

## ОТЗЫВ

Официального оппонента на диссертацию

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

Диссертация Судьенкова Ю.В. посвящена исследованию нестационарных процессов в твердых телах, стимулированных импульсным лазерным воздействием или электрическим током субмикросекундной длительности. Эта проблема продолжает оставаться актуальной, поскольку она охватывает процессы, лежащие в основе широкого класса лазерных и импульсных технологий обработки материалов, находящие применение в различных отраслях промышленности.

В диссертации Судьенкова Ю.В. нет погони за предельными амплитудами волн давления и температуры, а делается акцент на технологически обоснованные значения интенсивности ( $1 \text{ МВт/см}^2 - 1 \text{ ГВт/см}^2$ ) и длительности ( $10^{-8} \text{ с} - 10^{-6} \text{ с}$ ) воздействия. Несмотря на длительный период исследований таких воздействий, считать эту тему полностью исчерпанной до сих пор не представляется возможным. Поэтому важность и актуальность темы диссертации не вызывает сомнений и вклад ее автора в разработку проблемы лазерной обработки твердых сред хорошо известен и признан.

В работах Судьенкова Ю.В. исследуется наиболее универсальный, широко встречающийся механизм лазерного возбуждения ультразвука – термоупругий, определяемый нестационарным тепловым расширением слоя среды, нагретого импульсным излучением. Термоупругое возбуждение акустических волн подробно изучено как теоретически, так и экспериментально в режиме сравнительно малых нагревов, не приводящих к появлению фазовых переходов в среде. Важный с точки зрения технологии режим с развитыми фазовыми переходами исследовался экспериментально, а его теоретическое описание значительно отстает, что связано как с отсутствием достаточно признанных теоретических моделей, так и с чисто математическими трудностями получения аналитических решений. Поэтому используемые в диссертации

модели процессов зачастую носят несколько абстрактный характер, что впрочем не мешает проведению их сравнения с результатами экспериментов.

Важным достоинством диссертации Судьенкова Ю.В. является использование термооптического возбуждения звука для получения «стандартных» аperiodических ультразвуковых импульсов, используемых для динамического нагружения твердых тел. Проблема широкополосной регистрации акустических полей решается с использованием как пьезоприемников различных типов, так и с помощью лазерных интерферометров. Использование датчиков колебаний различных типов придает дополнительную обоснованность полученным результатам.

Диссертация Судьенкова Ю.В. состоит из введения, пяти глав и заключения. Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, определяются цели и задачи работы, приводятся основные положения, выносимые на защиту, обсуждается практическая ценность полученных результатов. Во введении отражены также личный вклад диссертанта, апробация работы и ее новизна.

Первая глава диссертации посвящена исследованию реакции твердых тел на наносекундные лазерные воздействия. Представлен достаточно подробный сравнительный анализ публикаций по термооптическому возбуждению звука как теоретических, так и экспериментальных. Делается вывод об ограниченности теоретических моделей для описания термооптического эффекта в металлах.

Проводится сравнение откликов сред с высокой и низкой теплопроводностью (металлы и диэлектрики) и указывается на различия в проявлениях термооптического возбуждения ультразвука в этих средах. Впервые обсуждается механизм термооптического возбуждения звука в металлах, связанный с импульсом отдачи электронов при теплопереносе. Предлагается теоретическая модель этого эффекта, основанная на приближении «теплового поршня». С ее помощью объясняется наблюдавшееся в эксперименте смещение облучаемой поверхности металла по направлению к лучу.

Исследуется также прогиб диэлектрической пластины под действием импульсного лазерного излучения. Показано, что прогиб навстречу лазерному лучу связан в первую очередь с продольным градиентом наводимого температурного поля и растет с повышением коэффициента поглощения света. Полученные в эксперименте величины прогиба хорошо соответствуют сделанным теоретическим оценкам.

К представленным в первой главе результатам можно высказать несколько замечаний. Во-первых, модель «теплового поршня» для генерации звука импульсом отдачи при тепловой диффузии электронов не выглядит достаточно обоснованной, поскольку ее относительный вклад не оценивается. На мой взгляд, более предпочтительной в этом случае являлась бы кинетическая модель двухкомпонентной среды. Весьма произвольно взято условие малости скорости теплового поршня (стр.41), а выполнение закона сохранения импульса в соотношении (1.4.14) не обсуждается. Во-вторых, при анализе термооптического возбуждения звука в металлах используется одномерная модель, применимость которой требует обоснования. Наконец, прогиб диэлектрической пластины навстречу лучу (при переходе к поверхностному поглощению света) в целом соответствует поведению металлических образцов при импульсном облучении. Поэтому необходимость привлечения дополнительных механизмов для объяснения термооптического эффекта в металлах не выглядит убедительной.

