектродное расстояние h может быть довольно большим и равным 1,5 мм. При таких параметрах течения получаем:

$$\Delta p_0 \sim 1000 \text{ атм} \times b \times \frac{3}{27} = 100 \text{ атм} \quad \text{и} \quad \Delta p_c \sim 125 \text{ атм.}$$

Если отношение $\Delta p_c/\Delta p_0$ близко к единице, такие условия легко выполнимы. В целях уменьшения размера поршня можно использовать более высокие давления, но при нестационарном течении жидкости эта возможность становится нереальной, поскольку модуль всестороннего сжатия магнитореологической жидкости равен:

$$\beta = \frac{V\Delta p}{\Delta V} \sim 2 \times 10^6 = 10^6 \text{ Н/м}^2, \quad (8.16)$$

где V – объем жидкости. Отсюда получаем оценку величины сжатия ΔV :

$$\Delta V = \frac{V\Delta p}{\beta} = UA \Delta p. \quad (8.17)$$

Считая $F = A \Delta p$ и $V = AL$, имеем:

$$\Delta t = \frac{FL}{A\beta U} \sim \frac{150\,000 \times 0,1}{0,01 \times 2 \times 10^9 \times 10}. \quad (8.18)$$

Для высокого быстродействия ход поршня должен быть небольшим, а его площадь значительной. При ходе поршня 1 м и площади 0,01 м² теоретическое значение постоянной времени равно 10 мс (время сжатия жидкости при неподвижном поршне).

Полное решение можно найти методом последовательных приближений исходя из начальной силы F и скорости клапана U . Предположив, что температура постоянна, тепловое равновесие изолированного цилиндра описывается формулой:

$$E = \mu c_v A \Delta T. \quad (8.19)$$

Считая c_v равной теплоемкости чистого масла, при ходе поршня 0,1 м получаем: $150\,000 \approx 0,75 \times 2 \times 10^3 \times 0,1 \times 0,01 \times 4\,000 \times \Delta T$.

Отсюда имеем оценку:

$$\Delta T \approx 25^\circ\text{C}.$$

Для машинного масла, содержащего 25% частиц, теплоемкость $c_v = 2$ кДж/(кг·°C), а средняя плотность равна примерно 2000 кг/м³. Расчет магнитной цепи требует учета величины поля. Мы этого делать не будем, и влиянием этого эффекта на величину разогрева ΔT пренебрежем.

Это не относится к цилиндрической муфте на основе ЭРЖ. В этом случае разогрев жидкости может быть весьма значительным, поскольку объем жидкости мал, а ее электропроводность резко возрастает с температурой. Теплота, выделяющаяся при течении электрического тока, может быть равна теплоте, выделяемой в результате работы сдвиговых сил. Вычисления теплопередачи являются проблемой, причем в этом случае необходимо учитывать скорость вращения внешнего управляющего диска.

Когда разность скоростей дисков муфты станет достаточно большой, запирающая структура частиц разрушится и $\dot{\gamma} \sim \omega R/h$. Вращающий момент T можно оценить по формуле:

$$T = AR(\tau_o + \tau_c) = 2\pi R^3 \frac{\mu\omega L}{h} + \tau_c 2\pi R^2 L. \quad (8.20)$$

где ω – частота вращения, R – средний радиус, A – площадь пластин и L – длина цилиндрической муфты. В стационарных условиях работы теплопередача по корпусу и валу должна балансировать величину $\omega(T_o + T_c)$. В принципе проводимость при постоянной температуре увеличивается со скоростью сдвига, а τ_c – снижается. В случае МРС этот вопрос может осложниться наличием катушек магнитной муфты.

Важное значение имеет отношение вращающего момента к моменту инерции (T/I). Если скорость движения изменяется очень часто, электрический ток может привести к сильному разогреву. Его величина определяется отношением T/I , лимитирующим ускорение и определяющим профиль смещений.

Из-за проблем с теплопроводностью выбор клапанов, действующих путем изменения радиуса и длины, очень ограничен. Отметим, что теплоотдача по несущему валу может составлять значительную долю общего теплоотвода.

Поведение жидкости можно моделировать линейным элементом, жесткость которого определяется модулем всестороннего сжатия G . При этом изменение объема жидкости мало по сравнению с деформацией корпуса, который обычно имеет гораздо большие габариты. С учетом изменения скорости время, необходимое для ускорения жидкости, равно примерно 1 мс.

Размеры пьезоклапанов

Для моделирования работы клапана в условиях нестационарного течения ЭРЖ разработали компьютерную программу. Результаты расчетов показали, что высокая стоимость системы электропитания при зарядке и разрядке ограничивает рабочую частоту клапана на основе пьезокерамики, а масса вала и объем катушек, создающих смещающее магнитное поле, лимитируют применение магнитоэлектрика. Повышение быстродействия является одной из основных целей развития этой техники. Судя по результатам экспериментов и компьютерных расчетов, прогресс в этом направлении весьма реален. Отметим, что в магнито- и электромагнитных устройствах разогрев жидкости можно измерить при помощи тензометров, приклеенных к несущему валу.

В стационарном режиме осевая сила на активные элементы равна произведению давления на их площадь, а скорость течения может быть определена исходя из данных рис. 8.7. Для более широкого диапазона раскрытий аналогичную оценку можно получить на основании результатов испытаний опытной установки.

8.7. Применение

Разработка новых интеллектуальных гидравлических устройств является одним из основных направлений развития современной техники. Помимо ходунков и протезов ног, имитирующих естественный ход человека, все шире используются динамические возможности таких устройств.

Примерно 5000 амортизаторов сидений корпорации Lord без серьезных поломок прошли миллионы километров на грузовиках, автобусах и сельскохозяйственных тракторах. Успешно прошел испытания гоночный автомобиль Каррера с системой подвески на основе МРЖ, а в 2002 году система подвески Магнарайд фирмы Delphi была установлен на автомобиль «Кадиллак Севилль». Эта система состоит из герметичной бесклапанной трубки, имеющей поршень и наполненной азотом и МРЖ.

Поршень при помощи вала связан с корпусом автомобиля. Амортизаторы, размещенные между корпусом и колесами, обеспечивают мягкий ход и хорошее управление автомобилем. Эта система действует втрое быстрее и меньше по размеру существующих активных амортизаторов. Быстрая реакция системы, управляемой встроенным компьютером, обеспечивает мягкое движение автомобиля (рис. 8.10). Разработка этой системы в перспективе ведет к появлению транспортных средств, которые с помощью датчиков и системы управления «чувствуют дорогу на ощупь».

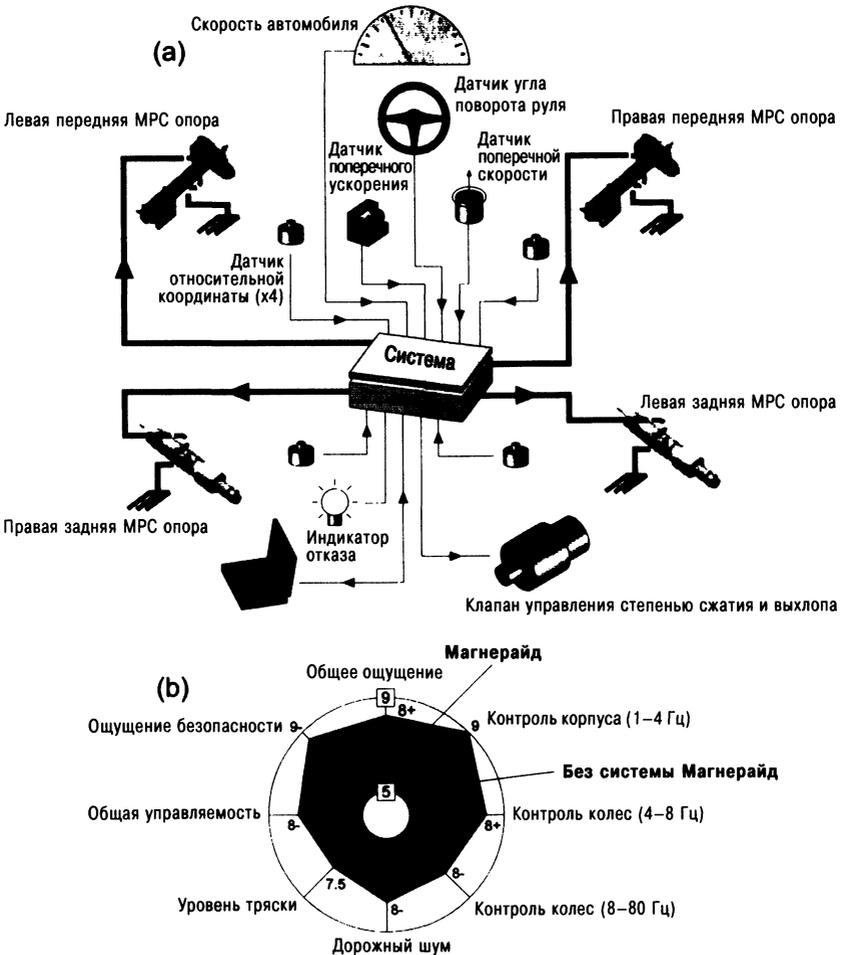


Рис. 8.10. Система контроля движения Магнерайд: (а) – конструкция системы; (б) – субъективная оценка автомобиля по десятибалльной шкале (удовлетворительная – 6, хорошая – 8, отличная – 10).

В гражданском строительстве в Японии в фундаментах отдельных зданий установлены 30-тонные сейсмические амортизаторы. Колебания подвесного моста на озере Донтинг в провинции Хунань, Китай, демпфируют с помощью магнитореологических амортизаторов, помещенных между тросами и корпусом моста (тросы имеют различную частоту собственных колебаний) (рис. 8.11).

В Советском Союзе производились громкоговорители, в которых для улучшения рабочих характеристик в области возбуждения использовалась пастообразная МРЖ (рис. 8.12) с очень высоким пределом текучести.

Фирма QED выпустила первый интеллектуальный станок, полирующий оптические линзы МРЖ, в которую добавили абразивный алмазный порошок. Изменение давления полирующей суспензии с помощью системы управления позволило выпускать линзы более высокого качества, чем при ручной полировке. Линза (рис. 8.13) вращается, пока «несущий вал» поставляет полирующую жидкость в зону контакта.

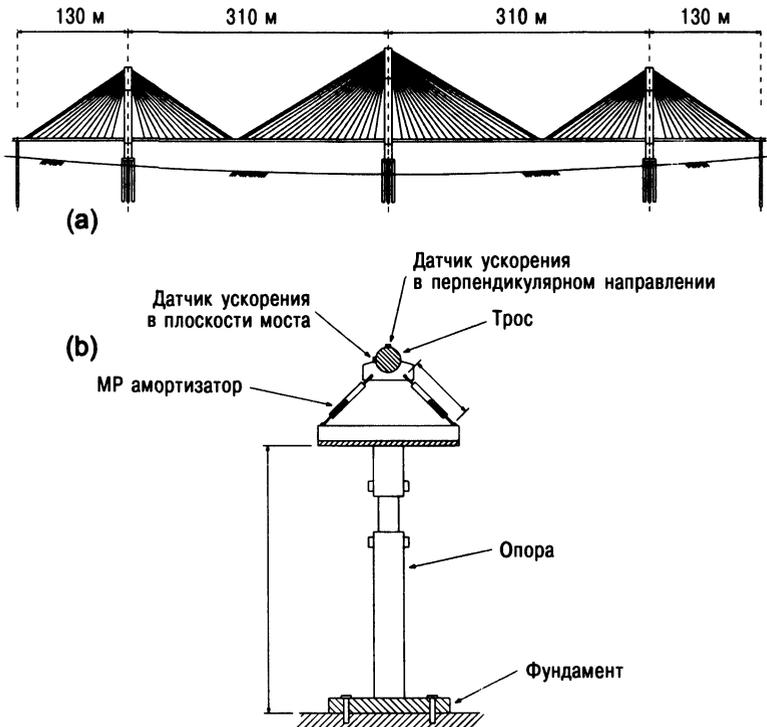


Рис. 8.11. Мост через озеро Донтинг: (а) — система подвесных тросов; (б) — соединение магнитореологического амортизатора с тросом и основанием моста при помощи опоры.

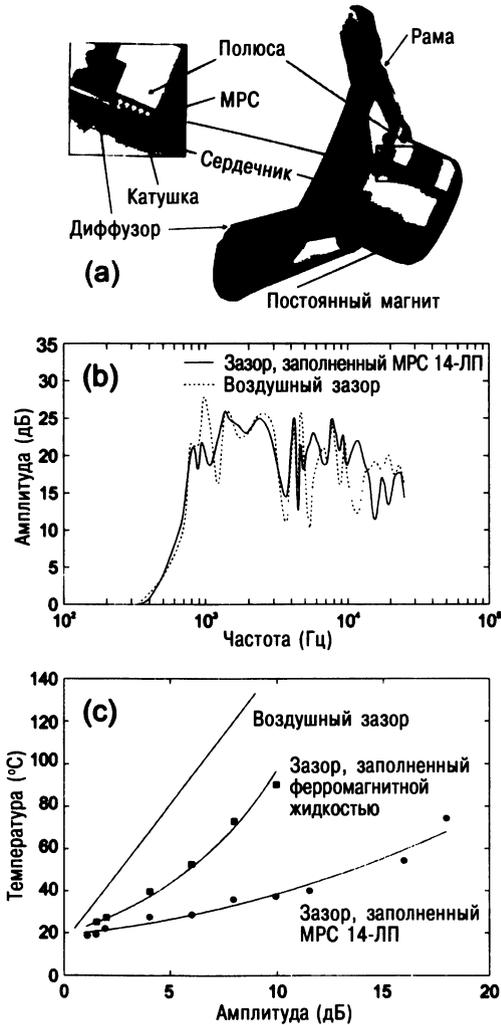


Рис. 8.12. (а) – Громкоговоритель, использующий магнитореологическую суспензию; (б) – частотная характеристика громкоговорителя; (с) – температура звуковой катушки.

Весьма перспективно использование таких жидкостей для демпфирования ударных воздействий в подвесках больших машин. В настоящее время интеллектуальные жидкости производят шесть компаний. МРЖ производят MR Lord, QED, Heat and Mass Transfer Institute, New Age Materials, а ЭРЖ – Fluidcon, Smart Technologies и Asahi.

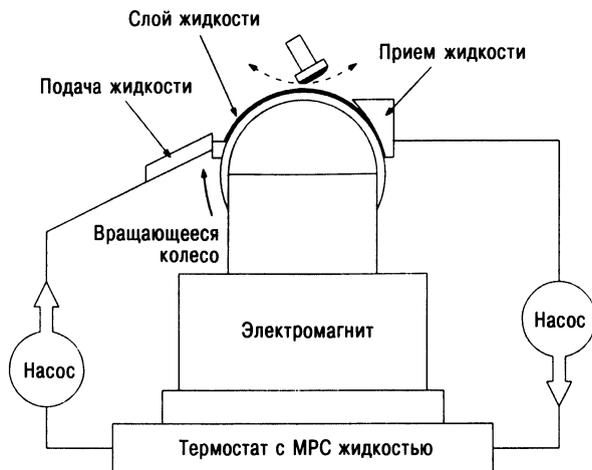


Рис. 8.13. Полировка линз магнито-реологической жидкостью (фирма QED).

