

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

КАЦ Виктор Михайлович

ДЕФОРМИРОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ  
ВОЗДЕЙСТВИИ МЕХАНИЧЕСКИХ И  
СЛАБЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург  
2014

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном университете.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,  
профессор Морозов Виктор Александрович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,  
профессор Брагов Анатолий Михайлович,  
Научно-исследовательский институт механики  
Нижегородского государственного университета  
им. Н.И. Лобачевского, заведующий лабораторией  
механики материалов

доктор физико-математических наук,  
профессор Мещеряков Юрий Иванович,  
Институт проблем машиноведения РАН,  
заведующий лабораторией «Физика разрушения»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
профессионального образования «Тамбовский  
государственный университет имени Г.Р. Державина»

Защита состоится “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2014г. в \_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д212.232.30 при Санкт-Петербургском государственном университете по адресу: 198504, г. Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Университетский пр., 28, математико-механический факультет, аудитория 405.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. М. Горького Санкт-Петербургского государственного университета по адресу: 199034, Санкт-Петербург, Университетская набережная, 7/9 и на сайте <http://spbu.ru/science/disser/dissertatsii-dopushchennye-k-zashchite-i-svedeniya-o-zashchite>.

Автореферат разослан “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

Е.В. Кустова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Бурное развитие энергетики и радиоэлектроники во второй половине двадцатого века привело к дополнению естественного магнитного поля Земли массой источников магнитных полей техногенного происхождения с лежащей в широких пределах интенсивностью (от излучения радиотелефона до излучений, сопутствующих применению ядерного взрывного устройства) и с разнообразными законами и скоростями изменения во времени (от постоянных и низкочастотных до СВЧ и импульсных). Данное обстоятельство сделало осуществимым и актуальным исследование влияния магнитных полей на разнообразные процессы в физических, химических и биологических системах.

В то время как процессы, вызванные воздействием достаточно интенсивных полей, хорошо описываются квантовой теорией магнетизма, а их экспериментальное исследование не представляет принципиальных трудностей, исследование влияния малоинтенсивных полей сталкивается с рядом трудностей, связанных с отсутствием как теоретических моделей, описывающих их воздействие, так и экспериментальных методик, способных непосредственно регистрировать столь слабые воздействия в силу недостаточности энергетического вклада таких полей. Однако в ходе проводимых с середины 60-х годов прошлого века исследований было замечено влияние слабых магнитных полей на протекание физико-химических процессов.

В дальнейшем круг таких явлений существенно расширился и, в частности, было открыто влияние слабых магнитных полей на параметры пластичности немагнитных твердых тел – магнитопластический эффект (МПЭ).

МПЭ исследовался независимыми группами с использованием широкого круга материалов для изготовления образцов и магнитных полей с разнообразными законами изменения во времени.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что первопричиной возможности существенных откликов на слабые возмущения, является создание и поддержание в рассматриваемых системах неравновесного состояния. Данное обстоятельство позволяет считать возможным управление пластическими характеристиками материалов слабым магнитным полем и делает получаемые при исследовании МПЭ результаты не только актуальными в механике и физике пластичности, но и важными для развития спинтроники и фундаментальной базы нанотехнологий.

В данной работе внимание сосредоточено на изучении особенностей влияния слабых магнитных полей на процессы в твердых телах при кратковременных импульсных нагружениях, требующих учета особенностей динамического поведения материалов.

**Актуальность темы** настоящего диссертационного исследования обусловлена как важностью решения задач механики связанных полей в целом, так и необходимостью изучения особенностей деформирования материала при динамическом (механическом и электромагнитном) воздействии.

**Предметом исследования** настоящей диссертационной работы является микро- и макромагнитопластичность диамагнитных кристаллов в условиях нестационарного воздействия слабых радиочастотных и импульсных магнитных полей без или совместно с кратковременными механическими нагрузками.

**Цель работы** – экспериментальное исследование подвижности индивидуальных дислокаций в условиях электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) при совместном воздействии слабого радиочастотного или импульсного электромагнитного поля и магнитного поля Земли, а также экспериментальное и теоретическое изучение влияния слабых магнитных полей на поведение кристаллов в условиях нестационарного кратковременного механического воздействия в субмикросекундном диапазоне длительности.

В работе решаются следующие задачи:

1) экспериментальное исследование резонансного разупрочнения кристаллов NaCl при совместном воздействии слабого радиочастотного либо импульсного магнитного поля и магнитного поля Земли, ориентированных по схеме ЭПР;

2) экспериментальное и теоретическое исследование особенностей поведения диамагнитной среды с парамагнитными центрами при механическом высокоскоростном воздействии на нее в присутствии магнитных полей.

**На защиту выносятся** следующие результаты:

Разработка ряда физических методов и экспериментальных установок для их реализации с целью экспериментального исследования микро- и макропроявлений магнитопластического эффекта в условиях высокоскоростных воздействий.

Обнаружение и наблюдение резонанса дислокационных перемещений в кристаллах NaCl в условиях ЭПР в магнитном поле Земли и радиочастотном либо импульсном электромагнитном поле. Определение основных характеристик наблюдаемого резонанса.

Определение параметра дислокационной структуры, ответственного за влияние слабого магнитного поля на изменение характеристик импульса механического напряжения при его распространении по диамагнитному кристаллу NaCl с парамагнитными центрами.

Создание метода построения динамической диаграммы напряжение-деформация при нагружении образцов NaCl.

Исследование эффекта понижения динамического предела текучести при предварительной экспозиции в слабом магнитном поле кристаллов NaCl, подвергаемых в дальнейшем нагружению в микросекундном диапазоне длительности.

**Метод исследования** базируется на апробированных методиках эксперимента и физических моделях.

В экспериментальных исследованиях для изучения подвижности индивидуальных дислокаций применяется метод химического травления поверхностей образца до и после его экспозиции в магнитных полях. Генерирование механического

импульса давления при исследовании влияния магнитных полей на макропластичность осуществляется с помощью электронного пучка либо посредством импульсного преобразователя электромагнитно-индукционного типа. Для измерения профилей давления используются пьезодатчики. При обработке результатов экспериментов применяются стандартные статистические методики.

