

**ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**  
доктора физико-математических наук, профессора  
Шоркина Владимира Сергеевича  
**на диссертационную работу Вильчевской Елены Никитичны**  
**«Построение моделей механики сплошных сред с учетом изменяющейся**  
**микроструктуры материала»,**  
представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по  
специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела.

Диссертация Елены Никитичны Вильчевской направлена на решение проблемы создания научно обоснованной методологии и построению на ее основе математических моделей твердых деформируемых сред с изменяющейся гетерогенной структурой моделируемого материала.

Автор диссертации опирается на представление о том, что частицы сплошной среды являются объединением микрочастиц. Его описание связывает между собой микро и мезо уровни. Так что движение и характеристики частиц сплошной среды выражаются через соответствующие характеристики микрочастиц, образующих дискретное множество, путем соответствующего осреднения. Сами частицы являются открытыми термодинамическими системами, их состояние и движение характеризуется в рамках пространственного описания, реализуемого для движущегося материала, попавшего в выбранный объем пространства.

В рамках диссертации осуществлена разработка ряда математических моделей деформируемых твердых тел, которые учитывают влияющие на прочность микроструктурные физико-химической особенности материалов и процессы их развития под влиянием внешних воздействий.

**Тема диссертации соответствует паспорту специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела.** Цель ее реализации соответствует одной из заявленных в паспорте целей механики деформируемого твердого тела – выявлению новых связей между структурой материалов, характером внешних воздействий и процессами деформирования и разрушения. Область предложенных в диссертации исследований входит в указанные в паспорте области:

1. теория деформируемых тел с простой и сложной структурой;
2. мезомеханика многоуровневых сред со структурой;
3. механика композиционных и интеллектуальных материалов и конструкций.

**Актуальность темы диссертации.** В настоящее время актуально создание функциональных материалов, обладающих специфическими свойствами, наличие которых поможет решить ряд проблем в целом спектре науки, техники, строительства и медицины. Разработка технологий их создания является наукоемким и в высокой степени трудозатратным процессом, требующим больших финансовых вложений и времени реализации. Решение проблемы высокоточного и однозначного теоретического предсказания свойств композиционных материалов, обусловленных их сложными микро и мезоструктурой, разнообразием свойств их элементов, является актуальным для успешного развития науки и техники.

Диссертация Е.Н. Вильчевской направлена на решение этой проблемы. Поэтому ее тема является актуальной.

**Степень разработанности темы исследования.** Актуальность математического моделирования наличия внутренней микроструктуры твердых материалов в рамках механики сплошного деформируемого твердого тела привела к появлению, особенно в последнее время большого количества работ в этом направлении. Их создание опирается на большое количество разнообразных методов и подходов, позволяющих в той или иной степени точности, адекватности и общности решить проблему моделирования влияния микро и мезоструктуры гетерогенного материала на его осредненные характеристики.

Автор диссертации как во введении к ней, так и при написании каждой из ее глав делает достаточно полный обзор работ, связанных с темой диссертации и с тематикой соответствующей главы.

В результате анализа литературных источников Е.Н. Вильчевская приходит к выводу о том, что, несмотря на большое количество публикаций и высокую разработанность темы моделирования материалов со сложной микро и мезоструктурой, существует ряд проблем, которые требуют дальнейшего исследования. Автор диссертации обращает внимание на целый ряд ситуаций, когда необходимы разработка новых и модификация существующих классических и неклассических подходов к созданию адекватных моделей и процессов в целом ряде ситуаций. Примером таких ситуаций являются те, в которых

- микропараметрами выбираются такие, которые однозначно связаны с эффективной характеристикой свойства сплошного материала;
- модель использует дополнительные параметры состояния, эволюция которых определяется независимыми от основных специальными балансовыми соотношениями;
- нарушается биективность между актуальной и отсчетной конфигурациями, возникает необходимость рассмотрения материальной частицы как открытой, а не замкнутой термодинамической системы.

**Целью диссертационной работы** ее автор выбирает разработку в рамках механики и термодинамики сплошных сред моделей деформируемых твердых тел с изменяющейся микроструктурой путем введения в рассмотрение дополнительных параметров состояния и источниковых членов.

