

Р.Г. Петроченков

# КОМПОЗИТЫ НА МИНЕРАЛЬНЫХ ЗАПОЛНИТЕЛЯХ

Том 1

МЕХАНИКА  
СТРОИТЕЛЬНЫХ  
КОМПОЗИТОВ

*Допущено  
Учебно-методическим объединением  
вузов Российской Федерации по образованию  
в области горного дела в качестве учебного пособия  
для студентов вузов, обучающихся  
по специальности «Открытые горные работы»  
направления подготовки  
«Горное дело»*

**Высшее  
горное  
образование**



МОСКВА  
ИЗДАТЕЛЬСТВО МОСКОВСКОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА  
2005

УДК 622.02.2

ББК 33.1

П 30

*Экспертиза проведена Учебно-методическим объединением высших учебных заведений Российской Федерации по образованию в области горного дела (письмо № 51-124/6 от 27.09.2005)*

*Книга соответствует «Гигиеническим требованиям к изданиям книжным для взрослых. СанПиН 1.2.1253—03», утвержденным Главным государственным санитарным врачом России 30 марта 2003 г.*

**Рецензенты:**

- проф., д-р техн. наук *М.И. Щадов* (президент Международного горного конгресса);
- проф., д-р техн. наук *Л.Н. Кашипар* (кафедра Горного дела Российского университета дружбы народов)

**Петроченков Р.Г.**

П 30 Композиты на минеральных заполнителях: Учебное пособие для вузов: В 2 т. — М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2005. — Т.1. Механика строительных композитов. — 331 с.

ISBN 5-7418-0390-3 (в пер.)

Рассмотрены характеристики состава и строения естественных и искусственных строительных композитов. Дан анализ свойств составляющих композитов во внешних физических полях. Описаны концентрационные зависимости упругих свойств и коэффициентов температурного расширения естественных и искусственных строительных композитов со структурой типа статистических механических смесей. Приведены модели композитов типа сфера (включение) в сфере (матрица), а также комбинации из последовательно-параллельных схем. Получены выражения для расчета коэффициентов концентраций продольных и поперечных напряжений в составляющих композитов по этим моделям. Даны примеры расчетов комплекса физико-механических свойств горных пород, тяжелых, легких бетонов, полимербетонов и других композитов.

Для студентов вузов, обучающихся по специальности «Открытые горные работы» направления подготовки «Горное дело». Может быть полезна аспирантам, а также специалистам, занятым в строительной и горно-добывающей промышленности.

УДК 622.02.2

ББК 33.1

ISBN 5-7418-0390-3

© Р.Г. Петроченков, 2005

© Издательство МГГУ, 2005

© Дизайн книги.

Издательство МГГУ, 2005

## ВВЕДЕНИЕ

Естественные композиты (горные породы) и искусственные строительные композиты на их основе являются гетерогенными средами. Принципиальное отличие горных пород от искусственных строительных композитов (тяжелые, легкие бетоны, полимербетоны и др.) заключается в их естественном происхождении. Ближе всего по характеристикам структуры к строительным композитам относятся осадочные породы и в несколько меньшей степени — метаморфические горные породы. Строительные композиты на минеральных заполнителях, имея искусственное происхождение, формально в рамках физических теорий могут рассматриваться наряду с горными породами, в том числе и магматическими, и метаморфическими породами, если анизотропные минералы последних рассматривать в квазиизотропном приближении свойств минеральных составляющих. Далее для краткости будем называть горные породы и строительные композиты на их основе просто композитами, если при этом по тексту не требуется для разъяснения делать особые комментарии.

