В диссертационный совет Д 002.075.01
при Федеральном государственном
бюджетном учреждении науки Институт проблем
машиноведения
Российской академии наук
199178 г.Санкт-Петербург, Большой
пр. В.О., д.61.

ОТЗЫВ

официального оппонента
на диссертацию Вавилова Дмитрия Сергеевича
«Динамика структурных преобразований в материале
при нестационарном воздействии»,
представленной на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Объектом диссертационного исследования являются процессы структурных преобразований материала, определяемые изменениями в его кристаллической решётке и происходящие за чрезвычайно малые времена, не превышающие несколько микросекунд, которые могут реализовываться при кратковременных интенсивных воздействиях, ударно-волновых процессах. Структурные преобразования в материале при высокоинтенсивных динамических награждениях вызываются перестройкой структуры материала и представляют собой сложный динамический процесс, связанный с образованием новой фазы с иной кристаллической решеткой и затрагивающий несколько масштабных уровней. Исследование проблемы прогнозирования поведения материалов при кратковременных интенсивных воздействиях, несомненно, является актуальной проблемой в связи интенсивным развитием различных современных отраслей промышленности и с тенденцией наиболее полного использования свойств материалов в современных конструкциях различного назначения, работающих в условиях высокоинтенсивного (в том числе динамического и теплового) нагружения.

Используемая в работе модель структурно-реологической сплошной среды и его дискретного аналога -двухстепенного осциллятора с нелинейной связью между массами позволяет реализовать главную идею работы и построить определяющее соотношение материала, претерпевающего структурные изменения при динамическом награждении. При этом пожалуй впервые при моделировании структурных преобразований в динамических процессах немонотонная диаграмма, описывающая физические процессы в материале, подверженном переходу в новое состояние, не задаётся, а находится в результате решения задачи. Это, несомненно, в значительной степени определяет новизну результатов исследования. Для решения задачи, описывающей сложный динамический процесс, обусловленный нелинейными силами взаимодействия, зависящими от внутренних степеней свободы материала, для получения приближенных аналитических решений последовательно и порой виртуозно используется метод переменного интервала.

Можно признать **достоверность** полученных результатов, ибо решения, полученные на основе предложенной одномерной модели качественно согласуются с известным экспериментальными данными. Кроме того, достоверность сделанных выводов подтверждается совпадением в целом приближенных аналитических решений для континуальной модели с соответствующими прямыми численными решениями и с решениями, найденными для аналогичной дискретной модели.

Полученные результаты, в основном являются теоретическими. Однако, установленные механизмы структурных преобразований в материале при нелинейных динамических процессах деформирования, методы их моделирования, предложенная континуальная и дискретные модели, позволяют утверждать, что результаты диссертации имеют и значительное прикладное значение, так как определяют теоретические основы построения прикладных моделей материалов, способных учитывать аномальные структурные изменения материалов при оценке их прочности и эксплуатационных свойств в целом в случае интенсивных динамических воздействиях.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы.

Во введении обосновывается актуальность темы исследования в диссертации, формулируются цели работы, дается краткое описание методов исследования, обоснование достоверности результатов диссертации, формулируются результаты работы, их научная новизна, практическая значимость, дается информация об апробации работы.

В первой главе диссертации дается обзор литературы, приводится описание экспериментов по высокоскоростному деформированию, даются качественные оценки механизмов структурной перестройки материалов, фазового преобразования материала при высоких скоростях деформирования, предлагается трактовка эффектов перестройки структуры , связывая ее с возможностью немонотонных диаграмм деформирования при динамическом нагружении, анализируются методы исследования процессов перестройки структуры, методы построения определяющих соотношений с учетом структурных изменений. Наконец в первой главе дается краткое описание модели, основанной на идее многокомпонентной механики. Фактически в этой главе дается формулировка новой континуальной одномерной модели для двухкомпонентной среды, которая в дальнейшем и используется для моделирования процесса перехода материала из одного состояния в другое за счет относительного перемещения компонент. По всей видимости эта модель, и ее трактовка, позволяющая моделировать эволюцию структуры (относительных перемещений компонент) является новой моделью, которая, как показано в дальнейшем, позволила изучить динамику структурного превращения, определить условия, при которых эти превращения происходят, без явного введения межфазной границы,.

