

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Сибирский федеральный университет

**А. М. Капитонов, В. Е. Редькин**

**ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ  
УПРУГИЕ СВОЙСТВА**

Монография

Красноярск  
СФУ  
2013

УДК 620.22:539.31  
ББК 34.22  
К202

Р е ц е н з е н т ы: Г. И. Фролов, д-р физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник Института физики им. Киренского СО РАН;

Г. Г. Крушенко, д-р тех. наук, профессор, главный научный сотрудник Института вычислительного моделирования СО РАН

**Капитонов, А. М.**

К202      Физико-механические свойства композиционных материалов. Упругие свойства : монография / А. М. Капитонов, В. Е. Редькин. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2013. – 532 с.  
ISBN 978-5-7638-2750-7

Монография посвящена изучению упругих свойств композиционных материалов (КМ). Сформулированы методологические принципы изучения физико-механических свойств твердых тел со сложной внутренней структурой. Представлена классификация КМ, в основу которой положен принцип иерархии системы «твердое тело». С единых позиций систематизированы упругие свойства КМ, принадлежащих разным структурным уровням системы «твердое тело».

Приводится сводка данных об упругих свойствах КМ. Предложен принцип предельных значений физико-механических характеристик КМ. Установлена иерархия структурной чувствительности физико-механических характеристик КМ. Проведен анализ существующих методов расчета упругих характеристик изотропных и анизотропных КМ. Большое внимание уделено анализу точности определения упругих характеристик КМ.

Монография предназначена для научных сотрудников и аспирантов, специализирующихся на изучении физики твердого тела, материаловедения, а также технологов и инженеров производства композиционных материалов.

УДК 620.22: 539.3  
ББК 34.22

ISBN 978-5-7638-2750-7

© Сибирский федеральный университет, 2013

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	9
<i>Глава 1. КЛАССИФИКАЦИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПРИНЦИПЫ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА К ИЗУЧЕНИЮ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ.....</i>	11
1.1. Основные определения и классификация.....	11
1.2. Применение системного анализа к изучению физико-механических свойств.....	21
1.2.1. Принцип иерархии.....	23
1.2.2. Элемент, элементарная ячейка, структура.....	25
1.2.3. Изменение физических свойств при ранговом переходе в системе композиционные материалы	30
<i>Глава 2. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ ТЕЛ.....</i>	33
2.1. Общие сведения о диаграммах «напряжение – деформация» композиционных материалов.....	33
2.1.1. Упруго-пластические мягкие материалы.....	35
2.1.2. Сверхпластичные материалы.....	41
2.1.3. Упруго-пластические жесткие материалы: инструментальные стали.....	42
2.1.4. Конструкционные материалы с особыми механическими свойствам: мартенситное состояние.....	44
2.1.5. Магнитоупорядоченные конструкционные материалы.....	60
2.1.6. Природные композиционные материалы: горные породы.....	64
2.1.7. Материалы с композиционной структурой.....	67
2.1.8. Эластичные материалы: резины.....	74
2.2. Обобщение данных по диаграммам «напряжение – деформация» композиционных материалов.....	75
2.3. Поведение материалов при разных видах нагружения	78

