

В диссертационный совет Д002.075.01
на базе Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Институт проблем машиноведения РАН

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Вильчевской Елены Никитичны
«ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД С
УЧЕТОМ ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ МИКРОСТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛА»,
представленную на соискание ученой степени доктора физико-
математических наук по специальности 01.02.04 – «Механика
деформируемого твердого тела».

Диссертация Е.Н. Вильчевской посвящена развитию моделей механики деформируемого тела, учитывающих изменения микроструктуры и фазовых превращений.

Задача описания фазовых превращений в композитных материалах важна при разработке и создании материалов, в которых в результате фазового превращения могут быть изменены эффективные физико-механические свойства, такие как прочность, жесткость, трещиностойкость.

В диссертации исследуются задачи механики сплошных сред с учетом микроструктурных особенностей материалов и физико-химических процессов, возникающих при деформировании тел, и влияющие на их деформационно-прочностные свойства. Примерами таких процессов являются фазовые переходы, структурные превращения, химические реакции, взаимодействия с полями различной природы

Таким образом, **актуальность, научная и практическая значимость работы** не вызывают сомнений.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Список литературы содержит 286 наименований. Общий объем рукописи – 300 страниц в формате машинописного текста.

Во введении дается краткий обзор литературы по теме диссертации, излагается краткое содержание диссертации, формулируются основные результаты.

В первой главе диссертации рассматриваются модели, в которых учет микроструктуры заложен в фиксированных параметрах, не меняющихся при внешних воздействиях. Главным достоинством этих моделей является возможность установления ясных взаимосвязей между макро и микро описанием материала, т.е. возможность оценить факторы, оказывающие существенное влияние на эффективные свойства среды и исключить из рассмотрения малозначимые детали. Обсуждаются различные подходы к выбору микроструктурных параметров, приводятся основные соотношения для тензоров вклада отдельного включения в рассматриваемое свойство и описание схемы осреднения Максвелла в терминах соответствующих микроструктурных параметров. Решены задачи определения эффективных свойств материалов с неэллипсоидальными включениями и трещинами и частично отслоившимися включениями, а также эффективных свойств вязко-упругих гетерогенных сред

Во второй главе рассматриваются модели с дополнительными скалярными переменными, характеризующими микроструктуру материала, эволюционирующими в процессе механических нагружений.

В третьей главе исследовано поведение материалов, структура которых в процессе нагружения меняется вследствие фазовых или химических превращений, локализованных на границе раздела между материалами с разными свойствами. Форма областей новой фазы и положение границы априорно не известно и определяется из термодинамического условия, связанного с дополнительной степенью свободы, порождаемой неизвестной границей раздела. Изменение микроструктуры материала, сопровождающее фазовый переход или химическую реакцию, порождает собственные деформации превращения и изменение модулей упругости материала, вследствие чего происходит перераспределение полей напряжений и деформаций. Таким образом, введенные в первой главе микроструктурные параметры материала (объемная концентрация, форма и ориентация включений и их механические характеристики), меняются под влиянием внешних и внутренних термомеханических воздействий.

В четвертой главе разработана новая модель теории микрополярных сред со структурными изменениями. В отличие от второй главы, дополнительная переменная, описывающая эволюцию структурных изменений,

рассматривается как тензорный параметр. Структурные параметры вводятся в строгое соответствие с методами механики сплошной среды, при этом ключевую роль играет уравнение баланса энергии. Рассматриваются процессы пластического течения, консолидации сыпучих сред, динамики многокомпонентных сред, включающих крупнодисперсные составляющие.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы.

Основными результатами являются следующие:

1. Определены эффективные характеристики неоднородных материалов с неэллипсоидальными включениями, а также композитов с произвольно ориентированными сфероидальными включениями в трансверсально изотропной матрице.
2. Получены зависимости эффективной текучести материала от формы включений и их распределения по ориентациям.
3. На основе фундаментальных законов механики разработана модель описания структурных изменений среды, с учетом изменяющейся плотности распределения числа частиц
4. 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
5. В пространстве деформаций построены области существования областей новой фазы, исследована их устойчивость и энергетическая предпочтительность
6. Получены зависимости концентрации, формы и ориентации включений новой фазы от внешних воздействий; определены эффективные модули гетерогенного материала с изменяющейся микроструктурой
7. 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
8. Предложен новый подход к построению моделей механики микрополярных сред с учетом источниковых членов, описывающих структурные изменения среды.
9. Разработана процедура определения инерционных и кинематических свойств элементарного объема при пространственном описании.

Сформулировано и обосновано новое балансовое соотношение для тензора инерции с источниковым членом.

10. Предложена методика построения определяющего уравнения для источникового члена с учетом изменений в микроструктуре материала.

11. Решен ряд конкретных задач, демонстрирующих особенности предложенной модели по сравнению с классической теорией микрополярных сред.

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, получены с использованием физических и математических моделей, адекватных изучаемым эффектам и экспериментальным данным, на основе чёткого понимания и трактовки рассматриваемых физических явлений, и, поэтому, являются достоверными.

Достоверность основных положений диссертации определяется использованием строгих математических подходов, соответствием полученных решений экспериментальным данным и результатам других авторов.

Новизна полученных результатов, определяется тем, что в диссертации впервые разработан новый аналитический подход к учету микроструктуры материала в рамках механики и термодинамики сплошных сред. Предложены модели описания структурных изменений в материале с учетом изменяющейся плотности распределения числа частиц. Введен новый структурный параметр, являющийся аналогом параметра порядка и характеризующий фазовое состояние материала, для которого сформулировано дополнительное балансовое соотношение с источниковым членом. Продемонстрированы эффекты запираания или ускорения химической реакции в открытой системе деформируемое твердое тело - газ в зависимости от свойств материала, геометрии образца и типа приложенной внешней нагрузки. Показано что, в зависимости от вышеперечисленных факторов, тонкий поверхностный слой прореагировавшего материала может предотвратить распространение реакции внутрь образца или, напротив, реакция может быть заблокирована внутренними напряжениями, при достаточно большом количестве прореагировавшего материала.