Созданная математическая модель основана на динамике дислокаций. Метод построения динамической диаграммы напряжение-деформация ( $\sigma - \epsilon$ ) в приближении Прандтля основан на фундаментальных законах акустики.

**Достоверность результатов** обеспечивается при получении экспериментальных данных использованием надежных средств регистрации, основанных на разных физических принципах, с использованием средств измерения прошедших надлежащую поверку и тарировку; многократной проверкой полученных результатов и использованием современных приборов, а также применением устоявшихся математических методов при сопоставлении теоретических решений с экспериментальными результатами; применением современных программных вычислительных средств; сравнением с альтернативными подходами.

**Научная новизна и практическая ценность** работы состоит в том, что выявлен и исследован ряд проявлений магнитопластического эффекта в условиях кратковременных нестационарных воздействий.

Впервые обнаружен резонанс дислокационных перемещений в магнитном поле Земли в схеме ЭПР, обладающий в отличие от ранее наблюдавшегося резонанса сильной анизотропией.

Создана математическая модель, выявляющая параметр, ответственный за влияние магнитного поля на параметры дислокационной структуры – дислокационную вязкость.

Предложен метод построения диаграммы напряжение-деформация при прохождении упругопластической волны через образец NaCl. Исследовано влияние магнитного поля на форму этой диаграммы.

Исследованные аспекты магнитопластического эффекта открывают новые возможности практических приложений магнитопластичности. Это, в частности, использование слабых магнитных полей для управления динамической прочностью материалов, спинтроники, нанотехнологии, медицина и т.д.

Основное отличие полученных результатов от результатов других авторов состоит в том, что в проведенных экспериментах осуществлялись режимы воздействия, существенно отличающиеся от используемых другими авторами. Разработанные методы экспериментального исследования позволяют достаточно эффективно проводить изучение указанных выше процессов высокоскоростного воздействия слабых электромагнитных полей на образец, как самостоятельных, так и совместных с полем высокоскоростного механического нагружения. Предложенная математическая модель позволяет связать параметры электромагнитного поля с па-

раметрами дислокационной структуры, а через них – и с параметрами деформирования материала.

**Апробация результатов исследования.** Основные результаты исследований по теме диссертации докладывались и обсуждались на Всероссийских, Международных конференциях и семинарах:

Первые Московские чтения по проблемам прочности материалов, 1-3 декабря 2009 г., Москва; XIX «Петербургские чтения по проблемам прочности», 13-15 апреля 2010 г., С.-Петербург; Международная научная конференция по механике Шестые Поляховские чтения, 31 января - 3 февраля 2012 г., С.-Петербург; Конференция-семинар «Актуальные направления в механике сплошных сред», 2-6 июля 2012 г., С.-Петербург; XXV Международная конференция Математическое моделирование в механике деформируемых сред и конструкций. Методы граничных и конечных элементов, 23-26 сентября 2013 г., С.-Петербург; Международный симпозиум «Физика кристаллов», 28 октября - 2 ноября 2013 г., Москва; Международная конференция «Влияние высокоэнергетических воздействий на структуру и свойства конструкционных материалов», 23-30 сентября 2013 г., с. Ольгинка, Краснодарский край.

**Публикации автора** по теме диссертации представлены работами [1-9], в том числе статьи [1-5] в журналах, рекомендованных ВАК.

В работах [1, 3, 5-7] диссертант участвовал в создании экспериментальных установок, разработке методов проведения экспериментов, обработке экспериментальных данных. В работе [2] вклад соискателя состоит в построении программы расчета, проведении с помощью данной программы численных экспериментов по разработанной совместно с В.А. Морозовым математической модели распространения короткого упругопластического импульса в условиях слабого импульсного магнитного поля. В работах [4, 8, 9] соискатель принимал участие в создании установки, разработке экспериментального метода, им выполнена обработка и проведен анализ экспериментальных данных по распространению упругопластической волны через образец, нагружаемый магнитоимпульсным способом с предварительной экспозицией в слабом постоянном магнитном поле. Во всех приведенных работах постановка задачи принадлежит В.А. Морозову; совместно с В.И. Альшицем в работах [1, 3, 5-7]. Формулировка физической модели в работах [1, 3, 5-7] принадлежит В.И. Альшицу. Обсуждение результатов с соавторами проводилось во всех совместных работах.

**Работа состоит** из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 102 страницах машинописного текста, содержит 31 рисунок и список литературы из 104 наименований.

### **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**В главе 1** введено понятие слабого магнитного поля и дан краткий обзор результатов исследования влияния слабых электромагнитных полей на разнообраз-

ные физические и механические процессы, химические реакции и биологические системы. Упомянутые эффекты входят в сферу интересов различных научных дисциплин и исследовались с использованием и применением характерных для той или иной области методик, однако не могут быть отмечены аналогии особенностей протекания различных процессов, указывающих на их общую первопричину – неравновесность рассматриваемых систем.

В главе описано современное состояние исследований магнитоластического эффекта и охарактеризовано место настоящей работы в этих исследованиях.

**В главе 2** описаны методики исследования, примененные в данной работе.

Первые два раздела посвящены методикам исследования подвижности индивидуальных дислокаций в условиях электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) в магнитном поле Земли и радиочастотном либо импульсном электромагнитном поле. Блок-схемы установок представлены на рисунке 1.

Установка для исследования дислокационной подвижности в кристаллах NaCl, подвергаемых воздействию радиочастотного электромагнитного поля, ориентированного относительно магнитного поля Земли по схеме ЭПР, блок-схема которой представлена на рисунке 1.а, представляет собой ограниченный сплошными стенками отрезок коаксиальной линии диаметром 80 мм и длиной 120 мм, выполненный в виде набора параллельных проводников. Внутренний проводник линии имеет диаметр 2 мм и замкнут на волновое сопротивление нагрузки  $R_l = 75 \text{ Ом}$ .