Данные по физическим свойствам строительных горных пород необходимы как на стадии проектирования горных предприятий, так и в период эксплуатации месторождений полезных ископаемых. При комплексном использовании сырья, в частности при вовлечении попутных пород в сферу производства строительных композиционных материалов, необходима оценка физических свойств горных пород, характеризующая их не только как объект разработки, но и в потребительском отношении [1—6]. То есть необходимо знать, как свойства строительных горных пород (заполнителей) скажутся на свойствах конечной продукции (изделий из бетона, полимербетона и других композиционных материалов). В настоящее время получение экспериментальных данных по физическим свойствам строительных горных пород представляет существенные трудности как в плане отбора проб, так и при проведении экспериментальных исследований на образцах пород. По-

этому желательно, чтобы они для указанных выше целей могли быть оценены расчетными методами по физическим свойствам минеральных составляющих горных пород и их объемным относительным содержаниям (т. е. по данным состава) и в то же время с учетом структурных особенностей пород (строения). Разработка и применение расчетных методов оценки физических свойств строительных горных пород по их минеральным составам тем более оправданны, так как геологами при разведке месторождений полезных ископаемых практически всегда определяется минеральный состав горных пород и полезных ископаемых, а также дается описание их структуры.

Теоретическое определение аддитивных свойств композитов не представляет существенных затруднений, так как они рассчитываются по формулам арифметического средневзвешенного [1, 3 и др.]. К тому же аддитивные свойства минеральных составляющих горных пород, а также связующих частей искусственных композитов хорошо изучены и представлены в соответствующей справочной литературе [2, 6 — 13 и др.]. Несколько сложнее обстоит дело с определением по данным состава неаддитивных свойств составляющих композитов, так как они чувствительны к их структуре и, кроме того, эти свойства составляющих композитов изучены гораздо в меньшей степени, чем аддитивные свойства [2, 6 — 9]. Поэтому при составлении справочной базы данных, например по свойствам минералов, требуется разбиение их на группы в соответствии с достоверностью определения геологами названий минералов или групп минералов в горных породах при геологических исследованиях месторождений полезных ископаемых. Это оправдано тем, что минеральный состав пород при геологической разведке месторождений полезных ископаемых вследствие их неоднородности определяется лишь приблизительно [14 — 17 и др.]. Неаддитивные свойства составляющих композитов удобно для расчетов иметь в квазиизотропном приближении свойств составляющих. Для горных пород они точно соответствуют свойствам мономинеральных поликристаллов. Неаддитивные свойства мономинеральных поликристаллов с хаотической ориентировкой зерен в агрегате минералов могут быть достаточно точно определены известными расчетными методами по свойствам анизотропных минералов (см., например, работы [11, 18—21 и др.]).

# ОГЛАВЛЕНИЕ

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ .....	5
КРАТКИЙ ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКИЙ СЛОВАРЬ .....	7
ВВЕДЕНИЕ .....	11
<i>Глава 1</i>	
<b><i>ХАРАКТЕРИСТИКИ СОСТАВА И СТРОЕНИЯ ЕСТЕСТВЕННЫХ И ИСКУССТВЕННЫХ КОМПОЗИТОВ</i></b> .....	17
1.1. Основные факторы, определяющие свойства композитов .....	19
1.2. Основные типы структур композитов .....	22
1.3. Характеристики состава композитов (относительные весовые и объемные содержания составляющих композитов) .....	27
1.4. Геометрические параметры пространственной микроструктуры композитов .....	30
1.5. Аддитивные физические свойства композитов .....	34
1.6. Линейные физические поля и «обобщенная проводимость» .....	37
1.7. Упругие характеристики изотропных твердых тел .....	41
1.7.1. Обобщенный закон Гука и взаимосвязи между статическими (изотермическими) упругими характеристиками изотропных твердых тел .....	41
1.7.2. Упругие динамические характеристики твердых тел .....	46
1.7.3. Взаимосвязи статических и динамических упругих характеристик .....	47
1.7.4. Оценка зависимостей деформационных свойств твердых тел от температуры и давления .....	48
1.7.5. Второй закон Грюнайзена для простых твердых тел .....	50
1.8. «Критические» параметры твердых тел .....	52
1.8.1. Обоснование применимости второй классической теории прочности для оценки прочностных свойств композитов и их составляющих .....	53
1.8.2. Соотношения между напряжениями и относительными деформациями на стадии разрушения хрупких изотропных тел при выполнимости второй классической теории прочности .....	58
1.8.3. Способ исследования прочностных свойств твердых тел в сложнапряженных состояниях .....	60
1.9. Сопоставление энергии разрушения твердых тел от механического воздействия (теоретическая прочность) и при плавлении .....	63