Сейчас производят недорогие моечные машины с губками, смачиваемыми МРЖ, а также аналогичные машины, работающие на смеси магнито-реологической и электро-реологической жидкостей. В связи с такими задачами в последнее время интенсивно исследуются методы управления силой трения. Разрабатываются также струйные принтеры на основе ЭРЖ.

В будущем ожидается дальнейшее улучшение характеристик электроструктурируемых жидкостей в результате исследования механизмов самосборки частиц и их взаимодействия с твердой поверхностью. Имеются сообщения о планах разработки электро-реологических и магнито-реологических жидкостей с пределом текучести порядка нескольких десятков килопаскалей. Сейчас также разрабатываются компьютерные программы, которые учитывают влияние микроструктуры частиц на рассеивание тепла и т.д.

До недавнего времени пьезоклапаны находились на стадии разработки модельных образцов. Они имеют ту же область применения и примерно такую же скорость действия, что и клапаны, управляемые сервомоторами. В 2001 году было выпущено 2 млн автомобилей «Пежо 307» с устройством контроля впрыска топлива, изображенным на рис. 8.14.

Если в промышленных объемах удастся наладить технологию производства пьезокерамики, удлиняющейся под действием электрического поля на 1%, клапаны на ее основе произведут настоящую революцию в гидравлической технике. Отметим, что сейчас такие характеристики имеют лишь отдельные пьезокристаллы. Типичным примером современных тенденций развития интеллектуальных уст-

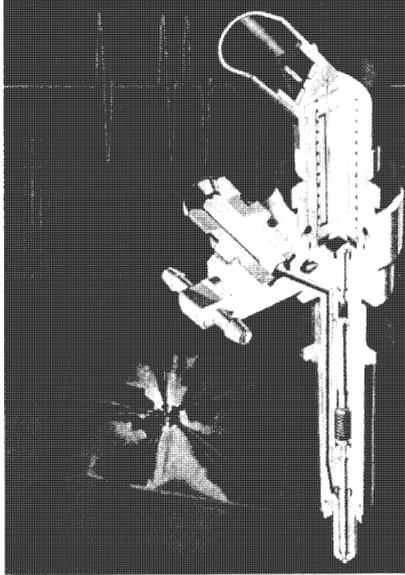


Рис. 8.14. Карбюратор компании Siemens с интеллектуальным пьезоклапаном впрыска дизельного топлива. С помощью электронной системы управления он за один рабочий цикл двигателя позволяет произвести несколько впрысков топлива требуемой продолжительности. Топливо вводится в клапан под высоким давлением.

ройств является разработка карбюраторов с контролируемым впрыском топлива. Благодаря своему быстрдействию, интеллектуальный инжектор улучшил рабочие характеристики двигателя, значительно снизив расход топлива [7].

Рекомендуемая литература

- (i) Millar Henrie, A. J. (2002) «Magnetorheological Fluids», *Encyclopaedia of Smart Materials*, Wiley.
- (ii) Filisko, F. E. (2002) «Electrorheological Fluids», *Encyclopaedia of Smart Materials*, Wiley.
- (iii) Tao, R. (ed.) (1999) *Proc. 7th Int. Conf. on Electrorheological Fluids, Magnetorheological Suspensions and their Applications, Honolulu, Hawaii*.
- (iv) Nakamo, M. and Koyama, K. (ed.) (1997) *Proc. 6th Int. Conf. on Electrorheological Fluids, Magnetorheological Suspensions and their Applications, Yonezawa, Japan*.
- (v) Bossis, G. (ed.) (2001) *Proc. 8th Int. Conf. on Electrorheological Fluids, Magnetorheological Suspensions and their Applications, Nice*.
- (vi) Bullough, W. A. (1988) «Integrated Electron Hydraulics», *Proc. Australian Bicentennial Int. Congress in Mechanical Engineering, Brisbane*, pp. 18–23.

Литература

1. Akio Inoue, Ushio Rhu and Syoji Nishimoro (2001) «Walker with Intelligent Brakes Employing ER Fluid of Liquid Crystalline Polysiloxane», *Proc. 8th Int. Conf. on Electrorheological Fluids, Magnetorheological Suspensions and their Applications*, Nice, pp. 520–525.
2. Akio Inoue, Yochroh Ide, Shinyungi Maniwa, Hiroyuki Yamada and Hiruyi Uda (1997) «Properties of ER Fluids Comprised of Liquid Crystalline Polymers», *Proc. 7th Int. Conf. on Electrorheological Fluids, Magnetorheological Suspensions and their Applications*, Yonezawa, Japan, pp. 520–525.
3. Anon. (2000) «Indecisive Material Makes a Big Step Forward», *Design Eng.*, 34–35.
4. Bullough, W. A. and Peel, D. J. (1986) «Electro-Rheological Oil Hydraulics», *Proc. Japan. Soc. Hydraulics and Pneumatics*, 17, 520–525.
5. Stringer, J. D. (1976) *Hydraulic Systems Analysis*, MacMillen.
6. Strandh, S. (1979) *The History of the Machine*, Bracken Books.
7. Anon. (2002) «Ceramic Muscle», *Automotive Eng.*, pp. 52–54.
8. Jolly, M. R., Bender, J. W. and Carlson, J. D. (1998) «Properties of Commercial Magnetorheological Fluids», *Proc. SPIE Int. Symp. on Smart Structures and Materials*, San Diego, California, pp. 1–15.
9. Alexandrisis, A. (2000) «Magnetorheological Fluid Based Semi-Active Suspension System», *Proc. Euro. Conf. on Vehicle Electronic Systems*, pp. 1–12.
10. Ko, J. M., Zheng, G., Chen, Z. Q. and Ni, Y. Q. (2002) «Field Vibration Tests of Bridge Stay Cables with Magnetorheological (MR) Dampers», *Proc. SPIE*, 4969, 1–12.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ МЕДИЦИНСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

*Р. ван Ноорт
П. В. Хаттон
Д. Б. Хаддоу*

9.1. Введение

За последние 150 лет средняя продолжительность жизни человека увеличилась вдвое. Практически удвоилась и доля людей с ограниченными физическими возможностями (рис. 9.1). В настоящее время одним из наиболее эффективных способов лечения тяжелых заболеваний считается пересадка органов. У этого метода, однако, есть серьезная проблема — нехватка трансплантируемых тканей и органов. Поэтому в последнее время активно разрабатываются искусственные медицинские устройства, которые могли бы заменить естественные трансплантаты.

Биоматериалом мы будем называть любой материал, который используется для замены органа человека или работает в непосредственном контакте с ним. По более детальному определению, данному в 1992 году, «биоматериалом является любое вещество, отличное от лекарств, или комбинация веществ, синтетических или естественных по происхождению, которые могут использоваться в течение некоторого периода времени как целый орган или его часть для улучшения функционирования или замены какой-либо ткани, органа или жизненной функции тела» [1]. То есть *биоматериалами* являются протезы головки бедра и коленного сустава, искусственные клапаны сердца, вставные грудные пластины и зубные пломбы (табл. 9.1). В отличие от биоматериалов, *биологические материалы* имеют естественное происхождение, например коллаген, целлюлоза или кератин.

Согласно экспертным оценкам, стоимость имплантируемых изделий сейчас составляет примерно 10 млрд фунтов стерлингов в год. В больницах национальной службы здравоохранения Великобритании доля операций по замене сердечного клапана составляет приблизительно 20% от общего количества операций. За год имплантируется

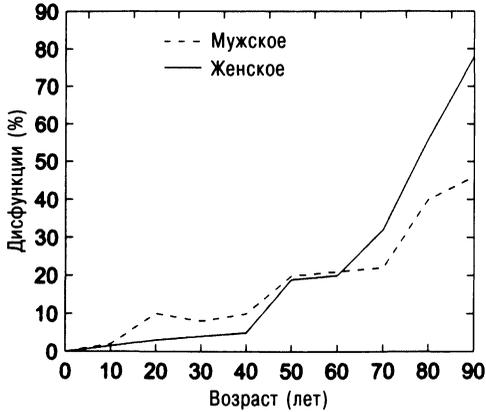


Рис. 9.1. Доля мужского и женского населения с дисфункциями в зависимости от возраста.

приблизительно 7000 искусственных клапанов сердца общей стоимостью 12–15 млн фунтов. А стоимость материала имплантируемых только в Великобритании пломб и зубных протезов оценивается в 50 млн фунтов.

До некоторой степени все существующие биоматериалы могут считаться «интеллектуальными», поскольку они учитывают индивидуальные особенности пациента. Однако действительно интеллектуальные биоматериалы, которые реагируют на поведение организма, появились лишь в последнее время.

Свойства интеллектуальных устройств учитывают особенности конкретного человека. Для лечения зубов с 1968 года используют цветной цемент, называемый стеклоиономерным. Этот материал можно считать интеллектуальным, поскольку по цвету он не отличается от соседних натуральных зубов. Что не менее важно, он является источником фтора, который предупреждает дальнейшее развитие кариеса. Однако он все же менее «интеллектуален», чем естественная эмаль зубов, которая анизотропна по механическим свойствам (это снижает вероятность ее разрушения) и способна самовосстанавливаться. Другой пример интеллектуального биоматериала — растворимые хирургические нити из полилактидной кислоты. Что может быть более интеллектуальным, чем нить, выполнившая свою работу и исчезнувшая, когда потребность в ней отпала!

Важно, чтобы биоматериал был биосовместимым и не вызывал воспаления или отторжения организмом. Биосовместимость можно определить как способность сосуществовать с живым организмом для исполнения определенной функции [2]. Реакция организма не должна противоречить безопасной и эффективной работе биоматериала. Кроме



Таблица 9.1. Примеры биоматериалов и медицинских устройств

Орган или ткань	Примеры
Сердце	Устройство, задающее ритм сердца, искусственный клапан, искусственное сердце
Кожа	Растворимые хирургические нити, «пластыри» тканей
Глаза	Контактные линзы, искусственные хрусталики и линзы
Уши	Искусственные слуховые косточки среднего уха, искусственная ушная улитка
Кости/суставы	Искусственные суставы, костные пластины, внутрикостные стержни, костный цемент
Почки, мочевыводящие пути	Механизм диализа почки, катетеры,
Череп/мозг	Вставные черепные пластины, шунты внутричерепной жидкости
Зубы	Зубные пломбы и протезы

того, биоматериал должен быть неядовитым и не вызывать нежелательной реакции на продукты частичного износа вследствие трения. Большое значение имеют также механические, физические и химические свойства материала.

Серьезнейшей проблемой медицинских устройств является их безопасность. Введение биоматериала в организм иногда приводит к большим проблемам. Часто это обусловлено неправильным выбором материала. Например, протез челюсти фирмы Витэк (США) часто разрушался, а образовавшиеся осколки вызывали хроническое воспаление и боль. Это привело к множеству судебных исков к фирме-изготовителю. Не меньше проблем в свое время вызвали силиконовые имплантаты груди. Тысячи женщин утверждали, что вставленные в 1980–1990-х годах имплантаты стали причиной разнообразных болезней, включая увеличение жесткости груди, потерю ее формы, хронические боли в мышцах и суставах, ослабление иммунной системы. Хотя сейчас и признано, что имплантаты действительно могут приводить к некоторым нежелательным последствиям, например увеличению жесткости груди, причины многих проблем не установлены. Хирурги подозревают, что некоторые пациентки имели психологические проблемы, не связанные с использованием силикона. Как бы то ни было, несмотря на недостаток доказательств, компания Dow Corning вынуждена была удовлетворить многие иски о компенсации. Стоимость судебных тяжб и возмещения ущерба достигла миллиардов долларов, и Dow Corning вынуждена была запросить помощь для защиты от банкротства. Этот случай вызвал большую озабоченность производителей медицинского оборудования. В один момент вся индустрия производства медицинского силиконового каучука была парализована этой тяжбой и почти коллапсировала. Но медицинский каучук используется также и во множестве других изделий (от катетеров до внутричерепных шунтов), и его потеря имела бы крайне нежелательные последствия. К счастью, этого кошмарного сценария

удалось избежать. Положительным результатом этой тяжбы стала разработка правил и требований к медицинскому оборудованию. Теперь все медицинские устройства должны проходить строгую проверку на безопасность, и только после этого их можно использовать. В ЕЭС в течение 90-х годов все медицинские устройства должны были пройти процесс лицензирования. Лицензия гарантирует, что устройство безопасно и пригодно для достижения декларируемой цели. Аналогичный закон существует и в США. Тем не менее, несмотря на множество испытаний, никогда нельзя быть уверенным, что биоматериал абсолютно безопасен, и поэтому большое значение имеет послепродажное наблюдение за его поведением. В Великобритании вся информация о возникающих проблемах с биоматериалами сообщается в Агентство медицинского оборудования, которое принимает решение о дополнительной проверке безопасности материала. Информацию о поведении и степени безопасности биоматериалов, например материалов зубных имплантатов, можно сообщить на сайт www.shef.ac.uk/uni/project/arrp. Эта система регулирования имеет как недостатки, так и достоинства. Конечно, хорошо, что производители оборудования и клиники имеют ясные указания о методах правильного проектирования, производства и использования материала или устройства. Недостаток такой системы состоит в увеличении времени изучения до начала клинического использования. Однако это — та не слишком высокая цена, которую приходится платить за возросшее доверие к медицинским устройствам и биоматериалам.

Успешное применение нового устройства зависит от его конструкции, свойств и степени биосовместимости. Поэтому разработка новых материалов должна быть основана на междисциплинарном взаимодействии материаловедов, инженеров, биологов и медиков. Общая нить, связывающая этих людей, — желание улучшить медицинские устройства. Такое сотрудничество различных специалистов началось только в середине XX века.

9.2. Первое поколение биоматериалов. «Глухие» биоматериалы

Идея использования естественных или искусственных материалов для замены части человеческого тела «витала в воздухе» в течение многих столетий. Однако реальное развитие биоматериалов стало возможным лишь в конце XIX столетия после появления анестезии, стерильной хирургии и открытия рентгена. До тех пор попытки использовать биоматериалы не были успешными из-за инфекций и постоянного гноения тканей. Серьезными проблемами было также растворение инородной костной ткани и отторжение имплантатов [2]. Инфицирование, впрочем, остается проблемой и в наше время, поскольку переносимые

кровью бактерии могут внедриться в имплантат и сформировать биологическую пленку, защищающую их от системы естественной защиты организма или антибиотиков. Этот механизм аналогичен формированию на зубах налета, мешающего нейтрализации производимой бактериями кислоты, в результате чего разрушается зубная эмаль.