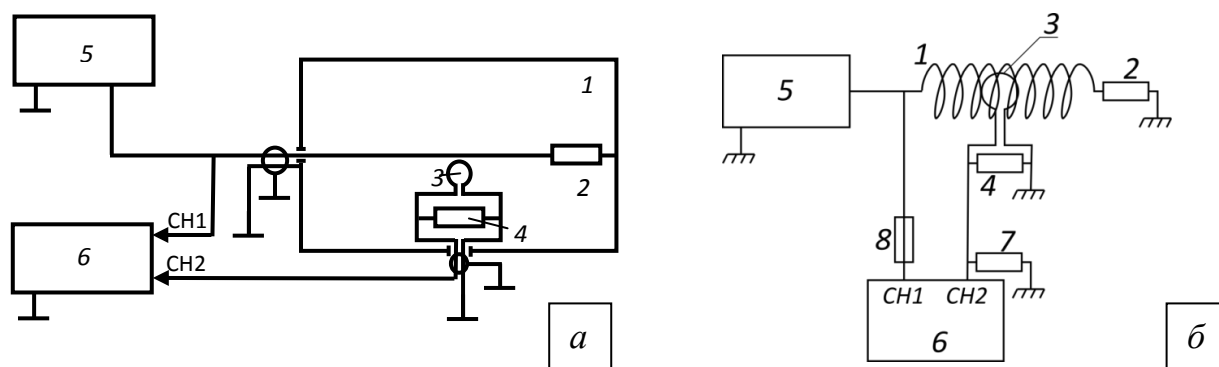


Рисунок 1. Блок-схемы экспериментальных установок для исследования микропластичности в кристаллах NaCl в условиях ЭПР в магнитном поле Земли: а – с радиочастотным полем: 1 – коаксиальная камера; 2 – сопротивление нагрузки коаксиальной линии, 75 Ом; 3 – индукционный датчик-виток; 4 – сопротивление нагрузки датчика, 50 Ом; 5 – генератор ГЗ-7А; 6 – осциллограф TDS 2012; б – с импульсным полем: 1 – катушка; 2 – сопротивление нагрузки,  $R_1 = 4,3 \text{ кОм}$ ; 3 – индукционный датчик; 4 – сопротивление нагрузки датчика,  $R_2 = 50 \text{ Ом}$ ; 5 – генератор Г5-63; 6 – осциллограф TDS 2012; 7 – согласующее сопротивление, 50 Ом; 8 – шуп осциллографа, ослабление 1:10.

Камера закреплена в поворотной обойме, что позволяет свободно задавать ориентацию магнитных полей в месте постановки образца.

Радиочастотное поле  $\tilde{\mathbf{B}}$  индуцировалось переменным током  $I = U/R$ , который

протекает по центральному проводу коаксиальной линии от генератора ГЗ-7А. Амплитуда переменного синусоидального напряжения  $U_m$  могла варьироваться в пределах от 0 до 30 В, а его частота изменялась в диапазоне 0,9 – 3,7 МГц. Амплитуда поля определяется известной формулой  $\tilde{B}_m = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2U_m}{R_1 h}$ , где  $\mu_0$  – магнитная постоянная,  $h$  – расстояние от оси проводника до образца.

Амплитуды и формы сигнала в линии и порожденного им магнитного поля контролировались посредством цифрового двухканального осциллографа Tektronix TDS 2012.

В процессе экспериментов в месте постановки образца магнетометром ПРОМ-2М были измерены значения вертикальной и горизонтальной компонент геомагнитного поля и по ним вычислены значения полного вектора магнитного поля и угол его отклонения от вертикали. Измеренные значения составили  $B_{\text{Earth}}^{\leftarrow} = 45 \pm 6$  мкТл,  $B_{\text{Earth}}^{\downarrow} = 108 \pm 6$  мкТл,  $B_{\text{Earth}} \approx 117$  мкТл,  $\varphi \approx 22,5^\circ$ .

Образец, представляющий собой параллелепипед с примерными размерами  $2 \times 3 \times 6$  мм, выколотый из выращенного на Никольском заводе кристалла NaCl с концентрацией примесей, не превышающей 10 ppm, помещался в гнездо на постоянном расстоянии от центрального провода линии в одной из конфигураций, представленных на рисунке 2. Взаимная ориентация граней кристалла и линии дислокации показана на рисунке 3.

Ориентация на рисунке 2.а использовалась при опытах с горизонтальной составляющей геомагнитного поля, 2.б – с вертикальной, 2.в – с полным вектором геомагнитного поля. Также (рисунок 2.г) использовалась ориентация, при которой угол между вектором геомагнитного поля и радиочастотным полем составлял  $45^\circ$ . Линия дислокации, для которой исследовался резонанс, перпендикулярна плоскости рисунка 2.

Для изучения влияния импульсного электромагнитного поля, ориентированного по схеме ЭПР с магнитным полем Земли была разработана установка на основе последовательного  $L$ - $R$  контура, блок-схема которой приведена на рисунке 1.б.

Магнитное поле  $\mathbf{B}_{\text{sol}}$  создавалось в катушке импульсным током. От генератора Г5-63 импульс напряжения прямоугольной формы подавался на катушку с индуктивностью  $L = 70$  мкГн, состоящую из  $N = 106$  витков диаметром  $d = 26$  мм. Длина катушки составляет  $l = 123$  мм. Катушка заземлена через сопротивление нагрузки  $R_1 = 4,3$  кОм.

Такой выбор сопротивления нагрузки и индуктивности обеспечивает прохождение импульса тока через катушку без внесения значительных искажений. Импульс напряжения имел амплитуду от 16 до 70 В и длительность (500-570) нс. Генератор был настроен на однократный запуск, чтобы на образец воздействовал одиночный импульс.



