

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

СУДЬЕНКОВ ЮРИЙ ВАСИЛЬЕВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ  
И УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ  
ПРИ НАНОСЕКУНДНЫХ ДЛИТЕЛЬНОСТЯХ ВОЗМУЩЕНИЙ

01.02.04 – Механика деформируемого  
твёрдого тела

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург

2014

Работа выполнена на кафедре теории упругости математико-механического факультета Санкт-Петербургского государственного университета.

Научный консультант:

**МОРОЗОВ НИКИТА ФЕДОРОВИЧ**

доктор физико - математических наук, академик  
Российской академии наук

Официальные оппоненты:

**КАРАБУТОВ АЛЕКСАНДР АЛЕКСЕЕВИЧ**

доктор физико-математических наук, профессор  
Международный учебно-научный лазерный центр  
МГУ

**ЛУКЬЯНОВ ВАЛЕРИЙ ДМИТРИЕВИЧ**

доктор физико-математических наук, профессор  
ОАО «Авангард»

**МУРАТИКОВ КИРИЛЛ ЛЬВОВИЧ**

доктор физико-математических наук, профессор  
Физико-технический институт им.А.Ф.Иоффе  
РАН

Ведущая организация: Институт механики сплошных сред РАН УО, г.Пермь.

Защита состоится “30” апреля 2015г. в 14 часов на заседании совета Д.002.075.01 в Институте проблем машиноведения Российской академии наук по адресу: 199178, Санкт-Петербург, В.О., большой пр.,д.61.

С диссертацией можно ознакомиться в ОНТИ Института проблем машиноведения и на сайте института по адресу <http://www.ipme.ru>.

Автореферат разослан “ \_\_\_\_ ” декабря 20014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

доктор технических наук



В.В. Дубаренко

## **ОБЩЕЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### **Актуальность темы.**

Современные технологии обработки материалов все шире используют методы высокоскоростного деформирования и воздействия интенсивных потоков энергии (электронные и ионные пучки, лазерное и радиационное излучение). В тоже время элементы различных современных устройств и механизмов испытывают запредельные ускорения и эксплуатируются в условиях ударных или радиационных воздействий. В этой связи актуальность исследований термомеханических процессов в твердых телах и, зачастую, непосредственно связанных с ними ударно-волновых процессов, влияющих на прочность элементов конструкций и механизмов, несомненна.

Результат интенсивных радиационных и механических кратковременных воздействий на элементы конструкций в настоящее время недостаточно изучен и плохо прогнозируем. Это обусловлено как многообразием эффектов, проявляющихся при воздействиях такого рода воздействий, так и влиянием различных масштабных уровней структуры материалов на прочность и процесс разрушения.

Чрезвычайный интерес в последнее время проявляется к исследованиям отклика материалов в нано- и субнаносекундном диапазоне длительностей нагружения. Это связано с тем, что при таких длительностях размеры области нагружения становятся сравнимыми с характерными размерами дефектной структуры материалов (размеры зерен, микротрещин, дислокационные скопления и т.д.), что создает особые условия протекания ударно-волновых процессов.

Наименее изученной областью термомеханических и ударно-волновых исследований является область нестационарного процесса вблизи поверхности воздействия. Это связано как с целым рядом ограничений присущих традиционным методам исследований, так и сложностью теоретического описания нестационарных сильнонеравновесных процессов.

Актуальность исследований этих явлений очевидна, а их результаты позволят внести вклад в развитие фундаментальных представлений о механизмах, определяющих те или иные особенности радиационных и ударных воздействий наносекундной длительности, а также в решение прикладных задач, возникающих при современных технологиях обработки материалов с использованием радиационных, в частности лазерных, воздействий.

### **Цель работы и задачи исследования.**

Многообразие эффектов, проявляющихся при интенсивных радиационных и/или ударных воздействиях нано- и субнаносекундной длительностей на элементы конструкций,

диктуют необходимость существенного увеличения базы экспериментальных данных, а также разработки физических и физико-математических моделей изучаемых явлений, таких как нестационарные тепловые и ударно-волновые процессы вблизи области нано- и субнаносекундных возмущений.

Для достижения поставленных целей, естественно необходима, разработка и усовершенствование экспериментальных методов исследований.

### **Научная новизна.**

Выполненная работа является комплексным исследованием по изучению динамического отклика твердых тел на наносекундный нагрев и ударное воздействие, в том числе в области нестационарного неравновесного процесса, а также особенностей упругопластического деформирования и разрушения твердых тел при таких длительностях нагружения.

1. Впервые показано принципиальное различие характера импульсных термоупругих напряжений в тепло- и нетеплопроводящих материалах и разработана физико-математическая модель учета скорости теплового потока для адекватного описания термоупругой реакции теплопроводящих материалов.

2. Впервые продемонстрирована в эксперименте возможность перемещения металлических объектов в направлении источника неоднородного нагрева и объяснен этот эффект на базе разработанной модели.

3. Впервые получен ряд данных свидетельствующих о сильнонеравновесном характере процессов в твердых телах в зоне формирования нано- и субнаносекундных импульсных напряжений. Представлен анализ обнаруженных особенностей протекания нестационарного ударно-волнового процесса и определяющего влияние ангармонизма и атомного строения твердых тел на характер этого процесса.

4. Впервые экспериментально показано, что формирование двуволновой структуры фронта при упругопластическом высокоскоростном деформировании твердых тел начинается лишь по завершении нестационарного ударно-волнового процесса вблизи поверхности нагружения.

5. Впервые обнаружено нарушение соотношения Холла-Петча в случае наносекундного ударного нагружения поликристаллических твердых тел. Показано, что в мелкозернистых материалах ротационный механизм является определяющим пластическое деформирование, при этом деформационное упрочнение в них минимально.

7. Впервые показано, что наличие двухкаркасной структуры нанометрового масштаба является основным фактором, определяющим значительное увеличение прочности двухфазных стекол, являющихся практически наноструктурным композитом.

8. Впервые экспериментально обнаружена возможность реализации квазирезонансного разрушения твердых тел при ударном нагружении цугом наносекундных импульсов.

9. Впервые экспериментально обнаружена корреляция спектра электромагнитного излучения и масштабов структурных уровней, определяющих процесс разрушения пьезоматериалов наносекундными импульсами давления. Показано существенное влияние корреляции масштабов дефектной структуры материалов и пространственно-временного спектра ударной нагрузки на процессы разрушения.

#### **Практическая ценность.**

Практическая ценность диссертации заключается в расширении базы экспериментальных данных и создание физико-математических моделей особенностей термомеханических и ударно-волновых процессов в твердых телах при наносекундных длительностях воздействий, что позволяет применять полученные результаты для решения широкого круга прикладных задач.

1. Разработаны экспериментальные методы изучения термомеханических и ударно-волновых процессов с высоким временным ( $\sim 10^{-9}$  с) и пространственным разрешением ( $\sim 10^{-9}$  м).

2. Разработана и реализована методика повышения чувствительности лазерных интерферометров.

3. Разработаны методы исследований лучевой стойкости и особенностей разрушения оптических элементов при воздействии импульсного лазерного излучения, а также бесконтактный метод измерения коэффициентов поглощения слабопоглощающих оптических элементов.

4. Разработаны и реализованы методики опто-акустической дефектоскопии и измерений упругих постоянных материалов и элементов конструкций.

5. Экспериментально продемонстрирована и теоретически обоснована возможность острой фокусировки наносекундных импульсов давления в жидкости за счет оптимизации начального распределения давления на концентраторе.

6. Экспериментально показано и результатами численного моделирования подтверждено повышение эффективности переноса импульса и процесса разрушения при использовании трехстержневой ударной системы.

**Автор защищает следующие научные положения:**

1. Принципиальное различие термоупругих напряжений в тепло- и нетеплопроводящих материалах, обусловленное вкладом электронного механизма теплопереноса в металлах в формирование механических напряжений. Физико-математическую модель учета скорости теплового потока для адекватного описания термоупругой реакции теплопроводящих материалов. Возможность притяжения металлических объектов к источнику неоднородного нагрева.
2. Результаты исследований и анализ особенностей протекания нестационарного ударно-волнового процесса, демонстрирующего влияние ангармонизма и атомного строения твердых тел на характер этого процесса.
3. Результаты экспериментальных исследований, показывающие определяющее влияние нестационарного ударно-волнового процесса на формирование упругопластических волн в твердых телах при высокоскоростном деформировании.
4. Результаты экспериментальных исследований процесса упрочнения поликристаллических металлов при ударном нагружении наносекундной длительности.
5. Результаты экспериментальных исследований, демонстрирующих влияние корреляция масштабов структуры материалов и пространственно-временного спектра ударной нагрузки, что, в частности, создает возможность квазирезонансного разрушения твердых тел при ударном нагружении.
6. Решение ряда прикладных задач и разработанные методы этих исследований.

**Достоверность результатов.**

Применение высокоточных методов лазерной интерферометрии с высоким временным и пространственным разрешением, использование современных приборов регистрации, большое число взаимодополняющих экспериментов с применением стандартных статистических методов обработки экспериментальных результатов убедительно подтверждают достоверность исследований.

Ряд методов и устройств, использовавшихся в экспериментальных исследованиях, защищены авторскими свидетельствами и патентами.

**Апробация работы.**

Результаты работы докладывались на значительном числе научных конференций и опубликованы в их итоговых материалах:

Всесоюзн.Конф. "Фундаментальные проблемы физики ударных волн", Черногловка, 1987; XIII Междунар.конф.по когерентной и нелинейной оптике, Минск, 1988; VIII Всесоюзн.конф. "Взаимод.оптического излучения с

веществом”, Ленинград, 1990; X Междунар. конф. ”Воздействие интенсивных потоков энергии на вещество”, Терскол, 1995; X сессии Рос. Акуст. общ., Москва, 2000; Conference «Shock-Compression of Condensed Matter», Atlanta, USA; July, 2001; X International Conference Laser –Assisted Microtechnology, St. Peterburg 2003; 34th International Conference and NDT Exposition, DEFECTOSCOPY 2004, November 3-5, 2004, Špindlerův Mlýn - Czech Republic; FORUM ACUSTICUM, Budapest, 2005; 33rd International acoustic conference “Acoustics” High Tatras, 2006, Slovak Republic; XXXVII Summer School conference “Advanced problems in mechanics”, 2009. St.-Petersburg (Repino); ECF18 18th European Conference on Fracture. 30 August - 3 September 2010 – Dresden; Warsaw, 4-7 July 2010. 7th International Symposium on Impact Engineering.; Международная научно-техническая конференция “Прочность материалов и элементов конструкций”, сентябрь 2010, Киев; XXXIX Summer School Conference “Advanced Problems in Mechanics” Repino, St. Petersburg, July 1-5, 2011; Third International Workshop “PROTECT2011: Performance, Protection and Strengthening of Structures under Extreme Loading”, Lugano, August 30 – September 01, 2011; X ВСФПТПМ, 24-30 августа 2011, Нижний Новгород; // Shock-Compression of Condensed Matter., Chicago, USA, 26-01 July, 2011; Актуальные проблемы механики сплошной среды”, Армения, Цахкадзор, 8-12 октября 2012; ECF19, 2012, Kazan ; 39th European Physical Society Conference on Plasma Physics Stockholm, Sweden, 2-6 July 2012; 13<sup>th</sup> International Conference on Fracture, June 16-21, 2013, Beijing, China; International Symposium on Impact Engineering, 2-6 September, Osaka, Japan

#### **Публикации и личный вклад автора.**

По теме исследований, вошедших в диссертацию, автором опубликовано 51 печатная работа в отечественных и зарубежных изданиях. Личный вклад соискателя в работы, перечисленные в конце реферата, может быть охарактеризован следующим образом:

- работы [6,7, ,10,29,31-33] выполнены без соавторов; в работах [1, 4,12,16,17,25] автору принадлежит постановка задачи и разработка методики, эксперименты и анализ результатов выполнены совместно с соавторами; в работах [2,3,9,11,13,15,16,18-24,27-30,34-44,50,51] автору принадлежат постановка задачи, разработка методики экспериментов, участие в экспериментальных исследованиях и анализ результатов; в работах [45-49] ] автору принадлежит постановка задачи, разработка методики экспериментов и анализ результатов экспериментов и теоретической модели, соавторам принадлежит проведение экспериментальных исследований, обсуждение результатов экспериментов и теоретической модели.