Костные пластины для фиксации переломов конечностей используют с начала 1900-х годов. Поскольку было известно, что инородные тела типа пули или шrapнели могут существовать в теле многие годы, постепенно появилось осознание того, что можно использовать и внутренние протезы [2]. К сожалению, первые опыты были не слишком успешными из-за плохой механической конструкции или неправильного выбора материала имплантатов. В организме человека материалы вроде ванадиевой стали корродируют, а продукты коррозии неблагоприятно воздействуют на организм. Ситуация изменилась после появления нержавеющей стали и хромокобальтовых сплавов, что позволило добиться хороших результатов при фиксации переломов.

Хотя первая попытка замены головки бедра была предпринята еще в 1938 году, положительных результатов удалось достичь только после 1958 года, когда Чарнли разработал клеящий материал для фиксации протеза (рис. 9.2). Этим материалом был синтетический полиметилметакрилат (ПММА), называемый также оргстеклом. Ранее ПММА применяли в зубных протезах, а использовать его для фиксации протеза



Рис. 9.2. Протез головки бедра из нержавеющей стали и соответствующая ему чашечка из полиэтилена высокой плотности.

головки бедра предложил Д. Смит, дантист из Манчестерского университета. Со времен Второй мировой войны было известно, что летчики, получившие проникающие ранения осколками стекол из ПММА, после заживления ран не страдали от отравления этим материалом. На основе этого наблюдения в 1940-х годах ПММА начали применять для замены роговицы глаза. ПММА оказался очень эффективным материалом для фиксации имплантатов из нержавеющей стали, и с этой целью его используют до сих пор.

Несколькими годами позже хирург-ортопед Брэйнемарк случайно открыл очень интересную реакцию организма на титан [3]. Он изучал на кролике течение крови через периферийные кровеносные сосуды при помощи стеклянного окошка, помещенного в титановое кольцо. Когда исследователь попытался удалить это окошко, то оказалось, что сплав прирос к хрящу. Дальнейшие эксперименты показали, что реакция организма на титан отличается от реакции на нержавеющую сталь или хром-кобальтовые сплавы. В случае нержавеющей стали вокруг имплантата образуется герметизирующий волокнистый материал. Такая защитная реакция организма на внедрение инородного тела характерна и для многих синтетических полимерных материалов, в том числе и ПММА. Вокруг титана волокнистая ткань не образуется, и металл контактирует непосредственно с костью, в результате роста которой он оказывается как бы вросшим в нее. Брэйнемарк назвал такую реакцию организма *оссеинтеграцией*, характеризуемой связью кости непосредственно с имплантатом, без образования защитной волокнистой капсулы. Это открытие привело к созданию бесклеевой фиксации искусственных суставов из сплава Ti_6Al_4V и зубных протезов из чистого титана (часто называемых зубными винтами или штифтами) (рис. 9.3).

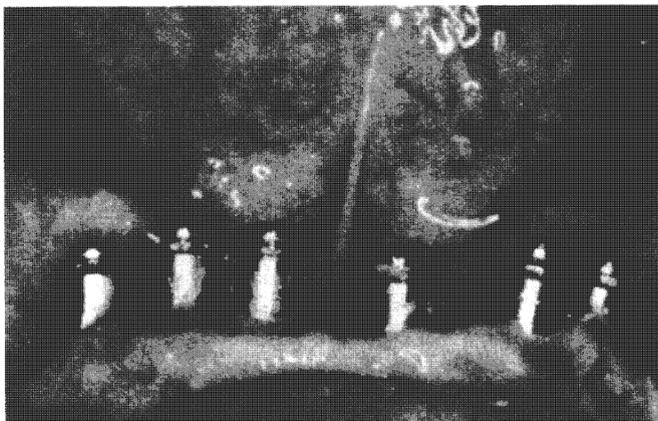


Рис. 9.3. Титановые протезы зубов, выступающие из мягкой ткани.

В сердечно-сосудистой хирургии было замечено, что некоторые материалы работают в контакте с кровью лучше, чем другие. При порезе защитное поведение организма состоит в местном сворачивании крови и формировании уплотнения, останавливающего кровотечение. Так как вставка имплантата без местного повреждения ткани пока невозможна, то, когда кровь входит в контакт с инородным телом, происходит ее частичное сворачивание. Это осложняет разработку устройств, непосредственно контактирующих с кровью, например искусственных кровеносных сосудов, искусственного сердца, оксигенаторов и аппаратов диализа почки.

Постепенно стало понятно, что разные материалы вызывают принципиально различную реакцию живого организма. Для преодоления проблем, связанных с использованием синтетических материалов, необходимо было разработать *интеллектуальные биоматериалы* – «материалы, активно взаимодействующие с биологическим окружением для достижения желаемого результата».

9.3. Второе поколение биоматериалов. Улучшенные биоматериалы

В процессе разработки биоматериалов первого поколения стало очевидно, что они имеют множество недостатков, особенно при длительных сроках использования. Если имплантат несет значительную механическую нагрузку, важно, чтобы механические напряжения передавались от него к кости. Кость является исключительно интеллектуальным материалом. Если она не испытывает нагрузки, то уменьшает свою прочность. От этой проблемы страдают космонавты, проводящие долгое время в невесомости. Напротив, в местах, где кость испытывает высокие нагрузки, она пытается их компенсировать, образуя дополнительные костные слои. Примером является костная мозоль, появляющаяся при заживлении перелома. Если нагрузка слишком высока, кость нарастает, чтобы снизить уровень напряжения и избежать разрушения. При лечении зубов интеллектуальное поведение кости используют, чтобы сдвинуть их положение по эстетическим или функциональным причинам. Такое поведение зубной ткани является основанием *ортодонтии*.

Форма и жесткость протеза тазобедренного сустава сильно отличаются от характеристик натуральной кости (табл. 9.2). Успех использования первых протезов был частично обусловлен возрастом пациентов, которые в большинстве своем были старше 65 лет. Такие люди не слишком активны, и напряжения, которые испытывают имплантат и окружающая кость, не так высоки, как у молодых и активных пациентов. Однако существует спрос и на замену сустава физически активным людям. Это накладывает серьезные требования к имплантату. Боль-

Таблица 9.2. Сравнение механических свойств кортикальной кости и некоторых имплантируемых материалов

Материал	Прочность при растяжении (МПа)	Модуль упругости (ГПа)	Удлинение (%)
Кортикальная кость	136	18	1
Ti ₆ Al ₄ V	860	110	12
Нержавеющая сталь	550	200	50
Отливки из сплава Cr-Co	650	240	10

шая нагрузка может привести к разрушению имплантата или окружающего его волокнистого материала. Кроме того, микросдвиги в области контакта кости с ПММА-цементом могут привести к разрушению соединения или потере герметичности волокнистого материала вокруг имплантата.

Работа с титаном показала, что некоторые материалы могут стимулировать чрезвычайно интересную реакцию кости. Возможность бесклеевой фиксации сплавов титана инициировала разработки имплантатов, испытывающих в процессе эксплуатации более низкие нагрузки, что увеличивает их долговечность. Титан и его сплавы являются оссеинтегрируемыми, и после заживления возможен их прямой контакт с костью без образования мягкой волокнистой оболочки. Рисунок 9.4 демонстрирует герметизацию двуокиси циркония волокнистой тканью, а рисунок 9.5 – непосредственный контакт кости и керамики, состоящей из гидроксиапатита и двуокиси циркония.

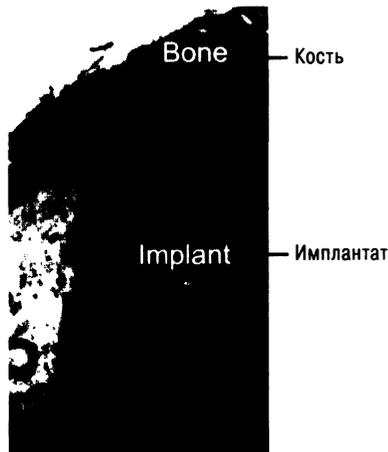


Рис. 9.4. Волокнистая ткань вокруг имплантата из двуокиси циркония, имеющая вид темной полосы.

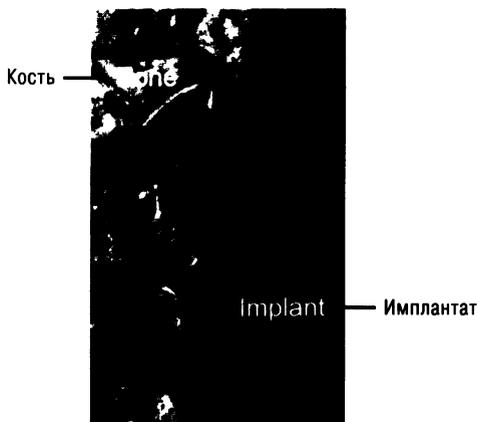


Рис. 9.5. Оссеинтегрированный имплантат из композиционного материала, состоящего из 50% гидроксиапатита и 50% двуокиси циркония.

Некоторые исследователи объясняли оссеинтеграцию титана появлением поверхностной окисной пленки TiO_2 , однако это, видимо, только одна из причин наблюдаемого явления. Сейчас признано, что второй причиной является осторожное хирургическое вмешательство, позволяющее избежать омертвления костной ткани.

Внедрение некоторых биоматериалов в костную ткань стимулирует появление на их поверхности новой кости и заживление области хирургического вмешательства. Примером таких материалов являются синтетический гидроксиапатит, *биоактивные стекла* (например, так называемое *биостекло*) и некоторые стеклокерамики. Хотя механизм их действия достоверно не известен, существуют две теории, подтверждаемые экспериментальными данными. Согласно первой, на поверхность такого материала из биологического окружения адсорбируются определенные белки, которые стимулируют рост костных клеток и процесс заживления. В некоторых биоматериалах типа биостекла этому предшествуют ионообменные реакции на поверхности внедрения и появление слоя фосфата кальция. Считается, что эта реакция способствует формированию прямых химических связей между биостеклом и минеральной фазой новообразованной костной ткани.

9.3.1. Фосфаткальцевая керамика

Поскольку минеральная микрофаза кости и ткани зубов состоит из солей фосфата кальция, исследователи начали изучать возможность использования этого материала в качестве потенциального заменителя кости. Минеральная фаза кости подобна гидроксиапатиту $[Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2]$, но имеет меньшую степень кристалличности и содержит целый набор фосфатных микровключений, в том числе трикальцийфосфат, углеродапатит и раз-

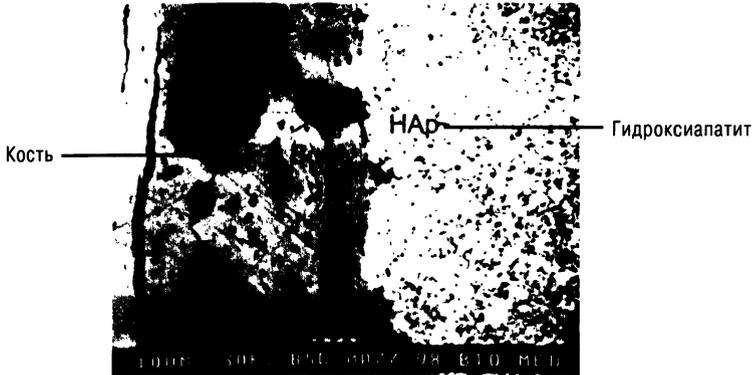


Рис. 9.6. Растровое электронное изображение, демонстрирующее непосредственный контакт гидроксиапатита с костью.

личные ионные примеси типа фтора, магния и натрия [4]. Фторапатит $[\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{F})_2]$ имеет химическую структуру, похожую на гидроксиапатит. Единственное отличие состоит в замене гидроксильных групп ионами фтора. Фторапатит устойчивее гидроксиапатита при повышенных температурах и более стоек к действию кислот. Трикальцийфосфат $[\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2]$ существует в двух формах, называемых α - и β -трикальцийфосфатами. Обе формы имеют высокую стойкость к растворению [5]. Эти материалы могут образовывать непосредственную связь с живой костью без формирования защитной волокнистой ткани. Образование химической связи фосфаткальциевой керамики с костью состоит в частичном растворении приповерхностного слоя керамики и формировании кристаллов CO_3 -апатита с включенными биомолекулами окружающей жидкости (рис. 9.6) [6].



Рис. 9.7. Нарращивание зубных лунок при помощи гидроксиапатитных гранул.

Разработка синтетических фосфатов кальция привела к появлению целого набора материалов, которые должны исследоваться на предмет использования в качестве искусственной кости. Недостатком этих материалов является невысокая прочность. Поэтому гидроксипатит может применяться лишь в имплантатах, не несущих значительной механической нагрузки, например при лечении зубных лунок (рис. 9.7) [7, 8].

Один из способов преодоления этого недостатка состоит в нанесении на металлическую подложку слоя покрытия из керамического фосфата кальция. Одним из методов ее исполнения является плазменное напыление [9]. В этом случае биологическая реакция определяется главным образом поверхностным покрытием, а не подложкой. Подложка обеспечивает прочность, а покрытие – биологическую реакцию организма на имплантат (рис. 9.8).

Этот подход к разработке интеллектуальных биоматериалов основан на эмпирических наблюдениях. Чтобы прогнозировать реакцию организма на биоматериал, необходимо понимать механизм его взаимодействия с живой тканью. К счастью, одновременно с разработкой новых материалов быстро развивалась и биологическая наука.

9.3.2. Биоактивные стекла

Состав биоактивных стекол разработан так, чтобы их поверхность вступила в химическую реакцию с определенными компонентами окружающей физиологической среды и образовалась химическая связь ткани с внедрением [10].

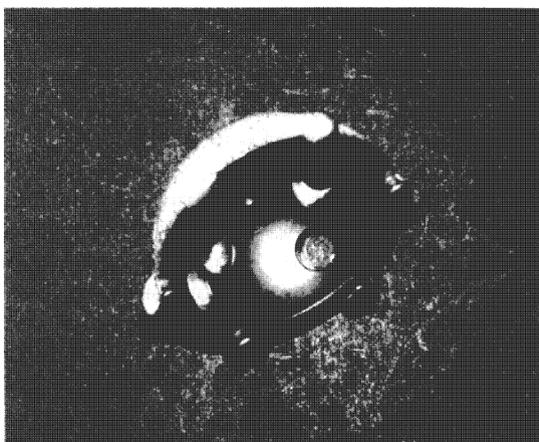


Рис. 9.8. Металлическая суставная чашка с плазменно-напыленным гидроксипатитным покрытием.

