

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

МОРОЗОВ Виктор Александрович

**НЕРАВНОВЕСНОСТЬ И
ВЫСОКОСКОРОСТНОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ
И РАЗРУШЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ ПРИ
КРАТКОВРЕМЕННЫХ ИМПУЛЬСНЫХ
НАГРУЖЕНИЯХ**

01.02.04 – механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург

2011

Работа выполнена на кафедре физической механики математико-механического факультета Санкт-Петербургского государственного университета

- Научный консультант: академик РАН,
доктор физико-математических наук,
профессор Морозов Никита Федорович
(Санкт-Петербургский государственный университет)
- Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Брагов Анатолий Михайлович
(Научно-исследовательский институт
механики Нижегородского государственного
университета им. Н.И. Лобачевского)
- доктор физико-математических наук,
профессор Даль Юрий Михайлович (Санкт-
Петербургский государственный университет)
- доктор физико-математических наук,
профессор, Клявин Олег Владимирович
(Физико-технический институт им.
А.Ф.Иоффе, Санкт-Петербург)
- Ведущая организация: Институт кристаллографии
им. А.В. Шубникова РАН (Москва)

Защита состоится “___” _____ 201__ г. в ___ часов на заседании совета Д 212.232.30 по защите докторских и кандидатских диссертаций при Санкт-Петербургском государственном университете по адресу: 198504, Санкт-Петербург, Петродворец, Университетский пр., д. 28, математико-механический факультет, ауд. 405.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. М. Горького Санкт-Петербургского государственного университета по адресу: 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9.

Автореферат разослан “___” _____ 201__ г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук, профессор

Е.В. Кустова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Проводимые на протяжении многих десятилетий экспериментальные исследования убедительно показали, что поведение материалов при квазистатическом и динамическом нагружении существенно отличается. Изучение этих отличительных особенностей и является актуальной задачей современных исследователей по деформированию и разрушению материалов. Становится общепринятым представление о том, что разрушение является процессом, протекающим на многих масштабных уровнях.

Потребности современной промышленности предъявляют высокие требования к точности прогноза прочностных характеристик различных материалов, работающих в условиях, быстро изменяющихся во времени. Актуальными и достаточно сложными являются вопросы исследования ударно-волновых процессов в конструкционных материалах.

Наибольшую трудность представляют задачи высокоскоростного разрушения материала, когда время разрушения меньше или сопоставимо с временем приложения нагрузки.

При высокоскоростном нагружении материалы могут выдерживать нагрузки, существенно превышающие (в несколько раз) пороговые при соответствующем статическом воздействии. Наблюдаются случаи задержки разрушения, когда материал разрушается во время спада локальных напряжений в местах разрыва бездефектных материалов.

Динамическое разрушение твёрдых тел характеризуется целым рядом принципиальных эффектов, не имеющих объяснения в рамках традиционных квазистатических представлений. Существующие способы моделирования динамического деформирования и разрушения, а также тестирования динамических прочностных свойств материалов сводятся к измерению скоростных зависимостей. До сих пор отсутствует система построения адекватных определяющих уравнений и определяющих параметров, описывающих динамическую прочность и вязкость разрушения.

Как показывают исследования, проводимые при быстром (порядка 10нс) и сверхбыстром (порядка 1нс) нагружении твердых тел, существует принципиальное различие в поведении материалов при таком нагружении не только от квазистатического, но и от воздействия в микросекундном диапазоне длительностей.

Ограниченность традиционных методов разрушения материалов (в частности, горных пород) стимулирует поиск новых высокотехнологичных и высокоэффективных подходов к данной проблеме.

В последнее время стремительно развиваются задачи связанных полей. Это название отражает взаимное влияние двух и более физических полей. В частности, проявляется большой интерес к теории электромагнитной упругости и магнитопластичности.

Влияние магнитного поля (МП) на свойства материалов известно очень давно. Однако широко распространено мнение, что слабое МП в принципе не в состоянии существенно (с точки зрения практического использования) повлиять на структуру и свойства немагнитных твёрдых тел. Это действительно так в термодинамически равновесных системах с индукцией магнитного поля порядка 1Тл. Выявленные в последнее время термодинамические и кинетические особенности наблюдавшихся магнитопластических эффектов (МПЭ) дали основание считать, что неравновесность в кристалле, исходно или непрерывно подпитываемая извне тем или иным способом, является необходимым и важнейшим фактором, обеспечивающим высокую чувствительность дефектной структуры к магнитным полям. Данное обстоятельство лежит в основе механизмов управления пластическими характеристиками кристаллов относительно слабыми магнитными полями. Результаты исследования МПЭ открывают новую главу не только в физике пластичности, но и в недавно зародившейся дисциплине **спинтроника**, а еще шире – в **нанотехнологии**.

Целью диссертационной работы является экспериментальное и теоретическое исследование поведения материалов в условиях нестационарного кратковременного воздействия в субмикросекундном и наносекундном диапазонах длительностей.