1.10. Косвенные методы оценки некоторых основных физических свойств квазиизотропных твердых тел (основных породообразующих минералов) ..... 67

1.11. Прогнозирование прочностных свойств минеральных составляющих горных пород по другим их физическим свойствам .....86

**Глава 2**

**СРЕДНИЕ ПРОДОЛЬНЫЕ И ПОПЕРЕЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ ЛИНЕЙНЫЕ И ОБЪЕМНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ В СОСТАВЛЯЮЩИХ КОМПОЗИТОВ** ..... 107

2.1. Аддитивность средних по зернам составляющих напряжений и относительных деформаций в композиционных материалах ..... 109

2.2. Закономерности распределения усредненных по зернам напряжений и относительных деформаций по составляющим двухкомпонентных композитов в случае равномерного объемного сжатия композитов ..... 113

2.3. Средние напряжения и линейные относительные деформации в составляющих двухкомпонентных композитов для различных случаев их напряженно-деформированного состояния ..... 116

    2.3.1. Неравномерное трехосное сжатие — растяжение композитов ..... 116

    2.3.2. Одноосное сжатие или растяжение ..... 120

    2.3.3. Одноосное сжатие композита при отсутствии его поперечных деформаций ..... 121

    2.3.4. Случай чистого сдвига композита ..... 122

    2.3.5. Плосконапряженное состояние композита ..... 123

    2.3.6. Соотношения «эффективных» и действительных значений модулей Юнга и коэффициентов Пуассона составляющих двухкомпонентного композита в случае его одноосного сжатия ..... 124

2.4. Температурные напряжения и относительные деформации в составляющих искусственных двухкомпонентных композитов ..... 125

    2.4.1. Свободное температурное расширение композитов ..... 125

    2.4.2. Случай отсутствия объемного расширения композита при его нагревании ..... 127

    2.4.3. Одновременные температурные и механические воздействия на композит ..... 129

2.5. «Флокутационные» напряжения и относительные деформации в составляющих двухкомпонентного композита при его всестороннем равномерном сжатии ..... 130

2.6. Внутренние остаточные напряжения в составляющих композитов ..... 132

2.6.1. Внутренние напряжения в минеральных составляющих пород в массиве вокруг скважины .....	133
2.6.2. Внутренние напряжения в минеральных составляющих пород, возникающие в них после взятия проб пород из массива .....	136
2.6.3. Внутренние остаточные (усадочные) напряжения в составляющих искусственных двухкомпонентных композитов .....	140
2.7. Метод определения «эффективных» упругих характеристик связующих частей композитов, необходимых для расчета внутренних усадочных напряжений в составляющих композитов .....	142
2.8. Энергии деформации составляющих в композите и композита в целом .....	146
2.8.1. Сравнение энергии деформации составляющих в двухкомпонентном композите и композита в целом при всестороннем объемном сжатии .....	146
2.8.2. Изменение внутренней энергии композита при его свободном температурном расширении .....	148

### **Глава 3**

<b>ДЕФОРМАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ИСКУССТВЕННЫХ КОМПОЗИТОВ И ГОРНЫХ ПОРОД С КВАЗИИЗОТРОПНЫМИ СОСТАВЛЯЮЩИМИ</b> .....	151
3.1. Установление зависимостей деформационных свойств композитов от их составов .....	153
3.2. Эмпирические и полуэмпирические зависимости упругих свойств композитов от их составов .....	159
3.2.1. Вывод зависимостей упругих свойств гетерогенных сред от составов по моделям из комбинаций последовательной и параллельной схем .....	159
3.2.2. Сравнение расчетных зависимостей упругих свойств двухкомпонентных композитов от составов по моделям из комбинаций последовательной и параллельной схем .....	168
3.3. Вывод зависимостей модулей объемной упругости и сдвига двухкомпонентных композитов от их составов при выполнении для них гипотезы о существовании упругого потенциала .....	177
3.3.1. Модуль объемной упругости композитов .....	177
3.3.2. Модуль сдвига композитов и коэффициенты концентраций относительных деформаций и напряжений в их составляющих .....	180
3.4. Зависимости коэффициентов концентраций относительных деформаций и напряжений в составляющих двухкомпонентных композитов от состава при выполнении гипотезы о существовании упругого потенциала .....	184