### **Структура и объем диссертации.**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы из 362 наименований и содержит 265 стр. текста с 130 рисунками.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.**

**Во введении** обоснована актуальность исследования, сформулированы цели и задачи исследования. Приведены основные положения, выносимые на защиту, показана практическая ценность полученных результатов, проиллюстрирована апробация работы, отражена ее научная новизна и личный вклад соискателя.

### **Глава 1. Исследования термоупругого отклика твердых тел на тепловые возмущения наносекундной длительности.**

Представлен обзор состояния проблем динамической термоупругости.

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований динамических упругих напряжений, возникающих в тепло- и нетеплопроводящих твердых телах при воздействии лазерного излучения наносекундной длительности. Исследована динамика перемещений облучаемой поверхности металлов, проведены исследования различий деформации пластин диэлектрика при действии объемных и поверхностных источников тепла. Теоретически обоснована и экспериментально продемонстрирована возможность перемещения твердых тел при быстром неоднородном нагреве поверхности лазерными импульсами.

**§1.1.** Приведены результаты экспериментальных исследований параметров термомеханических напряжений в металлах при воздействии лазерных импульсов наносекундной длительности в широком диапазоне интенсивностей облучения (1-300 МВт/см<sup>2</sup>). Результаты исследований показали, что термоупругий механизм генерации механических напряжений является определяющим до возникновения оптического пробоя у поверхности. Отмечается, что временные профили термоупругих напряжений в металлах не соответствуют классическому решению В.И. Даниловской, в связи с чем были проведены исследования различия параметров термоупругих напряжений в металлах и диэлектриках.

**§1.2.** Описана методика проведения исследований и представлены результаты экспериментов (рис.1.1). Сравнение временных зависимостей термоупругого отклика тепло- и нетеплопроводящих материалов показывает принципиальное значение теплопроводности в формировании термоупругих напряжений в материалах. Отметим



также, что характер термоупругих напряжений в нетеплопроводящих материалах (рис.1.1.a), в которых тепловой источник локализован, вполне удовлетворительно описывается в рамках традиционных решений динамической задачи термоупругости. Для теплопроводящих материалов, в которых изменение теплового источника обусловлено значительной скоростью теплопереноса, традиционные решения оказываются не состоятельными.

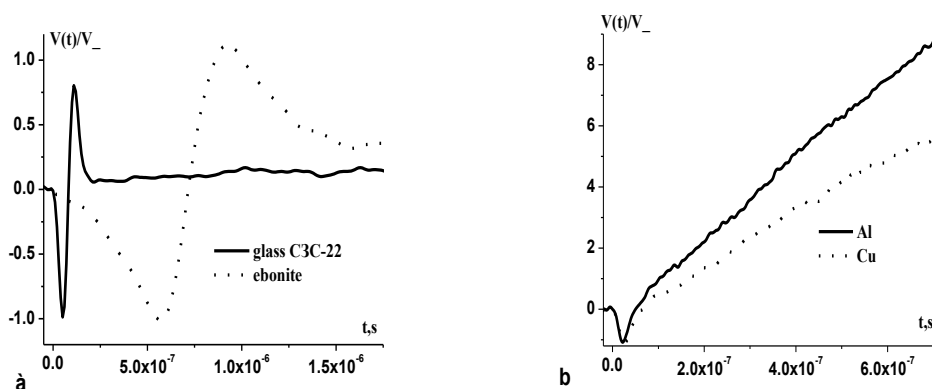


Рис.1.1. Типичные импульсы термоупругих напряжений в образцах диэлектриков-а и металлов -b.

**§1.3.** Представлены результаты дисперсионного анализа и решение классической системы уравнений динамической задачи термоупругости. Показано, что учет связности сказывается лишь на амплитудных параметрах термоупругих напряжений и не определяет их временную форму. Отмечается, что при длительностях тепловых возмущений больших  $> 10^{-10}$  сек несвязанную систему уравнений можно использовать, учитывая различия дисперсионных соотношений для упругих волн и теплового поля. При этом, для нетеплопроводящих сред, где коэффициент температуропроводности очень мал ( $\chi \sim 0$ ), дисперсионное соотношение для теплового поля становится тривиальным, и точное решение системы уравнений термоупругости будет соответствовать классическому решению В.И. Даниловской и выполняться для любых длительностей тепловых возмущений. Решение же этой задачи для теплопроводящих сред не позволяют адекватно описать формы импульсов напряжений в металлах, с характерной для них продолжительной фазой растяжения, значительно превышающей фазу сжатия(рис.1.1.b).

Анализ динамики процесса теплопереноса в теплопроводящих твердых телах (металлах), определяемая характеристикой  $z(t)$  уравнения теплопроводности, с очевидностью показывает, что тепловой источник с изменяющейся температурой и скоростью распространения  $\sim \sqrt{\chi/t}$ , создает возмущения плотности среды (растяжение),

распространяющиеся с упругой скоростью, весьма продолжительное время после импульса облучения. Таким образом, адекватное описание термонапряжений в теплопроводящих средах может быть построено только с учетом скорости потока тепла.

**§1.4.** Известно, что в металлах большую часть тепла переносят электроны, поток которых может быть описан в рамках гидродинамической модели. То есть, генерация упругих волн при движении теплового потока может быть ассоциирована с гидродинамической задачей о движении «теплового поршня», где в качестве термодинамической силы выступает  $\nabla T$ , и является задачей с «бегущим» граничным условием.

В системе уравнений одномерной несвязанной задачи динамической термоупругости, перемещения можно представить в виде двух составляющих -  $u = u_a + u_T$ . Здесь  $u_a$  - перемещение, соответствующее решению системы уравнений с традиционными граничными и начальными условиями,  $u_T$  - перемещение среды с учетом действия «теплового поршня». Для нетеплопроводящих материалов  $u_T \rightarrow 0$  и мы имеем обычную систему уравнений.

Для теплопроводящих сред в системе уравнений получим дополнительное волновое уравнение для  $u_T$  -  $\frac{\partial^2 u_T}{\partial x^2} - \frac{1}{c} \frac{\partial^2 u_T}{\partial t^2} = 0$ , которое описывает процесс, обусловленный переносом тепла в среде и требует задания граничных условий на характеристики теплового уравнения -  $x(t) = \sqrt{2\chi \cdot t}$ . При этом для времен  $t \geq \frac{\sqrt{2\chi t}}{c_L}$  нагретая область среды уже разгружена и, следовательно, напряжения  $\sigma_x = 0|_{x=\sqrt{2\chi t}}$ .

Тогда с учетом соотношения Дюгамеля граничные условия запишутся в виде -  $\frac{\partial u}{\partial x} = \beta T|_{x=\sqrt{2\chi t}}$  и на подвижной границе получим следующие условия:

$$u_T(x,0) = 0; \frac{\partial u_T}{\partial t}(x,0) = 0, \quad \rho \frac{\partial^2 u_T}{\partial t^2} = (3\lambda + 2\mu)\alpha_T \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=\sqrt{2\chi t}}.$$

Действие движущегося «теплового поршня» с учетом решения для  $\nabla T$  на его фронте, в первом приближении, даст добавку к традиционному решению динамической задачи термоупругости в напряжениях, хорошо описывающую экспериментально

наблюдаемую фазу растяжения в металлах (рис.1.1b). Асимптотика ее имеет следующий

$$\text{вид: } \sigma_T = \rho v_T \cdot c_L \approx c_L (3\lambda + 2\mu) \alpha_T \left\{ \frac{B}{2e\sqrt{\pi\chi}} (\sqrt{t} - \sqrt{10t_*}) - C \frac{Q}{2ce\sqrt{\pi\chi t}} \ln \frac{t}{10t_*} \right\}$$

Очевидно, что по этой же причине средний импульс напряжений, в теплопроводящих материалах:  $p = \int_0^t \sigma(t) dt > 0$ , где  $\sigma(t) = \sigma_a + \sigma_T$ . Так как величина импульса определяется фазой растяжения, то он направлен в сторону облучаемой поверхности, то есть к источнику излучения.

Это обстоятельство указывает на возможность перемещения теплопроводящих твердых тел в направлении источника излучения за счет термоупругих напряжений, генерируемых при неоднородном импульсном нагреве. На рис.1.2 представлены типичные интерферограммы движения маятника в результате воздействия импульсов излучения YAG:Nd лазера с длительностями импульсов -  $t_p \cong 30ns$  и  $t_p \cong 60\mu s$ .

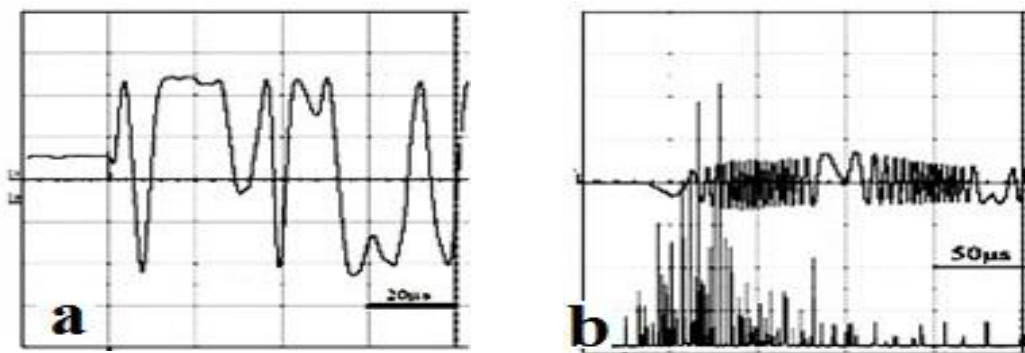


Рис.1.2.Интерферограммы движения маятника и импульсы излучения для двух режимов работы YAG:Nd лазера с  $t_p \cong 30ns$  -а и  $t_p \cong 60\mu s$  – б.