Для достижения поставленной цели **автор решает ряд задач**, посвященных

- оценке эффективных свойств гетерогенных материалов через фиксированные параметры микроструктуры;
- моделированию структурных изменений материала в зависимости от внешних и внутренних процессов путем введения для этого параметров состояния и использования для их определения источниковых членов в балансовых соотношениях и эволюционных уравнений;
- разработке методов построения определяющих соотношений для источниковых членов с учетом микроструктурных изменений.

Как цель диссертации, так и решаемые для ее достижения задачи и иллюстрации на конкретных примерах подчинены необходимости научного обоснования и создания общей методологии моделирования происходящих в гетерогенных средах процессов с изменяющейся микроструктурой материала.

В диссертации использованы **теоретические методы исследования с привлечением имеющихся в литературе экспериментальных данных** для проверки полученных теоретических результатов. Используемые методы опираются на фундаментальные балансовые уравнения механики сплошных сред для массы, импульса, момента импульса и энергии, их математически строгое применение для построения актуальных моделей механики сплошных сред, в том числе с изменяющейся микроструктурой материала. Автор диссертации использует как свои, так и разработанные Петербургской школой методы и подходы математики и механики, в частности положение о том, что фундаментальные законы, которые применяются для описания изменяющейся микроструктуры материала, должны записываться для открытых систем.

**Объем и структура диссертационной работы.** Диссертация изложена на 300 страницах машинописного текста. Она состоит из введения, раздела с основными обозначениями, четырех глав, в которых изложено основное содержание диссертации, заключительной части, в которой сформулированы основные результаты диссертации, и списка используемой литературы, который содержит ссылки на 286 работ отечественных и зарубежных авторов. Проведенные рассуждения и полученные результаты иллюстрируются и 88 рисунком и данными 5 таблиц.

## **Краткий анализ содержания.**

Во введении описаны состояние исследований и степень проработанности темы диссертации, обоснована ее актуальность. Здесь же указана новизна результатов, отмечена их научная и практическая значимость, подчеркнута их достоверность, указано, где проведена их апробация. Во введении представлен перечень публикаций автора диссертации, в которых отражены ее основные результаты.

**Первая глава.** Для достижения цели диссертации, решения проблемы построения научно обоснованной методологии создания математических моделей твердых деформируемых сред с изменяющейся гетерогенной структурой моделируемого материала, прежде всего, необходимо решение задачи определения эффективных свойств гетерогенных материалов через параметры микроструктуры. Этому посвящена **первая глава** диссертации. Главным требованием к выбору микроструктурных параметров автор называет их способность представлять вклад отдельной неоднородности в соответствующее эффективное свойство. Это делается для обеспечения однозначности зависимости эффективных свойств от параметров микроструктуры. Вклад микро неоднородности в жесткость и податливость упругого материала оценен с помощью специальных тензоров вклада, выражаемых через тензоры Хилла, связанные с тензором Грина. Учет взаимного влияния микро неоднородностей осуществлялся при этом в соответствии со схемой осреднения Максвелла.

Построенная таким образом схема рассуждений, сделанная для оценки эффективных механических свойств упругого материала с включениями определенной формы, обобщена как на случай определения не механических характеристик материала, так и на случаи включений разной формы не только в изотропных, но и в анизотропных упругих материалах, а также в вязко - упругих материалах. Полученные результаты сравнивались с результатами решения тех же задач другими методами, а также результатами экспериментов. Соответствие удовлетворительное.

В конце главы сформулированы выводы о полученных результатах.