Покрытие защищает внедрение от постепенной коррозии. Первыми искусственными материалами, которые срастались с живой костью, были стекла с составом $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{P}_2\text{O}_5$. Их открыли в начале 1970-х годов и назвали биостеклами [11]. Биостекло ускоряет сращивание внедрения и кости. Когда биостекло находится в водной среде, ионы кальция и фосфатов выщелачиваются из внедрения и формируют обогащенный фосфатом кальция поверхностный слой, который обеспечивает срастание биостекла с костью. Взаимное срастание путем образования коллагеновых пальцеобразных выростов было описано Хенчем с соавторами [12]. Сейчас известно, что с живой костью срастаются различные виды стекол и стеклокерамик. Некоторые из них используются в хирургии, например, для создания искусственных косточек среднего уха [11] и зубных лунок (челюстных альвеол) [13, 14]. Биоактивные стекла используют также для создания искусственных позвонков, подвздошных костей и гранул для заполнения дефектов костей [11 – 13]. Отметим, что применение фосфаткальциевой керамики ограничено ее низкой прочностью.

9.4. Биоматериалы третьего поколения. Интеллектуальные покрытия

9.4.1. Поверхность раздела материала и живой ткани

После внедрения биоматериала в тело вокруг него собираются *макрофаги*. Если внедрение мелкое и фаги способны его охватить, они пытаются разрушить внедрение. Это явление было названо фагоцитозом. Если же инородный объект слишком велик, макрофаги прикрепляются к его поверхности, в результате чего образуется коллагеновая защитная ткань. Образование соединительной ткани является макропроцессом, но регулируется оно процессами наномасштаба, и реакция организма на биоматериал определяется свойствами поверхности [15].

Атаки макрофагов и последующего образования соединительной ткани можно избежать выбором биоматериала (например, Ti) или нанесением покрытия на его поверхность. Применимость первого способа ограничена малым количеством материалов, вызывающих желательную биореакцию организма. Создание покрытия является способом «перехитрить» механизм естественной защиты организма. Внедрение герметизируется тонким слоем материала, вызывающего положительную реакцию организма.

Поведение клеток зависит от их взаимодействия с поверхностью внедрения, другими клетками, субстратом и межклеточной матрицей [16]. Следовательно, успех использования устройства зависит от слож-

ного взаимодействия клеток и материала. Реакция клеток на синтетический материал имеет большое значение при заживлении раны. Взаимодействие клетки с поверхностью внедрения определяет характер ее поведения, например силу взаимодействия с соседями, рост, скорость перемещения и размножения и т.д. После внедрения биоматериала в ткань из межклеточной матрицы на поверхность высаживаются белки типа фибронектина, проламина, витронектина и молекулы, способствующие фиксации клеток. Микробиологи установили, что поверхность клеток покрыта множеством рецепторов, которые обеспечивают их взаимную фиксацию. Эти рецепторы включают иммуноглобулины, селектины и интегрины. Протеины взаимодействуют с рецепторами и связывают клетку с межклеточной матрицей, которая аналогична супу с разнообразными питательными компонентами типа цитокинов и компонентов роста.

Важно, чтобы на поверхность внедрения адсорбировались нужные белки, обеспечивающие положительную биореакцию организма и в конечном счете успешное использование внедрения. Если при контакте материала с кровью происходит ее сворачивание, из него нельзя делать устройства гемодиализа, искусственные кровеносные сосуды или сердечные клапаны. Контактная линза должна легко смачиваться слезой, поскольку в противном случае она повредит оболочку роговицы глаза. Аналогично, недостаточная связь протеза зуба со слизистой оболочкой приводит к инфицированию из-за проникновения бактерий в промежуток между протезом и живой тканью.

Маловероятно, что существующие сейчас материалы смогут удовлетворить многочисленным требованиям к взаимодействию различных клеток с поверхностью имплантата. Следовательно, для принятия организмом биоматериала его поверхность нужно обработать для получения желательного взаимодействия с биосредой. Характер этого взаимодействия определяется особенностью применения биоматериала. Если материал имеет высокую прочность, но не вызывает требуемой биореакции организма, на него можно нанести покрытие, стимулирующее эту реакцию.

Установив факторы, определяющие взаимодействие поверхности внедрения и клетки, можно осознанно модифицировать поверхность биоматериала для изменения биореакции организма. Один из таких методов состоит в химической модификации поверхности биоматериала для адсорбции определенных белков, а другой – в прививке биоактивных молекул на его поверхность. Особенности поверхностной модификации определяются характером требуемой реакции организма. Если имплантат подвергается воздействию бактерий, как, например, искусственные голосовые связки, адгезия клеток нежелательна. Напротив, для ортопедических имплантатов адгезия необходима.

9.4.2. Модификация поверхности

Взаимодействие внедрения и клетки было исследовано на ионообменных материалах (заряженных полимерах) [17], самособирающихся монослоях (ССМ) [18] и плазменно-напыленных полимерах [19].

ССМ получают в результате адсорбции упорядоченных органических молекул на поверхность золота. Они являются моделью для исследования взаимодействия клетки и имплантата. Химический состав поверхности ССМ создается специальными концевыми группами адсорбированных цепей, что делает этот материал идеальным объектом для исследования адсорбции белков и адгезии клеток. ССМ позволяет исследовать взаимодействие клеток с поверхностью имплантата, но его клиническое использование ограничено, потому что подложкой является стекло, покрытое слоем золота. Напротив, полимерные покрытия, полученные плазменным напылением, в сочетании с различными подложками имеют огромный потенциал практического использования.

Модифицированные поверхности способны влиять на поведение клетки, управляя природой белкового слоя, высаживающегося на поверхность в биосреде. Клетки способны «чувствовать» высадившиеся белки с помощью рецепторов. Как правило, желательны осаждение определенных клеток на поверхность внедрения, их рост и быстрое деление. Так, наличие на поверхности карбоксильной кислоты увеличивает адгезию и ускоряет деление клеток кожи, а азот влияет на поведение нервных клеток.

Интересная особенность некоторых плазменно-напыленных покрытий состоит в способности отторгать в некоторый момент клетки. Это явление вызвало удивление первых исследователей. Если клетка охотно садится на поверхность, почему в некоторый момент она ее покидает?

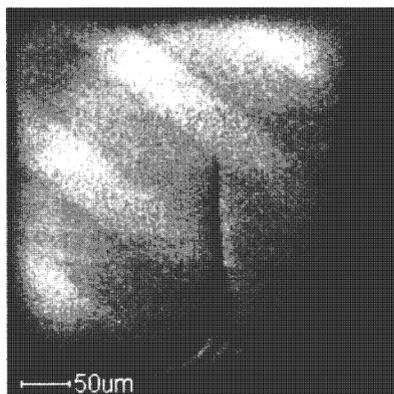


Рис. 9.9. Полосы акриловой кислоты (темные) на плазменно-напыленной подложке полиоктадиена. Изображение получено при помощи времяпролетного масс-спектрометра вторичных ионов (SIMS).

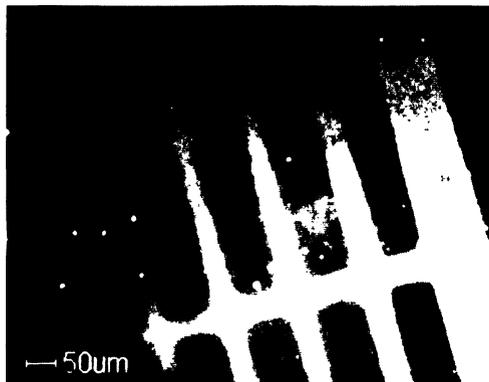


Рис. 9.10. Изображение плазменно-напыленной поверхности аллиламина/полиоктадиена, на которую с помощью маски вторично нанесли прямоугольные области толщиной 50 мкм.

Эксперименты с плазменно-напыленными полимерами с кислотной функциональностью показали, что на них высаживаются клетки кожи, но при наличии диабетической язвы клетки перемещаются в обратном направлении, с поверхности в область раны. Это открытие привело к созданию нового метода заживления ран.

Напыляя через соответствующие маски несколько полимеров с различными функциональными группами, на подложке можно получить рисунок с различным химическим составом отдельных областей (рис. 9.9). Такие образцы имеют различную гидрофобность или гидрофильность отдельных областей и, как следствие, способность осажать клетки и белки (рис. 9.10). Пространственное изменение хими-

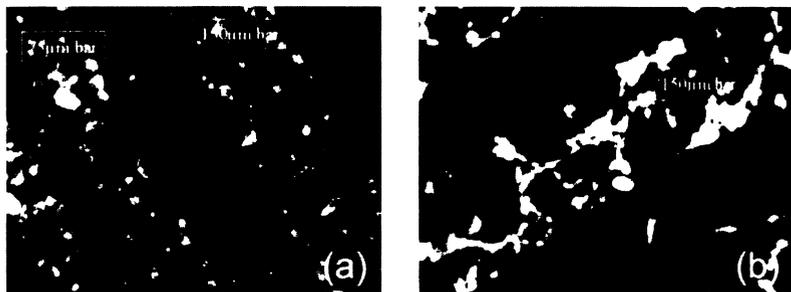


Рис. 9.11. Окрашенные актином нейроны, выращиваемые на напыленной с помощью маски поверхности. После выращивания в течение пяти часов наблюдается закрепление клеток (а); после одного дня видно направление роста нейронов (б).

ческого состава поверхности является очень интересным направлением развития инженерии живых тканей. Например, напыленные азотсодержащие полимеры стимулируют осаждение нервных клеток и рост нейронов. Влияние химического состава поверхности на осаждение определенных клеток можно использовать для управления высаживанием нужных клеток в определенных областях. Пространственно-упорядоченные структуры нервных клеток создавались для направленной электростимуляции нейронов [20]. Выращивая нейроны в ограниченном объеме, можно исследовать их взаимодействие (рис. 9.11). А это, в свою очередь, позволяет регенерировать нейроны, ориентированные в нужном направлении.

Создание поверхностных рисунков с помощью плазменного напыления помогает получать объекты сложной трехмерной структуры [21], что позволяет, например, стимулировать рост множества клеток в нужных местах.

9.4.3. Биологическая модификация поверхности

Биологическая модификация состоит в изменении поверхностных свойств материала при помощи нанесения ковалентно связанных биоактивных молекул, на которые реагирует окружающая среда на клеточном или молекулярном уровне [22]. Разработаны различные модели, позволяющие изучать влияние подложки на поведение клетки. Биоактивную поверхность создают, высаживая на подложку биологически активные лиганды естественного или синтетического происхождения. Они могут состоять из рецепторов клеточных мембран, антител, адгезионных пептидов, ферментов, клейких углеводов, лектина, мембранных липидов и компонентов матричных гликозаминогликанов [23].

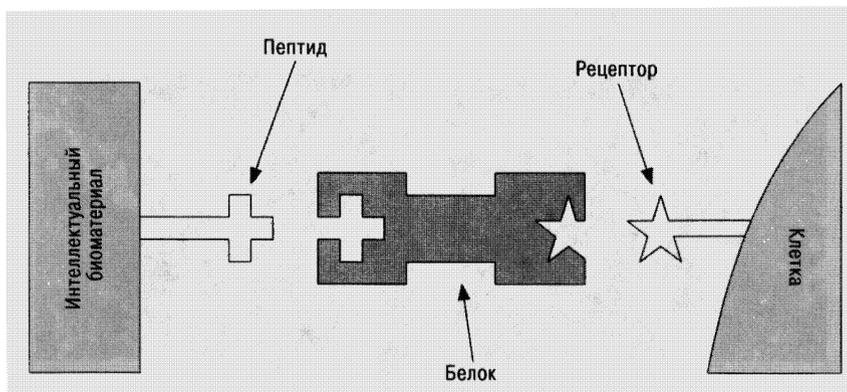


Рис. 9.12. Модель с привитым на его поверхность пептидом, притягивающим определенный белок межклеточной матрицы, который, в свою очередь, притягивает некоторый элемент клетки.



Для прививки лигандов необходимо выбрать подходящую подложку, поверхность которой можно модифицировать плазменным напылением. Такая поверхность должна содержать химически активные компоненты для закрепления биоактивных лигандов (рис. 9.12), выбор которых зависит от желательного поведения клетки.

9.4.3.1. Антибактериальная модификация

Несмотря на стерильность современной хирургии, имплантаты часто вызывают бактериальную инфекцию. Белок фибриноген легко высаживается из плазмы на поверхность, где к нему присоединяются бактерии стафилококка или другие типы инфекции. Для предотвращения высаживания бактерий поверхность модифицировали фосфонированным полиуретаном [24]. Для этого в цепочку полиуретана был встроены лиганд фосфорилхолин. Кроме того, к полимерной смеси метилэндифенилендиизоцианата с полиокситетраметилом пришивались боковые группы глицерофосфорилхолина. Для бактерий эти материалы оказались значительно менее привлекательными.

9.4.3.2. Модификация, обеспечивающая связь с костью

Клетки кости имеют поверхностные рецепторы (интегрины), которые легко образуют связь с аргинин-глицин-аспартатными областями белков типа фибронектина и витронектина из внеклеточной матрицы. Для селективной адсорбции белка к биоматериалу можно привить короткую пептидную цепь, содержащую клеточный адгезив [25]. Исследования показали, что использование аргинин-глицин-аспартата значительно улучшает связь костных клеток и имплантата [22, 26, 27].

9.4.3.3. Модификация, обеспечивающая совместимость с кровью

В настоящее время большинство искусственных кровеносных сосудов сделано из политетрафторэтилена (тефлона) или тканого полиэфира. В случаях, когда существует сильный поток крови (например, в аорте), эти материалы оказались вполне приемлемыми. Однако при малом потоке крови, когда диаметр кровеносного сосуда меньше 4 мм, эффективное сечение сосуда постепенно уменьшается, и через восемь лет оно снижается до 10% от исходного значения [28].

Механизмы взаимодействия лейкоцитов с клетками эндотелия, т.е. клетками стенки кровеносного сосуда, очень сложны. В частности, селектин приводит к вращению лейкоцитов, а интегрин — прилипанию к кровеносному сосуду (рис. 9.13). По этой причине один из потенциально наиболее эффективных методов создания гемосовместимого биоматериала, который инициирует высаживание на нем клеток эндотелия, — прививка к поверхности белка типа фибронектина или олигопептида.

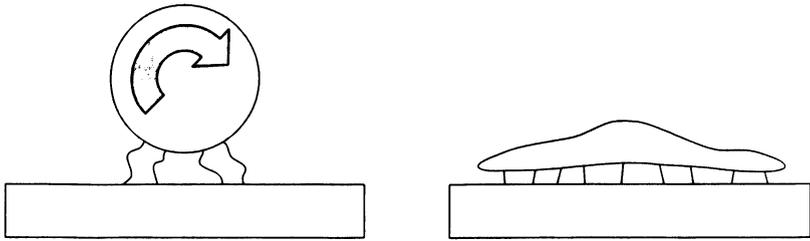


Рис. 9.13. Схематическое изображение вращения и прилипания клетки, обусловленного селектином и интегрином соответственно.