3.5. Метод расчета упругих свойств многокомпонентных гетерогенных сред с анизотропными составляющими по моделям из комбинаций последовательной и параллельной схем .....	195
3.6. Модули упругости многокомпонентных композитов и полиминеральных горных пород при выполнимости для них гипотезы о существовании упругого потенциала и метод расчета главных напряжений и относительных деформаций по их составляющим .....	197
3.7. Модули упругости двухкомпонентных композитов по модели сфера (включение) в сфере (матрица) .....	215
3.7.1. Модуль объемной упругости матричных композитов .....	215
3.7.2. Модуль сдвига матричных композитов .....	219
3.7.3. Приближенная оценка модуля сдвига матричных композитов .....	223
3.8. Анализ влияния степени матричности составляющих композитов на их упругие свойства и коэффициенты концентраций относительных деформаций и напряжений в составляющих .....	224
3.8.1. Упругие свойства матричных композитов переходных структур .....	224
3.8.2. Коэффициенты концентраций относительных деформаций и напряжений в составляющих композитов матричной структуры по модели сфера в сфере .....	226
3.8.3. Коэффициенты концентраций относительных деформаций и напряжений в составляющих матричных композитов переходных структур .....	232
3.9. Деформационные свойства насыщенных водой твердых тел по модели сфера (вода) в сфере (твердое тело) .....	235
3.9.1. Влияние полного водонасыщения порового пространства твердых тел на их упругие свойства .....	235
3.9.2. Влияние полного водонасыщения порового пространства твердых тел на коэффициенты концентраций относительных деформаций и напряжений в их составляющих .....	236
3.10. Деформационные свойства пористых твердых тел по модели сфера (воздух) в сфере (твердое тело) .....	237
3.10.1. Влияние пористости на упругие свойства твердых тел .....	237
3.10.2. Влияние пористости твердых тел на коэффициенты концентраций напряжений и относительных деформаций в их составляющих .....	239
3.10.3. Упругие свойства пористых твердых тел при линейной зависимости влияния на них степени матричности .....	240
3.11. Сравнение зависимостей упругих характеристик двухкомпонентных композитов от их составов по различным моделям композитов .....	242

3.12. Сравнение зависимостей коэффициентов концентраций напряжений и относительных деформаций в составляющих двухкомпонентных композитов от их составов по различным моделям композитов .....	250
3.13. Коэффициенты концентраций напряжений в составляющих многокомпонентных композитов при выполнении для них гипотезы о существовании упругого потенциала по различным моделям композитов .....	253
3.14. Коэффициенты концентраций напряжений и относительных деформаций в составляющей композита при малом ее объемном относительном содержании по различным моделям композитов .....	258

## **Глава 4**

<b>ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ДЕФОРМАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ И ГОРНЫХ ПОРОД С КВАЗИИЗОТРОПНЫМИ СОСТАВЛЯЮЩИМИ</b> .....	263
---	-----

4.1. Определение концентрационных зависимостей коэффициентов температурного расширения композитов .....	265
4.2. Некоторые частные случаи зависимостей коэффициентов температурного расширения композитов от их составов .....	266
4.3. Композиты со структурами матрица — включение (сфера в сфере) и переходного типа .....	274
4.4. Зависимости коэффициентов температурного расширения двухкомпонентных композитов от их составов при различных усредняющих функциях модуля объемной упругости .....	277
4.5. Сравнение расчетных и экспериментальных значений коэффициентов температурного линейного расширения композитов по различным моделям .....	279
4.6. Зависимости коэффициентов температурного расширения твердых тел от пористости .....	284
4.7. Коэффициенты температурного расширения многокомпонентных естественных и искусственных композитов .....	285
4.8. Температурные напряжения в составляющих композитов и коэффициент их термоупругости .....	290
4.8.1. Температурные напряжения в составляющих композита при его свободном температурном расширении .....	290
4.8.2. Коэффициенты термоупругости композитов .....	294
4.9. Энергия температурной деформации составляющих композитов при выполнении для них гипотезы о существовании упругого потенциала .....	297
4.10. Экспериментальные методы определения неоднородности напряженно-деформированного состояния композитов по	