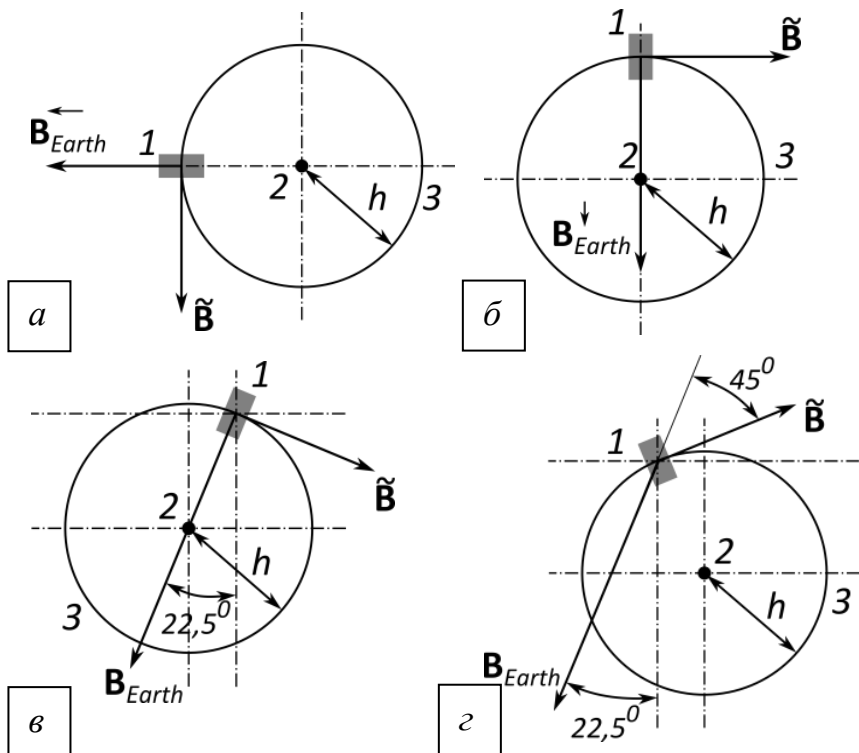


Рисунок 2. Схемы взаимного расположения образца 1 и центрального провода 2 коаксиальной линии по отношению к векторам магнитного поля Земли  $\mathbf{B}_{Earth}$  и осциллирующего поля  $\tilde{\mathbf{B}}$  с силовой линией 3 для ориентаций, использованных в опытах.

Катушка свободно надевается на сердечник из диэлектрического материала, в котором выполнено гнездо для установки образца. Поворотное устройство позволяет располагать ось катушки под произвольным углом к горизонту.

Образец, представляющий собой параллелепипед с примерными размерами  $3 \times 3 \times 5$  мм, выколотый из выращенного в Институте физики и оптики (Будапешт, Венгрия) кристалла NaCl с концентрацией примесей, не превышающей 0,5 ppm, помещался в гнездо на оси катушки в её среднем сечении. Катушка с образцом ориентировалась относительно магнитного поля земли как показано на рисунке 4.

В работе показано, что при выбранных параметрах контура амплитуда импульсного магнитного поля может быть оценена как  $B_0 \approx \mu_0 n U_0 / R_1$ , где  $n$  – число витков на единицу длины катушки, и составляет при максимальной амплитуде импульса напряжения 17,6 мкТл. Импульс магнитного поля имел прямоугольную форму и длительность подаваемого импульса напряжения. Амплитуды и формы сигнала в контуре и порожденного им магнитного поля контролировались посредством цифрового двухканального осциллографа Tektronix TDS 2012.

Во второй половине главы описаны методики нагружения, применявшиеся для изучения влияния магнитного поля на параметры деформирования кристаллов NaCl под действием динамической нагрузки – с использованием электронного пучка и магнитно-импульсного метода.

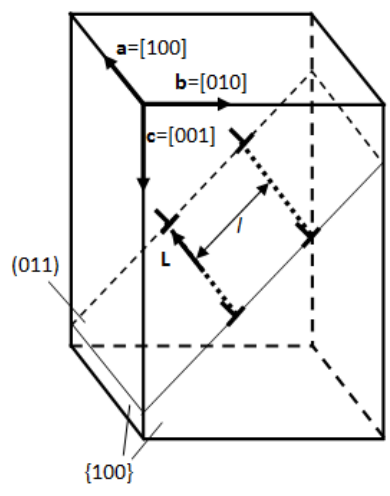


Рисунок 3. Схематическое изображение ориентации образца и перемещения  $l$  краевой дислокации ( $\mathbf{L} \parallel \mathbf{a}$ ) в плоскости скольжения (011).

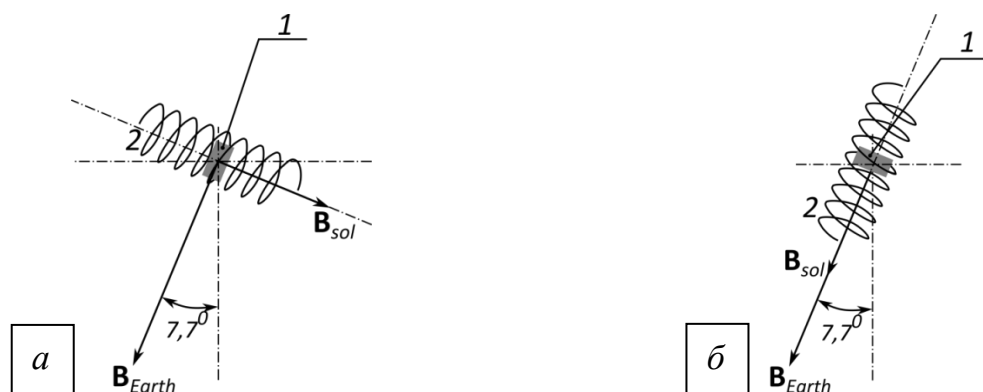


Рисунок 4. Схема расположения образца  $1$ , и катушки  $2$  по отношению к вектору магнитного поля Земли  $\mathbf{B}_{Earth}$ :  $a - \mathbf{B}_{Earth} \perp \mathbf{B}_{sol}$ ;  $б - \mathbf{B}_{Earth} \parallel \mathbf{B}_{sol}$ . Линия исследуемых краевых дислокаций направлена перпендикулярно плоскости рисунка.

Для получения начальных и граничных условий при численном моделировании движения среды под действием высокоскоростного нагружения использовался метод возбуждения импульса механического напряжения электронным пучком от генератора коротких высоковольтных импульсов ГКВИ-300. Метод заключается в инициации упругой волны в алюминиевой мишени с последующей её передачей в образец NaCl. При этом амплитуда нагружения может быть выбрана достаточной для получения в образце упругопластического отклика. В дополнение к механическому образцу подвергался действию сопутствующего пучку импульсного магнитного поля, либо мог быть изолирован от него. Для нагружения образцов использовались импульсы с амплитудой 125 и 60 МПа, длительностью порядка 100 нс. Для первого случая значения амплитуд на тыльной стороне образца составили 27,5 МПа при воздействии поля и 35 МПа без него, импульс в обоих случаях был упругопластическим. Для второго случая соответственно 17,5 и 25 МПа, импульс в случае без магнитного поля – упругий, с полем – упругопластический.

