

Отзыв
официального оппонента Шоркина Владимира Сергеевича
на диссертацию
Белова Петра Анатольевича, выполненную на тему
"МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ДЕФЕКТНЫХ СРЕД"
на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности
01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела.

Диссертация П.А. Белова посвящена созданию математических моделей сплошной упругой среды, описывающих влияние на их механические свойства распределенных по реальной среде различного рода дефектности и искажений упорядоченной структуры, причиной возникновения которых могут быть взаимодействия с кластерами, поверхностным слоем, имеющим, как известно отличную от объемной атомно-молекулярную структуру, адгезионное взаимодействие с другими твердыми деформируемыми телами.

Актуальность темы диссертации.

Известно, что свойства поверхностного слоя твердого тела, а также свойства, проявляемые им при адгезионном контакте с другими телами (например, адгезия элементов слоистого композита, напыленной пленки и ее основы, микро и нановключений, существенно изменяющих свойства среды – матрицы), во многом определяют функциональное предназначение и длительность жизненного цикла соответствующих изделий. Именно по этой причине в технологических процессах изготовления деталей из твердых материалов, а также самих твердых материалов с новыми свойствами содержится большое количество операций, так или иначе влияющих на свойства поверхностных слоев, придающих им заранее запланированные характеристики. Однако, зачастую эти операции и соответствующие режимы их реализации планируются на основании только большого производственного опыта, анализа результатов дорогостоящих экспериментов, которые нельзя в достаточной мере адекватно моделировать математически из-за того, что специальной общей теории такого моделирования нет, а классическая теория упругости в принципе не может адекватно отражать в своих рамках свойства поверхностных слоев.

Известно, что поверхностные слои твердых деформируемых тел по сравнению с их объемным состоянием обладают значительно большей дефектностью. Это является их основной особенностью, которую необходимо моделировать при рассмотрении, по крайней мере, механических процессов, происходящих в различных деталях изделий промышленности. Наличие повышенной дефектности обуславливается различными причинами. Одной из главных причин является то, что даже у идеальных по своей атомно-молекулярной структуре материалов, изготовленных в специальных условиях, поверхностная структура будет отличаться от объемной. Это приводит к внутренним несоответствиям структур, порождающим дефектность. Аналогичная ситуация возникает при адгезии различных твердых материалов. Кроме того, дефектность в материалах существует в силу их природных свойств (при самодиффузии возникают либо межатомные пустоты, либо внедрения в элементарную ячейку лишних атомов). Все эти причины, наряду с внешними механическими воздействиями должны быть увязаны в рамках соответствующей математической модели материала.

Именно по этой причине тема диссертации П.А. Белова является актуальной.

Краткий анализ содержания диссертации.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, семи глав, заключения, списка используемой литературы и 8 приложений. Она содержит 312 страниц, в том числе 292 страниц основного текста, 23 рисунка, 5 таблиц. Список используемой литературы включает 126 наименований (из них 64 на иностранном языке).

Во введении обосновывается актуальность научных исследований, изложенных в диссертации, сформулированы цель исследования; научная новизна; практическая и теоретическая ценность работы. Во введении также изложено краткое содержание работы, отмечается большой вклад в развитие обобщенных вариантов теории упругости, использованных в теории композиционных материалов, механике гетерогенных сред, механике дефектов, который внесли такие известные отечественные и зарубежные учёные.

Целью своей работы автор видит обоснование и формулировку спектра моделей дефектных сред (сред с полями сохраняющихся дислокаций), их классификацию, а также исследование их общих свойств и специфики, построение на их основе прикладных инженерных моделей.

В первой главе дан обзор существующих моделей в механике сплошной среды. Рассмотрены теория сред Коссера, Джеремилло, Аэро – Кувшинского, Миндлина, Тупина, «простейшая» теория сред с сохраняющимися дислокациями. Отмечены общие свойства и индивидуальные особенности каждой теории. Постулировано их естественное обобщение, содержащее перечисленные теории как частные случаи этого обобщения. Характерно, что при анализе моделей сплошной упругой среды автор диссертации обращает внимание на получение их вариационные уравнения из соответствующих лагранжианов, которые учитывают условия на граничных поверхностях и совокупности их ребер.

