

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

о диссертации 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

Актуальность темы диссертации.

Все более широкое распространение на практике получают новые высокопроизводительные материалы, исследованию микроструктуры которых в последнее время уделяется особое внимание. Под влиянием различных внешних возмущений могут происходить микроструктурные изменения материала, приводящие к перераспределению полей напряжений, развитию и блокированию пластических деформаций и процессов разрушения. Можно привести целый ряд процессов, в которых необходим учет взаимного влияния внешних воздействий и микроструктурных изменений. К ним относятся фазовые превращения в сплавах и сталях, в частности, в материалах с памятью формы, ориентационные превращения в полимерах, химические реакции, переходы в термотропных и лиотропных жидких кристаллах и многие другие. Несмотря на значительное число работ, посвященных построению различных моделей, учитывающих микроструктуру материалов, основное их внимание сосредоточено на введении дополнительных параметров с целью более полно и адекватно учесть реакцию материала на внешние возмущения. В связи с этим, тема диссертации, направленной на построение моделей механики сплошных сред с учетом изменяющейся микроструктуры материала, модификации традиционного представления о материальной частице как о неделимом твердом теле и рассмотрении ее как открытой системы, обменивающейся массой с окружающими частицами, учете дискретного строения вещества путем введения дополнительных параметров состояния, эволюция которых определяется балансовыми уравнениями с источниковыми членами, является, несомненно, актуальной.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 286 наименований, 88 рисунков, 5 таблиц и изложена на 300 страницах печатного текста.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Обоснование научных положений и выводов занимает значительное место в работе. Так, аргументируя тем, что в существующих моделях, учитывающих микроструктурные параметры, которые не меняются при внешних воздействиях, используется слишком идеализированная форма неоднородности, автор работы предлагает различные подходы к получению приближенных аналитических зависимостей для эффективных упругих свойств трансверсально-изотропного материала с произвольно ориентированными сфероидальными включениями, изотропного материала с вогнутыми включениями, а также эффективных свойств вязко-упругих гетерогенных сред, содержащих вязко-упругие частицы в форме сплюснутых эллипсоидов различной ориентации. Это позволило, в частности, установить микроструктурные параметры волокнистого композита с произвольным распределением трещин расслоения по ориентациям и обосновать эффективность предложенных моделей также при анализе эффективной электропроводимости материала с вогнутыми включениями-порами, эффективных свойств трансверсально-изотропного материала с произвольно ориентированными круговыми трещинами и вязкоупругих материа-

лов. Исчерпывающие выводы из проведенного анализа не вызывают сомнений и безусловно обоснованы.

Поскольку главной целью работы – разработка моделей механики сплошных сред с учетом изменяющейся микроструктуры материала, то совершенно естественно, что автор не ограничивается оценкой эффективных свойств гетерогенных материалов через фиксированные параметры структуры, а последовательно вводит в рассмотрение структурные превращения в материале и эволюцию микроструктурных параметров как от внешних, так и от внутренних термомеханических процессов. Вполне обоснован последующий более общий подход путем введения дополнительных параметров состояния, содержащих функции источника (источниковые члены) в балансовых соотношениях, и построения определяющих соотношений для источниковых членов с учетом микроструктурных изменений. На каждом этапе автор убедительно показывает необходимость поэтапного совершенствования моделей учета микроструктуры материала для оценки его свойств, приходя в конечном счете к описанию микроструктуры, способной изменять свои механические, физические, химические свойства, влияющие на эффективные свойства материала в целом. Работоспособность моделей, их реализуемость, обоснована демонстрацией примеров различных процессов, в частности, фазовое превращение цилиндрического включения в бесконечном теле и цилиндрическом теле, распространение плоского и сферического фронта химической реакции, разделяющего разные фазы материала, изменение температуры и угловой скорости частиц в образце, процесс измельчения гранулированного материала и др.

Достоверность и новизна научных положений, выводов и рекомендаций.

Достоверность результатов диссертации обусловлена математически выверенными и физически корректными и непротиворечивыми построениями моделей механики сплошных сред с изменяющейся микроструктурой материала, использованием строгих математических методов, надежных и проверенных численных алгоритмов, сопоставлением полученных аналитических и численных решений, которые в частных случаях совпадают с известными результатами других авторов.

Научные положения, выводы и рекомендации, изложенные в диссертации и основанные на корректной постановке рассмотренных проблем, построенных физически обоснованных моделей и результатах их применения, являются новыми.

Так, например, получены микроструктурные параметры волокнистого композита с произвольным распределением трещин по ориентациям, что не было сделано ни в одной из известных работ, и позволило оценить накопление повреждений в процессе гидротермального старения.

Впервые получены замещающие соотношения для вязкоупругих материалов, устанавливающие связь между свойствами пористого материала и тем же материалом с вязкоупругим наполнителем.

В отличие от классической термодинамики, в которой последовательные переходы из одного равновесного состояния в другое описываются при помощи уравнения уравнение Клаузиуса-Клапейрона, предложенная в работе модель фазового перехода, в которой плотность распределения частиц и плотность массы линейно связаны для каждой фазы вблизи температуры фазового перехода, позволяет описывать существенно неравновесные процессы.

Показано, что нет принципиальных различий результатов, полученных при разных подходах к исследованию эффекта запирания или ускорения химической реакции в осесимметричных и центрально симметричных задачах. Качественное совпадение подтверждает достоверность полученных результатов и правильность построенной в работе модели.