2.4. Классификация механических характеристик.....	79
2.4.1. Механические состояния.....	79
2.4.2. Прочностные и деформационные показатели.....	81
2.4.3. Упругие показатели композиционных материалов	88
2.5. Упругие свойства композиционных материалов с ориентационной недетерминированностью: однофазные поликристаллы.....	102
2.6. Упругие свойства композиционных материалов с ориентационной и вещественной недетерминированностью: многофазные поликристаллы	108
2.6.1. Эффективные упругие характеристики.....	110
2.6.2. Выражение эффективных упругих постоянных через коэффициенты концентрации средних напряжений и деформаций.....	111
2.6.3. Расчет упругих модулей полимеров, армированных наноалмазами.....	120
2.6.4. Расчет упругих модулей композиционных материалов с высокой твердостью.....	124
2.7. Влияние вещественной анизотропии на упругие характеристики композиционных материалов.....	128
2.8. «Неупругость» композиционных материалов.....	134
2.8.1. Определение «неупругости».....	135
2.8.2. Квазистатические функции отклика.....	137
2.8.3. Основные динамические функции отклика.....	141
2.8.4. Определяющие соотношения между динамическими деформациями и напряжениями	143
2.8.5. Динамические свойства стандартного неупругого тела.....	146
2.8.6. Динамические свойства стандартного неупругого тела при изменении температуры.....	149
2.9. Назначение упругих постоянных.....	150
2.9.1. Применение упругих характеристик материалов для определения технологических параметров надежности деталей из них.....	152
2.9.2. Изучение методом динамической упругости пластических свойств поликристаллов.....	155
2.9.3. Применение метода динамической упругости для контроля качества композиционных материалов	163
2.10. Методы изучения упругих свойств композиционных материалов.....	164
2.10.1. Статические методы.....	164
2.10.2. Динамические методы.....	166

<b>Глава 3. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ СИСТЕМЫ ЖЕЛЕЗО – УГЛЕРОД: ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ УГЛЕРОДИСТЫЕ СТАЛИ.....</b>	<b>182</b>
3.1. Фазовая диаграмма сплавов системы «железо – углерод».....	184
3.2. Фазовый состав и структура сталей при термической обработке.....	188
3.2.1. Фазовые составляющие стали.....	189
3.2.2. Структуры сталей.....	196
3.3. Изменение фазового состава и структуры стали при термообработке.....	200
3.4. Физическое состояние инструмента при эксплуатации	203
3.5. Поведение стали при разных видах нагружения.....	205
3.6. Прочностные и деформационные характеристики углеродистых инструментальных сталей.....	206
3.6.1. Твердость инструментальных сталей.....	207
3.6.2. Предел упругости.....	214
3.6.3. Предел прочности на сжатие.....	215
3.6.4. Предел текучести при сжатии.....	216
3.6.5. Предел прочности при изгибе.....	217
3.6.6. Предел прочности при растяжении.....	223
3.6.7. Прочность при кручении.....	224
3.6.8. Динамические испытания. Вязкость сталей.....	225
3.7. Упругие свойства фазовых составляющих сталей.....	228
3.7.1. Методологический подход при изучении упругих свойств сталей.....	229
3.7.2. Плотность углеродистых сталей.....	232
3.7.3. Упругие постоянные кристаллических фаз сталей	235
3.8. Упругие свойства сталей: анализ литературных данных	259
3.8.1. Влияние аустенита на упругие свойства ферритовых сталей: расчет.....	265
3.8.2. Экспериментальные исследования влияния термообработки на упругие постоянные сталей...	268
3.8.3. Влияние цементита на упругие свойства инструментальных сталей: расчет.....	271
3.9. Применение метода динамической упругости для контроля качества изделий из инструментальных сталей.....	283
3.9.1. Физические основы метода.....	284
3.9.2. Влияние термической обработки на скорость ультразвука в сталях.....	284