**Вторая глава.** Здесь автор диссертации описывает, как с помощью методов, опирающихся на понятие открытой системы, возможно моделирование структурных изменений в исследуемом материале. Среда считается гомогенной. Ее термодинамические свойства определяются одним и тем же определенным набором термодинамических параметров, которые связаны между собой балансовыми соотношениями, допускающими наличие источниковых членов. В рассматриваемой главе показано, что введение в модель одного, дополнительного к традиционному набору, параметра достаточно для описания фазового перехода в исследуемом материале. При классическом описании термодинамики сплошной среды считается, что внутренняя энергия ее произвольной частицы является аддитивной функцией ее массы. В работе предложено считать внутреннюю энергию аддитивной числу частиц (атомов, молекул) в том же объеме. В классике при отсутствии фазовых переходов и структурных изменений масса пропорциональна числу частиц. Поэтому обе функции зависят. При наличии фазового перехода, консолидации или распада частиц это не так, но традиционный способ Лагранжа описания континума уловить это не может. Автор диссертации в этой ситуации использует идею открытости рассматриваемой системы частиц (атомов или молекул) в выбранном объеме и в качестве дополнительного к традиционным термодинамическим параметрам принимает отношение плотности частиц к плотности массы. Для каждой фазы этот параметр постоянен и имеет свое значение. Критерием появления новой фазы является резкий переход параметра от одного значения к другому. Для вновь введенного параметра предложено балансовое соотношение, предусматривающее (с помощью распределенного источникового члена – скорости рождения или исчезновения частиц в данной точке) его изменение.

**Третья глава.** Глава посвящена моделированию локализованных структурных превращений. Здесь с позиций механики твердого тела рассмотрены материалы, структура которых в процессе нагружения меняется в следствие фазовых или химических

превращений, локализованных на границе раздела материалов с разными свойствами. Положение границы раздела является дополнительной степенью свободы, а ее продвижение определяется термодинамической (конфигурационной) силой.

Вторая глава это лишь пример того, как с помощью введения дополнительного к традиционным термодинамического параметра можно построить модель нетрадиционного для механики сплошных сред фазового превращения исследуемого материала. В третьей же главе представлена достаточно полная теория фазовых и химических превращений, развития в связи с этим гетерогенности структуры материала и ряда других эффектов, связанных с этим. Учитывается, что устойчивые границы раздела фаз возникают и существуют при определенных условиях, определяемых дополнительным термодинамическим условием, которое должно выполняться на границе фаз в дополнение к обычным кинематическому и силовому условиям непрерывности векторов перемещения и усилия.

**Четвертая глава** посвящена развитию теории микрополярных сред в рамках пространственного описания, когда все характеристики вводятся для среды, попавшей в выделенный объем пространства. Среда в этом объеме является открытой термодинамической системой.

Автор акцентирует внимание на том, что его представление о представительной частице сплошной среды существенно отличается от традиционного. При традиционном подходе представительная частица сплошной среды – это бесконечно малая частица, обладающая всеми свойствами среды, которые на основании интуитивных представлений о свойствах реального материала, представляющего собой дискретную систему микрочастиц, моделью которого является среда, вводятся аксиоматически. Эти свойства распределены по частице равномерно со значением, определенным в центре ее инерции. Эта бесконечно малая частица считается элементарной, далее неделимой структурной единицей сплошной среды.

В представлении автора диссертации эта частица обладает сложной структурой, хотя по-прежнему является представительной частицей сплошной среды. Предложенная структура допускает открытость частицы как термодинамической системы. Свойства макрочастиц определены через свойства заполняющих их объемы дискретного множества микрочастиц реального материала не интуитивно, а конкретными методами статистической механики и в общем случае не совпадают со свойствами, введенными традиционным способом. Предполагается, что кинематика микрочастиц характеризуется векторами скоростей поступательного и вращательного движений, вектором перемещений и тензором поворота определяются в результате решения соответствующих уравнений.

Отмечено, что предлагаемое пространственное описание позволяет моделировать процессы в твердых материалах с фазовыми переходами и химическими реакциями. Это описание учитывает как собственные деформации, возникающие при отсутствии фазовых переходов и химических реакций, так и деформации «превращения», вызванные этими переходами. При моделировании указанных процессов предложено отказаться от равенства используемого тензора инерции тензору инерции абсолютно твердого тела. Вместо традиционного уравнения сохранения для него используется балансовое соотношение с источниковым членом. Тогда изменение массовой плотности отсчетного тензора инерции характеризуется его начальным неравномерным распределением, трансляционным перемещением среды и, в дополнение к этому, ее структурными изменениями. Показано, что для учета влияния изменения тензора инерции на энергетические процессы необходимо ввести кроме энтропии дополнительные параметры состояния – след и девиатор тензора инерции, а также сопряженные им величины. При этом расширен смысл вектора теплового потока, обобщается уравнение энергии. Источниковый член задается исходя из физических соображений.