Во второй главе изложена общая теория кинематики дефектных сплошных сред, определяющая в зависимости от типа рассматриваемых дефектов, характеристики кинематического состояния сплошной среды, позволяющая сформулировать условия существования дефектов различного типа, их зарождения и исчезновения. Исследование кинематики дефектов является в работе П.А. Белова основным этапом в формулировке феноменологических моделей теории дефектных сред и составляет наиболее важный элемент в применении вариационных методов при построении соответствующих моделей. Оригинальным является подход автора диссертации к определению кинематических характеристик дефектной среды. Соответствующие рассуждения опираются не на интуитивное введение тех или иных характеристик, а на формально строгий метод заключаются в использовании условий нарушения интегрируемости выражений для введенной на предыдущем шаге метода кинематической характеристики. На первом шаге такой характеристикой является вектор перемещений. Характерно, что для введенной таким формальным образом дефектности найдены физические оригиналы – реальные дефекты. Использованный метод введения полей дефектов позволил ввести их классификацию.

В третьей главе сформулирован и применен к построению моделей дефектных сред «кинематический» вариационный принцип, являющийся частным случаем принципа возможных перемещений со связями. Кинематический вариационный принцип автор характеризует как принцип возможных перемещений с системой связей, наложенных на кинематические переменные, получаемые на основе условий совместности Папковича, выражающие условия интегрируемости вводимых кинематических полей. Характерной чертой «кинематического» вариационного принципа является то, что в нем возможная работа обобщенных внутренних сил сводится к возможной работе сил связей, наложенных на обобщенные кинематические переменные. Внутренние силы рассматриваются как неопределенные множители Лагранжа.

Представлен также алгоритм построения физических моделей сред в соответствии с введенным «кинематическим» вариационным принципом, а также пример использования этого алгоритма (модель Папковича – Коссера) для построения моделей, в том числе и с учетом внутренних силовых факторов на гранях боковой поверхности рассматриваемых тел и ее ребрах.

В четвертой главе «Построение физических моделей» сформулирован спектр моделей сред с полями сохраняющихся дислокаций. В качестве максимально полной и

сложной модели сред с сохраняющимися дислокациями рассмотрена общая модель среды с полями сохраняющихся дислокаций. Все остальные модели получены как её частные случаи. Частные случаи определяются соответствующим упрощением структуры тензоров модулей, что приводит к отсутствию в лагранжианах частных моделей того или иного слагаемого в потенциальной энергии. В свою очередь, такой подход позволяет создать «конструктор» моделей дефектных и идеальных (бездефектных) сред с определенным набором физических свойств - многомерное пространство моделей, каждое измерение которого определяется некоторым механическим свойством (модулем) дефектной среды. Выделяются пространства когезионных и адгезионных приближений.

В пятой главе рассматривается пространство когезионных приближений. Даются определения когезионных взаимодействий, когезионных перемещений, характерных длин когезионных взаимодействий в различных частных случаях теории. В результате, установлен исчерпывающий спектр возможных когезионных взаимодействий в средах с сохраняющимися дислокациями, определены физические параметры среды, отражающие свойства когезионных взаимодействий, и связь этих параметров с неклассическими модулями, рассмотрена структура решений уравнений равновесия в соответствующих ситуациях.

В шестой главе рассматривается теория адгезионных взаимодействий, строится теория идеальной, «поврежденной» и градиентной адгезии. В этом случае поверхность твердого тела является материальной, обладающей аналогичными с объемным состоянием материала свойствами, но независимыми от них. Учитываются также когезионные свойства среды, когда связь между объемными и поверхностными свойствами существует. В связи с этим, в качестве приложения полученных результатов рассмотрены теория поверхностного натяжения Лапласа, распространение специального типа поверхностных волн.

В седьмой главе сформулированные модели дефектных сред использованы для объяснения ряда известных масштабных эффектов. Здесь же рассмотрены вопросы идентификации модели по известным экспериментальным данным. Приведены данные по сопоставлению аналитической оценки модулей упругости мелкодисперсного композита с результатами его экспериментального определения. В связи с рассмотрением композиционных материалов на основе матрицы с наноразмерными включениями рассмотрены вопросы математического обоснования гипотез осреднения свойств композита, понятий эффективных включений, матриц, эквивалентного континуума.

Глава восьмая представляет собой заключение, в котором сформулированы основные результаты и выводы диссертации.

Девятая глава является, по сути, приложением к диссертации, в котором рассмотрен ряд необходимых технических вопросов.

Обоснованность научных положений, выводов и практических рекомендаций, сформулированных в диссертации, подтверждается рядом положений.

1. При получении результатов, рекомендаций и выводов использованы фундаментальные законы механики деформируемого твердого тела, физики твердого тела, тензорного анализа, вариационного исчисления, функционального анализа, теории дифференциальных уравнений.

2. В основе представленных в диссертации результатов использованы основополагающие представления о структуре и свойствах дефектных структур реальных материалов на микро-, нано-, мезо- и макроуровнях.

3. Результаты диссертации получены методами, которые обобщают и развивают подтвержденные многочисленными исследованиями разработанные в свое время классиками механики, математики и физики твердого тела.