С этой целью был разработан так называемый карбодимидный метод. Смесь поликарбонатуретана и полигидроксibuтилакрилата обрабатывается бифункциональным карбоксилдихлоридом, в результате чего на поверхности появляется карбоксильная группа, на которую легко высаживаются пептиды [29]. Следующая стадия состоит в присоединении карбодимидкарбоксила, после чего карбодимидная группа замещается нуклеофильной аминной группой и образуется устойчивый ковалентно связанный пептид (рис. 9.14).

9.5. Следующее поколение биоматериалов. Истинно интеллектуальные биоматериалы

Травмы и болезни могут привести к потере живой ткани или утрате организмом способности исполнять некоторую функцию. Клиническое лечение в подобных случаях состоит в замене потерянной ткани или восстановлении утраченной функции с помощью синтетических биоматериалов и медицинских устройств. Для улучшения характеристик биоматериалов значительные усилия были направлены на выяснение взаимодействия биоматериала с живой тканью. В результате появились биоматериалы второго

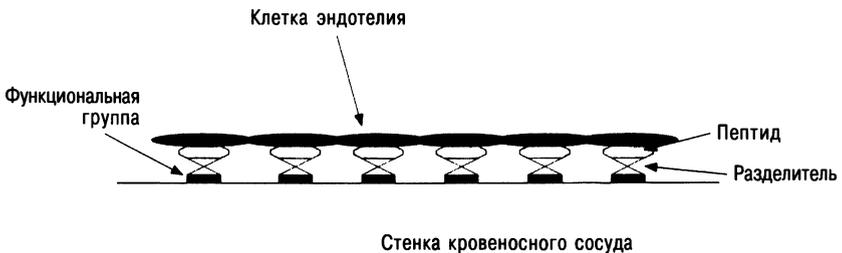


Рис. 9.14. Схематическое изображение поверхности искусственного кровеносного сосуда [28].



поколения, часто называемые биоактивными. Однако лучшим «материалом» для любого человеческого органа остается здоровая живая ткань. Новой философией разработки биоматериалов стала инженерия живых тканей. Она состоит в биологических и технических методах создания функциональных тканей, заменяющих или улучшающих работу больных и патологических частей организма. Практически эту идею реализуют путем выращивания живых клеток на биоматериале в присутствии биоактивных молекул. После этого живые клетки и производимую ими внеклеточную матрицу вместе с подложкой вводят в организм как единую клеточно-биоматериальную структуру. Из-за применения искусственных подложек инженерия живых тканей тесно связана с материаловедением. Термин «заменяющая медицина» был введен Клеменсом ван Блиттерсвйком (Нидерланды) для определения методов лечения, основанных на совместном использовании биоматериалов и выращенных живых тканей. Инженерия живых тканей является одной из наиболее быстро развивающихся областей науки. Журнал «Тайм» поместил специалистов по инженерии живых тканей в самом верху таблицы «лучших рабочих мест будущего». Особенности инженерии живых тканей состоит в совместной работе биологов, химиков и материаловедов. Интерес к ней подпитывается политической заботы о здоровье пожилого населения, а также ожиданием огромного воздействия на методику клинического лечения различных болезней.

До сих пор в качестве подложки биоматериалов часто использовали биодеградирующие материалы типа полилактида. Их считали идеальными, поскольку желательно, чтобы после имплантации материал постепенно исчезал. До настоящего времени попытки усовершенствовать такие подложки практически не предпринимались, хотя некоторые продукты их распада могут подавлять рост и дифференцирование клеток. Одним из перспективных направлений исследований является разработка биологически модифицированных биоматериалов, поверхность которых несет некую информацию для живых клеток, взаимодействующих с этой поверхностью. Информация может состоять в определении того, где клетки должны и где не должны высаживаться, в определении их ориентации или дифференциации. Ожидается, что подобные разработки обеспечат биоинженерам широкий выбор подложек. Весьма вероятно, что появятся биоматериалы, поверхность которых будет содержать интеллектуальные биодеградирующие слои и биологически активные пептиды или лекарства. Такие работы ведутся, и уже есть примеры модификации поверхности для управления высаживанием определенных клеток. Используя поли(п-изопропилакриламид), Окано с соавторами [30] разработал биоматериал с термически активной поверхностью, которая при температуре выше 32°C гидрофобна, а ниже 32°C – гидрофильна. Таким образом, после роста клеток при температуре 37°C их можно удалить с поверхности, понизив температуру до 32°C. Это свойство, вероятно, будут использовать для снятия выращенной кожи с подложки перед перенесением на рану.

Несмотря на прогресс в описанной области, создание истинно интеллектуальных подложек – это задача будущего. В настоящее время для выращивания определенных тканей не часто удается создать правильную морфологическую и биохимическую окружающую среду для высаживания клеток, их роста и дифференцирования. Для того чтобы использование биоинженерных тканей стало рутинной, необходимо дальнейшее развитие биоматериаловедения, биологии и медицины. В частности, необходим прогресс в технологии выращивания клеток (включая стволовые) и биокультур.

9.6. Заключение

Традиционно основными требованиями, предъявляемыми к биоматериалам, были нетоксичность и высокая механическая прочность. Если сто лет назад биоматериалы развивались методом проб и ошибок, то в настоящее время принят более осторожный подход. Угроза судебных тяжб является сильнейшим средством устрашения производителей, предотвращающим «кавалерийский» подход к применению новых биоматериалов и медицинских устройств. Недостатком многих медицинских устройств является недостаточно длительный срок работы. Появление второго поколения биоактивных материалов не только улучшило медицинские устройства, но и изменило стратегию их развития. Современные исследования основаны на попытках получить желательную реакцию живой ткани на биоматериал. Такие разработки позволяют создать медицинские устройства, восстанавливающие или заменяющие больные ткани и органы. Сложность подобных работ состоит в изменении окружающей биологической среды при болезни, что затрудняет успешное оперативное вмешательство. Разработка новых медицинских устройств, биоматериалов и тканей, несомненно, будет играть все более важную роль в лечении болезней. Будущее развитие биоматериалов явится результатом совместных усилий материаловедов, биологов и врачей. Вероятно, новые биоматериалы будут сильно отличаться от биоматериалов прошлого. Они станут намного более интеллектуальными в том смысле, что будут взаимодействовать с биосредой, способствуя восстановлению физиологических функций организма и живых тканей. Окончательной целью лечения будет восстановление здоровой ткани и исчезновение остатков имплантированного биоматериала [31].

Литература

1. Williams D. F., Black, J. and Doherty P. J. (1992) «Consensus of 2nd Conference on Definitions in Biomaterials», *Biomaterial-Tissue Interfaces*, **10**, 525.
2. Burney, F. and Muster, D. (2000) «Aspects of Reconstructive Biomaterials», *MRS Bulletin*, **25**, 15.
3. Branemark, R., Ohmell, L. O., Nilsson, P. and Thomsen, P. (1997) *Biomat.*, **18**, 969.

4. de Groot, K. (1983) «Ceramics of Calcium Phosphates: Preparation and Properties», *Bioceramics of Calcium Phosphates* (ed. K. de Groot), CRC Press.
5. Klein, C. P. A. T., de Blicke-Hogervorst, J. M. A., Wolke, J. G. C. and de Groot, K. (1990) *Adv. Biomat.*, **9**, 277.
6. LeGeros, R., Daculsi, G., Orly, I. and Gregoire, M. (1991) «Substrate Surface Dissolution and Interfacial Biological Mineralization», *The Bone-Biomaterial Interface* (ed. J. E. Davies), Toronto University Press.
7. Brook, I. M., Graig, G. T. et al. (1987) *Brit. Dent. J.*, **162**, 413.
8. Frame, J. W., Rout, P. G. J. and Browne, R. M. J. (1987) *Oral Maxillofac. Surg.*, **45**, 771.
9. Klein, C. P. A. T., Patka, P., van der Lubbe, H. B. M., Wolke, J. G. C. and de Groot, K. (1991) *J. Biomed. Mat. Res.*, **25**, 53.
10. Hulber, S. F., Hench, L. L., Forbes, D. and Bowman, L. S. (1983) «History of bioceramics», *Ceramics in Surgery*, **17**, 3.
11. Hench, L. L. and Wilson, J. (1984) *Science*, **226**, 630.
12. Hench, L. L. (1991) *J. Am. Ceramic Soc.*, **74**, 1487.
13. Vogel, W. and Holland, W. (1987) *Angew. Chem. Int. UK*, **26**, 527.
14. Wilson, J. (1985) «Clinical Application of Bioglass», *Glass: Current Issues* (ed. A. F. Wright and J. Dupuy), pp. 662–669.
15. Ikada, Y. (1994) *Biomat.*, **15**, 725.
16. Springer, T. A. (1990) *Nature*, **346**, 425.
17. Shelton, R. M. and Davies, J. E. (1991) *The Bone-Biomaterial Interface* (ed. Davies, J. E.), Toronto University Press.
18. Cooper, E., Wiggs, R., Hutt, D. A., Parker, L., Leggett, G. J. and Parker, T.-L. (1997) *J. Mat. Chem.*, **7**, 435.
19. Haddow, D. B., France, R. M., Short, R. D., MacNeil, S., Dawson, R. A., Leggett, G. J. and Cooper, E. (1999) *J. Biomed. Mat. Res.*, **47**, 379.
20. Matsuzawa, M. (1994) *Brain Res.*, **47**, 67.
21. Bullett, N. A., Short, R. D., Beck, A. J., France, R. M., Cambray-Deakin, M., Fletcher, I. W., Douglas, C. W. I., Roberts, A. and Blomfield, C. (2001) (preprint).
22. Rezanian, A. et al. (1997) *J. Biomed. Mat. Res.*, **37**, 9.
23. Drumheller and Hubbell (1995) *The Biomedical Engineering Handbook* (ed. J. D. Bronzini), CRC Press.
24. Baumgartner, J. N. et al. (1997) *Biomat.*, **18**, 831.
25. Pierschbacher, M. D. and Ruoslahti, E. (1984) *Nature*, **309**, 30.
26. Cook, A. D. et al. (1997) *J. Biomed. Mat. Res.*, **35**, 513.
27. Sugawara, T. and Matsuda, T. (1995) *J. Biomed. Mat. Res.*, **29**, 1047.
28. Tietze, L. (2000) *MRS Bulletin*, **25**, (1), 33.
29. Anderheiden, D. (1992) *J. Mat. Sci. Mat. Med.*, **3**, 1.
30. Okano, T. (1995) *Biomat.*, **16**, 297.
31. Sittinger, M. (1996) *Biomat.*, **17**, 237.

ГЛАВА 10

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ В ПРИРОДЕ

Д. Ф. В. Винсент

10.1. Введение

Существует несколько определений интеллектуального материала. Общим для них является то, что материал (или структура) способен ощущать внешнее воздействие и реагировать на него. Сложности связаны с тем, что имеется несколько масштабных уровней, на которых могут проявляться эти способности, каждый со своей возможностью реагирования. Определение интеллектуального материала подразумевает наличие сенсоров или поступление информации, возможной обработки сигналов и информации, принятия решения и, наконец, действия [1]. В принципе аналогичным способом функционируют биологические объекты, и мы можем использовать накопленный в природе опыт для создания искусственных интеллектуальных материалов и устройств. Рассмотренные ниже примеры представляют лишь малую долю того, что встречается в природе, но они отражают случаи, когда удалось удачно применить в интеллектуальных структурах знания, полученные в результате изучения биологических объектов.

10.2. Биоподражающие интеллектуальные устройства

10.2.1. Механизмы рецепции

Основным элементом живых организмов является клетка, и уже на этом уровне организм способен реагировать на внешнее воздействие. Наиболее важным элементом передачи и обработки информации в клетке является *мембрана*. В ней внешние воздействия преобразуются в химические сигналы. Этот сигнал может быть усилен и обработан, после чего клетка производит сигнал, который снова должен пересечь мембрану. Клетка способна как усиливать, так и суммировать входящие сигналы.

Следует иметь в виду, что биологические организмы очень сложны, и поэтому примеры, иллюстрирующие работу их органов чувств, приходится выбирать с большой осторожностью. В клетке происходит большое количество жизненных процессов. Однако при выборе биологи-

ческой модели желательно иметь более простую систему, исполняющую преимущественно одну функцию, что типично для больших организмов, в которых клетки специализированы. В пределе, чувствительность рецепторов биообъекта ограничена квантовыми эффектами [2]. Поэтому в принципе к биосистемам желательно применять квантовый подход. Во многих случаях имеются специфические требования, предъявляемые к механизмам выделения, обработки и усиления сигнала рецепторных клеток. Чтобы выяснить принцип работы рецептора, необходимо знать биологические особенности организма. Принципы функционирования биообъектов гораздо сложнее созданных человеком изделий, и поэтому слепое копирование биологических механизмов является ошибкой. К сожалению, часто нам не удается выявить принципы работы многофункционального биоорганизма, и мы не понимаем принципов его работы.

10.2.1.1. Механические рецепторы членистоногих

Механические рецепторы членистоногих исследовались довольно внимательно, но до сих пор их искусственные аналоги используются не слишком часто. Механорецепторы насекомых состоят из *кутикул*, которые являются волокнистыми композитами. Отметим, что кутикулы мух и пауков довольно похожи, а, например, у океанских ракообразных crustacea они содержат до 40% CaCO_3 . Проблемы состоят в выяснении механизмов работы рецепторов (не всегда очевидных) и в определении влияния размеров на конструкцию искусственного сенсора. Насекомые имеют три группы рецепторных

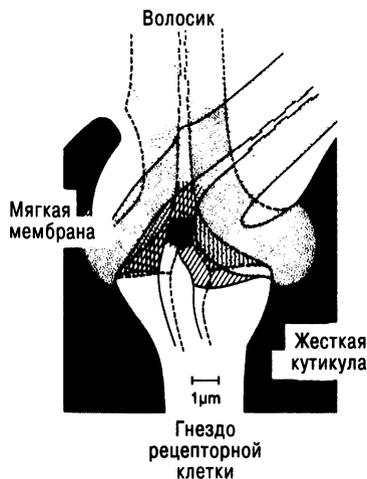


Рис. 10.1. Схематическое изображение рецепторного волосика насекомого, иллюстрирующее его деформацию при изгибе [5].

органов — волосики и щетинки, трихоботрии и колоколообразные рецепторы, которые будут описаны ниже [3]. Для тяжелых и опасных для жизни человека условий были разработаны роботы, движения которых моделируют движения насекомых. Проворство насекомых обусловлено разнообразием информации, которую они получают при помощи органов чувств. Насекомые имеют как минимум три типа механорецепторов: рецепторы движения, механической силы и внешнего контакта [4]. На ногах расположена часть рецепторной системы насекомого.