Используя изложенные представления, в четвертой главе решен ряд конкретных задач, иллюстрирующих отличие предложенной модели от традиционного описания микрополярных сред и ее особенности.

**В заключении** диссертации перечислены основные результаты, полученные в ходе её выполнения. Они состоят в следующем:

- Определены эффективные характеристики неоднородных материалов с неэллипсоидальными включениями, а также композитов с произвольно ориентированными сфероидальными включениями в трансверсально изотропной матрице.
- Получены зависимости эффективной текучести материала от формы включений и их распределения по ориентациям.
- Получены замещающие соотношения для гетерогенных упруго-вязких материалов, позволяющие определять эффективные свойства материала с вязко-упругими включениями через эффективные свойства пористого материала
- На основе фундаментальных законов механики разработана модель описания структурных изменений среды, с учетом изменяющейся плотности распределения числа частиц
  - Введен новый структурный параметр, характеризующий фазовое состояние материала, для которого сформулировано дополнительное балансовое соотношение с источниковым членом и предложено определяющее уравнение для источникового члена, моделирующее фазовый переход при изменении температуры
  - В пространстве деформаций построены области существования областей новой фазы, исследована их устойчивость и энергетическая предпочтительность
  - Получены зависимости концентрации, формы и ориентации включений новой фазы от внешних воздействий; определены эффективные модули гетерогенного материала с изменяющейся микроструктурой
  - Продемонстрировано влияние механических напряжений на ускорение, замедление и блокировку химической реакции; определено влияние знака и величины кривизны фронта реакции, типа граничных условий (жесткое или мягкое нагружение) и величины внутренних и внешних напряжений на скорость реакции
  - Предложен новый подход к построению моделей механики микрополярных сред с учетом источниковых членов, описывающих структурные изменения среды.
  - Разработана процедура определения инерционных и кинематических свойств элементарного объема при пространственном описании. Сформулировано и обосновано новое балансовое соотношение для тензора инерции с источниковым членом.
  - Предложена методика построения определяющего уравнения для источникового члена с учетом изменений в микроструктуре материала.
  - Решен ряд конкретных задач, демонстрирующих особенности предложенной модели по сравнению с классической теорией микрополярных сред.

**Достоверность полученных в диссертации результатов** подтверждается тем, что при их получении использованы хорошо апробированные строгие математические подходы и методы вариационного и тензорного исчислений, механики деформируемого твердого тела. Полученные в диссертации результаты основаны на точных аналитических решениях, не противоречат физическому смыслу. Их достоверность подтверждается также тем, что результаты других авторов, полученные в аналогичных ситуациях, вытекают из результатов диссертации в качестве частных случаев.

**Полученные результаты являются новыми.**

Новизна результатов подтверждена их **апробацией** при обсуждении на представительных конференциях и семинарах.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертации доложены и обсуждены на многочисленных международных конференциях и семинарах (список представлен в автореферате), а также опубликованы в 42 работах, в том числе 28 работ, входящих в базы Web of Science и SCOPUS.

**Полнота изложения материала.** Все основные результаты диссертации опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК России.

**Научная новизна** результатов диссертации состоит в научном обосновании методологии создания математических моделей твердых деформируемых сред с изменяющейся гетерогенной структурой моделируемого материала. Для этого разработан новый аналитический подход к учету микроструктуры материала в рамках механики и термодинамики континуума. На основе фундаментальных законов механики сплошных сред предложены методы моделирования в ее рамках структурных изменений в исследуемом материале, их влияния на напряженно-деформированное состояние твердых деформируемых материалов. На основе этих методов предложен ряд математических моделей, описывающих эти особенности, установлены критерии их проявления.

**Теоретическая значимость** диссертации состоит в обеспечении научно обоснованной методологии и создании ряда моделей для расширения класса явлений и процессов, моделируемых в рамках механики деформируемого твердого тела за счет включения в него моделирования структурных изменений в исследуемом материале, их влияния на напряженно-деформированное состояние и прочность.