Во второй главе диссертации рассматриваются нестационарные процессы в твердых телах при наносекундном нагружении. Использование лазерных термооптических источников акустических импульсов позволяет исследовать диапазон скоростей нагружения  $10^5$ - $10^8$  с<sup>-1</sup> при умеренных значениях напряжений 0.1-1 ГПа, недостижимый в традиционных экспериментах. Материал второй главы по-видимому впервые представляет систематические исследования динамической реакции твердых тел на субмикросекундные нагрузки. Впервые используется термооптический эффект для получения калиброванных субмикросекундных импульсов с хорошо повторяемой формой и заранее заданной амплитудой.

Исследуется распространение импульсов в металлах и диэлектриках, определяется время пробега импульса одноосного напряжения в зависимости от толщины образца. Анализируются временные зависимости как продольных, так и радиальных компонент напряжений в широком диапазоне их изменения от 0.05 МПа до 350 МПа. Во всех образцах отмечается изменение скорости распространения возмущения при увеличении пройденного им расстояния. Впервые отмечается, что на малых расстояниях скорость распространения волны напряжения на несколько десятков процентов превышает линейную скорость звука. При увеличении пройденного расстояния скорость уменьшается и стремится к значению скорости ультразвуковой волны. Полученные значения вариации скорости не укладываются в рамки традиционной модели нелинейной акустики. Автором делается предположение о наличии нестационарных релаксационных

процессов при высоких скоростях нагружения и предлагается микроструктурная модель этих процессов на основании теории Грюнайзена. Теоретический анализ с привлечением этой модели качественно подтверждает поведение скорости волны напряжения наблюдаемое в эксперименте.

На мой взгляд, однако, предположение о сильной неравновесности наблюдаемых процессов не выглядит достаточно обоснованным, поскольку и амплитуды волн и длительности импульсов не выходят за рамки применимости традиционного нелинейно-акустического приближения. Кроме того, сравнение форм импульсов, прошедших различные расстояния в образце (см. Рис.2.4.2) говорит о необходимости учета затухания ультразвука при распространении. Рисунок 2.5.1 с необходимо перерисовать, поскольку взятое значение скорости ультразвука в алюминии (5240 м/с) отличается как от табличного, так и от измеренного ранее (Таблица 1 на стр. 90).

Исследованию упруго-пластического отклика твердых тел на субмикросекундное воздействие посвящена третья глава диссертации. При субмикросекундных воздействиях пространственная протяженность возмущения в поликристаллах сравнима с характерными размерами структуры материала. В главе 3 последовательно исследуется влияние микроструктуры материала на его стойкость при субмикросекундном нагружении. Наблюдалось разделение волны пластичности и упругого предвестника по мере распространения возмущения в среде. Исследовано поведение амплитуды волны и упругого предвестника. Показано наличие зависимости характеристик упруго-пластических волн от температуры отжига металла с одинаковой начальной структурой. Обнаружен эффект упрочнения (повышение микротвердости) металла при динамическом нагружении по сравнению со статическим нагружением.

Было обнаружено, что зависимость параметров упрочнения металла при динамическом нагружении от размеров зерен не описывается соотношением Холла-Петча, выполняющимся при меньших скоростях деформации. Обсуждаются причины такого поведения и делается предположение о доминирующем влиянии структурной перестройки при протяженности возмущения сравнимой с размерами зерен. Последующие эксперименты методом широкополосной акустической спектроскопии подтвердили справедливость этого предположения.

Исследовано упруго-пластическое поведение металлических образцов в нагруженном статически (растяжение) состоянии. Измерялось затухание ультразвука в широкой полосе до 20 МГц в зависимости от приложенного напряжения и размеров зерен.

Предлагается объяснение наблюдаемых зависимостей с привлечением различных механизмов пластического течения в металлах и выделяются доминирующие механизмы в различных условиях нагружения, внутренней структуры металла и характеристик ударного возмущения.

На мой взгляд проведенные измерения спектров затухания и дисперсии скорости ультразвука дают достоверные результаты только в полосе до 20 МГц, поскольку амплитуды спектральных компонент сигнала на более высоких частотах (см. Рис.3.4.3) не превышают уровень шумов. Поэтому представление результатов расчетов (рас.3.4.4) для больших частот представляется некорректным. Тем более, что на графиках отсутствуют (как, впрочем, и практически на всех графиках) ошибки измерения. Проведенные измерения показали существенную зависимость коэффициента затухания ультразвука от частоты, справедливую для линейного режима распространения ультразвука. Для ударных импульсов конечной амплитуды ее спадание аппроксимировалось экспонентой (кстати, в формуле (3.5.1) имеется опечатка). При этом физический смысл этого коэффициента затухания не столь очевиден, как в случае его спектральной зависимости для волн малой амплитуды. Обсуждение физического смысла коэффициента затухания ультразвука в случае импульсов конечной амплитуды отсутствует.