Волос насекомого не похож на волос млекопитающих. Он представляет собой длинный полый сужающийся усеченный конус, состоящий из кутикулы (рис. 10.1) и установленного в гнездо из резилина, эластичной формы *кутина*, очень податливого, упругого и почти не имеющего необратимой деформации материала. Каучукоподобные свойства кутина обусловлены его поперечной сшивкой в сочетании с гидратацией, которая придает относительно жестким цепям белка высокую стерическую подвижность [6]. Изгиб волоса воздействует на рецепторную ячейку насекомого, и появляется сигнал. Когда на волос не действуют внешние силы, каучукоподобное основание обеспечивает его ориентацию в вертикальном направлении, и сигнал отсутствует. Структура настолько надежна, что сигнал появляется только при смещении волоса из положения равновесия. Волос может смещаться вследствие действия внешних сил, близости других частей тела или движения воздуха. Сообщалось о создании искусственного наноуровневого сенсора (рис. 10.2), похожего на систему рецепторных волос насекомого [7], но информация о его работе отсутствует.

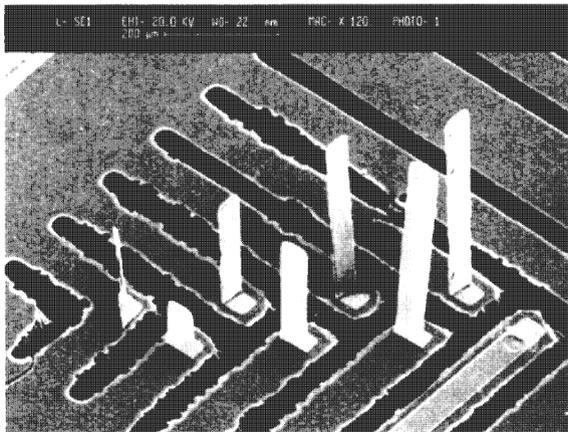


Рис. 10.2. Датчик, сделанный по кремниевой технологии и подражающий системе рецепторных волосиков насекомого.



Трихоботрии (рис. 10.3) представляют собой довольно необычные волосы, чувствующие движение воздуха. На лапках взрослой особи паука *cupiennius salei* имеется 936 трихоботрий. Длина трихоботрий равна 100–1400 мкм, а диаметр в основании – 5–15 мкм. Многие из них согнуты в направлении тела. Похожие на перья поверхностные наросты увеличивают силу взаимодействия с воздухом без значительного увеличения массы и, как следствие, возрастает чувствительность рецептора. Обычно трихоботрии состоят из кластеров по 2–30 штук, причем их длина увеличивается по направлению к кончику лапки. В зависимости от длины резонансная частота их колебаний равна 40–600 Гц. Поскольку при увеличении длины волоса изменяется и чувствительность, объединение трихоботрий в группу позволяет получить информацию об интенсивности и частоте возмущающего воздействия, а в некоторых случаях и направлении на источник. Толщина граничного слоя колеблющегося воздуха у лапки изменяется от 2600 мкм при частоте 10 Гц до 600 мкм при 950 Гц, что близко к длине трихоботрии. В качестве рецепторов скорости короткие трихоботрии не хуже длинных, но имеют более высокую чувствительность для регистрации ускорения [9]. С помощью системы трихоботрий паук может обнаружить гудящую муху на расстоянии приблизительно 20 см [10]. Подобно трихоботриям, *антенны* мужских особей москитов являются датчиками звукового сигнала, но имеют больший размер и более высокую чувствительность. Антенна покрыта длинными щетинками, которые видны невооруженным глазом, и, в отличие от рецепторных волосиков, жестко соединена с ее основанием. В основании антенны имеется выпуклость (рис. 10.4), названная *органом Джонстона*, по имени открывшего ее ученого. Эта выпуклость содер-

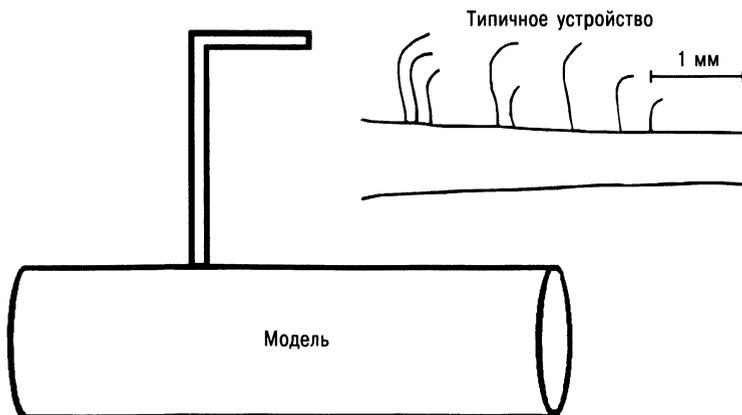


Рис. 10.3. Изображение трихоботрии на лапке паука и модель, позволяющая исследовать механизм ее действия [8].

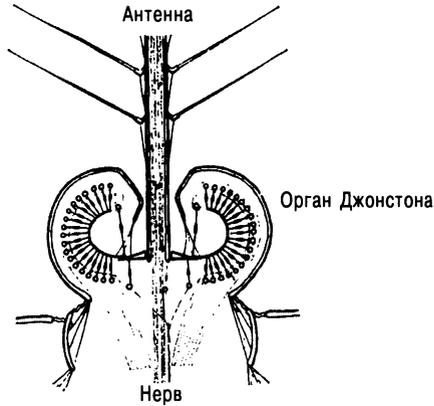


Рис. 10.4. Орган Джонстона в основании антенны москита [12].

жит множество датчиков смещения, называемых *хордотональными органами* и преобразующих движение антенны в нервные импульсы [11]. Рецепторные волосы насекомого можно моделировать, используя стандартную кварцевую технологию, но резонансные частоты будут отличаться, так как плотность кутикулы насекомого ниже плотности кварца и равна лишь 1500 кг/м^3 .

Колоколообразный орган является сенсором деформации. Он представляет собой отверстие в кутикуле, закрытое *колпачком*, как показано на рис. 10.5. Этот орган позволяет насекомому измерять смещение в плоскости кутикулы за счет ее податливости. Отверстие в кутикуле увеличивает деформацию и приводит к ее движению вверх или вниз. Таким образом, появляется деформация в перпендикулярном направлении, которая

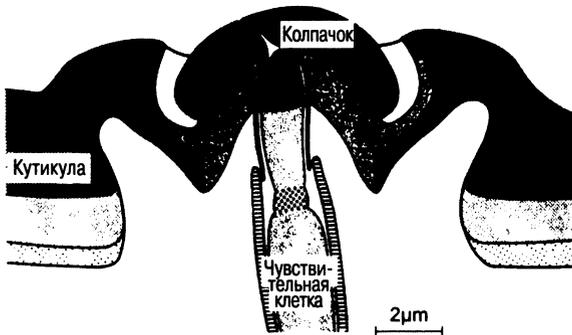


Рис. 10.5. Колоколообразный орган, представляющий собой отверстие в кутикуле, закрытое колпачком [12].



измеряется клеткой, находящейся на эпидерме кутикулы. Колоколообразный орган размещается в области максимальной нагрузки, где наиболее вероятно разрушение крыла или лапки. Таким образом, у насекомого ослаблены области, которые, казалось бы, требуют усиления. Эта странность указывает на то, что мы столкнулись с чем-то интересным. Разрушение происходит, когда деформация достигает некоторого значения, являющегося характеристикой материала. Коэффициент концентрации напряжения вблизи отверстия характеризует величину вызываемого им снижения прочности. Влияние колоколообразного органа моделировали при помощи ряда отверстий в пластине из композиционного материала [13]. Отверстия высверливали (в результате чего волокна были разрушены) или получали в процессе формования композита (в этом случае волокна изгибались и оставались целыми). Получали как круглые, так и эллипсообразные отверстия, как показано на рис. 10.6. Концентрация напряжения максимальна вблизи края отверстия в плоскости симметрии, перпендикулярной оси растяжения. Исключением является случай формованного (несверленного) эллиптического отверстия, ориентированного вдоль оси нагружения. В этом случае концентрация напряжения максимальна на главной оси эллипса. Вблизи сверленных отверстий концентрация напряжения выше, чем в случае несверленных отверстий. Худшим случаем является эллиптическое сверленное отверстие, ориентированное перпендикулярно направлению нагружения. В этом случае коэффициент концентрации напряжения равен примерно четырем. В формованном несверленном композите концентрация напряжения приблизительно в полтора раза ниже, чем в сверленном. Распределение напряжения в случае несверленных отверстий также более однородное, чем в случае сверленных отверстий.

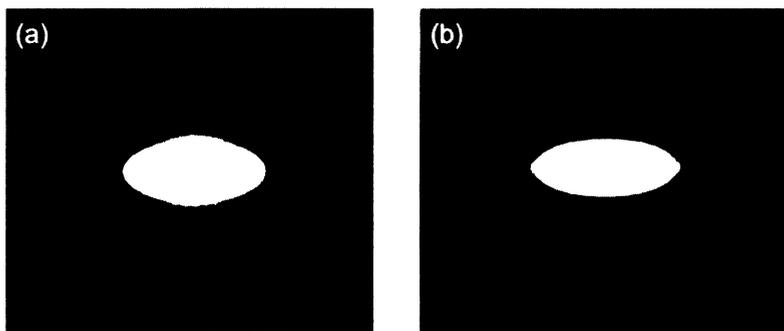


Рис. 10.6. Модель для вычисления методом конечных элементов напряжения вблизи овального отверстия, высверленного в пластине из волокнистого композиционного материала (а) и впрессованного в пластину (б). Волокна и нагружающая сила направлены вдоль главной оси овала [14].

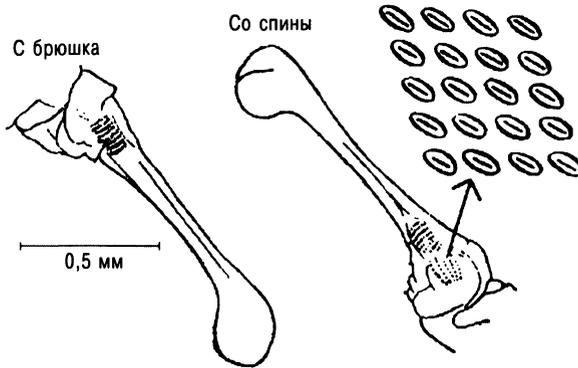


Рис. 10.7. Вид поводка навозной мухи из различных точек наблюдения. Увеличена область с множеством колоколообразных органов [8].

Имеется несколько технических способов измерения деформации отверстия, включая и колпачки, как у насекомых. Наиболее простой способ состоит во введении в отверстие прозрачного полимера и использовании метода двулучепреломления света. Еще один способ состоит в измерении длины световой волны, отраженной от дифракционной решетки, нанесенной на область вблизи отверстия. Это позволяет исследовать влияние отверстия методом удаленного контроля, что уменьшает сложность и стоимость измерений.

На системе отверстий основаны и другие рецепторные органы насекомых. Например, *поводок* – орган, ответственный за балансировку мухи в полете и представляющий собой измененное крыло (рис. 10.7). Попытки создать аналогичные искусственные сенсоры пока не предпринимались.

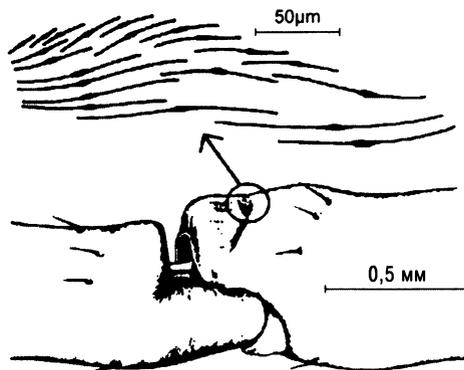


Рис. 10.8. Расположение разрезов в лириформе на лапке паука вблизи сочленения плюсны [8].

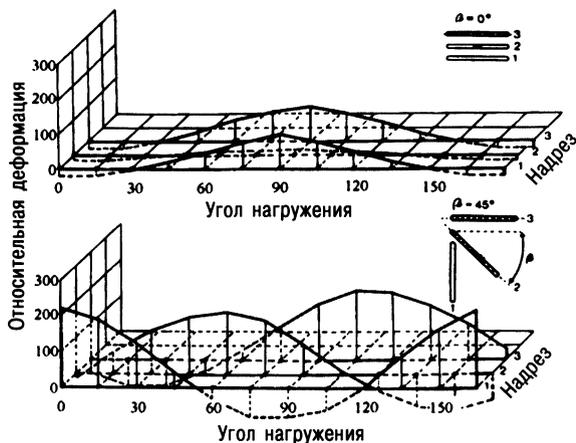


Рис. 10.9. Деформация пластины из перфлекса с разрезами, моделирующей органы чувств паука. Силу прикладывали под различными углами к оси вырезов [15].

У пауков есть аналогичный орган, имеющий ряд вырезов и называемый *лириформом*. Этот орган похож на колоколообразный орган (рис. 10.5), но эллипсы в нем сильно вытянуты вдоль оси растяжения и похожи на продольные разрезы. Разрезы обычно взаимнопараллельны, как показано на рис. 10.8. Поведение различных органов чувств насекомых, имеющих ряд вырезов, изучали при помощи полимерных моделей. Измеренную величину удлинения при различных направлениях приложения силы сравнивали с результатами испытания модели с одиночным вырезом [16]. В случае трех или пяти вырезов одинаковой длины (рис. 10.9) деформация каждого из них значительно уменьшается при близком расположении соседнего выреза. Периферийные вырезы деформируются сильнее внутренних. В больших группах они искажены даже сильнее, чем одиночный разрез. Во всех случаях вырез наиболее сильно деформируется в направлении, перпендикулярном его плоскости. Деформирование неоднородно по длине, причем самая большая деформация возникает не всегда в середине выреза. При ориентации вырезов под углом более 120° возникает сжатие. Если длина вырезов увеличивается регулярным образом, а их кончики образуют треугольный контур, как на рис. 10.7, различие в деформации оказывается наиболее сильным. Если вырезы формируют область в форме сердца, в большом диапазоне углов растяжения возникает сжатие [15].

Некоторые жуки (рис. 10.10) обладают парными органами чувств в виде *ямки*, расположенных вблизи основания средних ног. Каждая ямка содержит приблизительно 70 плотноупакованных нервных окончаний, реагирующих на инфракрасное излучение и позволяющих



Рис. 10.10. Жук *melanophila acuminata*, способный обнаружить удаленный лесной пожар. Органы чувств находятся в нижней части насекомого.

жукам обнаружить удаленный лесной пожар. Отдельная ямка состоит из круглой кутикулы диаметром около 15 мкм. Периферийные процессы возбуждают две клетки плоской формы, которые передают сигнал на нейрон. Этот орган реагирует на инфракрасное излучение продолжительностью 2 мс. Он напоминает основание рецепторных волос, реагирующих на механическое возбуждение, и, вероятно, является результатом их эволюционного развития [13, 17]. Механизм их работы окончательно не выяснен, но интенсивно исследуется и, видимо, будет установлен.