**Практическая значимость результатов диссертации** состоит в возможности применения предложенных в диссертации моделей для качественного и количественного исследования производственных процессов, сопровождаемых структурными изменениями и химическими реакциями в обрабатываемых твердых материалах, в частности при создании композиционных материалов с заданными свойствами, термо-химической обработке металлов и их сплавов, их механической обработке, металлургии.

Все результаты, составляющие научную новизну и выносимые на защиту, **получены автором лично**. Автореферат диссертации содержит перечень работ, отражающий результаты, полученные лично автором и те, которые получены совместно с другими авторами.

**Язык** изложения материала в диссертации грамотный, понятный. Изложение логически стройно, последовательно.

**Автореферат** оформлен в соответствии с установленными требованиями и полностью отражает суть диссертационной работы. Основные результаты диссертационной работы получены лично автором.

#### **Замечания и недостатки**

1. Во введении к третьей главе было бы уместно отметить связь ее содержания с содержанием второй главы, их не противоречивость.
2. При описании структуры представительных частиц сплошной среды, вводя в рассмотрение представление о микро частицах было бы точнее сослаться не на пример с сыпучим материалом, а сделать допущение о том, что реальный материал моделируется дискретной системой частиц, характеризуемых рядом свойств, которые необходимо учесть в рассматриваемой ситуации. Например, частицы можно считать жесткими или деформируемыми гантелями. Тогда появятся дополнительные к рассматриваемым в диссертации кинематические характеристики. При этом представленные в диссертации методы позволяют описать и эти ситуации.
3. Введение характеристик макрочастиц сплошной среды через аналогичные характеристики микрочастиц похоже на аналогичный процесс введения термодинамических характеристик газовой среды через характеристики ее молекул. В газовой среде таким образом вводится скорость движения сплошной среды, ее плотность, тензор напряжений, а также температура.  
В работе температура вводится независимо от кинетической энергии микрочастиц. Введение вращательных степеней свободы приведет к появлению дополнительного слагаемого энергии микрочастицы. В теории газов это приводит к расширению понятия «температура».

Было бы уместно акцентировать внимание в четвертой главе на этих особенностях.  
Нет ли противоречия или неполноты описания сути явления в диссертации.

Перечисленные замечания не снижают ценности полученных автором диссертации результатов, их строгости, достоверности, научной и практической значимости. Их подчеркивание необходимо для повышения уровня понимания рецензируемой работы и ее результатов, носит рекомендательный характер.

### Заключение

Диссертация Вильчевской Елены Никитичны является соответствующей п. 9 Положения ВАК законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как решение научной проблемы, имеющей важное хозяйственное значение, новое научное направление, посвященное созданию научно обоснованной методологии и построению на ее основе математических моделей твердых деформируемых сред с изменяющейся гетерогенной структурой моделируемого материала.

Автореферат оформлен в соответствии с установленными требованиями и полностью отражает суть диссертационной работы. Основные результаты диссертационной работы получены лично автором.

Выше изложенное позволяет сделать вывод о том, что диссертационная работа на тему «Построение моделей механики сплошных сред с учетом изменяющейся микроструктуры материала» удовлетворяет всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней ВАК от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, Вильчевская Елена Никитична, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела.

#### Официальный оппонент

доктор физико-математических наук по специальности  
01.02.04 – механика деформируемого твердого тела,

профессор по кафедре «Физика»,

ведущий научный сотрудник профессор кафедры,

«Техническая физика и математика»

Федерального государственного бюджетного

образовательного учреждения высшего образования

«Орловский государственный университет им. И.С.

Тургенева»,

ул. Комсомольская д. 95.

Орловская область, г. Орел,

302026 Российская Федерация,

каф. «Техническая физика».

Контактный телефон: 8 (486) 2 41 98 44

Email: VShorkin@yandex.ru

«Подпись Владимира Сергеевича Шоркина заверяю»

проректор по научно-технологической деятельности и  
аттестации научных кадров

Федерального государственного бюджетного

образовательного учреждения высшего образования

«Орловский государственный университет им. И.С.

Тургенева»,

Шоркин  
Владимир  
Сергеевич

ss. 05.05.2018.



Радченко  
Сергей  
Юревич