

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ИМСС УрО РАН

академик РАН

В.П.Матвеенко  
«01» марта 2015 г.

Государственное бюджетное учреждение Российской Федерации  
Уральского отделения Российской академии наук

## ОТЗЫВ

ведущей организации, Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, о диссертационной работе Судьенкова Юрия Васильевича «Исследование термомеханических и ударно-волновых процессов в твердых телах при наносекундных длительностях возмущений», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.04 — механика деформируемого твердого тела.

Диссертационная работа Ю.В.Судьенкова посвящена развитию методических основ эксперимента по изучению отклика твердых тел на интенсивное тепловое и ударное воздействие наносекундных длительностей, а также систематическому исследованию динамической прочности широкого спектра материалов (металлов, стекол, твердых полимеров, пьезоматериалов, горных пород) при данном виде воздействия. Рассматриваемый диапазон скоростей воздействий интересен тем, что размеры области нагружения становятся сопоставимыми с характерными размерами мезоскопических дефектов материала, а времена воздействия — сопоставимыми с характерными временами релаксации структуры, что приводит к

возникновению существенно неравновесных состояний в зоне процесса. В качестве теоретической основы анализа рассматриваются связанные уравнения термоупругости (с параболическим уравнением теплопроводности); рассматриваемые процессы, сопровождаемые плавлением, испарением, детонационными процессами, учитываются условиями на границе воздействия теплового потока на материал. В работе впервые систематически, экспериментально и теоретически исследованы особенности формы акустического импульса на выходе из образца и вклад в её формирование различных физических механизмов, показана качественная зависимость формы волны напряжений от теплопроводности материала, разработаны новые экспериментальные методы, в основе которых лежит действие излучения на вещество, эффективные для широкого спектра научных и технических приложений.

Задачи, рассмотренные в диссертационной работе, являются актуальными как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения. Необходимость детального исследования процессов высокоскоростного деформирования диктуется как новыми методами получения и обработки конструкционных материалов, так и необходимостью прогнозировать и моделировать физико-механический отклик этих материалов при закритических и/или аварийных условиях эксплуатации. С фундаментальной точки зрения диссертационная работа вносит существенный вклад в исследование термодинамики неравновесных процессов, сопровождающих эволюцию структуры материала при интенсивных радиационных и ударно-волновых воздействия в нано- и субнаносекундном диапазоне длительностей нагрузления.

Научная новизна результатов диссертации заключается в комплексном исследовании процессов динамического отклика твёрдых тел на радиационное и динамическое воздействие, с учётом неравновесного характера процессов, происходящих в области взаимодействия. В результате

получен ряд новых теоретических результатов, например, показано существенное различие термоупругих импульсных напряжений в тепло- и нетеплопроводных материалах, проведён анализ и предложена модель протекания нестационарного ударно-волнового процесса в зоне формированияnano- и субнаносекундных импульсных напряжений. Разработаны новые и повышена эффективность традиционных экспериментальных методов исследования процессов динамического деформирования твёрдых тел, предложены эффективные методы неразрушающего контроля и решён ряд прикладных задач механики деформируемого твёрдого тела.

Практическая значимость результатов заключается в развитие методов экспериментального исследования динамического поведения твёрдых тел в области расширения возможностей лазерных интерферометров для измерения параметров движения поверхности твёрдых тел при динамических нагрузках, развитие методов определения лучевой стойкости оптических элементов, разработке методологии применения оптико-акустической ячейки для дефектоскопии конструкционных материалов, исследовании волновых процессов в трёх массовой ударной системе.

Результаты, полученные в диссертации, могут быть использованы в организациях, осуществляющих научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы в области физики и механики ударно-волновых и радиационных процессов в твёрдых телах, а так же при построении новых моделей нестационарных динамических процессов в материале с учётом эволюции его реальной структуры.

Анализ содержания работы. Работа состоит из введения, пяти глав и списка использованной литературы. Объем работы составляет 265 страниц, работа содержит 130 рисунков и 362 ссылки на цитируемую литературу.

Во введении сформулирована актуальность темы исследования, определены цели и задачи, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, отражена научная новизна и личный вклад автора.

Первая глава посвящена исследованию параметров термомеханических напряжений в металлах при воздействии лазерных импульсов наносекундной длительности. Описана методика проведения экспериментов и представлены их результаты. Представлены результаты дисперсионного анализа и решение классической системы уравнений динамической задачи термоупругости. Показана область её применимости и обоснована необходимость учёта скорости потока тепла для описания термонаряжений в теплопроводящих металлах. В данной главе получено решение задачи о перемещении теплопроводящих твёрдых тел в направлении источника излучения за счёт термоупругих напряжений. Проведено исследование неравновесных процессов в зоне поглощения излучения наносекундной длительности. В заключение главы проведено исследование деформаций изгиба пластин при воздействии поверхностного теплового источника.

Вторая глава диссертационной работы посвящена исследованию нестационарных ударно-волновых процессов в твёрдых телах. Представлены экспериментальные результаты исследования процессов распространения импульсных напряжений, результаты измерения поперечных напряжений при ударных нагрузках. В параграфах 2.5, 2.6 проведён теоретический анализ полученных результатов на основе современных методов неравновесной термодинамики. В результате убедительно показано существование нестационарного процесса вблизи поверхности ударного нагружения, характеризующегося релаксацией напряжённого состояния и скорости распространения импульсов. Показано начальное различие отклика для различных классов исследованных материалов в зависимости от природы сил межатомного взаимодействия.