10.2.1.2. Органы чувств позвоночных

Позвоночные имеют различные рецепторные органы, некоторым из которых люди пытаются подражать.

Электрорецепторы

Рыбы телеост и акула, а также яйцекладущее млекопитающее утконос (вероятно, и многие другие виды животных) имеют электрорецепторы, ощущающие электрическое поле. Сильнее всего это чувство развито у акул, которые имеют ряды электрорецепторов, имеющих вид углублений (*ampullae Lorenzini*) и способных ощущать чрезвычайно слабое электрическое поле (5 нВ/см). При плавании они ощущают магнитное поле Земли и используют это чувство для поиска добычи и навигации. Электрорецепторы не способны измерить величину поля. Как следствие, рыба не может определить скорость и направление потока жидкости.

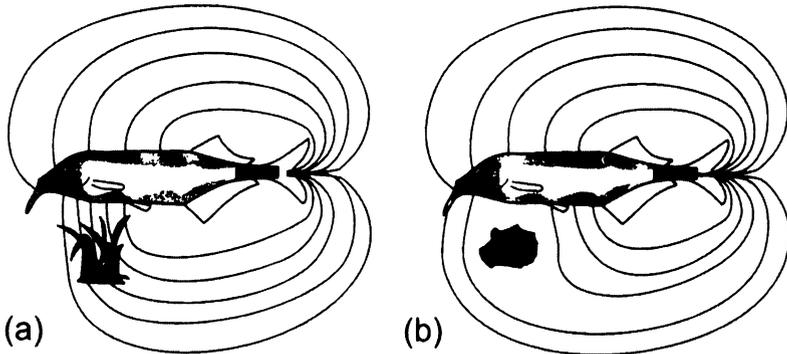


Рис. 10.11. Электрическое поле рыбы *gnathonemus petersii*, искаженное (а) водными растениями (хорошо проводят электричество) и (б) камнем (изолятор). Боковой вид. Изображены линии электрического поля. Чувствительные части поверхности тела показаны серым цветом [20].

Возможно, сигнал вызывает асимметрия электрического поля при поворотах рыбы. С помощью электрорецепторов и полукруглых каналов, направленных вдоль позвоночника и позволяющих определить ускорение, акула определяет направление движения [18]. Рыбы с более слабой чувствительностью электрорецепторов используют активную *электролокацию*, излучая и принимая отраженный сигнал для изучения окружающей среды (рис. 10.11). Хотя электрорецепция рыб исследовалась довольно интенсивно, ее механизм пока не известен. Тем не менее, используя видеосъемку поведения рыб совместно с экспериментальным измерением величины электрического поля и численными расчетами, можно надеяться на создание алгоритма распознавания образов на основе сигналов электрорецепторов [19].

Тепловидение

Удавы обладают уникальными инфракрасными органами зрения, имеющими вид *ямки*. Их поверхность рассеивает или отражает электромагнитное излучение определенной длины волн. Кожа ямки покрыта множеством похожих на поры структур, называемых *микрорябью*. Микрорябь имеет средний диаметр 320 нм и глубину 46 нм, а расстояние между ними равно 810 нм. Они работают как светопоглощающее покрытие и могут усиливать сигнал поглощенного инфракрасного излучения, увеличивая чувствительность к тепловому воздействию [21]. Их чувствительность не является уникально высокой, но они сконцентрированы в небольших областях, где их количество выше по сравнению с количеством нервных окончаний человеческой кожи, и находятся они ближе к поверхности, чем у человека.

10.2.2. Суммирование и кодирование сигналов

В результате эволюции появились нервные системы, передающие сигнал с высокой скоростью. Особенностью механизмов передачи сигнала является некоторый избыток информации. Вопрос заключается в том, содержится ли информация исключительно в количестве импульсов каждого нейрона или же она содержится и во взаимном расположении сигналов соседних нервных клеток? Очень важно, как суммируется и анализируется сигнал отдельных нейронов. Если несколько нервных клеток несет сходную информацию, то она избыточна, и полная информация равна информации одной клетки. Если сигналы различных нейронов независимы, их амплитуда возрастает пропорционально количеству нейронов. Если же информация имеется и в корреляции между временем импульсов соседних нейронов, то сигнал является *синергетическим*, и полная информация превышает сумму информации отдельных нейронов. При коротких временах такой механизм доминировать не может, но при значительных временах корреляция сигналов может привести к значительному синергизму. Отметим, что только некоторые комбинации коррелированных сигналов приводят к значительному синергетическому эффекту [18].

10.2.3. Реакция

10.2.3.1. Кожа

При растяжении кожи ориентация основного волокнистого компонента — коллагена может быть значительно увеличена введением трещин или надрезов [22]. В кончике трещины имеется концентрация напряжения, величина которого быстро уменьшается с расстоянием до него. При двусосном растяжении аорты свиньи на одну треть от начального размера влияние напряжения, проявляющееся в ориентации коллагеновых волокон, перестает наблюдаться на расстоянии 0,5 мм от кончика трещины длиной 5 мм (рис. 10.12). Концентрация напряжений максимальна в направлении, перпендикулярном плоскости трещины, и волокна коллагена ориентируются перпендикулярно плоскости трещины (в направлении Р). Трещина в процессе своего роста пересекает большое количество ориентированных коллагеновых волокон, для чего требуется много энергии. При случайном расположении волокон (точка R) материал первоначально изотропен, и энергия распространения трещины одинакова во всех направлениях. В точке Q коллаген ориентируется параллельно плоскости трещины. Таким образом, кожа ведет себя как интеллектуальный материал. Это свойство кожи обеспечивается гетерогенностью структуры (негибкие волокна в мягкой матрице) и высокой подвижностью волокон. В зависимости от стойкости к распространению трещины и степени начальной ориентации волокон кол-

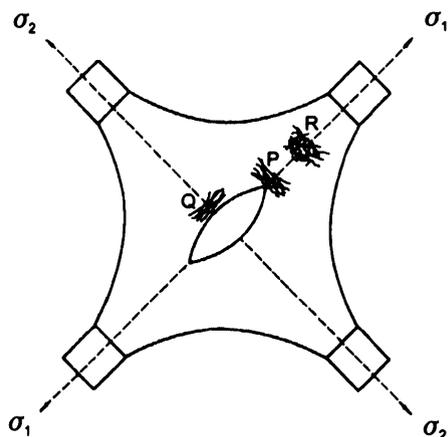


Рис. 10.12. Ориентация волокон коллагена вокруг разреза в артериальной ткани свиньи при растяжении [22].

лагена кожа имеет высокое удлинение при разрыве (10–50%). Кривая «напряжение–деформация» имеет растущий J-образный вид, и текущее значение модуля упругости возрастает с ростом деформации. Такой вид кривой деформирования имеет интересные следствия, а именно кожа имеет высокую прочность и вязкость (энергию) разрушения [23].

10.2.3.2. Складчатые структуры

«Интеллектуальность» складчатых структур состоит в их способности реагировать на изменение внешних условий. Очень интересны инженерные подходы, основанные на изучении сворачивания и шарнирного крепления крыльев насекомого. Крыло приводится в действие основа-

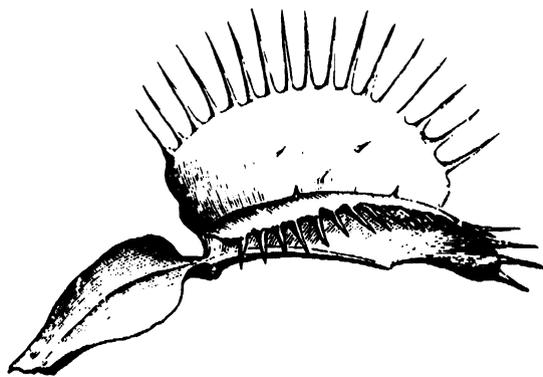
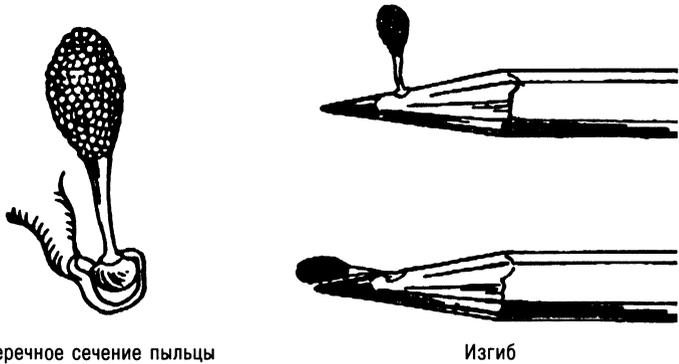


Рис. 10.13. Открытая ловушка мухи Венеры.



Поперечное сечение пыльцы

Изгиб

Рис. 10.14. Пыльца [26].

нием, а изменение формы обусловлено сворачиванием при упругом поведении материала крыла. Крыло имеет шарнирное соединение в трех точках, и его можно моделировать тремя шарнирно соединенными по краю областями, способными изменять взаимную пространственную и фазовую связь при взмахе. Периферические складки, пересекающие две первичные складки, разграничивают три области, могут активизироваться или подавляться действием первичных складок [24]. Благодаря эластичности и способности к управляемому изменению формы крыло реагирует на изменение условий полета [1, 25]. Это обусловлено аэроупругим поведением крыла при взмахе и управляющим действием приводящих мышц. Очень интересны также механизмы изменения формы, связанные с потерей механической устойчивости [25], однако их анализ является задачей будущего.

Механизм аккумуляции энергии упругой деформации, который еще не исследован, но встречается в природе гораздо чаще, чем нам кажется, связан с использованием гидравлического давления для деформирования упругого элемента¹. Этот механизм лежит в основе действия ловушки хищной мухи Венеры (рис. 10.13), и, вероятно, некоторых механизмов опыления. Опора пыльцы орхидеи после прикрепления к насекомому изгибается (рис. 10.14), чтобы запасти энергию для прикрепления к женской части следующего цветка, который посетит насекомое [26].

¹ Плотность энергии упругой деформации описывается формулой $\rho = \sigma^2/2E$, где σ — растягивающее напряжение и E — модуль упругости. При наличии исходного растягивающего напряжения величиной σ_0 и дополнительного напряжения, вызванного, например, изгибом упругого элемента, полная плотность энергии равна $(\sigma_0 + \sigma)^2/2E$. Если исходное растяжение достаточно велико и $\sigma_0 \gg \sigma$, плотность дополнительной энергии изгиба $\sigma_0\sigma/E \gg \sigma^2/2E$. Таким образом, при наличии исходного растяжения дополнительный изгиб позволяет запасти гораздо больше энергии, чем в случае исходно ненапряженной структуры. — *Примеч. перев.*

Энергия упругой деформации запасается в целлюлозе стенок клеток, содержащих жидкость, которая сохраняет свой объем и обеспечивает растяжение упругих элементов. При этом механизме накопления энергии увеличивается мощность устройства, причем энергия запасается постепенно с низкой скоростью, а высвобождается очень быстро.

10.2.4. Использование

Имеется принцип, что самое простое интеллектуальное биоподражающее устройство, вероятно, будет и самым успешным. Имея это в виду, посмотрим, какие системы в природе имеют простоту и функциональность биметаллической полосы. Достоинством самоорганизованных материалов и структур типа жидкого кристалла является легкость изменения их свойств [27]. Жидкокристаллические структуры часто встречаются в живой природе. Отметим также, что очень легко делаются полимерные блоксополимеры, в которых происходит самопроизвольное разделение фаз и образуется структура [28].

10.2.4.1. Жидкие кристаллы

Жидкие кристаллы распространены в биологических системах исключительно широко. Жидкие кристаллы «самособираются» из неупорядоченного состояния, в результате чего в неупорядоченной химической системе появляется порядок и морфология. Так как жизнь возникла в результате упорядочивания и разделения химических веществ, имеется большой интерес к механизмам появления упорядоченных структур.

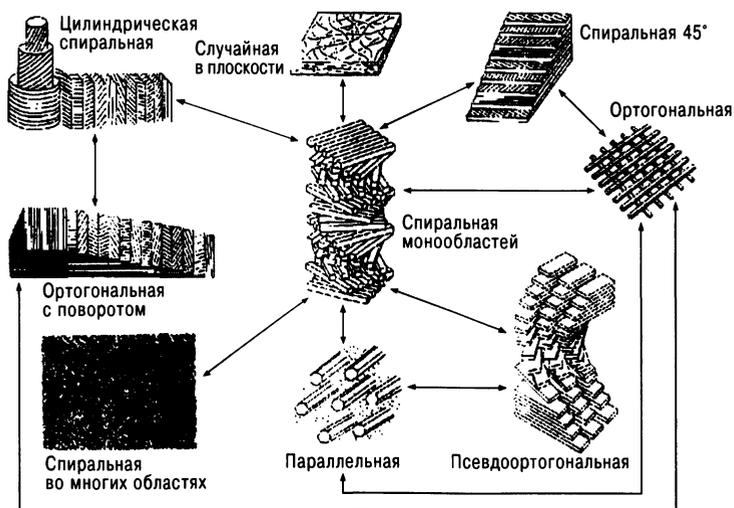


Рис. 10.15. Переходы жидкокристаллических структур [29].

Жидкие кристаллы образуют целый ряд упорядоченных структур из относительно простых молекул, причем возможны переходы от одного типа структуры к другой (рис. 10.15) в ответ на изменение внешних условий (например, концентрации соли, температуры, рН среды и т.д.). Жидкие кристаллы удовлетворяют общему критерию, предъявляемому к биосистемам, а именно их действие достигается с минимальным расходом энергии. Например, энергия перехода из нематической жидкокристаллической структуры (в которой стержнеобразные молекулы ориентированы параллельно) в спиралевидную (в которой стержни расположены слоями, ориентированными под определенным углом друг к другу) при толщине слоев 1 мкм в 10^5 раз меньше, чем энергия перехода в нематическое состояние из неупорядоченной системы. Образование нематической структуры с энергетической точки зрения часто более выгодно, если молекулы ориентируются перпендикулярно поверхности подложки. В биологии с энергетической точки зрения самоупорядоченные системы более выгодны по сравнению с материалами, которые не имеют собственного порядка, и поэтому нуждаются в ферментативном управлении и подводе энергии. Как следствие, жидкокристаллические структуры в биологии распространены чрезвычайно широко. Некоторой проблемой является неисследованность механизмов их появления в биосистемах. Клетка стремится образовать жидкокристаллическую морфологическую структуру, внутренним свойством которой является ее стабильность. Технические жидкокристаллические материалы имеют особые оптические (например, цвет или двулучепреломление), а также диэлектрические и механические свойства (реологические или упругие) и т.д.

Схожесть жидкокристаллических структур и кутикулы насекомого впервые заметили зоолог Чарльз Невилл и химик Конмар Робинсон в 1967 году [29]. В частности, похожи их оптические свойства. В кутикуле продольные и спиралевидные волокнистые структуры обладают двулучепреломлением подобно жидкокристаллическим нематикам. Различие состоит в том, что в жидком кристалле структура определяется молекулярным уровнем, а в кутикуле насекомого — субмикроразмером. Разница масштабных уровней составляет по крайней мере два десятичных порядка величины.