Для импульсного нагружения кристаллов NaCl также была использована установка на основе преобразователя электромагнитно-индукционного типа, блок-схема которой представлена на рисунке 5.

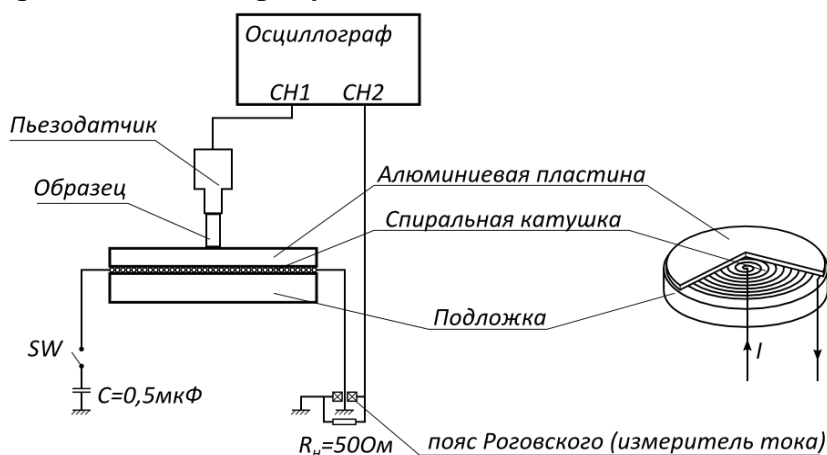


Рисунок 5. Блок-схема установки на основе преобразователя электромагнитно-индукционного типа.

Принцип действия установки основан на использовании индукции рассеяния плоской спиральной катушки для создания импульса механического напряжения в прижатой к ней алюминиевой пластине с последующей его передачей в образец NaCl. Напряжение заряда конденсатора варьировалось в широких пределах, позволявших инициировать в образце как упругую, так и упругопластическую волну.

Предложен метод построения диаграммы напряжение-деформация по схеме Прандтля (приближение двумя отрезками прямых) на основе данных об изменении амплитуды импульса напряжения при его прохождении через образец. Построенные диаграммы представлены на рисунке 6.

Представленные на рис.6 диаграммы 1-3 получены в опытах по измерению напряжений пьезодатчиком, а 4-6 – пересчитанные диаграммы для образца NaCl.

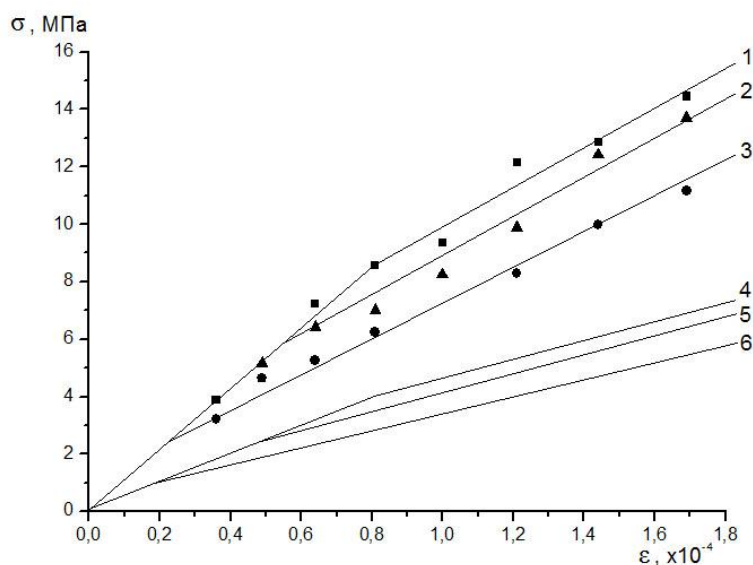


Рисунок 6. Динамические диаграммы напряжение – деформация. 1 – опытная диаграмма без экспозиции в магнитном поле; 2 – то же, после экспозиции в поле 4 минуты; 3 – то же, после экспозиции в поле 8 минут; 4 – диаграмма напряжение – деформация в образце NaCl без экспозиции в магнитном поле; 5 – то же, после экспозиции в поле 4 минуты; 6 – то же, после экспозиции в поле 8 минут.

Основная идея метода заключается в том, что при определённой амплитуде генерируемого в алюминиевой пластине механического импульса напряжения он является упругим в алюминии, а в кристалле NaCl уже упругопластическим. Важным является согласование передачи импульса через границы Al – NaCl и NaCl – Al, основанное на фундаментальных законах акустики – во-первых, условия равенства давлений по обе стороны границы (закон сохранения импульса); во-вторых, условия равенства массовых скоростей на границе (закон неразрывности среды).

**Глава 3** диссертационной работы посвящена обсуждению результатов экспериментального исследования подвижности индивидуальных дислокаций в условиях ЭПР в магнитном поле Земли и радиочастотном либо импульсном электромагнитном поле.

На рисунке 7 представлены зависимости дислокационного пробега от частоты радиочастотного поля. Измеренные резонансные частоты (рисунок 7.а) хорошо описываются формулой  $h\nu = g\mu_B B$ , где  $h$  – постоянная Планка,  $g$  – фактор Ланде,  $\mu_B$  – магнетон Бора. Резонанс достигается при  $g \approx 2$  для частот осциллирующего поля  $\nu_1 \approx 1,3 \text{ МГц}$  и  $\nu_2 \approx 3 \text{ МГц}$  при указанных выше значениях горизонтальной и вертикальной компонент геомагнитного поля.