Третья глава посвящена исследованию упругопластического отклика материалов на ударное нагружение наносекундной длительности. В результате показано формирование двух волнового фронта ударной волны после завершения нестационарного процесса вблизи поверхности нагружения, получены данные о затухании упругого предвестника, проведено исследование изменения структуры металлических материалов при квазистатическом и динамическом нагружении. В частности, исследовано выполнение закона Холла-Петча для меди, железа, никеля и алюминиевого сплава Д16. Показано нарушение закона Холла-Петча, вызванное, по мнению автора, перестройкой внутриизёренной структуры материала за счёт увеличения плотности дислокаций и двойников. Анализ структурных превращений проведен с использованием оптико-акустической ячейки. Показана эффективность данного метода неразрушающего контроля.

В четвертой главе исследуются вопросы прочности твёрдых тел при наносекундных длительностях ударной нагрузки. В результате показана важная роль пространственно-временного спектра ударной нагрузки, которая наряду с амплитудой и длительностью ударного импульса, существенно влияет на процессы разрушения твёрдых тел. Существенный научный интерес представляют результаты по исследования откольной прочности неорганических стёкол, определение порога лучевой и динамической прочности прозрачных материалов, впервые показано влияниеnanoструктуры двухфазных стёкол на их прочностные характеристики. В заключительных параграфах представлены результаты исследования динамической прочности кристаллов NaCl, пьезоэлектрических материалов, оргстекла и горных пород.

Пятая глава посвящена решению ряда задач, направленных на повышение точности и расширения возможностей экспериментальных методов, используемых для исследования физики и механики высокоскоростного взаимодействия. Представлены методы расширения

возможностей лазерных интерферометров, предложены методы повышения точности и возможностей в области измерения больших динамических смещений. Представлена методика исследования лучевой стойкости оптических элементов, проведено исследование физических и технических аспектов возможности бесконтактного фототермоакустического метода измерения коэффициента поглощения прозрачных оптических элементов. Исследованы особенности использования разработанной оптико-акустической ячейки, убедительно демонстрируется эффективность и перспективность её использования в области дефектоскопии материалов. В заключение решена задача об особенностях переноса импульса в трёх массовой ударной системе.

Заключение содержит выводы по диссертационной работе и перспективы развития работы.

По диссертации имеются следующие замечания.

1. При анализе экспериментальных данных используются модели, не учитывающие как вязкие свойства материала, так и другие механизмы релаксации, связанные с эволюцией его структуры. В работе не обсуждается достоверность и область применимости используемых моделей поведения материалов.

2. При анализе неравновесные процессы в области поглощения излучения и особенностей процессов теплопроводности используется система уравнений (1.3.11), включающая в себя параболическое уравнение теплопроводности. Автор не анализирует преимущества этого подхода по сравнению с работами других авторов, например, при использовании гиперболического уравнения для описания процесса распространения тепла.

3. При анализе эффективности оптико-акустической ячейки приведены результаты усталостного эксперимента на образцах в виде балки с защемлённым концом в области многоцикловой усталости. В работе не приведена величина предела усталости данного материала, а используемый

уровень напряжения  $0.2\sigma_G$  даёт сравнительно низкий уровень напряжения для формирования усталостной трещины на базе  $10^7$  циклов нагружения.

4. В третьей главе проведено исследование перестройки структуры материала под действием импульсных нагрузок. При этом для анализа структуры используются косвенные методы, в частности, метод, основанный на применении оптико-акустической ячейки, что не позволяет делать прямых выводов о механизмах и типах дефектных структур, возникающих в процессе нагружения. Это было бы крайне полезно при прямом подтверждении вывода автора о нарушение закона Холла-Петча для крупнозернистых образцов, вызванного увеличением плотности дислокаций и двойников.

5. В качестве заключительного замечания необходимо отметить достаточно небрежное отношение к тексту диссертации, наличие ряда опечаток, использование одновременное нескольких ГОСТ-ов при оформлении списка литератур и наличие англоязычных надписей на части иллюстративного материала в тексте диссертации.

Высказанные замечания не влияют на общую положительную оценку работы и имеют дискуссионный характер.

Работа подвергалась широкому обсуждению на нескольких десятках конференций и семинаров в течение длительного времени. Основные положения работы изложены в статьях в ведущих научных рецензируемых журналах по механике деформируемого твердого тела, рекомендованных ВАК. Автореферат корректно отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа является законченным научным исследованием, выполненном на высоком научном уровне и вносящим существенный вклад в развитие динамики деформируемого твёрдого тела. Результаты работы существенно развивают теорию эксперимента по тепловому ударному воздействию на деформируемое твердое тело.

Диссертационная работа Судьенкова Юрия Васильевича  
«Исследование термомеханических и ударно-волновых процессов в твердых

телах при наносекундных длительностях возмущений» удовлетворяет требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.04 — механика деформируемого твердого тела.

Заместитель директора по науке  
ИМСС УрО РАН  
д.ф.-м.н.

О.А. Плехов

Научный сотрудник  
ИМСС УрО РАН  
к.ф.-м.н.

И.Э. Келлер