Некоторые насекомые могут обратимо изменять содержание воды в кутикуле, в результате чего изменяется ее модуль упругости. Кровососущий клоп *rhodnius* способен снизить рН кутикулы от 7 до 6, в результате чего концентрация воды увеличивается с 26 до 31%. Как следствие, жесткость кутикулы снижается с 250 до 10 МПа, а ее растяжимость возрастает от 10 до 100% [30, 31]. Это возможно благодаря гидрофобности белков кутикулы, что изменяет ее характеристики в зависимости от концентрации воды [32].

Попытки использовать пластификаторы для изменения формы интеллектуальных устройств пока не предпринимались. Однако легкое изменение формы может быть большим преимуществом. В природе таким образом развивается защитная оболочка яиц акулы [33] и вытягиваются волокна шелкопряда [34]. Одновременно возникают и другие случаи, когда структура должна быть устойчива для несения или создания нагрузки. В этом случае ее форма фиксируется поперечными сшивками материала [35].

Морфология жидких кристаллов может изменяться в результате изменения концентрации, температуры, содержания солей, pH системы и т.д. Так как регулярно упакованный жидкий кристалл имеет более высокую плотность и меньшую энергию, чем неупорядоченная жидкость, увеличение давления и снижение температуры способствуют переходу в жидкокристаллическое состояние. Белок защитной оболочки яйца бегемота имеет спиралеобразную структуру, если pH среды выше 5, и изотропную, если ниже. Как было убедительно показано, коллаген оболочки яйца акулы имеет жидкокристаллическую структуру [34], однако при изменении солености окружающей воды он изменяет структуру упаковки. Таким образом, имеется множество способов изменения жидкокристаллической структуры. Эти изменения можно использовать для получения информации о состоянии окружающей среды, что является основой создания датчиков. Опрос датчика удобно проводить при помощи поляризованного света методом удаленного контроля. По типу образовавшейся морфологии можно также судить об условиях ее формирования.

10.3. Заключение

Биологические системы представляют интерес для создания интеллектуальных структур и робототехники. Поэтому естественно обратиться к природе, чтобы выяснить, как можно использовать приобретенный ею опыт для создания искусственных сенсорных систем. Природа может служить подсказкой не только при создании новых материалов и структур, но и при разработке технологий производства, а также методов их разумного использования.

Природные системы самоорганизованы на различных масштабных уровнях. На молекулярном и микроструктурном уровнях это обусловлено жидкокристаллической структурой материала. Но на макроуровне это почти наверняка управляется совокупностью свойств различных элементов конструкции. Это может быть неудобно для инженера (который должен быть уверен, что структура будет надежно нести расчетные нагрузки) и тем более для пользователя (который должен быть уверен в надежности структуры и не знает, кому предъявить судебный иск, если она разрушится!). Вероятно, саморазвиваю-

шиеся структуры появятся в космосе, где дороговизна полезного груза, отсутствие гравитационных сил и низкая потребность в питательных веществах для поддержания жизни делают такой выбор очень привлекательным. Однако на этом пути остаются проблемы. Например, проблема повторного использования самоощущающих и самовосстанавливающихся структур.

Литература

1. Haas, F., Gorb, S. and Blickhan, R. (2000) «The Function of Resilin in Beetle Wings», *Proc. Royal Soc. London B*, **267**, 1375–1381.
2. Bialek, W. (1987) «Physical Limits to Sensation and Perception», *Ann. Rev. Biophys. & Biophysical Chem.*, **16**, 78–455.
3. Keil, T. A. (1997) «Functional Morphology of Insect Mechanoreceptors», *Microscopy Res. & Technique*, **39**, 506–531.
4. Delcomyn, F., Nelson, M. E. and Cocatre-Zilgien, J. H. (1996) «Sense Organs of Insect Legs and the Selection of Sensors for Agile Walking Robots», *Int. J. Robotics Res.*, **15**, 113–127.
5. Thurme, U. (1965) «An Insect Mechanoreceptor Part I: Fines Structure and Adequate Stimulus», *Cold Spring Harbor Symp. on Quantitative Biology*, pp. 75–82.
6. Andersen, S. O. and Weis-Fogh, T. (1964) «Resilin, a Rubber-Like Protein in Arthropod Cuticle», *Adv. Insect Physiol.*, **2**, 1–65.
7. Goldin, D. S., Venneri, S. L. and Noor, A. K. (2000) «The Great Out of the Small», *Mech. Eng.*, Nov. **2000**, 71–79.
8. Barth, F. G. and Geethabali (1982) «Spider Vibration Receptors: Threshold Curves of Individual Slits in the Metatarsal Lyriform Organ», *J. Comparative Physiol*, **148**, 175–185.
9. Barth, F. G., Wastl, U., Humphrey, J. A. C. and Devarakonda, R. (1993) «Dynamics of Arthropod Filiform Hairs. II. Mechanical Properties of Spider Trichobothria (*Cupiennius Salei* Keys.)», *Phil. Trans. Royal Soc. London B*, **340**, 445–461.
10. Barth, F. G., Humphrey, J. A. C, Wastl, U., Halbritter, J. and Brittinger, W. (1995) «Dynamics of Arthropod Filiform Hairs. III. Flow Patterns Related to Air Movement Detection in a Spider (*Cupiennius Salei* Keys.)», *Phil. Trans. Royal Soc. London B*, **347**, 397–412.
11. Goepfert, M. C, Briegel, H. and Robert, D. (1999) «Mosquito Hearing: Sound-Induced Antennal Vibrations in Male and Female *Aedes Aegypti*», *J. Exp. Biol.*, **202**, 2727–2738.
12. Wigglesworth, V. B. (1965) *The Principles of Insect Physiology*, 6th edition, Methuen.
13. Skordos, A., Chan, P. H., Vincent, J. F. V. and Jeronimidis, G. «A Novel Strain Sensor Based on the Campaniform Sensillum of Insects», *Phil. Trans. Royal Soc. London A* (to appear).
14. Schmitz, H. and Bleckmann, H. (1997) «Fine Structure and Physiology of the Infrared Receptor of Beetles of the Genus *Melanophila* (Coleoptera, Buprestidae)», *Int. J. Insect Morphol. & Embryol.*, **26**, 205–215.
15. Barth, F. G., Ficker, E. and Federle, H.-E. (1984) «Model Studies on the Mechanical Significance of Grouping in Compound Spider Slit Sensilla (Chelicerata, Araneida)», *Zoomorphol.*, **104**, 204–215.
16. Barth, F. G. and Pickelmann, P. (1975) «Lyriform Slit Sense Organs Modelling an Arthropod Mechanoreceptor», *J. Comparative Physiol*, **103**, 39–54.

17. Vondran, T., Apel, K. H. and Schmitz, H. (1995) «The Infrared Receptor of *Melanophila Acuminata* Degeer (Coleoptera, Buprestidae) – Ultrastructural Study of a Unique Insect Thermoreceptor and its Possible Descent from a Hair Mechanoreceptor», *Tissue & Cell*, **27**, 645–658.
18. Paulin, M. G. (1995) «Electroreception and the Compass Sense of Sharks», *J. Theor. Biol.*, **174**, 325–339.
19. Assad, C., Rasnow, B. and Stoddard, P. K. (1999) «Electric Organ Discharges and Electric Images During Electrolocation», *J. Exp. Biol.*, **202**, 1185–1193.
20. von der Emde, G. (1999) «Active Electrolocation of Objects in Weakly Electric Fish», *J. Exp. Biol.*, **202**, 1205–1215.
21. Campbell, A. L., Bunning, T. J., Stone, M. O., Church, D. and Grace, M. S. (1999) «Surface Ultrastructure of Pit Organ, Spectacle, and Non-Pit Organ Epidermis of Infrared Imaging Boid Snakes: A Scanning Probe and Scanning Electron Microscopy Study», *J. Struct. Biol.*, **126**, 105–120.
22. Purslow, P. P., Bigi, A., Ripamonte, A. and Roveri, N. (1984) «Collagen Fibre Reorientation Around a Crack in Biaxially Stretched Aortic Media», *Int. J. Biological Macromolecules*, **6**, 21–25.
23. Mai, Y.-M. and Atkins, A. G. (1989) «Further Comments on J-Shaped Stress-Strain Curves and the Crack Resistance of Biological Materials», *J. Phys. D*, **22**, 48–54.
24. Wootton, R. J. (1981) «Support and Deformability in Insect Wings», *J. Zoological Soc. London*, **193**, 447–468.
25. Haas, F. (1994) *Geometry and Mechanics of Hind-Wing Folding in Dermaptera and Coleoptera*, MSc thesis, University of Exeter, Exeter, UK.
26. Darwin, C. (1877) *The Various Contrivances by which Orchids are Fertilised by Insects*, John Murray.
27. Donald, A. M. and Windle, A. H. (1992) *Liquid Crystalline Polymers*, Cambridge University Press.
28. Arridge, R. G. C. and Folkes, M. J. (1972) «The Mechanical Properties of a «Single Crystal» of SBS Copolymer – A Novel Composite Material», *J. Phys. D*, **5**, 344–358.
29. Neville, A. C. (1993) *Biology of Fibrous Composites: Development Beyond the Cell Membrane*, Cambridge University Press.
30. Reynolds, S. E. (1975) «The Mechanical Properties of the Abdominal Cuticle of *Rhodnius* Larvae», *J. Exp. Biol.*, **62**, 69–80.
31. Hillerton, J. E. (1979) «Changes in the Mechanical Properties of the Extensible Cuticle of *Rhodnius* through the Fifth Larval Instar», *J. Insect Physiol.*, **25**, 73–77.
32. Urry, D. W. (1995) «Elastic Biomolecular Machines», *Scientific American*, Jan. 1995, 44–49.
33. Knight, D. P., Feng, D., Stewart, M. and King, E. (1993) «Changes in Macromolecular Organization in Collagen Assemblies During Secretion in the Nidamental Gland and Formation of the Egg Capsule Wall in the Dogfish *Scyliorhinus Canicida*», *Phil. Trans. Royal Soc. London B*, **341**, 419–436.
34. Knight, D. P. and Vollrath, F. (1999) «Liquid Crystals and Flow Elongation in a Spider's Silk Production Line», *Proc. Royal Soc. London B*, **266**, 519–523.
35. Neville, A. C. (1975) *Biology of Arthropod Cuticle*, Springer.

Заявки на книги присылайте по адресу:
125319 Москва, а/я 594
Издательство «Техносфера»
e-mail: knigi@technosfera.ru
sales@technosfera.ru
факс: (095) 956 33 46

В заявке обязательно указывайте
свой почтовый адрес!

Подробная информация о книгах на сайте
<http://www.technosfera.ru>

К. Уорден
Новые интеллектуальные материалы и конструкции.
Свойства и применение

Компьютерная верстка – В.В. Павлова
Корректор – О.Ч. Кохановская
Дизайн книжных серий – С.Ю. Биричев
Ответственный за выпуск – Л.Ф. Соловейчик

Формат 60x90/16. Печать офсетная
Гарнитура Ньютон
Печ. л. 14. Тираж 2000 экз. Зак. № 205
Бумага офсет № 1, плотность 65 г/м²

Издательство «Техносфера»
Москва, Лубянский проезд, дом 27/1

Диапозитивы изготовлены ООО «Европолиграфик»
Отпечатано в ООО «Чебоксарская типография № 1»,
428019, г. Чебоксары, пр. И. Яковлева, 15



Датчики

для экстремальных условий эксплуатации

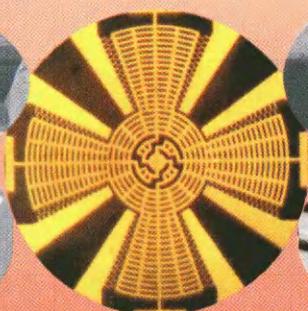
Высокотемпературные алмазоподобные материалы:

- карбид кремния
- нитрид алюминия
- нитриды бора и титана
- алмазоподобный углерод

Высокие температуры
Агрессивные среды
Радиация

Микро- и наноразмерные чувствительные элементы:

- мембраны
- маятники
- струны



- Ширина запрещенной зоны > 3 эВ
- Температура Дебая > 1000 К

Давление
Температура
Ускорение
Вибрация

- Толщина до 40 нм
- Размерный фактор > 1/1000
- Чувствительность до 50 нм/Па

Электрический высокотемпературный:

- рабочая температура до 200 °С
- измеряемое напряжение: -50 + 50 мВ
- измеряемый ток: -2.5 + 2.5 мА

Вторичные преобразователи

Оптический высокочувствительный:

- отношение сигнал / шум не хуже 70 дБ
- энергопотребление менее 1Вт



ЦЕНТР МИКРОТЕХНОЛОГИИ И ДИАГНОСТИКИ

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет

197376, г. Санкт-Петербург, ул. проф. Попова, д. 5
Тел.: (812)234-27-57 Тел./Факс: (812)234-16-82
e-mail: emid@eltech.ru



мир материалов и технологий

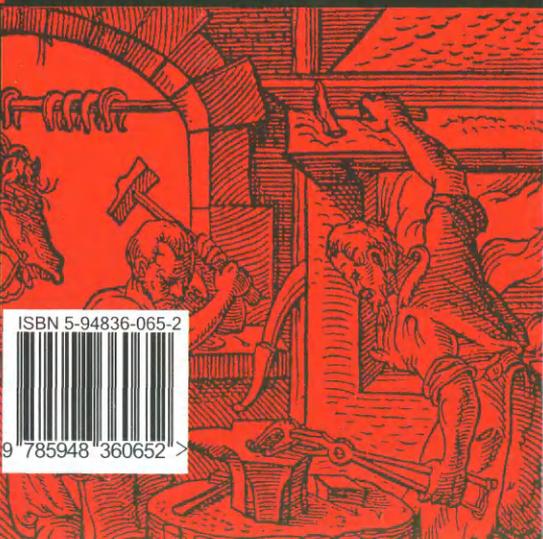
К. УОРДЕН

Новые интеллектуальные материалы и конструкции



НАУЧНЫЙ РЕДАКТОР ПЕРЕВОДА
С.Л. БАЖЕНОВ – Д.Ф.–М.Н.,
ЗАВ. ЛАБОРАТОРИЕЙ ИСПМ РАН,
ПРОФЕССОР МПГУ,
АВТОР БОЛЕЕ 80 НАУЧНЫХ РАБОТ

ПЕРВАЯ КНИГА
НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ
ПО КОНСТРУКЦИЯМ,
РЕАГИРУЮЩИМ
НА ИЗМЕНЕНИЯ
ВНЕШНИХ УСЛОВИЙ



ISBN 5-94836-065-2



9 785948 360652 >



ТЕХНОСФЕРА