Глава 2 посвящена математической формулировке основных уравнений двухкомпонентной среды, записанных относительно центра масс и разности смещений компонент. Диссипация вводится путем предположения о том что нелинейные силы взаимодействия компонент зависят не только от разности смещений компонент, но и от скорости изменения этой характеристики. Формулируются краевые и начальные условия, полагая, что для

двухкомпонентной среды используется аналог модели Фойгта (см (2.2)). *К сожалению, автор в некоторой степени обходит вопрос об иной возможной трактовке. Здесь можно указать на некоторое несоответствие между определением напряжений (2.2) и равенством (2.6), которое можно рассматривать как определяющее уравнение для материала в среднем (для центра масс). Предлагаемая трактовка не является согласованной в предельном случае, когда исходные фазы совпадают и материал следует рассматривать как однородный.* В подразделе 2. 2. рассматривается квазистатическая нелинейная задача и показывается, что в определенном диапазоне параметров наличие внутренней степени свободы в линейной постановке задачи не оказывает заметного влияния на распределение деформаций в образце. *Отметим, что имеет место нечеткость в изложении, особенно, когда в тексте, без должных акцентов вводятся различные упрощающие предположения. Так аналитические оценки действительно сделаны в предположении линеаризации на стр. 34, хотя исходная задача (2.15) является нелинейной. Если выводы сделаны для линейного частного случая-, то это нужно четко указать несколько ранее.*

В разделе 2.3 делается анализ решения, чтобы указать при каких условиях нелинейность для квазистатической задачи позволяет моделировать невыпуклую диаграмму напряжения-деформации в области значений параметров задачи, для которых отсутствует единственность решения. Доказательство возможности реализации невыпуклой диаграммы даже для квазистатики, является одним из существенных научных результатов работы. Решение задачи здесь строится методом Галеркина с использованием ряда предположений. К сожалению, не дается оценки влияния этих предположений на результат решения. Более того, автор при построении решения часто и довольно непоследовательно перескакивает с формальной стороны задачи на физическую трактовку вводимых предположений. Эта непоследовательность затрудняет чтение работы.

В разделе 2.4 устанавливается влияние относительного смещения на макропараметры материала, определяется критического значения деформации, при котором происходит структурное преобразование, дается анализ влияния микроструктуры на макро-деформации после завершения перестройки структуры.

В **Главе 3** метод переменного интервала применялся для получения приближенных решений сформулированных ранее одномерных динамических нелинейных задач и динамических задач термоупругости (тепловой удар).

Продемонстрирована возможность использования метода переменного интервала для поиска приближённого решения нестационарных задач, в которых точное аналитическое представление является слишком громоздким или неудобным с точки зрения проведения расчётов. При этом показано, что метода переменного интервала может применяться для достаточно широкого класса задач, не ограниченного гиперболическими уравнениями, что несомненно является интересным не только с научной точки зрения (полученные аналитические решения удобны для анализа, но и сточки зрения приложений.

Дискретная одномерная двухкомпонентная модель среды с нелинейно-упругой связью и диссипацией исследуется в **Главе 4.** Фактически рассмотрена модель из двух связанных

осцилляторов с мало отличающимися собственными частотами, представляющая собой дискретный аналог континуальной среды с нелинейной силой взаимодействия. С использованием ряда предположений, которые, как утверждаем автор, не имеют принципиального значения при изучении эффектов переключения строятся приближенные решения дискретных задач строятся методом переменного интервала.

Показана возможность передачи энергии на внутреннюю степень свободы, роль которой выполняет относительное перемещение маятников. *К сожалению, упоминая при физической трактовке результатов, о передаче энергии , автор не использует оценок в терминах энергии, хотя это возможно.* Установлено, что нелинейность сказывается на поведении системы только в очень узком временном диапазоне. Методом переменного интервала построено приближенное аналитическое выражение для перемещения центра масс, которое будет использовано далее в главе 5, чтобы распространить полученные результаты на континуальную модель

В **пятой главе** осуществляется переход от дискретной модели к континуальному аналогу. Рассмотрена модель (когда напряжение на границе, задается в виде прямоугольного импульса), позволяющая описать результаты экспериментов по высокоскоростному деформированию металлов, чтобы показать возможность передачи энергии от перемещения центра масс на внутреннюю степень свободы, переход которой в новое устойчивое состояние равновесия соответствует структурному преобразованию в материала.