Основные научные положения работы отражены в публикациях автора. Автореферат диссертации полностью соответствует содержанию диссертационной работы.

По диссертации имеются замечания:

1. При рассмотрении эффекта запираания и ускорения химической реакции от действия напряжений (раздел 3.2.2) не принимается во внимание возможная релаксация напряжений (о чем в диссертации оговорено). Однако было бы крайне желательно учесть этот эффект. В настоящее время существуют модели, учитывающие релаксацию напряжений, главным образом, за счет притока вакансий, причем в ряде случаев именно скорость притока вакансий является определяющей для скорости продвижения фронта (например, цикл работ В.В. Воронкова о росте преципитатов оксида кремния в монокристаллах).
2. На Стр 177 читаем: «Величины параметров ... соответствуют физическим параметрам Si и SiO₂ за исключением химической деформации превращения ..., которая на порядок меньше величины, соответствующей изменению объема при химическом превращении кремния в диоксид кремния. Такой выбор значения ... больше соответствует приближению малых деформаций и может быть оправдан быстрой перестройкой деформаций, обеспечивающей релаксацию напряжений вследствие вязкости диоксида кремния [243]». Однако, собственная деформация заданного количества вещества определяется только относительным молярным объемом, а не соответствием используемым моделям. Если речь идет об эффективных значениях, то в качестве наиболее вероятного объяснения представляется опять-таки приток вакансий – то есть уменьшения количества атомов кремния, подвергающегося окислению. Приведенные автором оценки не единственны, есть данные свидетельствующие о возможности даже отрицательных видимых собственных деформаций при окислении кремния, опять же, за счет вакансионного механизма. Таким образом, приведенные автором оценка и используемое значение эффективной собственной деформации представляются вполне оправданными, однако, в силу иных соображений.
3. При выводе уравнений третьей главы нигде не учитывается дополнительная энергия, связанная с наличием межфазовой поверхности. Учет вклада только упругой энергии приводит используемому автором тензорному виду химического потенциала; учет энергии, связанной с поверхностью раздела фаз, неизбежно приведет к более сложному виду. Известно (например, Ландау, Лифшиц, Статистическая физика), что именно поверхностная энергия

может быть определяющей при некоторых процессах фазовых превращений, например при росте кристаллов. Вклад данного эффекта было бы крайне желательно учесть в дальнейших исследованиях.

4. В диссертации, в главах 3 и 4, в частности в разделе 4.3.4 хотя и упоминается о роли теплового движения, в расчетах в явном виде не вводятся энтропийные члены. Вероятно, более аккуратные выражения для эволюции тензора поляризации могут быть получены как следствие выполнения законов статистической физики и физической кинетики – минимума свободной энергии, учитывающей энтропийный член.
5. На Стр 154 читаем: «при гидростатическом нагружении равновесными являются шаровые зародыши» По-видимому, имеется ввиду усредненный вклад от зародышей, поскольку без учета вклада поверхностной энергии наиболее энергетически выгодной для включения является форма сильно уплощенного сфероида (например, Мура).
6. Кроме того имеются отдельные опечатки и грамматические неточности и недостаточно строгие утверждения, в частности:
 - 6.1. Стр. 230. «Заметим, что для удовлетворения условиям линейной упругости, относительные перемещения границ не должны превышать 10%, что накладывает ограничения на изменения внешнего давления» - не строго: почему именно 10%.
 - 6.2. Стр 120 «свободные энергии Гиббса, равные суммам потенциальных энергий деформации и свободных энергий ненапряженных состояний тела с включением в фазовых состояниях» – неясно речь идет о свободных энергиях, или только об энтальпий части – потенциальной энергии.
 - 6.3. Стр 135 «Таким образом, в случае претерпевающего фазовое цилиндра» – пропущено слово «превращение»

Указанные замечания в целом носят уточняющий или редакционный характер и не влияют на положительную оценку диссертации Вильчевской Елены Никитичны. Работа является законченным исследованием, выполнена на высоком научном уровне и содержит результаты, вносящие существенный вклад в механику неоднородных (композитных) материалов, претерпевающих структурные превращения. Результаты работы могут быть использованы в учебном процессе при подготовке специалистов в области механики деформируемых тел.

Автореферат дает ясное представление о постановке исследования и основных результатах. Основные результаты апробированы и опубликованы, в том числе в журналах из списка ВАК.

Диссертация Е.Н. Вильчевской «Построение моделей механики сплошных сред с учетом изменяющейся микроструктуры материала» удовлетворяет всем требованиям ВАК России, предъявляемым к докторским диссертациям по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела». Елена Никитична Вильчевская заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по этой специальности.

Официальный оппонент

В.н.с. лаборатории Геомеханики ИПМех РАН

доктор физико-математических наук, доцент



Устинов Константин Борисович

26 мая 2020 г

Подпись К.Б. Устинова заверяю

Ученый секретарь ИПМех РАН

к. ф.-м. н.



Котов М.А.

Москва 119526 Проспект Вернадского 101-1

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт проблем механики им. А.Ю.Ишлинского

Российской академии наук (ИПМех РАН)

Телефон: +7 495 434 30 51

E-mail: Ustinov@ipmnet.ru