Следует отметить, что электронный механизм теплопереноса, определяющий формирование термонапряжений, неразрывно связан с термоэлектрическими явлениями, в частности, с эффектом Зеебека ( $E = \zeta \nabla T$ ).

Эта взаимосвязь иллюстрируется проведенными измерениями электрического тока при нагреве медного отполированного диска ( $\varnothing 20 \times 1$  мм) импульсами лазера с длительностью  $t_p \cong 30ns$  и  $t_p \cong 60\mu s$ . Время нарастания тока происходило за время облучения образца, а характер спада тока оказался подобен фазе растяжения в импульсе напряжений. То есть, движение диска, по сути, обусловлено импульсом отдачи электронов, подобно наблюдаемому инерционному движению электронов в экспериментах Толмена и Стюарта.

**§1.5.** Представлены результаты теоретического анализа и экспериментальных исследований динамики смещения поверхности металлов при облучении импульсами излучения наносекундной длительности.

В экспериментах по измерению смещения облучаемой поверхности металлических зеркал (Ag, Al, Cu, и др) было обнаружено существенное запаздывание смещения поверхности относительно лазерного импульса, отсутствующее при длительностях облучения порядка и более микросекунды, что не укладывается в представления линейной теории термоупругости -  $u(0,t) \cong const \cdot E(t)$ .

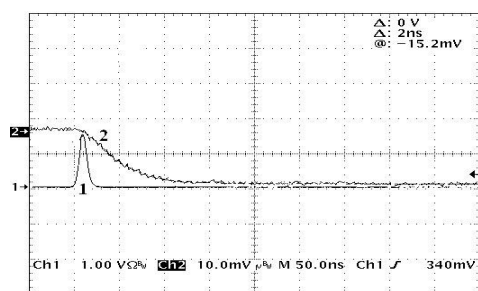
Наблюдаемая в экспериментах динамика смещения поверхности, по-видимому, обусловлена неравновесными процессами в зоне поглощения излучения наносекундной длительности. Учет неравновесных процессов приводит к обобщенному закону Дюгамеля с

$$\text{тепловой памятью} - \sigma_z = (\lambda + 2\mu)\varepsilon - (3\lambda + 2\mu)\alpha_T T(z,t) + \int_0^{\infty} \gamma(s)T(z,t-s)ds.$$

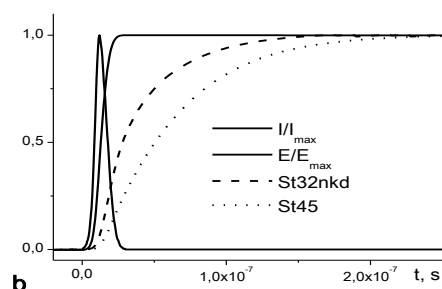
Вследствие этого смещение облучаемой поверхности металлов в результате термоупругого механизма выражается соотношением, хорошо описывающем эксперимент:

$$u(0,t) = -\frac{\alpha_T (3\lambda + 2\mu)}{\lambda + 2\mu} E(t)(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

На рис. 1.3а приведены осциллограмма импульса излучения лазера и интерферограмма смещения облучаемой поверхности образца из Al. На рис. 1.3б приведены нормированные зависимости от времени импульса излучения, энергии облучения -E(t), и смещения поверхности двух образцов стали различных марок.



**a**



**b**

Рис.1.3. Импульс облучения и интерферограмма смещения поверхности в Al-  
а;смещение поверхности образцов сталей –б.

Анализ экспериментальных результатов позволил получить времена релаксации( $\tau$ ) неравновесного процесса, для ряда металлов.

Алюминия	25-30 нсек	Молибден[111]	25-30 нсек
Титан	30-35 нсек	Вольфрам[111]	35 нсек
медь Cu	50-55 нсек	Серебро	55-60 нсек

**§1.6.** Приведены результаты моделирования и теоретического анализа процессов формирования деформаций изгиба, в зависимости от пространственного характера теплового источника, наведенного радиационным воздействием в элементах конструкций.

Термомеханические процессы характерные как для поверхностных, так и объемных тепловых источников, моделировались при воздействии лазерного излучения на пластины цветных стекол с одинаковой толщиной ( $h$ ) и разными коэффициентами оптического поглощения ( $\alpha$ ).

Экспериментальные результаты показали, что деформация пластин при действии объемных источников термонапряжений ( $\alpha h < 1$ ) наносекундной длительности складывается из квазигармонической реакции растяжение-сжатие и квазистатического изгиба, начинающегося одновременно с действием источника. В то время как при действии поверхностных источников термонапряжений ( $\alpha h \gg 1$ ), деформация пластин, в начале, определяется термдеформацией тонкого поверхностного слоя ( $\delta \sim 1/\alpha$ ) и, в дальнейшем, импульсным волновым процессом, приводящим, в конечном итоге, к изгибу пластины.

При теоретическом анализе воздействия объемных тепловых источников рассматривалась осесимметричная задача для пластины, с толщиной малой по сравнению с радиусом облучения, свободно опертой по контуру облучения. Решение представлено в виде суммы двух задач - задачи растяжения-сжатия и задачи симметричного изгиба.

Анализ деформаций изгиба пластин при действии поверхностного теплового источника был основан на законе сохранения энергии - равенстве энергии деформации изгиба пластины и энергии упругой волны, возбуждаемой поверхностным тепловым источником. Получено хорошее соответствие расчетов и результатов измерений.

## **Глава 2. Исследование нестационарных ударно-волновых процессов в твердых телах при наносекундном ударном нагружении.**

Наиболее интересной и информативной областью исследований отклика материалов на ударное возмущение является область нестационарного ударно-волнового процесса вблизи поверхности нагружения, определяющего эволюцию начальных профилей возмущения к характерным для установившегося процесса.

**§2.1.** Представлены результаты экспериментальных исследований процесса распространения импульсных напряжений наносекундной длительности в твердых телах в условиях одноосной деформации.

Импульсы давления инициировались при воздействии излучения импульсного лазера на тонкую алюминиевую фольгу. В экспериментах измерялись величина и форма продольной составляющей напряжения, а также скорость распространения импульсов в образцах разной толщины. Воспроизводимость величин давления от импульса к импульсу не превышала погрешности измерения энергии и лежала в пределах 10%.

На рис.2.1а приведены зависимости амплитуды продольных напряжений от толщины образцов для трех значений давления нагружения -  $P_0 = 50, 150, 350$  МПа. Уменьшение амплитуды продольных напряжений чрезвычайно сильное и происходит практически до одной величины  $\sim 0,5P_0$ .

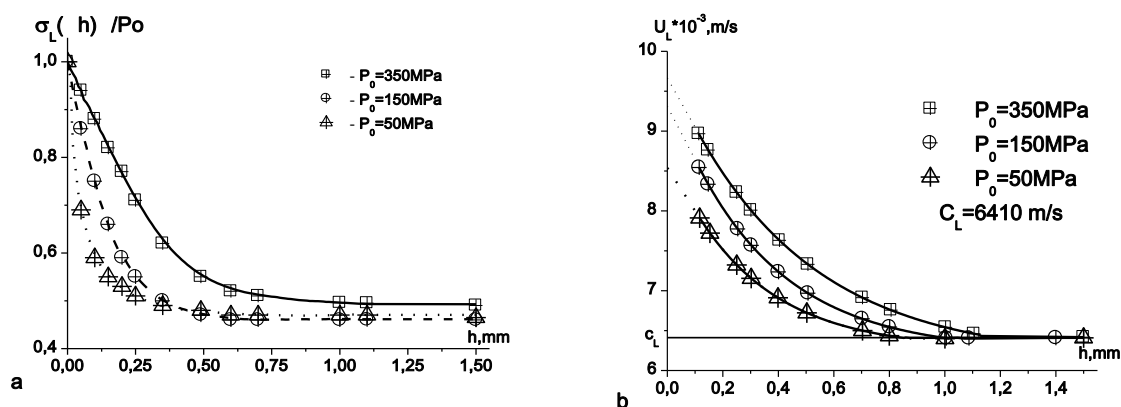


Рис.2.1 Зависимости  $\sigma(h)$  в алюминии (А5М) - а  $U_L(h)$  - б ( $P_0=0$ Мпа,50МПа,350Мпа).

На рис.2.1б приведены зависимости продольных скоростей распространения импульсов. Видно, что в области релаксации напряжений наблюдается значительное отличие скорости распространения от скорости звука. Релаксация продольных напряжений и аномалия величин скорости распространения при малых толщинах образцов наблюдались также в образцах меди, железа, монокристаллов NaCl и CsI, а также в монокристаллах кварца, кварцевого стекла и фторопласта-4.

Полученная информация о релаксации только продольной составляющей напряжения не позволяет провести достаточно полный анализ аномального характера неустановившегося ударно-волнового процесса, то есть возникает необходимость исследования характера изменений поперечных составляющих напряженного состояния.

**§2.2.** Измерения поперечных напряжений при одноосной деформации значительно расширяют информацию о поведении материалов при ударных нагрузках и дают возможность полностью описать напряженное состояние при плоском ударе.

Были разработаны и опробованы различные методики регистрации величины поперечных напряжений с использованием пьезокерамических и пьезопленочных датчиков давления. Результаты измерений поперечных напряжений в алюминии приведены на рис.2.2.

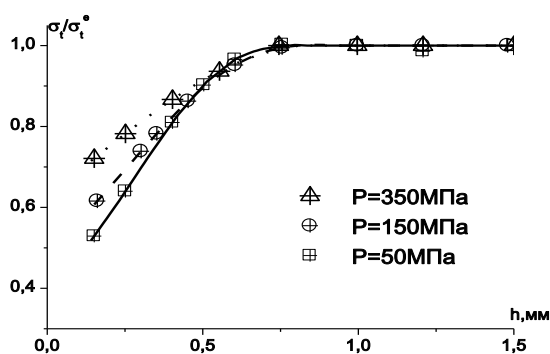


Рис.2.2. Нормированные зависимости амплитуды импульсов поперечных напряжений в алюминии А5М от расстояния до поверхности нагружения.

Как оказалось, изменение поперечных напряжений, также определяется релаксационными процессами, происходящими в приповерхностной области образцов.

**§2.3.** С целью дальнейшего изучения нестационарного ударно-волнового процесса в различных материалах были проведены экспериментальные исследования при величинах нагружения значительно меньших предела пропорциональности. Для увеличения точности измерений скорости ( $U_L$ ) была разработана дифференциальная схема измерений, в которой погрешность измерений не превышала 2,5%.

Проведенные исследования подтвердили наличие релаксационных процессов в зоне неустановившегося ударно-волнового процесса и в области упругих свойств материалов.

**§2.4** Приведены результаты измерений скорости распространения наносекундных импульсов давления в металлических фольгах( $h$ ). Для генерации импульсов давления использовался пикосекундный лазер с длиной волны 1,06 мкм, длительностью импульса  $t_p=0,2$  нсек и энергией  $E_p \approx 0,25$  мДж. Давление в зоне возбуждения не превышало  $p < 20$  Мпа, то есть, было ниже пределов упругости исследуемых металлов. Погрешность методики измерения скорости не превышала 2%.