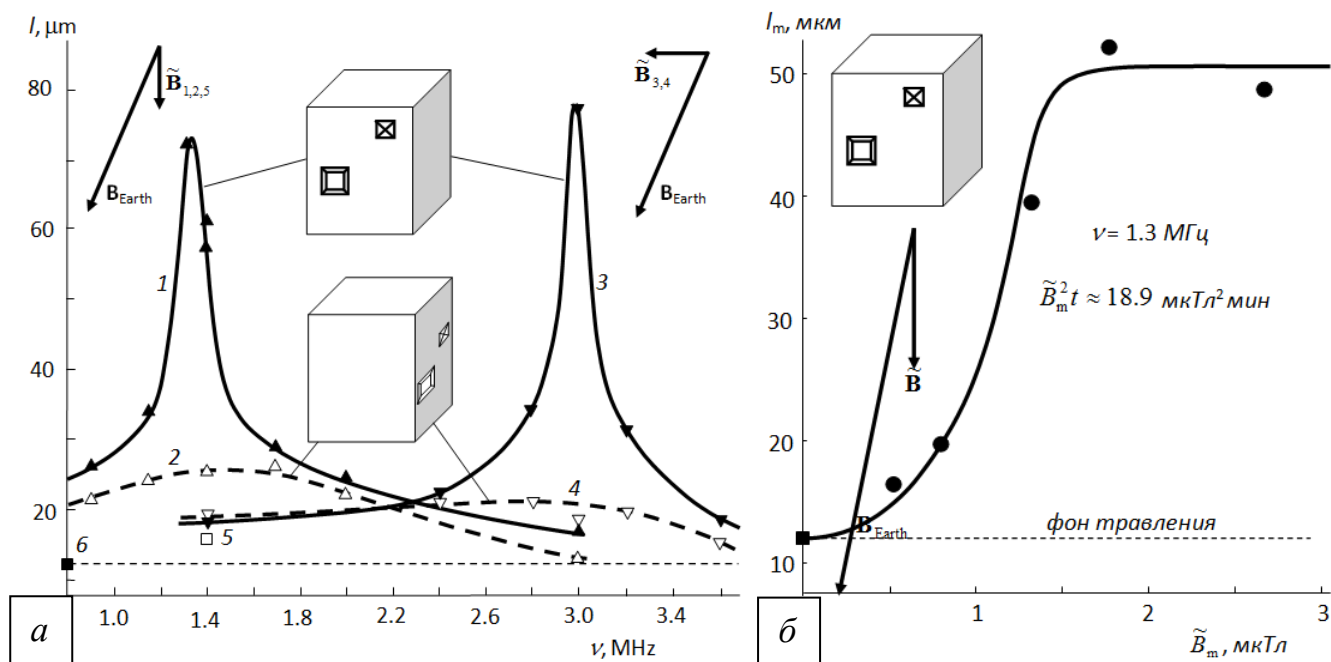


Рисунок 7. Зависимости дислокационного пробега от частоты радиочастотного поля: а – два ЭПР пика дислокационных пробега  $l(\nu)$  под действием скрещенных магнитных полей: статического поля Земли  $B_{\text{Earth}}$  и осциллирующего поля  $\tilde{B}$  регулируемой частоты. 1, 3, 5 – пробеги дислокаций, ортогональных плоскости  $\{B_{\text{Earth}}, \tilde{B}\}$  (а-типа); 2, 4 – пробеги дислокаций, параллельных плоскости  $\{B_{\text{Earth}}, \tilde{B}\}$  (b-типа); 1, 2, 5 – для горизонтальной компоненты геомагнитного поля (радиочастотное поле направлено вертикально); 3, 4 – для вертикальной компоненты геомагнитного поля (радиочастотное поле направлено горизонтально); 5 – для образца за магнитным экраном; б – уровень фона травления.  $\tilde{B} = 2.67 \text{ мкТл}$ ,  $t = 5 \text{ мин}$ ; б – порог резонанса по амплитуде радиочастотного поля для дислокаций а-типа, характеризуемый ступенеобразной зависимостью высоты  $l_m$  первого пика от величины  $\tilde{B}_m$  при поддержании постоянного уровня произведения  $\tilde{B}_m^2 t \approx 18.9 \text{ мкТл}^2 \text{ мин}$ .  $\tilde{B} \parallel B_{\text{Earth}}^\downarrow$ .

Существенной особенностью наблюдаемого резонанса является, во-первых, зависимость резонансной частоты не от вектора постоянного магнитного поля, а от его компонент; и, во-вторых, существенная анизотропия по отношению к взаимной ориентации скрещенных полей и дислокаций. Обнаружен порог эффекта по амплитуде осциллирующего поля (рисунок 7.б) в условиях нашего эксперимента при поддержании постоянного уровня энергетического вклада радиочастотного поля.

Приводится и дополнительно проверяется специальным экспериментом

предложенная В.И. Альшицем упрощенная физическая модель наблюдаемого резонанса.

Для случая воздействия импульсного электромагнитного поля, включенного по схеме ЭПР с магнитным полем Земли (рисунок 8.а) установлен резонансный характер зависимости пробегов дислокаций от длительности магнитного импульса и построена зависимость пика пробегов от значения амплитуды импульса индукции на резонансной длительности (рисунок 8.б).

