

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента, доктора физико-математических наук, члена-корреспондента РАН Лисовенко Дмитрия Сергеевича на диссертацию Клементьева Петра Дмитриевича «Двухуровневый анализ некоторых типов композитов и метаматериалов», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела

### **Актуальность работы**

Вычисление эффективных механических свойств различных материалов с использованием расчетов на уровне структуры (мезоуровне) является актуальной задачей, потому что такой подход позволяет дополнить экспериментальные данные. Например, одной из актуальных задач является вычисление эффективных диаграмм напряжение – деформация композитных и пористых материалов, используя модели реальной структуры, полученные методом компьютерной томографии. Учет реальной геометрии внутренней структуры композитных и пористых материалов позволяет уточнить вычисляемые эффективные свойства. Также актуальной темой исследований является сравнение и применение алгоритмов прогрессирующего разрушения в рамках метода конечных элементов (МКЭ).

Актуальными являются теоретическое (например, при помощи метода асимптотического осреднения) и численное исследования неклассических свойств материалов с хиральной структурой (метаматериалов), позволяющие заменить экспериментальное изучение эффектов связности деформаций (растяжение/изгиб, растяжение/кручение) численным моделированием на мезоуровне. Таким образом, тема диссертационной работы является актуальной и практически важной.

### **Краткий анализ содержания работы**

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы из 187 наименований. Общий объем работы 147 страниц.

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы, формулируются ее цель и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методология и методы исследования, перечисляются положения, выносимые на защиту, достоверность и обоснованность результатов, приводятся сведения об апробации работы и о структуре диссертации, дается краткий обзор диссертационной работы по главам.

**В первой главе** описано применение варианта асимптотического метода осреднения для определения эффективных упругих модулей дисперсных композитов. Предполагается, что рассматриваемые материалы не обладают ячейкой периодичности, но обладают представительной областью. На примере композита  $B_4C/2024Al$  выполнено вычисление эффективных модулей упругости для двумерных и трехмерных структур. В расчетах использованы геометрические структуры, полученные при помощи оцифровки послойных изображений, сделанных рентгеновским томографом, и модельные эллипсоидальные структуры, созданные при помощи специализированного программного обеспечения. Выполнено сравнение результатов вычислений с экспериментальными данными. Исследованы концентрации напряжений в рассматриваемом композите, возникающие при статическом нагружении. Показано, что форма включений существенно влияет на величину концентраций. В следующей части приведена модификация классического определения эффективных модулей упругости и эффективных упруго-пластических диаграмм пористой среды. Модификация заключается в использовании заданных на границе деформаций вместо осредненных по объему представительной области. Для модельных пористых и композитных материалов изучено влияние сложного пути деформирования на вид осредненной диаграммы напряжение – деформация. Пути деформирования состояли из комбинаций объемного сжатия и сдвига. На основе результатов вычислений пористого материала с угловатыми порами выполнена идентификация параметров макромодели Друкера–Прагера.

**Вторая глава** посвящена вычислению осредненной диаграммы напряжение – деформация композита  $B_4C/2024Al$ . Для качественного приближения расчета к экспериментальным данным в работе исследуется учет поврежденности фаз композита при деформировании. Для этого выполнен сравнительный анализ вариантов алгоритма прогрессирующего разрушения. Рассматриваемые варианты: 1) подход, в котором деградация учитывается отдельно в каждой точке интегрирования конечного элемента, 2) вариант деградации свойств конечного элемента целиком, 3) деградации свойств материала в области фиксированного размера. Апробация алгоритмов проведена на модельных задачах. Показано, что варианты 2 и 3 могут быть применены для вычислений диаграмм композита  $B_4C/2024Al$ . Вариант алгоритма 2 применен для вычисления диаграмм напряжение – деформация композитного материала  $B_4C/2024Al$  с учетом как искусственно сгенерированной, так и реальной микроструктуры, полученной методом компьютерной томографии. Показано, что учет реальной геометрии включений и повреждения фаз композита является важным условием для качественного приближения расчетных диаграммы напряжение – деформация к экспериментальным данным.