Принципиально новым в работе является представление макрочастицы в виде элементарного (репрезентативного) объема, содержащего множество частиц, которые перемещаются и вращаются независимо друг от друга. Тем самым, в отличие от классической теории микрополярных сред, тензор инерции элементарного объема играет роль дополнительной переменной, эволюция которой характеризует изменение микроструктуры материала. На примере температурной задачи показано, что предложенная в работе модель микрополярных сред приводит, в отличие от классической модели, к нелинейному профилю распределения угловой скорости термоупругих частиц по пространству.

Наиболее существенные научные результаты, полученные лично соискателем.

Наиболее существенными новыми результатами, принадлежащими лично автору диссертации, являются:

1. Определены эффективные характеристики неоднородных материалов с включениями, отличными от эллипсоидальных, а также композитов с произвольно ориентированными сфероидальными включениями в трансверсально изотропной матрице.
2. Разработан метод восстановления информации о накопленных в процессе гидротермального старения повреждений через эффективное сопротивление материала.
3. Получены зависимости эффективной текучести материала от формы включений и их распределения по ориентациям.
4. Получены замещающие соотношения для гетерогенных вязко-упругих материалов, позволяющие определять эффективные свойства материала с вязко-упругими включениями через эффективные свойства пористого материала.
5. Разработана модель описания структурных изменений среды при учете изменяющейся плотности распределения числа частиц.
6. Введен новый структурный параметр, характеризующий фазовое состояние материала, для которого сформулировано дополнительное балансовое уравнение, содержащее функцию источников (источниковый член).
7. Для источникового члена предложено определяющее уравнение, моделирующее фазовый переход при изменении температуры.
8. В пространстве деформаций построены области существования областей новой фазы, исследована их устойчивость и энергетическая предпочтительность.
9. Получены зависимости концентрации, формы и ориентации включений новой фазы от внешних воздействий и определены эффективные модули гетерогенного материала с изменяющейся микроструктурой.
10. Выявлено влияние механических напряжений на ускорение, замедление и блокировку химической реакции.
11. Установлено влияние знака и кривизны фронта реакции, типа граничных условий, внутренних и внешних напряжений на скорость реакции.
12. Предложен новый подход к построению моделей механики микрополярных сред, описывающих структурные изменения среды при учете источниковых членов.

13. Разработан способ определения инерционных и кинематических свойств элементарного объема при пространственном описании. Сформулировано и обосновано новое балансовое уравнение для тензора инерции с источниковым членом.
14. Предложен метод построения определяющего уравнения для источникового члена с учетом изменений микроструктуры материала.
15. При использовании построенной модели решен ряд конкретных задач, позволяющих обнаружить особые свойства структурных изменений и их влияние на макропараметры и поведение материала.

Замечания по работе.

1. Очень скромный перечень обозначений, в связи с чем возникают трудности при чтении работы.
2. На стр. 34 приводится формула (1.2.1) для коэффициента интенсивности теплового потока для трещины при заданном тепловом потоке на бесконечности. Из формулы следует, что этот коэффициент равен нулю при любом заданном тепловом потоке.
3. На рис. 1.11 приведены зависимости эффективной электропроводности катода от формы поры. Нет объяснений, почему теория и эксперимент достаточно хорошо согласуются при плотности пор $\phi = 0.3, 0.5$ и плохо – при $\phi = 0.4$?
4. Библиографические данные работы [188], на которую ссылается автор (например, на стр. 54), не соответствуют действительности.
5. На стр. 61 значения компонент тензора **В** выражены в (1.3.13) через упругие модули, обозначения которых не совпадают с обозначениями упругих констант дентина и песчаника, приведенных в таблице 1.4.
6. На стр. 71 приводятся асимптотические формулы для коэффициентов разложения тензора Хилла **Р** с главным членом разложения порядка γ^{-1} , где γ – геометрический параметр тонкого сплюснутого сфероида ($\gamma \ll 1$). Для некоторых коэффициентов в этих формулах сохранено слагаемое порядка γ^0 . Насколько это оправдано, и как отразится на результатах пренебрежение этим слагаемым.
7. На рисунках 2.1 и 2.2 (стр.100 и 109), а также в тексте на стр. 110, приводится отношение энтропии к плотности массы η / ρ , хотя подразумевается отношение плотности распределения частиц к плотности массы n / ρ .
8. На странице 153 дается ссылка на рис. 3.1.2, который под таким номером не существует.

Указанные замечания не умаляют значимости полученных результатов и не снижают общей положительной оценки работы. Диссертация составляет законченную научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение. Полученные в ней новые и оригинальные результаты представляют большой практический и теоретический интерес и могут служить богатым методическим материалом для научных и инженерно-технических работников, а также в учебном процессе в ВУЗах.

Основное содержание диссертации изложено в 42 работах автора, из которых 28 в изданиях, входящих в международные базы данных Web of Science и Scopus, и полно отражено в автореферате. Диссертация написана хорошим языком и на высоком профессиональном уровне.

Считаю, что работа «Построение моделей механики сплошных сред с учетом изменяющейся микроструктуры материала» отвечает требованиям, предъявляемым к докторской диссертации, а ее автор Вильчевская Елена Никитична заслуживает присуждения ей ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела.

Официальный оппонент

Доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры вычислительных методов
механики деформируемого тела факультета
прикладной математики – процессов управления СПбГУ



Греков Михаил Александрович

198504, Санкт-Петербург, Университетский пр., 35
С.-Петербургский государственный университет,
Тел.: (812) 4287159, E-mail: m.grekov@spbu.ru

25 мая 2020 г.

Личную подпись заверяю

начальник отдела кадров МЗ

Н. И. МАШТЕПА



Документ подготовлен
в порядке исполнения
трудовых обязанностей