Достоверность научных положений, выводов и практических рекомендаций подтверждается тем, что они

- получены путем строгих математических построений, использования точных решений соответствующих математических задач известными методами математической физики;
- качественно и количественно согласуются с известными экспериментальными данными;
- непрерывным образом преобразуются в свои аналоги, полученные для сред с менее сложной структурой при стремлении параметров, характеризующих усложнение свойств среды, к нулю.

Новизна научных положений, выводов и практических рекомендаций.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- Построена общая кинематическая теория полей дефектов, дана их классификация, исследованы их общие свойства и индивидуальные особенности.
- Сформулирован и применен к построению моделей дефектных сред «кинематический» вариационный принцип, который является частным случаем принципа возможных перемещений со связями, позволяющий по совокупности выбранных кинематических связей, названной кинематической моделью дефектной среды, однозначно определить спектр силовых взаимодействий, вывести формулы Грина, сформулировать уравнения обобщенного закона Гука, т.е. построить силовую модель среды.
- Сформулирован спектр моделей сред с полями сохраняющихся дислокаций и «бездефектных» градиентных сред. Часть из них сопоставлена с уже известными моделями.
- Дано теоретическое объяснение достаточно большого круга известных масштабных эффектов в рамках сформулированной механики дефектных сред.

Практическая значимость

1. Теория сред с полями сохраняющихся дислокаций позволяет сформулировать прикладные модели мелкодисперсных композитов, межфазных слоев, тонких пленок, механики хрупкого разрушения. Она в состоянии описать широкий спектр известных масштабных эффектов и предсказать новые эффекты, требующие экспериментальной проверки.
2. Теория когезионных взаимодействий, как корректно упрощенная форма теории сред с полями сохраняющихся дислокаций, позволяет представить дефектную среду как совокупность двух вложенных друг в друга сред – классической (бездефектной) среды и «когезионной». Она дает возможность получать и исследовать наглядные решения в виде классического решения и «когезионной» поправки к нему.
3. Теория адгезионных взаимодействий позволяет глубже понять, изучить и использовать на практике адгезионные свойства контактирующих тел. Исследованные различные механизмы адгезии позволяют рационально подбирать материалы контактирующих тел с целью улучшения функциональных свойств проектируемых конструкций и устройств.
4. Общая и прикладная теория межфазного слоя дает возможность изучать, моделировать и проектировать свойства композиционных материалов, а также оптимизировать их состав.

Разработанные в диссертации модели, методы и алгоритмы могут быть рекомендованы для проектных и научно-исследовательских организаций.

Необходимо отметить, что **содержание автореферата** в достаточной степени точно отражает содержание диссертации, а ее **основное содержание** в полной степени отражают публикации автора в периодических изданиях, входящих в **перечень ВАК Российской Федерации**.

Замечания.

1. В диссертации широко используются понятия адгезионного и когезионного взаимодействий. Из физики известен смысл понятия «адгезия» - прилипание за счет сил атомно-молекулярных взаимодействий: сил Ван-дер-Ваальса и т.д. Из текста диссертации трудно понять, чем используемые диссертантом понятия отличаются или совпадают с известными из физики понятиями адгезии и когезии, а также известными в механике понятиями контактных и нелокальных взаимодействий.
2. Учитывая различие механических свойств объемной составляющей деформируемого твердого тела, его поверхности, ребер и угловых точек автор диссертации фактически рассматривает взаимодействие тел разной размерности, вложенных в одно трехмерное пространство. Особенности таких взаимодействий надо было рассмотреть более подробно.
3. Важно выявить, какими свойствами должны обладать ребра и вершины многогранных поверхностей. Например, могут ли быть вершины точками возврата, когда касательный к линии, проходящей через такую вершину, вектор меняет свое направление на противоположное.
4. Желателен более подробный анализ связи предложенного автором кинематического вариационного принципа с вариационным принципом Гамильтона. Необходим его вывод из принципа Гамильтона с учетом выявленных или постулированных для данной среды связей.
5. Обычно заключение и приложения не являются главами диссертации.

Заключение

Диссертация Белова Петра Анатольевича является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решена научная проблема создания строгой математической теории дефектных линейно упругих сред, обоснования и формулировки спектра их моделей, классификации, выявления общих свойств и специфики, построение на их основе прикладных инженерных моделей.

Данная диссертация отвечает требованиям п. 7 Положения Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки Российской Федерации, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела. А ее автор, Белов Петр Анатольевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по названной специальности.

Официальный оппонент

доктор физико-математических наук,
профессор кафедры «Физика»
ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК»

Подпись В.С. Шоркина заверяю
Проректор по научной работе
ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК»



В.С. Шоркин

С.Ю. Радченко