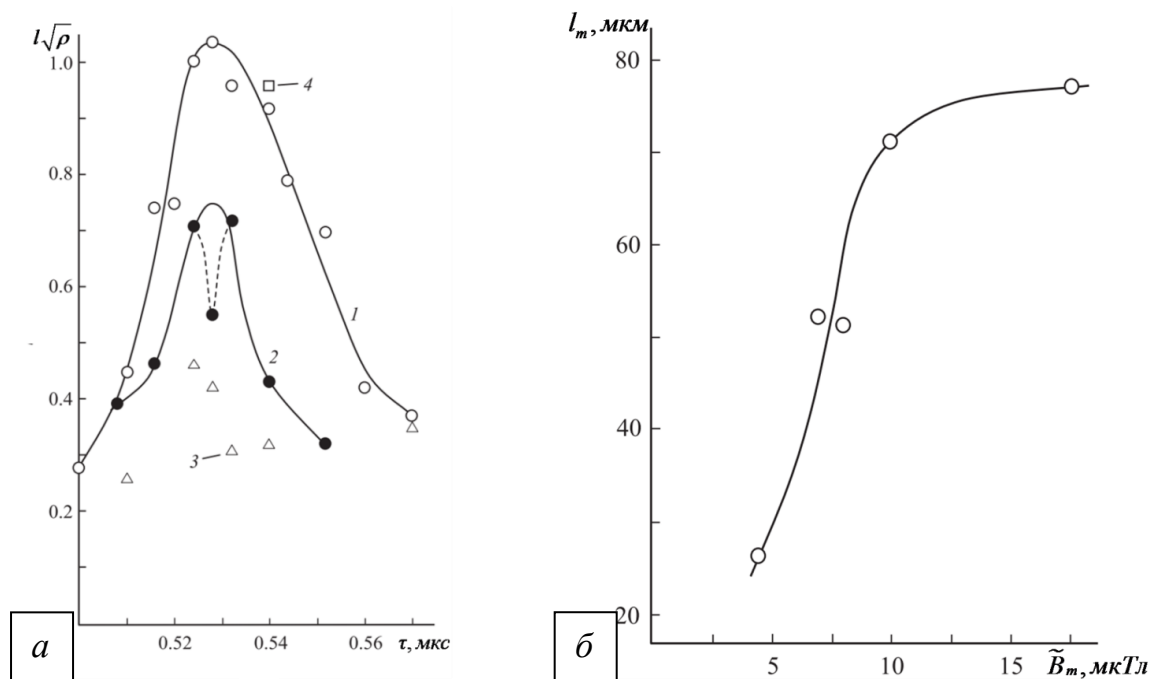


Рисунок 8. Зависимости относительного значения дислокационного пробега от длительности импульса электромагнитного поля: а – пик резонанса подвижности дислокаций, перпендикулярных вектору магнитного поля Земли (а-тип), при экспозиции в скрещенных перпендикулярных (рисунок 4.а) (1) и параллельных (рисунок 4.б) (2) магнитном поле Земли и импульсном поле, а также дислокаций, параллельных вектору магнитного поля Земли (с-тип) (3) в перпендикулярных полях. Точка (4) соответствует той же геометрии, что и точки 1 в контрольном опыте с поверхностью образца покрытой лаком.  $B_{\text{sol}} = 16,7 \text{ мкТл}$ ; б – порог резонанса дислокационной подвижности по амплитуде импульсного поля.

Условие ЭПР  $h\nu = g\mu_B V$  с фактом Ланде  $g \approx 2$  удовлетворяется при замене  $\nu$  на  $\tau_r^{-1}$  ( $\tau_r \approx 0,53 \text{ мкс}$  – резонансная длительность импульса). Здесь также обнаружен порог эффекта по амплитуде импульсного магнитного поля, который составляет примерно  $4 \text{ мкТл}$ .

Таким образом, для случая экспозиции в импульсном поле сохраняются резонансные закономерности, выявленные для случая использования радиочастотного поля. Важным является тот факт, что при существенном сокращении времени воздействия (от единиц минут до сотен наносекунд) при незначительном повышении амплитуды, а значит при сокращении сообщаемой образцу энергии воздействия, проявляется эффект сопоставимого масштаба.

**В главе 4** рассмотрены результаты исследования влияния магнитного поля на параметры деформирования кристаллов NaCl.

В первой половине главы ставится и решается задача численного моделирования движения среды под действием высокоскоростного нагружения в присутствии импульсного магнитного поля, с целью выявления для конкретного материала и конкретных условий нагружения параметров дислокационной структуры, ответственных за изменение функции релаксации при воздействии магнитного поля. Замкнутая система уравнений, используемая для описания упругопластической волны в случае одноосного нагружения, имеет вид

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial \sigma}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial \sigma}{\partial t} - (\lambda + 2\mu) \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = -F,$$

где  $\rho$  – плотность материала,  $\sigma$  – напряжение,  $\varepsilon$  – полная деформация,  $u$  – скорость смещения частиц среды,  $\lambda$  и  $\mu$  – константы Ламе,  $F$  – функция релаксации, вывод которой основан на динамике дислокаций. Предположив в линейном приближении малость деформации сдвига и коэффициента размножения дислокаций на начальной стадии пластической деформации, получим функцию релаксации в виде

$$F = \frac{2}{3} \mu b^2 N_0 / B \left( \frac{\mu \sigma}{\lambda + 2\mu} - \tau_0 \right),$$

где  $b$  – модуль вектора Бюргерса,  $N_0$  – начальная плотность дислокаций,  $B$  – коэффициент торможения дислокаций,  $\tau_0$  – характеристическое напряжение в плоскости скольжения. На рисунке 9 приведены расчетные и экспериментальные профили напряжения на тыльной поверхности образца для двух случаев нагружения.

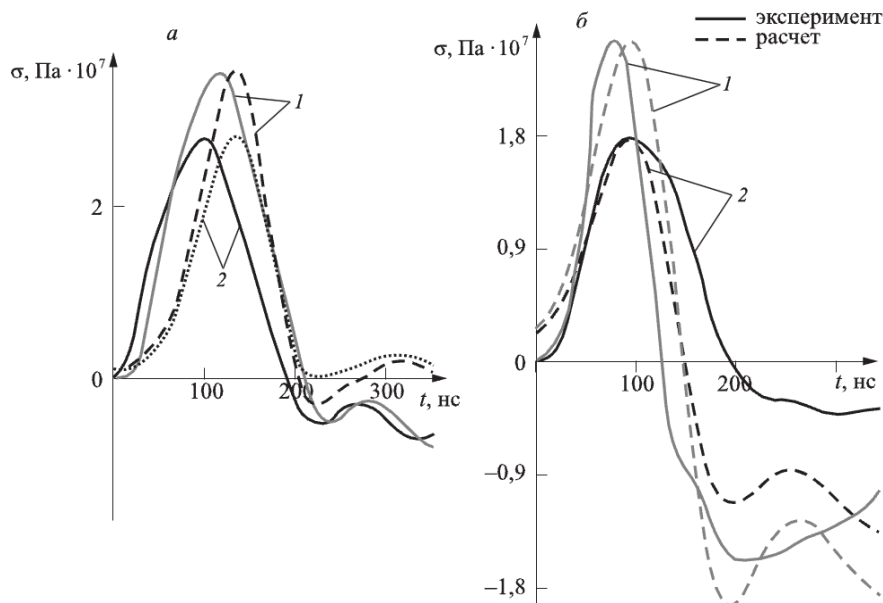


Рисунок 9. Расчетные и экспериментальные профили напряжения на тыльной поверхности образца: 1 – без магнитного поля, 2 – с магнитным полем.

