

## ОТЗЫВ

**официального оппонента на диссертационную работу «Динамика структурных преобразований в материале при нестационарном воздействии» ВАВИЛОВА Дмитрия Сергеевича, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04-механика деформируемого твердого тела**

Вопросы изучения структурных преобразований материалов при динамических воздействиях различного рода (механических, оптических и ряда других) в настоящее время составляют важную научную и практическую задачу. Интерес к вопросам подобного рода связан с одной стороны с необходимостью изучения изменений механических свойств материалов, происходящих в результате динамических воздействий, а с другой стороны с целенаправленным поиском воздействий, приводящих к формированию у них определенных заданных свойств. Возникающие при этом научные проблемы носят принципиальный характер и связаны с необходимостью изучения сложных быстро протекающих механических и теплофизических процессов, приводящих к изменению структуры материала. В связи с этим изучение кратковременных интенсивных воздействий, изменяющих кристаллическую решетку материала, представляет значительный научный интерес. Таким образом, тема диссертационной работы Д.С. Вавилова, посвященной теоретическому изучению особенностей динамических процессов перестройки структуры материалов под внешним воздействием, безусловно, является **актуальной**.

**Научная новизна** полученных Д.С. Вавиловым теоретических результатов состоит в том, что в диссертации впервые разработана модель передачи энергии при динамическом воздействии на материал с макроуровня на мезо- и микроуровни с учетом сложных нелинейных динамических процессов передачи энергии и импульса на его внутренние степени свободы. Разработанная модель позволяет объяснить эффект уменьшения амплитуды импульсного отклика материала на внешнее механическое воздействие происходящими в нем структурными преобразованиями. Неоспоримым достоинством предложенной модели является ее соответствие накопленным экспериментальным результатам по высокоскоростному деформированию материалов. Модель позволяет произвести детальный анализ динамических механических процессов с учетом нелинейных сил взаимодействия структурных элементов материала. Существенная новизна модели состоит в том, что немонотонная диаграмма, соответствующая переходу материала в новое состояние не задается отдельным образом, а получается в рамках разрабатываемой модели.

Разработанная модель основывается на использовании континуально-дискретной аналогии, позволяющей свести модель сплошной среды к динамике ее одного структурно-реологического элемента. Выполнены конкретные расчеты для структурно-реологической модели, в которой структурным элементом является двухстепенной осциллятор с нелинейной связью между массами. Разработанная модель позволила установить связь критической величины деформации для начала неустойчивого участка на определяющей диаграмме с микропараметрами материала, оценить скорость уменьшения амплитуды начального импульса при ударном воздействии за счёт динамики внутренних степеней свободы. В рамках предложенной структурно-реологической модели впервые удалось оценить длительность структурного преобразования материала.

Изучение процессов генерации динамических процессов в современных материалах короткими механическими и лазерными импульсами на протяжении многих лет привлекает серьезное внимание ученых из различных областей. Интерес к данному кругу вопросов связан с тем, что с их помощью удается получать фундаментальную информацию о характере трансформации энергии в материалах на разных структурных уровнях, особенностях ее перехода с одного уровня на другой. Подобная информация труднодостижима с помощью других средств. К таким процессам, в частности, относятся быстро протекающие процессы, в которых явления релаксации тепловых потоков начинают играть принципиальную роль. Важно подчеркнуть, что разработанные модели позволяют учесть динамические теплофизические процессы, сопровождающие указанные механические структурные преобразования материала. В настоящее время активно ведутся экспериментальные и теоретические исследования процессов подобного рода. В связи с этим диссертация Д.С. Вавилова имеет важное **фундаментально-научное значение**, так как в ней разработан систематический теоретический подход к рассмотрению процессов динамического механического воздействия на материалы с учетом их структурно-реологических особенностей.

**Практическая значимость** диссертации заключается в возможности использования предложенной модели и полученных результатов для оценки прочности различных материалов к динамическим нагрузкам, для разработки энергопоглощающих материалов для систем безопасности при ударных воздействиях.

**Обоснованность и достоверность** теоретических результатов диссертации основывается на использовании общепринятых в механике и физике теоретических моделей. Основные аналитические результаты получены хорошо разработанными

методами математической физики (методом Галёркина, методом разложения на переменном интервале, численными методами). Корректность выполнения теоретического анализа подтверждается совпадением полученных аналитических решений, соответствующих различным моделям и предельным случаям, с численными расчетами, теоретических результатов с экспериментальными данными по высокоскоростному деформированию. Так, диссертантом последовательно производится сравнение полученных результатов с результатами классических моделей по динамическим структурным преобразованиям, анализируется характер их соответствия с имеющимися экспериментальными данными.

Диссертационная работа выполнена на высоком теоретическом уровне. Диссертация состоит из введения, пяти глав, посвященных изложению оригинальных результатов, заключения кратко подводящего итоги диссертации. Список библиографии состоит из 120 ссылок на публикации по теме диссертации. Диссертация изложена на 130 страницах, в том числе содержит 62 рисунка и уже упомянутую библиографию.

Основные результаты соискателя изложены в 7 печатных работах, рекомендованных ВАК, причем 5 из них учитываются в базе данных Scopus. Результаты диссертации докладывались на 5 Международных конференциях и на Зимней школе по механике сплошных сред.