Результаты экспериментов также продемонстрировали значительное отличие скорости распространения таких импульсов возмущения от скорости звука.

	h, mkm	$U_L, \text{m/s}$	$C_L, \text{m/s}$
Al	65	$9770 \pm 230$	6400
Cu	50	$7140 \pm 170$	4700
Steel	20	$6560 \pm 160$	5600

§2.5 Приводится анализ полученных в §§2.1 ÷ 2.4 результатов экспериментов, демонстрирующих наличие и особенности нестационарного (переходного) процесса вблизи поверхности ударного нагружения, характеризующегося релаксацией напряженного состояния и скорости распространения импульсов наносекундной длительности в металлах, щелочно-галогидных кристаллах и кварцевом стекле.

В связи с отсутствием модели, описывающей переходной процесс при высокоскоростном нагружении, анализ результатов можно провести на основе традиционных соотношений, характеризующих напряженное состояние материалов в условиях одноосной деформации.

Анализ изменения составляющих напряженного состояния с учетом зависимостей  $U_L(t)$  показывает, что релаксационные процессы характеризуются единым временем.

Для анализа экспериментальных результатов была использована функция, позволяющая учесть изменение всех контролируемых в эксперименте

параметров: 
$$F(t) = \frac{\sigma_i(t)}{\sigma_L(t)} = \frac{v(t)}{1-v(t)} = \frac{\sigma_i(t)}{\sigma_i^e} \cdot \frac{\sigma_L^e}{\sigma_L(t)} \cdot \frac{v^e}{1-v^e}$$
, где индексом (e) обозначены величины в установившемся ударно-волновом процессе, индексы.

Оказалось, что для алюминия и плавленого кварца  $F(0) \rightarrow 0$ , что соответствует стремлению к нулю коэффициента Пуассона  $\nu(0) \rightarrow 0$  (рис.2.3).

Изменение составляющих напряженного состояния в щелочно-галогидных кристаллах носит противоположный характер по сравнению с аналогичными зависимостями в металлах. Построенная по результатам экспериментов зависимость  $F(t)$  кардинально отличается от характерной для металлов -  $F(t) \rightarrow 1$  при  $t \rightarrow 0$  и, следовательно, коэффициент Пуассона  $\nu(0) \rightarrow 1/2$ .



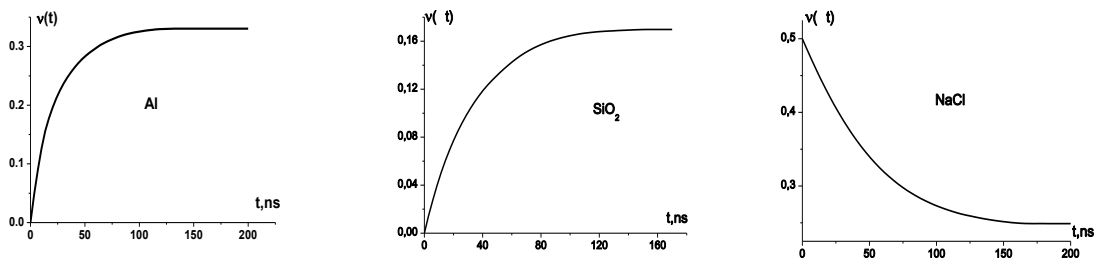


Рис.2.3. Аппроксимация зависимостей  $v(t)$  для Al, плавленого кварца и NaCl.

В рамках традиционных соотношений и предположения, что гидростатическое давление не меняется, то есть отсутствует диссипация энергии на малых расстояниях от поверхности удара, были рассчитаны зависимости изменения объемных модулей, а также коэффициентов Ламе в нестационарном ударно-волновом процессе (рис.2.4).

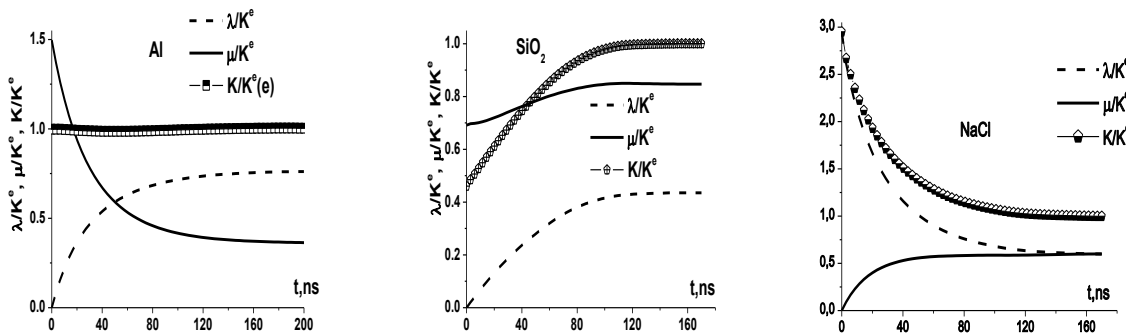


Рис.2.4. Нормированные зависимости объемных модулей ( $K^I/K^e$ ) и коэффициентов Ламе в Al, плавленом кварце и NaCl.

Характер этих зависимостей в алюминии и меди демонстрирует мгновенный отклик подобный отклику «жесткого стержня», что обусловлено высоким сопротивлением сдвигу при неизменном объемном модуле ( $K^I(0) = K^e$ ).

В кварцевом стекле характер изменения составляющих напряженного состояния качественно подобен наблюдаемым в металлах, но, в отличие от металлов, скорость распространения импульса возрастала от значения  $\sim 5000$  m/s вблизи поверхности нагружения (при толщине образца  $h \approx 0.12$  мм.), до значения равного продольной скорости звука ( $c_L = 5960$  m/s) для толщин образцов  $\sim 0,6$  мм.

Расчеты показывают, что отношение объемных модулей в плавленом кварце равно  $K^I(0)/K^e \approx 0.5$  при значении ( $v^e = 0.16$ ) и, следовательно, мгновенная деформация ( $\Delta V^I(0)/V$ ) практически в два раза превышает ее значение в установившемся ударно-волновом процессе.

Мгновенная реакция щелочно-галогидных монокристаллов подобна поведению «несжимаемой» жидкости ( $\nu(0) \rightarrow 1/2$ ), при этом  $K^I(0) = 3K^e$ . То есть, предположение о неизменности гидростатического давления приводит к выводу о том, что деформация ( $\Delta V^I(0)/V$ ) у поверхности нагружения в три раза меньше, чем в установившемся процессе.

Оценки времен релаксации, полученные из экспоненциальной аппроксимации зависимостей коэффициента Пуассона, дают следующие результаты для Al -  $\tau=25$ нс, плавленого кварца -  $\tau=30$ нс, NaCl -  $\tau=45$ нс.

**§2.6.** Существование нестационарного волнового процесса вблизи поверхности удара определяется сильнонеравновесным возбуждением продольных и поперечных мод колебательного спектра твердых тел при ударном нагружении с высокими градиентами давления. При этом характер переходных процессов, как демонстрируют результаты экспериментов, в значительной мере, обусловлен природой сил межатомного взаимодействия. Длительность же переходных процессов, определяемая скоростью перераспределения энергии по всем колебательным модам, существенно зависит от структурной неоднородности реальных материалов.

Особенности отклика материалов в нестационарном ударно-волновом процессе не могут быть описаны в приближении гармонического потенциала межатомного взаимодействия. Само существование такого процесса и особенности поведения материалов в нем обусловлено ангармонизмом реального межатомного потенциала.

Впервые учет ангармонизма был реализован через введение зависящей от температуры постоянной кубической атомной решетки в уравнение состояния, обычно записываемое в форме Ми-Грюнаизена в виде -  $P(V, T) = P_c(V) + \frac{\gamma(V, T)}{V} \cdot (E - E_c)$ .

Для невысоких интенсивностей нагружения коэффициент Грюнаизена ( $\gamma$ ) считается постоянным и рассчитывается через макроскопические константы -  $\gamma=3\alpha KV/c_v$ .

В квазигармоническом приближении Дебая параметр Грюнаизена определяет линейную зависимость изменения частот нормальных мод, или температуры Дебая, при

$$\text{изменении объема - } \gamma = -\frac{V}{dV} \cdot \frac{d\omega_D}{\omega_D} = -\frac{V}{dV} \cdot \frac{d\Theta_D}{\Theta_D}.$$

Для кубических кристаллов и изотропной среды температура Дебая может быть выражена через скорости продольных  $U_l$  и поперечных  $U_t$  упругих волн -

$$\Theta_D = \frac{\hbar}{k} \cdot \left( \frac{9N}{2V} \right)^{1/3} \cdot \left( \frac{1}{U_l^3} + \frac{2}{U_t^3} \right)^{-1/3}$$

и представляет собой сумму изменений температур

Дебая для продольных и поперечных мод, или граничных частот спектра продольных и поперечных мод.

Выразив отношение скоростей продольных и поперечных волн через коэффициент

Пуассона -  $\frac{U_t^2}{U_l^2} = \frac{(1-2\nu)}{2(1-\nu)}$ , и далее используя это соотношение в выражении для  $\Theta_D$ ,

получим выражение для коэффициента Грюнрайзена в зависимости от коэффициента

Пуассона - 
$$\gamma = \frac{1}{1+\nu} \cdot \frac{1}{(\sqrt{1-2\nu})^3 + 2(\sqrt{2(1-\nu)})^3} \cdot \left[ \frac{(\sqrt{1-2\nu})^3}{1-\nu} + \frac{3(\sqrt{2(1-\nu)})^3}{1-2\nu} \right] \cdot \frac{V}{dV}.$$

Для изотропных тел параметр Грюнрайзена может быть представлен в виде суммы параметров Грюнрайзена продольных ( $\gamma_l$ ) и поперечных ( $\gamma_t$ ) ветвей колебательного спектра -

$$\gamma = \frac{1}{3}(\gamma_l + 2\gamma_t),$$

которые определяют вклад теплового давления в составляющие

напряженного состояния.

Таким образом, зависимости изменения параметров Грюнрайзена в нестационарном ударно-волновом процессе с учетом экспериментальных зависимостей  $\nu(t)$  позволяют проанализировать в квазигармоническом приближении процесс перераспределения внутренней энергии между нормальными модами. На рис.2.5 приведены построенные таким образом зависимости параметра Грюнрайзена для трех исследованных материалов, а также изменение отношений ( $\gamma_l/\gamma_t$ ) и коэффициентов Ламе.