В результате проведенного численного решения системы уравнений движения среды и экспериментального исследования распространения короткого импульса напряжения в условиях воздействия импульсного магнитного поля показана

но, что за влияние магнитного поля на изменение характеристик импульса механического напряжения при его распространении по диамагнитному кристаллу NaCl с парамагнитными центрами ответственен параметр дислокационной вязкости  $B$ .

Во второй половине главы путем сравнения экспериментально полученных диаграмм напряжение-деформация при воздействии магнитного поля и без него получена оценка влияния скорости деформации и магнитного поля на механические свойства образца NaCl. Образцы NaCl (примерные размеры  $8 \times 5 \times 4$  мм) с суммарной концентрацией примесей, не превышающей  $10 \text{ ppm}$ , подвергались динамическому нагружению на магнитоиндукционной установке. При этом снималась диаграмма напряжение-деформация описанным выше способом (рисунок 6, кривая 4). Динамический предел текучести составил  $\sim 4 \text{ МПа}$  против  $(0,2-0,4) \text{ МПа}$  при статическом нагружении. Выдержка образцов в постоянном магнитном поле с индукцией  $\sim 0,37 \text{ Тл}$  в течение  $4$  минут понизила предел текучести до  $2,7 \text{ МПа}$ , а в течение  $8$  минут – до  $1,1 \text{ МПа}$  (рисунок 6, кривые 5 и 6).

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Основное содержание выполненных в настоящей диссертации исследований состоит в следующем.

1. Разработан и воплощен в экспериментальных установках ряд методов для изучения влияния слабых магнитных полей на интенсивность дислокационных перемещений, а также на распространение через образец короткого упругопластического импульса.

2. Впервые реализован и исследован резонанс дислокационных перемещений до  $80-100 \text{ мкм}$  при фоновом значении пробега  $\sim 12 \text{ мкм}$  по схеме электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) в магнитном поле Земли ( $\sim 100 \text{ мкТл}$ ) и радиочастотном (от  $0,9$  до  $3,7 \text{ МГц}$ ) либо импульсном (длительность импульса  $500-600 \text{ нс}$ ) электромагнитном поле. Найденны пороговые значения индукции электромагнитных полей порядка единиц микротесла. Исследовано влияние взаимной ориентации магнитных полей и линии дислокации.

3. На основе динамики дислокаций построена математическая модель распространения упругопластического импульса субмикросекундной длительности в кристаллах NaCl в условиях воздействия импульсного магнитного поля. Проведенное моделирование позволило выявить ведущий параметр, дислокационную вязкость, отвечающий за влияние магнитного поля на характеристики эволюции упругопластического импульса при его распространении. Получены характерные значения параметра для различных вариантов нагружения.

4. Предложен основанный на фундаментальных законах акустики метод построения динамической диаграммы напряжение-деформация ( $\sigma - \epsilon$ ) в приближении Прандтля на основе экспериментально полученных амплитуд давления при динамическом нагружении образцов посредством импульсного преобразователя электромагнитно-индукционного типа.

5. Исследован эффект понижения динамического предела текучести в кристаллах NaCl, предварительно выдержанных в постоянном магнитном поле с индукцией  $\sim 0,4$  Тл, с последующим импульсным нагружением в микросекундном диапазоне длительностей. Обнаружено четырехкратное снижение динамического предела текучести образца.

### **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

#### **Публикации в журналах рекомендованных ВАК РФ:**

1. Альшиц В.И., Даринская Е.В., Морозов В.А., Кац В.М., Лукин А.А. *Парамагнитный резонанс в магнитном поле Земли как причина движения дислокаций в кристаллах NaCl* // Письма в ЖЭТФ. – 2010. – Т. 91, № 2. – С. 97-101.
2. Кац В.М., Морозов В.А. *Моделирование распространения короткого упругопластического импульса в кристаллах NaCl в условиях воздействия слабого импульсного магнитного поля* // Вестн. С.-Петерб. ун-та. Сер.1. – 2011. № 1. – С. 115-121.
3. Альшиц В.И., Даринская Е.В., Морозов В.А., Кац В.М., Лукин А.А. *Резонансные перемещения дислокаций в кристаллах NaCl в условиях ЭПР в магнитном поле Земли с радиочастотным полем накачки* // ФТТ. – 2011. – Т. 53, № 10. – С. 2010-2017.
4. Кац В.М., Морозов В.А. *Применение динамической диаграммы напряжение-деформация для исследования магнитоупругого эффекта при импульсном нагружении диамагнитных кристаллов* // Вестн. С.-Петерб. ун-та. Сер.1. – 2012. № 2. – С. 117-121.
5. Альшиц В.И., Даринская Е.В., Морозов В.А., Кац В.М., Лукин А.А. *Резонансные перемещения дислокаций в кристаллах NaCl в схеме ЭПР в магнитном поле Земли с импульсной накачкой* // ФТТ. – 2013. – Т. 55, № 11. – С. 2176-2182.

#### **Публикации в других источниках:**

6. Альшиц В.И., Даринская Е.В., Морозов В.А., Кац В.М., Лукин А.А. *Парамагнитный резонанс дислокационной подвижности в магнитном поле Земли* // Первые Московские чтения по проблемам прочности материалов. (Москва, 1-3 декабря 2009г.): тезисы докладов. – М., 2009г., 2009. – С. 27.
7. Альшиц В.И., Даринская Е.В., Морозов В.А., Кац В.М., Лукин А.А. *Движение дислокаций в кристаллах NaCl в условиях ЭПР в магнитном поле Земли* // XIX Петербургские чтения по проблемам прочности: сборник материалов. – Санкт-Петербург, 2010. – С. 21-22.
8. Кац В.М., Морозов В.А. *Магнитоупругий эффект при импульсном нагружении диамагнитных кристаллов* // Шестые Поляховские чтения: Тезисы докладов Международной научной конференции по механике. (Санкт-Петербург, 31 января - 2 февраля 2012 г.) – Санкт-Петербург, 31 января - 2 февраля 2012 г., 2012. – С. 232.
9. Кац В.М., Лукин А.А., Морозов В.А. *Управление характеристиками гидродинамического затухания упругопластической волны с помощью магнитного поля* // Актуальные направления в механике сплошных сред. (Санкт-Петербург 2-6 июля 2012 г.): тезисы докладов конференции-семинара. – Санкт-Петербург, 2-6 июля 2012г., 2012г. – С. 19.