<b>Глава 4. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА</b>	
<b>ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ</b>	
<b>МАТЕРИАЛОВ: БЫСТРОРЕЖУЩИЕ</b>	
<b>ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СТАЛИ.....</b>	<b>289</b>
4.1. Диаграмма вольфрамовых теплостойких сталей.....	290
4.2. Карбиды быстрорежущих сталей.....	291
4.3. Основные фазы вольфрамовых сталей	
при термообработке и влияние их на физические свойства	295
4.3.1. Отжиг.....	296
4.3.2. Закалка.....	297
4.3.3. Отпуск.....	300
4.4. Плотность теплостойких сталей.....	305
4.5. Структура стали.....	308
4.6. Упругие свойства сталей.....	308
4.6.1. Зависимость упругих постоянных сталей	
от фазового состава.....	309
4.6.2. Экспериментальные исследования	
упругих свойств теплостойких сталей.....	320
 <b>Глава 5. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ</b>	
<b>МАТЕРИАЛОВ ВТОРОГО РАНГОВОГО УРОВНЯ:</b>	
<b>ТВЕРДЫЕ СПЛАВЫ.....</b>	<b>329</b>
5.1. Твердые сплавы системы карбид вольфрама – кобальт	330
5.1.1. Фазовый состав и структура сплавов.....	331
5.1.2. Методологические принципы изучения	
механических свойств твердых сплавов.....	337
5.1.3. Форма представления зависимости состав –	
физические свойства твердых сплавов.....	339
5.1.4. Общие положения изучения	
физико-механических свойств твердых сплавов	342
5.1.5. Предельное значение плотности твердых сплавов	344
5.1.6. Упругие свойства.....	345
5.1.7. Предел упругости и предел текучести.....	346
5.1.8. Прочностные показатели.....	348
5.1.9. Предельные значения упругих характеристик	
композиционных материалов.....	353
5.1.10. Упругие модули сплавов системы	
вольфрама – кобальт: расчет.....	355
5.1.11. Влияние структурных дефектов	
(пор и микротрещин) на упругие модули	
композиционных материалов.....	362

5.1.12. Упругие свойства сплавов системы карбид вольфрама – кобальт, полученных методом горячего прессования с использованием плазмoeлектролитного нагрева	366
5.1.13. Методологические принципы установления корреляционных связей между физико-механическими характеристиками твердых сплавов.....	382
5.2. Упругие свойства безвольфрамовых твердых сплавов	384
5.2.1. Упругие свойства фазовых составляющих.....	385
5.2.2. Теоретические и экспериментальные исследования упругих свойств.....	387
<b>Глава 6. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, СОДЕРЖАЩИХ НАНОПОРОШКИ.....</b>	<b>399</b>
6.1. Композиционные материалы системы алюминий – ультродисперсный алмаз.....	400
6.2. Полимерные композиционные материалы на основе эпоксидных смол.....	402
6.3. Исследование механических свойств эластичных материалов квазистатическим методом.....	409
6.3.1. Общая характеристика механических свойств резин.....	410
6.3.2. Температурная зависимость комплексного упругого модуля резин.....	413
6.4. Температурная зависимость комплексного упругого модуля композиционных материалов с использованием древесины.....	421
<b>Глава 7. УПРУГИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ВОЛОКНИСТОЙ СТРУКТУРОЙ.....</b>	<b>424</b>
7.1. Состав и основные свойства волокнистых композитов	425
7.2. Симметрия и упругие свойства волокнистых композитов	438
7.2.1. Показатели упругих свойств волокнистых композитов.....	439
7.2.2. Теория расчета упругих постоянных волокнистых композитов.....	440
7.3. Расчет упругих постоянных композитов системы: эпоксидная смола + углеродные волокна.....	441
7.4. Расчет упругих постоянных композитов системы: алюминий – борные волокна.....	444

7.5. Экспериментальные исследования упругих свойств композитов системы: алюминий – борные волокна.....	448
<i>Глава 8. УПРУГИЕ СВОЙСТВА СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ.....</i>	<i>464</i>
8.1. Расчет упругих характеристик слоистых композиционных материалов.....	465
8.1.1. Упругие показатели.....	465
8.1.2. Методы расчета упругих постоянных.....	466
8.2. Применение метода динамической упругости для контроля качества слоистых композиционных материалов, приготовленных по раздельной технологии	468
8.3. Особенности определения упругих постоянных слоистых сред ультразвуковым методом.....	473
8.4. Экспериментальные исследования упругих свойств природных слоистых композиционных материалов.....	483
8.4.1. Структурно-вещественная характеристика горных пород.....	483
8.4.2. Горные породы с композиционной структурой...	488
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	500
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	505