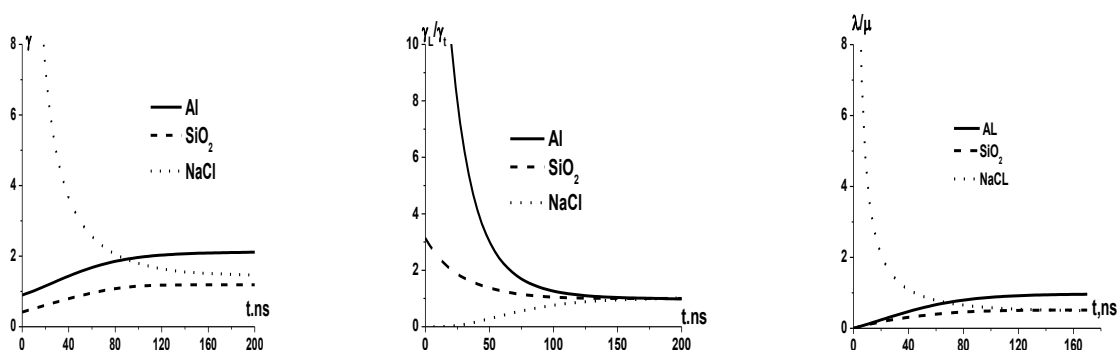


Рис.2.5 Зависимости  $\gamma(t)$ ,  $\gamma_l/\gamma_t=f(t)$  и  $\lambda/\mu=f(t)$  в Al, NaCl и SiO<sub>2</sub>.

Видно, что различие атомного строения определяет характер изменения всех параметров в нестационарном ударно-волновом процессе.

Вследствие ангармонизма потенциалов взаимодействия в простейшей модели строения твердых тел даже вблизи точки равновесия градиенты сил отталкивания, то есть модули жесткости в «пружинной» модели, существенно больше модулей притяжения. По этой причине, скоростная реакция сил отталкивания при быстрых деформациях сжатия значительно выше, чем сил притяжения, что и будет проявляться даже при невысоких интенсивностях нагружения. Следствием этого будет неравновесное распределение энергии возмущения по нормальным модам колебательного спектра при высокоскоростных возмущениях, что и определяет существование нестационарного ударно-волнового процесса в твердых телах.

### Глава 3. Исследования упругопластического отклика металлов на ударное нагружение наносекундной длительности.

Представлены результаты изучения формирования и эволюции двуволновой структуры упругопластических импульсных напряжений по мере распространения в металлах, а также исследований механизмов пластического течения в металлах с разной исходной структурой.

**§3.1.** Анализ полученных в экспериментах результатов, представленных в главе 2, приводит к выводу о «жестко-упругом» начальном отклике металлов на ударное возмущение, обусловленным неравновесным состоянием среды вблизи поверхности удара. В этой связи, представляет интерес изучение процесса формирования двуволновой структуры упругопластического отклика металлов при ударном нагружении.

На рис.3.1а приведены характерные профили импульсов сжатия для медных образцов разной толщины.

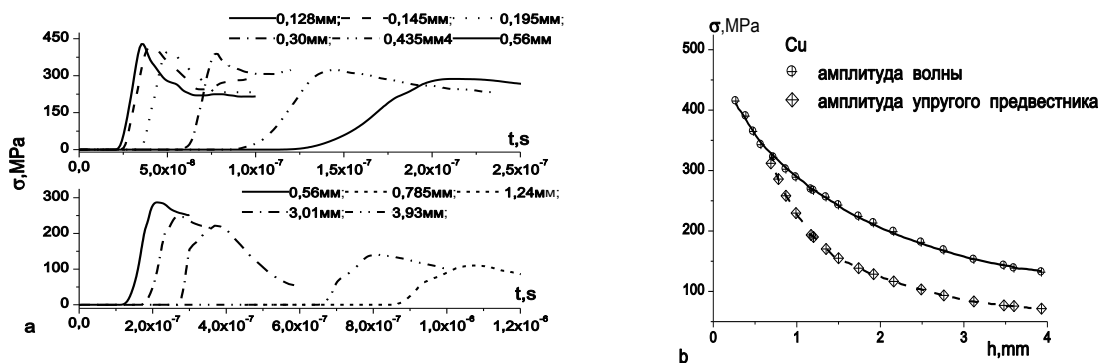


Рис.3.1.Профили продольных напряжений в Cu-а,затухание амплитуды напряжений и упругого предвестника в Cu-б.

В области, характеризуемой релаксационным нестационарным процессом, профили импульсов напряжений имеют единые гладкие фронты и, только в установившемся волновом процессе, наблюдается формирование двуволнового фронта и затухание упругого предвестника(рис.3.1.b).

Таким образом, полученные результаты подтверждают выводы главы 2 о неравновесных процессах, определяющих отклик материалов близи поверхности высокоскоростного ударного нагружения, а развитое пластическое течение наступает после завершения этих процессов.

**§3.2** Описаны методики подготовки образцов меди М1Р0, железа (О.ЗЖР), никеля (НН) и алюминиевого сплава (Д16) с различной исходной структурой для динамических и статических испытаний. Изменение исходной структуры образцов осуществлялось отжигом при разной температуре. Приведены результаты измерений пределов текучести и упрочнения при квазистатических испытаниях, которые соответствуют современным представлениям и хорошо описываются соотношением Холла-Петча.

**§3.3** Представлены результаты экспериментальных исследований влияния исходной структуры образцов на изменение механизмов пластического течения при наносекундном ударном нагружении.

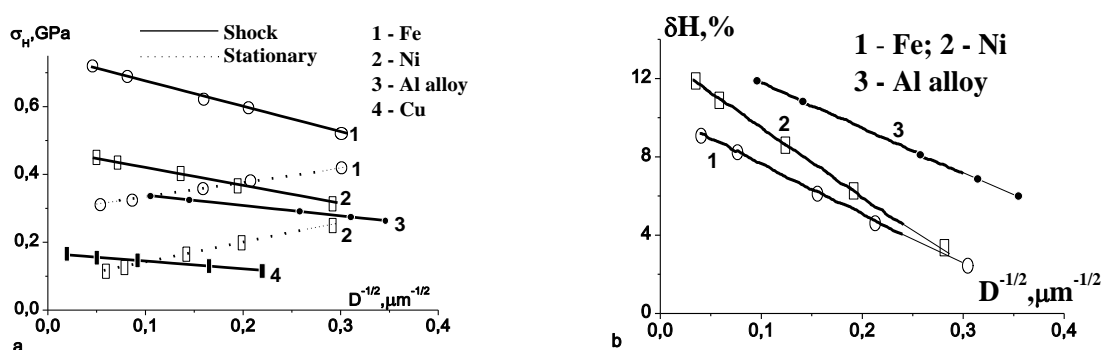


Рис.3.2. Зависимости  $\sigma_H(D^{-1/2})$  - а, зависимости  $\delta H(D^{-1/2})$  - б.

Проведенные измерения позволили построить динамические диаграммы  $\sigma$ - $\epsilon$  для образцов с разной исходной структурой. На рис.3.2а приведены зависимости динамического предела упругости ( $\sigma_H$ ) от размера зерна ( $D$ ) для квазистатических и динамических испытаний, а на рис.3.2б зависимости упрочнение ( $\delta H$ ) после ударного нагружения.

Полученные результаты демонстрируют нарушение соотношения Холла-Петча в случае наносекундного ударного нагружения – увеличение динамического предела Гюгонио и упрочнения с ростом размера зерна.

Этот эффект при таких длительностях удара, обусловлен особенностями перестройки внутризеренной дефектной структуры в крупнозернистых образцах и преобладающим вкладом ротационного механизма пластического течения в мелкозернистых образцах. Анализ механизмов перестройки исходной структуры в результате наносекундного нагружения проводился с применением методики широкополосной оптико- акустической спектроскопии.

**§3.4** Приведена методика оптико-акустической диагностика структурных перестроек, позволяющая исследовать с высокой точностью затухание и скорости упругих волн в полосе частот до 70МГц.

Скорости упругих волн в образцах с разным размером зерна измерялись вдоль и поперек направления распространения ударной нагрузки как до, так и после нагружения. Эти измерения позволили оценить вклад ротационного механизма в пластическое течение образцов. На рис.3.3а приведены зависимости эффективного числа зерен( $\Delta n=f(D)$ ), изменивших кристаллографическую ориентацию в образцах с разным размером зерна.

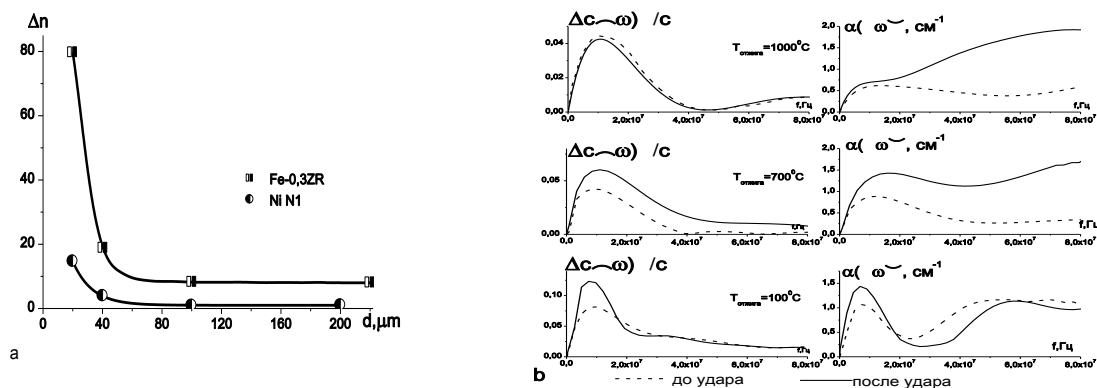


Рис. 3.3 Зависимости  $\Delta n(D)$ –а; зависимости  $\Delta C(\omega)/c$  и  $\alpha(\omega)$  – б ( $1000^\circ\text{C}$  -  $D \sim 220 \mu\text{мкм}$ ;  $700^\circ\text{C}$  -  $D \sim 20 \mu\text{мкм}$ ;  $100^\circ\text{C}$  -  $D \sim 20 \mu\text{мкм}$ ).

Видно, что в поликристаллах с  $D \leq c_L \tau_{\text{фронт}} (\leq 3 \cdot 10^{-5} \text{ м})$  ротационный механизм является определяющим пластическое деформирование, при этом упрочнение минимально. Анализ частотных зависимостей затухания ( $\alpha(\omega)$ ) и скорости упругих волн ( $\Delta C(\omega)/c$ ) до и после ударного нагружения, образцов позволил оценить вклад внутризеренной перестройки структуры в пластическое течение (рис.3.3б).

Полученные результаты указывают на то, что нарушение соотношения Холла-Петча в крупнозернистых образцах (увеличение  $\sigma_H$  и  $\delta H$  с ростом  $D$ ) обусловлено определяющим вкладом перестройки внутризеренной дефектной структуры в деформационное упрочнение, то есть увеличением плотности дислокаций и двойников.

**§3.5** Представлены методика и результаты исследований перестройки микроструктуры металлических образцов, находящихся в напряженном состоянии, при воздействии динамических нагрузок.

В одной серии экспериментов плоские образцы в виде лопаток с различной структурой, находящиеся под нагрузкой, зондировались наносекундными импульсами с амплитудами много меньше пределов упругости. В другой серии образцы нагружались импульсами с амплитудами порядка динамического предела Гюгонио.

Результаты исследований показали, что в первой серии экспериментов для всех исследуемых металлов наблюдается рост затухания упругих импульсов с увеличением размера зерна и ростом напряжения растяжения.

В отличие от этого, во второй серии максимальное затухание неупругих импульсных напряжений наблюдается при практически нулевом статическом напряжении, а значительное снижение коэффициента затухания происходит с увеличением напряжения для всех температур отжига образцов.