Исследования разрушения твердых тел субмикросекундными ударными импульсами, возбуждаемыми лазерным излучением, описываются в главе 4. Использование субмикросекундных импульсов особенно актуально для исследования разрушения твердых сред, поскольку пространственный размер импульса и, соответственно, области градиентов напряжений сравним с характерными размерами структурных элементов среды.

Разрушение стекол с различной внутренней структурой производилось с использованием акустических импульсов длительностью ~80 нс и амплитудой до 0.15 ГПа. Регистрация колебаний поверхности образца и появление откола производилось оптически. Полученные значения динамической прочности стекла К8 с одной стороны существенно (в 5 раз) превышают статическую прочность, а с другой – существенно (в 3 раза) ниже оценки по кинетической модели. Это указывает на принципиальную роль центров концентрации напряжений на развитие разрушения в динамическом режиме. Влияние микроструктуры среды на стойкость исследовалось также при оптическом пробое двухфазных стекол.

Стойкость кристаллов поваренной соли к откольному разрушению исследовалась при воздействии цуга импульсов на образец. Толщина зоны откола в целом соответствовала расстоянию наложения импульсов растяжения в первичном и отраженном от свободной границе пучке. Модель откольного разрушения подтверждается также в экспериментах по ударному нагружению пьезоэлектриков, оргстекла и горных пород. Подтверждается также важное значение структурной неоднородности материала в этом процессе.

Пятая глава диссертации Судьенкова Ю.В. стоит несколько особняком и носит методический характер – в ней более подробно описываются те экспериментальные методики, которые использовались в первых главах. К ним относятся, методы повышения чувствительности к смещению интерферометра Майкельсона за счет увеличения количества проходов луча в сигнальном плече, измерение скоростей ультразвука в эхо- и теновом режиме с использованием термооптического источника ультразвука, использование термооптического механизма для измерения поглощения зеркал и оптических элементов с возможностью разделения объемного и поверхностно вкладов и некоторые другие. Эти работы отличает стремление к совершенствованию измерительных схем и повышение устойчивости и надежности их работы. Во многом это удалось.

К недостаткам можно отнести достаточно скупые обоснования сделанных оценок чувствительностей, полос рабочих частот (временных разрешений), динамического диапазона измерительных схем. Нельзя сказать, что приводимые при этом осциллограммы достаточно убедительны.

В заключении диссертации сформулированы основные результаты работы.

В целом работы выполнена на высоком научном уровне соответствующем мировому. При этом работа не свободна от целого ряда недостатков. Так


1. В диссертации трудно найти экспериментальные результаты (в первую очередь графики), для которых приведены ошибки измерения, что конечно не украшает экспериментальную работу.
2. Оформление текста ниже всякой критики и изобилует опечатками, перебивками фонов и кеглей, цифры на рисунках зачастую не различимы.
3. Ссылки на литературу оформлены по главам, при этом нумерация в каждой главе начинается заново. Ссылки оформлены не единообразно, иногда идет ссылка на английский перевод при наличии русского оригинала.
4. Формулировки защищаемых положений, на мой взгляд, недостаточно конкретны.

Сделанные замечания не снижают, однако, в целом высокую оценку работы, в которой развивается новое направление – исследование отклика структурно неоднородных сред на субмикросекундное воздействие на основе термооптического эффекта.

Результаты исследований Судьенкова Ю.В. многократно докладывались на различных международных и отечественных научных конференциях и семинарах, опубликованы в научной литературе, входящей в список ВАК, и хорошо известны специалистам. Автореферат диссертации полностью и правильно отражает содержание диссертации.

Считаю, что настоящая диссертация соответствует требованиям, предъявляемым ВАК к докторским диссертациям, а ее автор - Судьенков Ю.В. – заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела.

Доктор физ.-мат. наук,

  
02.03.2015

Карабутов Александр Алексеевич

профессор МЛЦ МГУ имени М.В.Ломоносова  
119991, Москва, Ленинские горы, д.1. стр.62  
тел. +7(495)9395309  
e-mail: [aak@ilc.edu.ru](mailto:aak@ilc.edu.ru)

Подпись доктора физико-математических наук Карабутова Александра Алексеевича

**УДОСТОВЕРЯЮ**

Директор МЛЦ МГУ,  
Профессор



МАКАРОВ В.А.