На основе приближенных аналитических оценок, проведенных с помощью метода переменного интервала, сделана попытка определить продолжительность и величина импульса необходимые для пробуждения внутренней степени свободы. Полученные результаты несомненно представляют научную новизну

Для построения и исследования решений континуальных моделей существенно используется сходство уравнений, полученных для континуальной двухкомпонентной среды методом переменного интервала, с уравнениями дискретной системы. Этот подход является весьма оригинальным и оказывается эффективным. *Однако и в этой части работы следует отметить непоследовательность и нечеткость в изложении, которая затрудняет знакомство с интересным научным исследованием.*

Наконец, получено и прямое численное решение задачи, которое показало удовлетворительное совпадение с приближенным аналитическим решением. Дано качественное сравнение решений с данными экспериментов.

В Заключении сформулированы основные результаты работы.

Отметим еще раз основные на наш взгляд **новые и принципиальные научные результаты полученные в диссертации:**

- Разработана механическая модель, способная дать качественные и некоторые количественные оценки влияния внутренней степени свободы, отвечающей за перестройку кристаллической структуры материала, на динамику измеряемого макропараметра.

- Найдены параметры, обеспечивающие немонотонную зависимость напряжения от деформации, которая часто используется при описании материалов с фазовым переходом,

предложен критерий для оценки критической деформации, соответствующей точке экстремума на определяющей диаграмме.

- Показано, что проявления влияния относительного изменения структуры материала на макро-свойства возможно только в условиях интенсивного динамического нагружения. Сформулирована нестационарная задача о распространении прямоугольного импульса по материалу с изменяющейся структурой и показано, что имеет место аналогия между уравнениями, которые были получены для континуальной и дискретной моделями, описывающими динамику нелинейного осциллятора с невыпуклой потенциальной энергией, что открывает новые возможности для построения прикладных моделей.

- Продемонстрировано путем моделирования, что действительно реализуется динамический процесс структурных преобразований в материале. При этом немонотонная диаграмма, описывающая физические процессы в материале, подверженном переходу в новое состояние, не задаётся, а находится в результате решения задачи. В прикладном отношении интересной является демонстрация того, что метод переменного интервала может быть применен для достаточно широкого класса задач, не ограниченного гиперболическими уравнениями.

Анализ работы позволяет отметить научную новизну, достоверность и обоснованность приведенных в работе положений, выводов.

Автореферат отражает содержание диссертации, основные результаты работы опубликованы в 7 публикациях, в том числе в журналах из списка ВАК.

Список литературы состоит из 120 наименований.

Замечания по диссертационной работе *(ряд замечаний сделан при оценке результатов работы по главам)*

1. Цель работы обозначена в тексте диссертации как "…создание модели, раскрывающей механизм передачи энергии с макроуровня на внутренние степени свободы и позволяющей объяснить эффект уменьшения амплитуды первоначального импульса в материале за счёт структурных преобразований, который был отмечен в экспериментальных работах по высокоскоростному деформированию металлов" (стр. 4, последний абзац). В автореферате это сформулировано несколько по-другому, как "…изучение механизма передачи энергии на внутренние степени свободы материала, динамика которых связана с изменениями в его структуре, и в определении необходимых условий для их возникновения" (стр. 3, предпоследний абзац). Диссертация имеет большой объем (130 стр.) и содержит, в основном, разнообразный аналитический материал для одномерной, хотя и существенно нелинейной, задачи динамического деформирования одномерной среды с внутренними степенями свободы. Как правило главы имеют некоторые выводы. Хотелось бы, чтобы все главы сопровождались бы отдельным итоговым разделом, где были бы четко сформулированы выводы, следующие из рассмотренного в главе аналитического материала.

2. Во второй главе диссертации рассматривается задача о нелинейном растяжении двухкомпонентного стержня, один торец которого закреплен, и приводятся оценки параметров деформирования такого стержня, при которых возникает немонотонная зависимость между

напряжениями и деформациями (§2.3), представляющая практический интерес для материалов, подверженных структурным перестройкам. Эта диаграмма характеризует неустойчивые состояния двухкомпонентного материала, соответствующие переходу в новое устойчивое состояние его фаз. Следует отметить, что метод оценки этих параметров недостаточно обоснован и не указаны условия, при которых эти оценки могут применяться. Непосредственная численная реализация, возникающих в этой задаче уравнений, была бы в этом отношении предпочтительнее.