В Главе 1 приведены основные экспериментальные результаты по высокоскоростному деформированию, необходимые для создания моделей и последующей постановки механических задач по динамическим структурным преобразованиям. В ней особо отмечаются экспериментальные результаты по уменьшению скорости ударника в определенном диапазоне скоростей, непосредственно связанных с уходом части энергии на структурные преобразования кристаллической решетки материала. На основании анализа данных имеющихся в литературе, делается вывод о существовании двух подходов к моделированию фазово-структурных превращений в материалах. Первый из них предполагает немонотонный вид определяющей кривой материала, ветви которой отделяют устойчивые фазы материала. Второй подход основан на многокомпонентной механике, предполагающей сложную систему взаимодействующая структурных уровней материала. В заключительной части первой главы диссертантом формулируется постановка задачи диссертационной работы. В качестве модели динамических структурных преобразований предложено использовать одномерную двухкомпонентную модель материала, включающую две кристаллические решетки с близкими параметрами,

связанные нелинейной силой взаимодействия. Выполнен анализ перемещения центра масс решеток, являющегося измеряемым параметром задачи, а также их относительного смещения, отвечающего за структурные преобразования. Путем численных расчетов с использованием предложенной модели на примере квазистатической деформации стержня подтверждено существование решения задачи, дающего немонотонную зависимость напряжения от деформации.

В Главе 2 представлены основные уравнения движения двухкомпонентной среды, записанные относительно перемещения центра масс и относительного смещения решеток без учёта пластических свойства материала. При этом считалось, что каждая из решеток подчиняется закону Гука. Взаимодействие между периодическими решётками кристалла учитывается путем введения нелинейной диссиpативной силы. В рамках предложенной модели самостоятельно проанализирован вопрос о существовании немонотонной зависимости между напряжением и квазистатической деформацией стержня с одним закреплённым концом. Был получен принципиально важный результат, показывающий, что при квазистатической деформации такая зависимость с неустойчивым участком не реализуется. Диссертантом показано, что для возникновения структурных преобразований материала необходимо динамическое воздействие на него с частотным спектром, согласованным с характеристиками материала.

В Главе 3 рассмотрено применение метода переменного интервала для решения динамических задач механики. В ней детально проанализированы особенности его применения в задачах термоупругости для полубесконечной области. Отмечается, что принципиальный момент применения метода переменного интервала в таких задачах заключается в необходимости введения двух переменных интервалов, связанных с одновременным протеканием двух разномасштабных процессов: генерации и распространения тепловых и звуковых возбуждений в материале. Показано, что в этих условиях поставленная задача сводится к решению уравнения движения маятника с обобщенной силой, зависящей от длины интервала. Установлено, что результаты для перемещений среды, полученные методом переменного интервала, согласуются с точными аналитическими решениями задачи и имеющимися экспериментальными данными.

В Главе 4 двухкомпонентная среда анализируется на примере динамики элемента, представляющего собой двухстепенной осциллятор с нелинейной связью между массами. Получено аналитическое решение системы динамических уравнений для поведения двухстепенного осциллятора при малой расстройке собственных частот

отдельных осцилляторов. С его помощью диссертантом установлено, что движение центра масс осциллятора разбивается на два этапа. На первом происходит сброс энергии на внутренние степени свободы, а на втором поведение маятников становится похожим на динамику линейной системы с небольшой расстройкой частоты.

В Главе 5 проанализирован переход от дискретной модели к случаю сплошной среды. При близких параметрах решеток дисперсионные кривые среды определяются двумя близкими частотными ветками, являющимися аналогами акустической и оптической ветвей дискретной решетки. Показано, что нелинейное взаимодействие между компонентами среды приводит к передаче энергии с акустической ветви на оптическую. Важность этого результата состоит в том, что оптическая ветвь соответствует смещению решеток относительно друг друга. Диссертантом показано, что передача энергии на внутренние степени свободы среды в этом случае возможна, только если длительность импульса воздействия на нее не превышает величину, обратную определенной характерной частоте сплошной среды. Полученные теоретические результаты подтверждают уменьшение амплитуды первоначального импульса воздействия на среду, наблюдающегося экспериментально. Теоретически показано, что оно соответствует переходу материала в некоторое новое устойчивое равновесное состояние. Таким образом, предложенная нелинейная модель сплошной среды подтверждает теоретические и экспериментальные результаты о существовании в ней структурных переходов при внешних динамических воздействиях.

По представленной диссертационной работе можно сделать следующие замечания:

1. В диссертации для анализа нелинейных уравнений баланса используется метод Галёркина. При этом вопросы применимости этого метода (единственность, сходимость рядов) практически не обсуждаются. Хотелось бы видеть какое-то обоснование его применимости к рассматриваемым задачам.

2. В тексте работы имеются некоторые опечатки и неточности. Так, например, в уравнении (1.11) присутствует параметр “*b*”, а сразу за ним рассматривается случай *n*=0, хотя параметр *n* где-либо ранее не фигурировал. На стр.43 появляется ссылка на рис.2.10, хотя перед этим был рис.2.7, а за ним идет рис.2.8. На странице 57 в правой части уравнения движения (3.15) вместо перемещения “*u*” стоит температура “*T*”.

В целом, отмеченные недостатки не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы соискателя.

Содержание автореферата полностью соответствует содержанию диссертации.

В целом, диссертационная работа «Динамика структурных преобразований в материале при нестационарном воздействии» по используемым в ней теоретическим методам, по новизне научных результатов, практической и научной значимости соответствует специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела и удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям по данной специальности, а ее автор - Вавилов Дмитрий Сергеевич заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент,  
доктор физико-математических наук,  
заведующий лабораторией оптоэлектроники и голограммии  
ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН,



Муратиков К.Л.