Таким образом, методика исследования материалов при одновременном воздействии статических и динамических нагрузок позволяет "вымораживать" действие одних структурных уровней деформации и "включать" другие, что дает возможность определения характерных масштабов тех или иных структурных уровней деформации и, следовательно, прочностных характеристик элементов конструкций в различных условиях динамического нагружения.

#### **Глава 4. Исследования прочности твердых тел при наносекундных длительностях ударной нагрузки.**

Приводятся результаты экспериментальных исследований разрушения твердых тел при ударных нагрузках разной длительности и временного профиля. Показано, что наряду с известным влиянием величины и длительности ударного импульса на процессы разрушения существенное влияние имеет пространственно-временной спектр ударной нагрузки.

**§4.1.** Представлены результаты исследования динамической прочности неорганические стекла.

Нагружение образцов производилось импульсами давления длительностью 80 нсек, возбуждаемых при воздействии лазерного излучения на тонкий слой алюминия, находящегося в контакте с образцом. Одновременно с измерением скорости свободной поверхности для определения момента разрушения образцов регистрировалось излучение He-Ne лазера, зеркально отраженное от плоскости, возникающей при отколе трещины.

Результаты экспериментальных исследований показали, что начало разрушения образцов стекла К8 при наносекундном нагружении происходит по откольному механизму при значениях напряжений  $0.45 \pm 0,03$  ГПа в 5 раз превышающих значение временной прочности.

**§4.2.** Для получения информации о порогах как лучевой, так и динамической прочности стекол была разработана методика измерения давления при оптическом пробое в объеме прозрачных материалов.

Разработанная методика и полученные результаты позволили определять: 1- лучевую и динамическую прочность объема прозрачных материалов, что особенно существенно для неорганических стекол с сильно различающимися значениями поверхностной и объемной прочности; 2-получать количественную информацию о термонапряжениях в прозрачных средах; 3-определять изменение оптических характеристик материала в процессе лазерного воздействия.

**§4.3.** Представленная в §4.2 методика была применена для исследования влияние наноструктуры двухфазного стекла на пороги лазерного пробоя и процессы разрушения.

Двухфазные стекла, получающиеся из однофазного стекла в результате метастабильной ликвации, представляют собой макрооднородный материал, в котором характерные размеры фазовых образований составляют несколько десятков или сотен нанометров. Такого рода материалы представляют собой практически композит, получающийся не механическим соединением отдельно приготовляемых веществ, а формирующийся в результате физико-химического процесса в первоначально однородном веществе.

Результаты исследований показали, что микроструктура двухфазного стекла сказывается и на энергетических порогах проявления тех или иных физических процессов оптического пробоя и на прочностных его свойствах, определяющих развитие процесса разрушения.

На рис.4.1 представлены характерный вид зон разрушения при энергии излучения  $E \sim 39$  мДж; в однофазном стекле и двухфазном стекле. Верхние фотографии сделаны по направлению лазерного луча, нижние – нормально к нему.



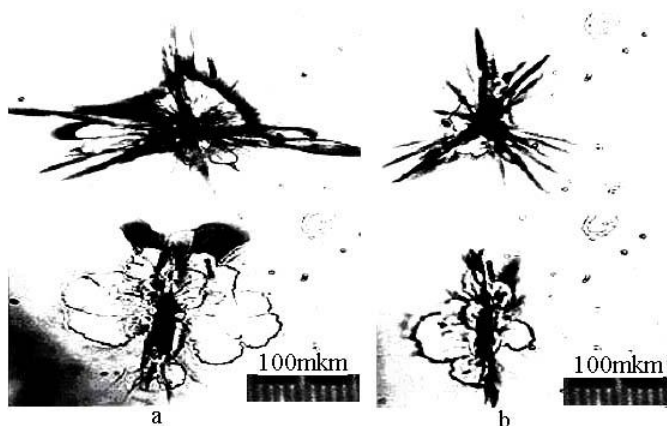


Рис.4.1 Характерный вид зон разрушения при  $E \sim 39\text{mJ}$ ; а – однофазное стекло, б – двухфазное стекло

На рис.4.2 приведены зависимости удельной плотности механической энергии  $W_v(E)$  и относительного изменения объема ( $\delta$ ) области растрескивания от энергии облучения в одно- и двухфазных стеклах, а также и в кварцевом стекле.

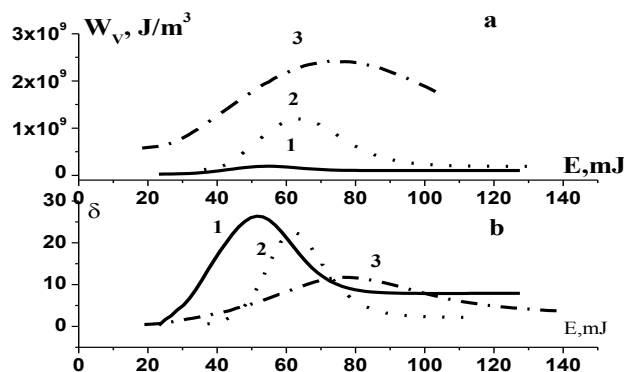


Рис. 4.2. Зависимости удельной плотности механической энергии  $W_v(E)$ -а; относительного изменения объема области растрескивания  $\delta(E)$  – б (1-однофазное стекло;2-двухфазное стекло;3-кварцевое стекло).

Результаты экспериментальных исследований показали заметное различие оптических и механических свойств однородных и двухфазных стекол. При этом именно наличие двухкаркасной структуры нанометрового масштаба является основным фактором, определяющим значительное увеличение прочности двухфазных стекол, представляющих по сути нанокомпозит.

**§4.4.** Приведены результаты исследований динамической прочности кристаллов NaCl при воздействии цуга ударных импульсов наносекундной длительности.

Информация об особенностях деформирования и разрушения материалов при таких ударных нагрузках отсутствует, хотя вероятность возникновения пульсирующих или

знакопеременных напряжений малой длительности при воздействиях излучений, или потоков частиц на элементы конструкций весьма значительна. При этом времена между пульсациями могут быть сравнимы с временами релаксации локальных напряжений, обусловленными масштабами дефектной структуры. В такой ситуации возможность прогнозирования прочности с позиций кинетической модели разрушения далеко не очевидна. Более того, при таком характере ударного нагружения возникает возможность реализации квазирезонансного механизма разрушения.

На рис.4.3. приведены результаты исследований откола в кристаллах NaCl при нагружении цугом импульсов наносекундной длительности.

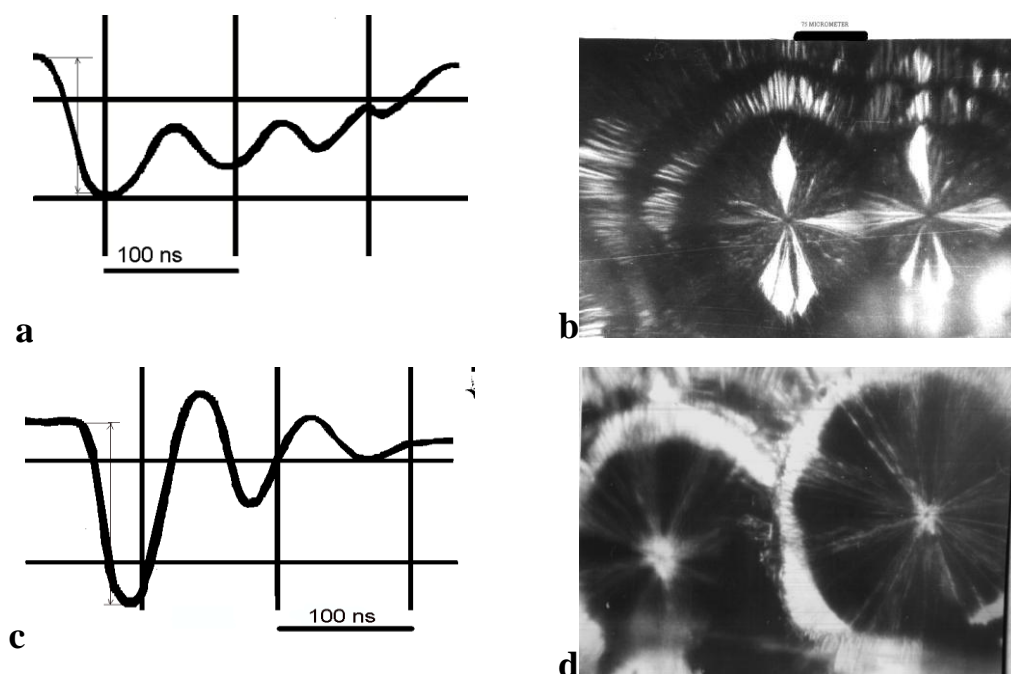


Рис.4.3. Разрушении кристаллов NaCl импульсами с пульсирующим профилем ударной нагрузки.(a,c- временные зависимости скорости свободной поверхности; b,d- микроочаги разрушения в плоскости откола).

Исследования и фрактографический анализ подтвердили возможность квазирезонансного развития микроочагов откольного разрушения и снижение порога откола, которое наблюдается при уменьшении длительности пульсаций и времени между ними.

**§4.5.** Приводятся результаты исследований электромагнитного излучения при разрушении пьезоэлектриков.

Интерес представляет изучение корреляции возникновения и эволюции электромагнитных импульсов с процессами микроразрушений при отколе в условиях ударного нагружения наносекундной длительности.

Исследовались образцы монокристаллов кварца X-среза и пьезокерамики ЦТБС-3. Нагружение образцов осуществлялось импульсами давления длительностью 80 нсек. Одновременно с измерением тока с пьезопластин регистрировался сигнал с катушки индуктивности, расположенной вокруг образцов. Индуктивный датчик регистрировал возникновение импульсов электромагнитного излучения с длительностями 2-12 нсек. Время появления электромагнитного излучения совпадает с моментом формирования максимальных растягивающих напряжений на глубине откольного слоя.

Причиной возникновения коротких импульсов электромагнитного излучения является образование новых поверхностей в результате разрушений на микроструктурном уровне, что приводит к появлению локальных градиентов поляризации, высокой напряженности электрического поля и электрическому пробое на масштабах микроразрушений.

Наблюдалась корреляция спектра электромагнитного излучения и масштабов структурных уровней, определяющих процесс разрушения пьезоматериалов наносекундными импульсами давления.

Таким образом, исследования структуры электромагнитных импульсов, генерируемых при разрушении пьезоэлектриков, дает возможность получать информацию о развитии процесса разрушения хрупких материалов и масштабах структуры, определяющих процессы разрушения в том или ином диапазоне длительностей ударной нагрузки.

**§4.6.** Приводятся результаты исследования откола в ПММА при микросекундных ударных нагрузках, которые демонстрируют влияние длительности фронта ударного импульса на характер и пороги откольного разрушения.

Эксперименты проводились на установке электрического взрыва с длительностью ударной нагрузки порядка 1 мкс. Плоская ударная волна инициировалась взрывом фольги и доставлялась к образцу через волновод из ПММА, при этом форма ударной нагрузки могла изменяться за счет изменения механического импеданса тонкого слоя расположенного между волноводом и образцом.

