

Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной физики
Российской академии наук
Институт проблем машиностроения РАН

В. И. Ерофеев, И. С. Павлов

СТРУКТУРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТАМАТЕРИАЛОВ

Нижний Новгород
ИПФ РАН
2019

УДК 539.3:534.22
ББК 22.251в6
Е78

Издано по решению редакционно-издательского совета
ФИЦ Институт прикладной физики РАН

Рецензенты:

доктор физико-математических наук, профессор *А. Н. Морозов*,
доктор физико-математических наук, профессор *В. М. Садовский*

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 18-29-10073-мк и 19-08-00965-а)

Ерофеев, Владимир Иванович.

Е78 Структурное моделирование метаматериалов : [монография] / В. И. Ерофеев, И. С. Павлов ; Федер. исслед. центр Ин-т приклад. физики РАН, Ин-т проблем машиностроения РАН. — Нижний Новгород : ИПФ РАН, 2019. — 196 с.

ISBN 978-5-8048-0098-8

В данной монографии развиваются теоретические основы метода структурного моделирования применительно к метаматериалам. Этот метод учитывает параметры кристаллической решетки, размеры частиц среды, их форму и константы силовых взаимодействий между ними и поэтому является наиболее подходящим для изучения влияния размерных эффектов на физико-механические свойства материала. Построенные математические модели метаматериалов позволяют не только получить представление о качественном влиянии локальной структуры на эффективные модули упругости соответствующей среды, но и проводить количественные оценки этих величин. Результаты исследования могут найти применение при проектировании перспективных метаматериалов с заранее заданными физико-механическими свойствами.

Издание предназначено для специалистов, работающих в области механики деформируемого твердого тела, физической акустики и физики конденсированного состояния, а также для студентов вузов и аспирантов, изучающих методы математического моделирования.

УДК 539.3:534.22
ББК 22.251в6

ISBN 978-5-8048-0098-8

© Ерофеев В. И., Павлов И. С., 2019
© ИПФ РАН, 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

<i>Предисловие</i>	3
Введение.....	5
Глава 1. Теоретические основы метода структурного моделирования	9
1.1. Обзор литературы.....	9
1.1.1. Дискретные модели сред без учета микровращений.....	9
1.1.2. Континуальные модели сред с вращательными степенями свободы частиц	12
1.1.3. Экспериментальные исследования динамических свойств сред с микроструктурой.....	15
1.2. Способы описания различных масштабных уровней	17
1.3. Границы применимости законов классической механики к моделированию обобщенных континуумов.....	22
1.3.1. Квантовое и классическое описание микрочастиц.....	22
1.3.2. Соотношение неопределенности	24
1.3.3. Микрочастица как локализованный волновой пакет	25
1.3.4. Принцип соответствия	27
1.4. Принципы структурного моделирования.....	29
1.5. Резюме	35
Глава 2. Двумерная решетка с плотной упаковкой частиц	36
2.1. Дискретная модель среды с гексагональной симметрией	36
2.2. Континуальное приближение.....	40
2.3. Влияние микроструктуры на акустические свойства среды	42
2.4. Дисперсионные свойства нормальных волн	44
2.4.1. Дисперсионные свойства дискретной модели	44
2.4.2. Дисперсионные свойства континуальной модели.....	49
2.5. Резюме	52
Глава 3. Двумерная решетка с неплотной упаковкой частиц	54
3.1. Дискретная модель анизотропной среды из эллипсоидных частиц	54
3.2. Континуальное приближение.....	58

3.2.1. Зависимость анизотропии среды от микроструктуры.....	59
3.2.2. Квадратная решетка из круглых частиц.....	62
3.2.3. Цепочка из частиц эллипсоидной формы.....	63
3.3. Влияние микроструктуры на акустические свойства среды	63
3.3.1. Зависимость скоростей упругих и ротационных волн от формы частиц в случае одномерной решетки.....	64
3.3.2. Зависимость акустических характеристик двумерной анизотропной среды от параметров микроструктуры.....	65
3.4. Дисперсионные свойства нормальных волн.....	67
3.4.1. Дисперсионные свойства дискретной модели.....	67
3.4.2. Дисперсионные свойства континуальной модели.....	75
3.5. Резюме.....	77
Глава 4. Применение двумерных моделей сред с плотной и неплотной упаковками частиц для решения задач параметрической идентификации	79
4.1. Редуцированные (градиентные) модели теории упругости.....	79
4.2. Задачи идентификации материалов.....	82
4.2.1. Идентификация среды с гексагональной симметрией.....	83
4.2.2. Идентификация среды с кубической симметрией.....	87
4.3. Сопоставление с континуальной теорией Коссера	92
4.4. Влияние микроструктуры материала на коэффициент Пуассона изотропной среды.....	94
4.5. Влияние микроструктуры материала на коэффициенты Пуассона анизотропной среды.....	98
4.6. Резюме.....	102
Глава 5. Нелинейные модели сред с микроструктурой.....	104
5.1. Прямоугольная решетка из эллипсоидных частиц.....	104
5.2. Оценка коэффициентов нелинейностей математической модели квадратной решетки из круглых частиц.....	109
5.3. Квадратная решетка из нанотрубок.....	114
5.3.1. Дискретная модель.....	114
5.3.2. Континуальное приближение.....	117
5.3.3. Взаимосвязь между макромодулями материала и параметрами его внутренней структуры.....	118
5.4. Однослойная среда из сферических частиц.....	120
5.4.1. Дискретная модель.....	121
5.4.2. Континуальное приближение.....	124

5.4.3. Зависимость макропараметров среды от параметров ее микроструктуры	125
5.5. Резюме.....	128
Глава 6. Распространение и взаимодействие нелинейных волн в обобщенных континуумах	130
6.1. Локализованные волны деформации в двумерной кристаллической среде с неплотной упаковкой частиц.....	130
6.2. Одномерная среда из эллипсоидных частиц с предварительными напряжениями.....	136
6.2.1. Механическая модель одномерной среды с предварительными напряжениями.....	136
6.2.2. Уравнения градиентной теории упругости для одномерной среды с внутренними напряжениями	140
6.3. Самомодуляция сдвиговых волн деформации, распространяющихся в одномерной зернистой среде.....	141
6.3.1. Области модуляционной неустойчивости.....	142
6.3.2. Вид волновых пакетов в случае модуляционной неустойчивости.....	144
6.4. Нелинейные продольные волны в стержне из анизотропного материала	147
6.4.1. Линейная математическая модель. Дисперсионные свойства.....	148
6.4.2. Нелинейная математическая модель. Стационарные волны деформации.....	150
6.4.3. Численное моделирование взаимодействия солитонов.....	157
6.5. Резюме.....	161
Заключение	163
<i>Литература.....</i>	<i>169</i>
<i>Приложения.....</i>	<i>190</i>