**В третьей главе** теоретически и численно исследуются материалы с неклассическими свойствами: метаматериалы и двухслойные резинокордные образцы. Для теоретического исследования свойств связанности растяжение/изгиб, сжатие/кручение в метаматериалах в случае пластин и трехмерных тел применен метод асимптотического осреднения. Для трехмерных структур теоретически проанализирована и численно подтверждена зависимость коэффициентов связанности от параметра, обратно пропорционального количеству ячеек периодичности, для сред с периодическими в декартовой системе координат структурами. Для метаматериалов с периодической структурой в цилиндрической системе координат показана независимость связанности растяжения с кручением от размера структуры. Методами мезомоделирования исследованы размеры зон

краевых эффектов в резинокордном двухслойном композите. Определены характерные размеры зон их влияния и обоснована методика использования коротких образцов при механических испытаниях на одноосное растяжение.

**В заключении** сформулированы основные полученные результаты и общие выводы по диссертации.

**Автореферат** отражает основное содержание диссертации.

**Основные результаты диссертационной работы, полученные лично соискателем и обладающие новизной:**

1. Разница между вычисленными значениями модуля Юнга для трехмерных структур и экспериментальных значений составляет около 1%. Значения модуля Юнга для двумерных структур отличаются от экспериментальных не более, чем на 10%.
2. Структура с угловатыми порами обладает свойством зависимости осредненной диаграммы напряжение – деформация от пути деформирования и от величины объемной деформации на макроуровне. Макромодель Друкера – Прагера позволяет описать эти свойства с высокой точностью.
3. Вычисленная эффективная диаграмма напряжение – деформация композита  $B_4C/2024Al$  качественно приближена к экспериментальной благодаря учету поврежденности в реальной структуре фаз композита.
4. Теоретически и численно исследовано, что при стремлении малого параметра, обратно пропорционального числу ячеек периодичности, к нулю свойства связанности растяжение/изгиб, сжатие/кручение пропадают в метаматериалах.
5. Исследованы размеры зон краевого эффекта и допустимые размеры резинокордного образца. Показано, что короткие образцы могут быть использованы при условии пересчета продольных напряжений и деформации.

### **Достоверность научных положений, выносимых на защиту**

Достоверность результатов обоснована использованием строгих математических методов, классических методов механики деформируемого твердого тела, апробированной экспериментальной техники, проверенных численных методов и компьютерных программ. Достоверность подтверждается также совпадением результатов ряда численных расчетов с экспериментальными результатами.

### **Замечания по диссертации:**

1. В диссертации вводятся математические обозначения, которым не даются объяснения. Объяснения могут приводиться через несколько страниц.
2. В диссертации не дано понимание с помощью коммерческого пакета или самостоятельно написанными программами диссертантом проводились численные расчеты.
3. В главах 2 и 3 диссертации приводятся сведения об экспериментах. Но нет информации как готовились образцы, на каком оборудовании и при каких параметрах проводился эксперимент. Единственно приводится только в главе 3 на стр.105 фотография установки.
4. В автореферате вводятся математические обозначения, которым не дается объяснения.
5. В диссертации и автореферате присутствуют опечатки.

Указанные замечания имеют рекомендательный характер и не снижают научной ценности работы.

### **Заключение**

В заключение следует отметить, что диссертационная работа выполнена качественно и на высоком уровне, а указанные выше замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает

требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода.

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственным университетом имени М.В. Ломоносова, а также оформлена согласно требованиям Положения о Совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Клементьев Петр Дмитриевич заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела.

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук,  
член-корреспондент РАН,  
заведующий лабораторией  
Института проблем механики имени А.Ю. Ишлинского РАН

ЛИСОВЕНКО Дмитрий Сергеевич

08.06.2026

Контактные данные:

Тел.: +7(495)433-34-96; e-mail: lisovenk@ipmnet.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом  
защищена диссертация:

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Адрес места работы:

119526, г. Москва, просп. Вернадского, д. 101, корп. 1,  
Институт проблем механики имени А.Ю. Ишлинского РАН,  
Тел.: +7(495)434-00-17, e-mail: [ipm@ipmnet.ru](mailto:ipm@ipmnet.ru)