Обнаружено, что характер и порог откола значительно различаются для разных временных форм ударной нагрузки. При нагружении образцов ударным импульсом, с более крутым фронтом, наблюдается увеличение плотности микроочагов разрушения, меньший

размер откольных «розеток» и снижение пороговых напряжений разрушения. Такой характер разрушения обусловлен корреляцией масштабов мезоструктуры с пространственно-временным спектром ударной нагрузки.

**§4.7** Представлены результаты экспериментальных исследований разрушения горных пород при ударных нагрузках микросекундной длительности ( $\sim 2,5$  мкс), генерируемых при электрическом взрыве проводников.

Исследования разрушения образцов доломита, песчаника и габродиабаза проводились при двух разных методиках нагружения, что позволило определить динамическую прочность пород при откольном разрушении, пороги старта трещин в образцах с исходным надрезом и оценить затраты энергии на их развитие.

Исследования откола при микросекундных ударных нагрузках выявили существенное различие процессов разрушения в горных породах. Показано, что в относительно однородных породах, как например доломит, затраты энергии импульса на образование магистральной трещины не велики и как следствие в таких материалах наблюдается макрооткол. В структурно-неоднородных породах (песчаник, габродиабаз) затраты энергии на развитие трещин весьма значительны. В следствие этого, при наличии наблюдаемого множественного растрескивания на глубине откола – макрооткол, при таких длительностях нагружения, реализуется лишь при значительном превышении растягивающих напряжений порога образования микротрещин.

## **Глава 5. Экспериментальные методы, разработанные для научных исследований и решения прикладных задач.**

**§5.1.** Представлены методы расширения возможностей лазерных интерферометров для измерений параметров движения поверхности твердых тел при динамических нагрузках. Применяющийся обычно интерферометр Майкельсона имеет ряд существенных ограничений как для измерения достаточно больших смещений, превышающих в  $10^{2-5}$  раз длину волны ( $\lambda_0$ ) излучения лазера, так и для измерения очень малых смещений  $\ll \lambda_0/4$ .

Для увеличения чувствительности интерферометрического метода измерения малых смещений разработаны схемы интерферометров, в которых использовано увеличение доплеровского сдвига частоты при многократном отражении светового луча от исследуемой поверхности.

Возможность измерения больших динамических смещений реализуется за счет увеличения постоянной интерферометра при использовании интерференции между отраженными под разными углами световыми лучами. Доплеровский сдвиг частоты для

каждого из отраженных лучей пропорционален косинусу соответствующего угла, который может быть определен с достаточной точностью.

Предложенные схемы интерферометров, позволяют существенно расширить диапазон применения интерферометрических методов измерения динамических смещений от десятых долей длины световой волны до десятков и сотен длин волн.

**§5.2** Приведены методика и результаты исследований лучевой стойкости оптических элементов.

Традиционно за порог лучевой стойкости оптических элементов принимается интенсивность излучения, приводящая к возникновению оптического пробоя у поверхности, хотя корректнее за порог лучевой стойкости считать интенсивность, при которой начинает происходить необратимое изменение оптических характеристик поверхности оптических элементов.

Наиболее точная и полная информация о процессах взаимодействия лазерного излучения с оптическими элементами, их поглощательной способности и лучевой стойкости может быть получена при измерениях параметров термомеханического процесса непосредственно в зоне воздействия излучения.

Проведенные исследования показали, что истинным порогом лучевой стойкости является значение интенсивности облучения, при превышении которой начинается нелинейный рост коэффициента поглощения, соответствующий началу перестройки и развития дефектной структуры поверхности.

**§5.3.** Представлены исследования физических и технических аспектов возможности бесконтактного фототермоакустического метода измерения коэффициента поглощения прозрачных оптических элементов. Показано, что применение фотоакустических методов измерения поглощения корректно лишь при тепловом механизме взаимодействия излучения с веществом, когда связь амплитуды любой из мод термоакустического отклика среды линейно зависит от величины поглощенной энергии. Отмечается, что бесконтактные фототермоакустические методы измерения коэффициента поглощения прозрачных оптических сред на сегодняшний момент являются наиболее перспективными при оперативном контроле качества оптических элементов и коррекции технологий производства.

**§5.4.** Приводятся примеры использования разработанной оптико-акустической (ОА) ячейки для дефектоскопии и измерения упругих свойств материалов и элементов конструкций.

В ОА-ячейке совмещены функции оптического и акустического волноводов, а также эффективного термоакустического преобразователя свет-звук, что позволило преодолеть ряд технических ограничений применения ОА-эффекта в дефектоскопии. Разработанная конструкция позволила проводить измерения при одностороннем доступе к исследуемому объекту, или при одновременном контроле проходящих и отраженных акустических импульсов. Представленные примеры применения убедительно демонстрируют информативность и перспективность разработанных методик использования ОА дефектоскопии.

**§5.5.** Приводятся исследования возможности высокой концентрации наносекундных импульсов давления в предельно малой пространственной области ( $\sim \varnothing 0,5 \times 1,0$  мм).

Описаны методики экспериментальных исследований фокусировки в воде наносекундных импульсов давления при разных начальных распределениях давления – на сферическом концентраторе, которые, как известно, существенно влияют на достижение максимальной остроты фокусировки. Представлены результаты измерений для двух начальных распределений (колоколообразном и кольцевом) в зависимости от уровня начального давления ( $p_0$ ) и геометрических параметров ОА-концентратора.

Продемонстрирована возможность значительного увеличения эффективности фокусировки за счет перехода от колоколообразного распределения к кольцевому. Показано, что для низких уровней  $p_0$  положительный эффект обусловлен, в первую очередь, увеличением эффективного угла сходимости за счет соответствующей трансформации функции распределения. Для более высоких начальных давлений дополнительным фактором является ослабление негативного влияния нелинейной рефракции при кольцевом начальном распределении давления на концентраторе..

**§5.6.** Представлены исследования процессов переноса импульса в трех массовой ударной системе, представляющие интерес как с фундаментальной точки зрения, так и для решения целого ряда прикладных задач. Например, для повышения эффективности работы ударного инструмента. Решение этой задачи, основанное на стереомеханической модели без учета волновых процессов в соударяющихся элементах, не позволяет в полной мере рассмотреть вопрос об эффективности переноса импульса в таких ударных системах.

В экспериментах регистрировался волновой процесс в стержне-преграде, возбуждаемый как при непосредственном ударе стержня-ударника, так и при ударе через короткий промежуточный стержень-боек. Исследования проводились в диапазоне скоростей ударника  $V_0 \sim 5 \div 15$  м/с, то есть в условиях упругого взаимодействия соударяющихся элементов.

Результаты экспериментов, убедительно показывают факт увеличения эффективности переноса энергии в  $1,2 \div 1,3$  раза в ударной системе из трех тел по сравнению с традиционной ударной системой двух тел. Этот эффект обусловлен возникновением, так называемого, эффекта «дребезга» легкого бойка, что обеспечивает порционный отбор энергии ударника и определяет квазипластический механизм соударения. Численное моделирование задачи подтверждает результаты эксперимента.

Исследования периодического режима работы ударного инструмента с промежуточным легким бойком подтверждают повышение эффективности переноса ударного импульса и возможность его применения в установках и инструментах ударного действия.

При этом отметим, что увеличение эффективности работы такого рода ударных систем, будет определяться не только ростом эффективности переноса ударного импульса, но и увеличением эффективности разрушения гетерогенных сред за счет сложного пространственно-временного спектра ударного импульса, генерируемого в системе из трех тел.

### **Выводы**

1. Разработаны экспериментальные методы изучения термомеханических процессов при лазерном воздействии на материалы. Впервые показано принципиальное различие характера импульсных термоупругих напряжений в тепло- и нетеплопроводящих материалах.

2. Впервые продемонстрирована в эксперименте возможность перемещения металлических объектов в направлении источника неоднородного нагрева и представлен теоретический анализ этого эффекта.

3.. Впервые получены экспериментальные данные о динамике движения облучаемой поверхности твердых тел при наносекундной длительности импульсов излучения и представлена модель, учитывающая влияние неравновесных процессов на параметры ее движения.

4. Впервые получены данные, свидетельствующие о неравновесном характере процессов в твердых телах вблизи поверхности ударного возмущения - в зоне формирования импульсных напряжений. Представлен анализ обнаруженных особенностей протекания нестационарного ударно-волнового процесса, показавший определяющее влияние ангармонизма и атомного строения твердых тел на характер этого процесса.

5. Впервые экспериментально показано, что формирование двуволновой структуры фронта импульсов напряжения при упругопластическом высокоскоростном

деформировании твердых тел начинается лишь по завершении нестационарного ударно-волнового процесса вблизи поверхности нагружения.

6. Впервые обнаружено нарушение соотношения Холла-Петча в случае наносекундного ударного нагружения поликристаллических металлов, обусловленное корреляцией пространственно-временных параметров ударной нагрузки и характерных масштабов структуры поликристаллических материалов.

7. Исследовано различие прочностных свойств однородных и двухфазных стекол. Показано, что наличие двухкарасной структуры нанометрового масштаба является основным фактором, определяющим увеличение лучевой и механической прочности двухфазного стека – практически, наноструктурного композита.

8. Экспериментально показана возможность реализации квазирезонансного разрушения твердых тел при ударном нагружении цугом наносекундных импульсов.

9. Показано, что наряду с известным влиянием величины и длительности ударного импульса на процессы разрушения существенное влияние имеет корреляция масштабов дефектной структуры материалов и пространственно-временного спектра ударной нагрузки.

10. Разработаны методы экспериментальных исследований, позволившие решить целый ряд прикладных задач.

#### **Основное содержание работы изложено в следующих публикациях:**

1. Ю.В.Судьенков, А.И.Недбай, О.Ф.Ронжин, Н.М.Филиппов Влияние скорости нагружения на поведение упруговязкопластического материала // Письма в ЖТФ, 1980, т.6, вып.18, с.1102-1105
2. Березин Г.В., Судьенков Ю.В. Исследование УВ от ЭВП по динамическому отклику твердотельной преграды // Физическая механика, Л.: 1980, вып.4, с Л19-127.
3. Ю.В.Судьенков, Н.М.Филиппов, А.И.Недбай Эффективная вязкость алюминия при высоких скоростях деформации // ЖТФ, 1981, т.51, вып.10, с.2181-2182
4. Судьенков Ю.В., Филиппов Н.М. Влияние шероховатости поверхности на динамический отклик металлов при лазерном воздействии //“Письма в ЖТФ”, 1982, т.7, вып.21, с.1221-1223
5. Воробьев Б.В., Недбай А.И., Судьенков Ю.В., Филиппов Н.М. Исследование механизмов взаимодействия наносекундного лазерного излучения с металлами //Письма в ЖТФ. 1983. Т. 9. № 7. С. 395-399.
6. Судьенков Ю.В. Релаксация упругих постоянных алюминия вблизи поверхности ударного нагружения//Письма в ЖТФ, 1983, т.9, вып.23, с.1418-1422.
7. Судьенков Ю.В. Измерение поперечных напряжений в условиях одноосной деформации при субмикросекундном нагружении // ЖТФ, 1984, Т.54. вып.10. С.2035-2037.