3. В главе третьей диссертации обсуждаются особенности использования метода переменного интервала при аппроксимации разрывных возмущений, распространяющихся с конечной скоростью, на примере ударной волны в нелинейном стержне (§3.2). При этом используются разложения в ряд Фурье разрывных функций, для которых, как известно, свойственно наличие неустранимого локального скачка вблизи разрывов (явление Гиббса). Однако этот момент в диссертации не обсуждается, а наоборот, утверждается, что "…ряд $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)} \sin \frac{\pi(2n+1)x}{2l}$ сходится равномерно при $x \in [0,l]$ по признаку Дирихле…" (стр. 54, предпоследний абзац). Это не так, равномерной сходимости нет на замкнутом интервале.

4. На стр. 80. имеется текст, который противоречив и непонятен

« На первом из них сообщённый центру масс импульс позволяет системе преодолеть потенциальный барьер, созданный нелинейной силой взаимодействия, не оказывающей здесь существенного влияния» и т.д. С одной стороны нелинейная сила является причиной потенциального барьера и обсуждаются условия его преодоления, с другой, в этом же предложении именно эта сила несущественна. Таких противоречивых и сбивчивых пояснений в тексте довольно много. Вероятно, идей и трактовок у автора, так много и они настолько многообразны, что имеет место некоторое переполнение.

5. В работе автор ограничивается только оценкой механических факторов эффектов на процесс перестройки структуры в динамических процессах. При это не дается никакой оценки связных термодинамических эффектов, связанных с возможными большими градиентами температур, отличием адиабатических характеристик от изотермических и пр. Такие эффекты могут оказаться определяющими как раз для рассматриваемых в диссертации случаев, когда градиентные эффекты возникают в силу больших импульсов в очень коротких интервалах воздействий, и также в случае, когда характеристики решеток мало отличаются (именно такие случаи рассматриваются). Это замечание следует рассматривать как пожелание, которое может быть реализовано именно для одномерных моделей.

6. В работе по мере изложения материала, и по мере решения конкретных задач в различных разделах вводится много упрощающих предположении, о которых автор далее как бы забывает. Как правило, не делается оценки влияния тех или иных предположений на структуру решений, на общность решений и общность выводов, следующих из этих решений (см. разделы 2.2 и 2.3. также см., например стр. 69, 82, 85 перед формулой (4.28), начало стр.98, первый параграф стр. 101 и т.д. и т.д.

Много технических погрешностей в тексте диссертации и автореферата. Отметим некоторые погрешности диссертации. На стр. 28, последний абзац, имеется редакционная ошибка: вместо ссылки на формулу (1.12) должна стоять ссылка на формулу (2.1). В главе 3 на стр. 57 в формуле (3.15) опечатка: вместо $\frac{\partial^2 T}{\partial t^2}$ должно стоять $\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$. На стр. 74, последний абзац, вместо ссылки на формулу (3.6) должна стоять, по-видимому, ссылка на формулу (4.10); на стр. 76, первый абзац, и на стр. 82, второй абзац, вместо ссылки на формулу (3.8) должна стоять, по-видимому, ссылка на формулу (4.12); на стр. 79, последний абзац, вместо ссылки на формулу (3.10) должна стоять, по-видимому, ссылка на формулу (4.14); на стр. 88, первый абзац, вместо ссылки на формулу (3.17) должна стоять, по-видимому, ссылка на формулу (4.24). Список неточностей может быть продолжен.

Сделанные замечания не влияют на положительную оценку работы. Диссертационная работа Вавилова Дмитрия Сергеевича в целом представляет собой завершенное и чрезвычайно интересное научное исследование, посвященное решению актуальной проблемы, апробирована на научных конференциях и симпозиумах различного уровня, включая международные.

Она является законченной научно–квалификационной работой, соответствующей всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 года, а ее автор Вавилов Дмитрий Сергеевич. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела.

Официальный оппонент,
доктор технических наук,
профессор, заведующий лабораторией
Института Прикладной механики РАН (ИПРИМ РАН)
Лурье Сергей Альбертович
125040, Москва, Ленинградский пр. 7 стр1
Телефон: (495) 9461806
E-mail: salurie@mail.ru

Лурье С.А.

Подпись Лурье Сергея Альбертовича заверяю

Директор ИПРИМ РАН А.Н. Власов