8. Байзаков О.Д., Судьенков Ю.В. Релаксационные явления в материалах вблизи поверхности упругого субмикросекундного нагружения // Письма в ЖТФ, 1985, т.11. вып. 23. С.1433-1437.
9. Судьенков Ю.В., Даубаев У., Макаревич И.П., Морозов В.А., Недбай А.И. Интерферометры для измерения динамических смещений // "Вестник ЛГУ", 1985, сер. мат. мех. астрон., деп., в ВИНТИ, №4024-85Д
10. Судьенков Ю.В. Особенности ударноволнового процесса в твердых телах вблизи поверхности высокоскоростного нагружения // Проблемы динамических процессов в гетерогенных средах, Калинин, 1987, с.120-126
11. Байзаков О.Д., Морозов В.А., Судьенков Ю.В. Модель затухания упругого предвестника с учетом релаксационных явлений в приповерхностной зоне ударного нагружения // Газодинамика и теплообмен под ред. Н.Н.Поляхова. Л., 1987. Т.9. С187-191.
12. Аверьянов Н.Е., Балошин Ю.А., Павлишин И.В., Судьенков Ю.В., Юревич В.И. Исследование формы акустических сигналов возбуждаемых излучением лазера в металлических отражателях // ЖТФ. 1987. Т..57. Вып. 11. С.2123-2130.
13. Судьенков Ю.В., Воробьев Б.Ф., Даубаев У., Недбай А.И. Устройство для многократных отражений в двухлучевом интерферометре // Авторское свид., №1399644, 01.02.1988
14. Антонов А.А., Балошин Ю.А., Павлишин И.В., Судьенков Ю.В., Юревич В.И. Способ определения качества поверхности оптических изделий // Авторск. свид. №1455292, 01.10.1988
15. Судьенков Ю.В., Воробьев Б.Ф., Даубаев У., Недбай А.И. Устройство для многократных отражений в двухлучевом интерферометре // Авторск. свид. №1490463, 30.06.1989, БИ №24
16. Аверьянов Н.Е., Балошин Ю.А., Буханов К.Ф., Павлишин И.В., Судьенков Ю.В., Юревич В.И. Optical-acoustic effect in laser -optics investigations. // (Fr)Rev.Phys.Appl., 1990, v.25, 463-467
17. Ю.А.Балошин, Ю.В.Судьенков, Юревич В.И. Slow thermodeformation of metals fast laser heating // SPIE Proceedings. V 1440, 71 (1991).
18. Ю.В.Судьенков, О.Д.Байзаков Экспериментальные исследования влияния структуры на динамический отклик меди при субмикросекундном упругопластическом деформировании // Проблемы прочности, 1991, №9, с.79-81
19. Антонов А.А., Буханов К.Ф., Судьенков Ю.В., Юревич В.И. Способ определения порог разрушения оптического изделия // Авторское свид. №4981215\2520.06.1991
20. Антонов А.А., Судьенков Ю.В., Юревич В.И. Способ измерения коэффициентов поглощения // Авторское свид., №1665796\251992
21. Ю.В.Судьенков, Ю.Б. Никитин Исследование влияния пластической деформации на затухание упругих волн в железе // Вестник ЛГУ", 1992, сер.1, №1, с.113-116
22. Никитин Ю.Б., Орлова С.А., Судьенков Ю.В. Оптикоакустический эффект в исследованиях структуры и дефектоскопии материалов // Дефектоскопия, 1992, №12, с.24-30
23. Ю.В. Судьенков, Ю.Б. Никитин Экспериментальные исследования влияния структуры на распространение упругопластических волн напряжений в металлах при субмикросекундном нагружении // Письма в ЖТФ, 1993, т.19, в.12, с.66-69
24. Ю.Б.Никитин, Ю.В.Судьенков Множественный квазипериодический откол в NaCl при пульсирующей и знакопеременной ударных нагрузках // Письма в ЖТФ", 1993, т.19, в.12, с.62-65

25. Судьенков Ю.В., Юревич В.И. Измерение коэффициента поглощения селенида цинка бесконтактным фототермическим // Известия РАН, 1993 Сер. физич., т.57, вып.12 с.160-166
26. Иванов Э.В., Судьенков Ю.В.. Эффективность фокусировки субмикросекундных импульсов давления в воде в зависимости от радиального распределения их начальной амплитуды. // "Письма в ЖТФ", 1996, т.22, вып.22, с.27-30,
27. Иванов Э.В., Судьенков Ю.В.. Экспериментальные исследования процессов фокусировки субмикросекундных импульсов давления в жидкости // ЖТФ, 1998, т.68, №6, с.111-117
28. Судьенков Ю.В., Иванов Э.В., Прочность и разрушение материалов и конструкций, С.- Пб, изд. С.-ПбГУ, 1999, в.18, с.220-227
29. Судьенков Ю.В. Лучевая стойкость и особенности разрушения металлических зеркал при импульсном воздействии лазерного излучения // Вестник Тамбовского университета, 2000, т.5, вып.2-3, с.216-218
30. Судьенков Ю.В., Никитин Д.Ю. Оптико-акустическая ячейка для дефектоскопии материалов и диагностики биологических объектов // Сб. трудов X сессии Рос. Акуст. общ., Москва, 2000, т.2, с.345-348
31. Судьенков Ю.В. Электромагнитное излучение при разрушении пьезоэлектриков субмикросекундными импульсами давления // ЖТФ, 2001, том 71, вып.12, с.101-103
32. Sud'cnkov Y. Influence of the structural levels on the elastic-plastic hardening of metals under submicrosecond shock loading // Proc. of conference Shock-Compression of Condensed Matter. Atlanta, USA. July, 2001. ch.IX, p627-629
33. Судьенков Ю.В. Откол в стекле К8 при субмикросекундном ударном нагружении // Письма в ЖТФ, 2001, том 27, выпуск 11, с.30-35
34. Ю.В. Судьенков, З. А. Сажко Оптико-акустическая спектроскопия изменений структуры металлов вследствие пластической деформации ударом субмикросекундной длительности // ЖТФ, в.1, 2003, с.134-136
35. Морозов Н.Ф., Зимин Б.А., Семенов Б.Н., Судьенков Ю.В., Сусликов А.И., Баранов Г.А., Беляев А.А., Цветков Г.В. Исследование динамической прочности объема кварцевого стекла методом оптического пробоя // Письма ЖТФ, 2004, т.30, в.6, с.38-44
36. З.А. Валишева, Ю.В. Судьенков Особенности термоупругого отклика металлов при субмикросекундных длительностях нагрева // Труды XVI сессия Российского акустического общества, Н.Новгород, 2005
37. Зимин Б.А., Судьенков Ю.В., Сусликов А.И. Исследования динамической прочности горных пород при ударных нагрузках микросекундной длительности // Труды XV Международная научная школа им. акад. С. А. Христиановича «Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках», Крым, Алушта, 19-25 сентября, 2005 г
38. Yuri Sudcnkov, Zoya Valisheva Optical-Acoustic Spectroscopy of Metal Elastic Property Modifications Due To Thermal Treatment and Shock Strengthening // Proceedings Forum Acusticum, Budapest, 2005 v.L, p95-98
39. Ю.В. Судьенков, А.И. Сусликов Исследование влияния спектра ударного импульса на характер и порог откола в ПММА // Сборник научных трудов «Поздеевские чтения», 23 – 24 марта, 2006 г., Пермь, с.123-124

40. Судьенков Ю.В., Сусликов А.И. Влияние спектра ударного импульса на характер и порог откола в ПММА. //«Ударно-вибрационные системы машины и технологии» Материалы III международного научного симпозиума - Орел: ОрелГТУ, 2006, стр 48-53.
41. Г.А Баранов., А.А Беляев., Н.Ф.Морозов, Ю.К.Старцев, Ю.В. Судьенков А.И.Сусликов Влияние наноструктуры двухфазного стекла на пороги лазерного пробоя и процессы разрушения //ЖТФ,2006,т.76,вып.7,стр.53-58
42. Арутюнян А.Р., Зимин Б.А., Судьенков Ю.В. Приложение метода оптико-акустической спектроскопии к исследованию усталости конструкционных материалов // “Актуальные проблемы механики сплошной среды” //Труды Международной конференции, посвященной 95-летию академика НАН Армении Н.Х. Арутюняна 25-28 сентября 2007 г., Цахкадзор, Армения. Ереван: Институт механики НАН Армении. 2007. С. 63-68
43. Арутюнян А.Р., Зимин Б.А., Судьенков Ю.В. Исследование циклической долговечности конструкционных материалов методом оптико-акустической спектроскопии //Вестник С.-Петербур. ун-та. 2008. Сер. 1. Вып. 3. С. 88-96.
44. Вовненко Н.В., Зимин Б.А., Судьенков Ю.В. Особенности формирования динамических напряжений в тепло- и нетеплопроводящих материалах при субмикросекундной длительностях нагрева // Вестник СПбГУ., 2008. Серия ,вып.6,с.67-
45. Зимин Б.А., Вовненко Н.В., Судьенков Ю.В. Термомеханический отклик пластин цветного стекла при субмикросекундных длительностях нагрева // Труды Межд. научная конференция по механике V Поляховские чтения., Санкт-Петербург, 2009г., с.164.
46. Н.В. Вовненко, Б.А. Зимин, Ю.В. Судьенков Дисперсионный анализ в слабо связанных системах динамической термоупругости //Труды XIV международная конференция «Современные проблемы Механики сплошной среды», 19-24 июня2010, Азов, т.2,с.116-118
47. Н.В.Вовненко, Б.А.Зимин, Ю.В.Судьенков Неравновесный процесс движения облучаемой поверхности металлов при воздействии лазерных импульсов субмикросекундной длительности //ЖТФ, 2010,т.80,вып.7,с.41-45
48. Н.В.Вовненко, Б.А.Зимин, Ю.В.Судьенков Экспериментальные исследования термоупругих напряжений в тепло- и нетеплопроводящих твердых телах при субмикросекундных длительностях лазерного нагрева//ЖТФ,2011,т.81,вып.6,с.57-92
49. Н. В. Вовненко, Б.А. Зимин, Ю.В.Судьенков, Д.А.Юнгмейстер Экспериментальные исследования и численное моделирование ударно-волновых процессов при центральном соударении трех стержней различной массы. // Вестник СПбГУ. Сер. 1. 2011. Вып. 3,стр.95-101
50. I.V. Smirnov, Yu.V. Petrov, Yu.V. Sudenkov, E. Cadoni Threshold Characteristics of Short Pulse Loads Causing Fracture in Concrete and Rocks// Applied Mechanics and Materials, 2011, Vol. 82, P. 106-111.
51. В.А. Zimin, Yu.V. Sud'enkov. The Movement of a Metal Disc toward Pulse Laser Radiation the Effect of Thermoplastic Stresses.// Technical Physics Letters. 2013, vol. 39, N 1. pp 23-26.