Методы исследования. При проведении экспериментов использовались как уже известные и хорошо себя зарекомендовавшие методы, так и новые, специально разработанные для выполнения указанных выше исследований. В диссертации использованы также теоретические методы исследования – методы неравновесной механики, механики сплошной среды, гидродинамики, численные методы решения краевых задач.

Достоверность результатов обеспечивается тем, что при получении экспериментальных данных использовались средства регистрации, основанные на разных физических принципах. Полученные результаты многократно проверялись, использовались современные приборы, а также применялись устоявшиеся математические методы при сопоставлении теоретических решений с экспериментальными результатами. Применялись современные программные вычислительные средства. Производилось сравнение с альтернативными подходами.

Научная новизна. Разработанные методы и созданные методики экспериментального исследования позволяют достаточно эффективно проводить изучение указанных выше процессов высокоскоростного нагружения материалов. Они созданы на основе трех авторских свидетельств на изобретения (а.с.№766544,1980г.; а.с.№831037,1981г.; а.с.№173753,1981г.). Предложенные на основе анализа экспериментальных данных математические модели позволяют получать результаты, обеспечивающие прогноз поведения материалов и конструкций в предельных состояниях, соответствующих условиям интенсивного внешнего воздействия.

данного высокотехнологичного и высокоэффективного способа разрушения при сравнительно малых энергозатратах.

6. В рамках «балочного» подхода выведено уравнение движения трещины при импульсном кратковременном нагружении и сформулирован динамический критерий распространения трещины при импульсных нагрузках.

7. Установлен факт сильного воздействия на дислокационную подсистему кристалла NaCl слабых магнитных полей в условиях импульсного и гармонического переменного магнитного поля. В магнитном поле Земли в схеме электронного парамагнитного резонанса реализован резонанс дислокационных перемещений и определены его основные характеристики. Обнаружен и исследован эффект понижения динамического предела текучести в кристаллах NaCl. Выявлено, что магнитное поле влияет существенным образом через параметр дислокационной вязкости на характеристики эволюции упругопластического импульса при его распространении.

Практическая значимость. Проведенные систематические исследования разрушения горных пород новым электроимпульсным способом в субмикросекундном диапазоне нагружений и выявленные основные механизмы и динамические пороги разрушения открывают широкие возможности практического применения данного высокотехнологичного и высокоэффективного способа разрушения при сравнительно малых энергозатратах.

Предложенный метод и проведенные исследования высокоскоростного соударения тел с преградой на основе использования явления электрического взрыва проводников могут быть использованы для анализа прочностных свойств материалов в широком диапазоне изменения параметров внешнего воздействия.

Обнаруженный и исследованный магнитопластический эффект открывает новые возможности практических приложений магнитопластичности.

Разработанный и апробированный магнитно-импульсный метод разрушения кольцевых металлических образцов при существенно коротких импульсах нагружения позволяет регистрировать момент разрушения, а также вязко-хрупкий переход, что очень важно в условиях динамического воздействия

Полученные экспериментальные результаты и разработанные математические методы расчетов воздействия мощных кратковременных потоков частиц на конструкционные материалы окажутся полезными при оценке возможностей использования материалов при конструировании оборудования различного назначения. Это особенно важно в настоящее время в связи как с широким применением пучковых технологий для модификации поверхностных свойств, так и с необходимостью определения долговечности деталей. Известно, что значительное количество техногенных катастроф связано с неправильной оценкой надежности применяемых материалов.

Можно рассчитывать, что полученные результаты позволят продвинуться в этом направлении, а также в технологии современных материалов.

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

Третья Всесоюзная конференция по инженерным проблемам термоядерных реакторов, Ленинград, 20-22 июня 1984 г.; VI Всесоюзный съезд по теоретической и прикладной механике, Ташкент, 24-30 сентября 1986 г.; VII International Conference on High Power Particle Beams Proceedings, July, 1988, Karlsruhe; XIII сессия Международной школы по моделям механики сплошной среды, 27 июня – 3 июля, С.-Петербург, 1995 г.; XIV сессия Международной школы по моделям механики сплошной среды, 17-24 августа 1997 года, г. Жуковский; XXXV Международный семинар «Актуальные проблемы прочности», Псков, 1999 г.; XV сессия Международной школы по моделям механики сплошной среды, 1-10 июля, 2000 г., С.-Петербург; Всероссийская научная конференция по механике «Вторые Поляховские чтения», 2-4 февраля 2000 г., С.-Петербург; Международная научная конференция по механике «Третьи Поляховские чтения», 4-6 февраля 2003 г., С.-Петербург; XIV Международная научная школа им. акад. С.А. Христиановича «Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках», Крым, Алушта, 20-26 сентября 2004 года; XXI Международная конференция «Математическое моделирование в механике деформируемых тел и конструкций. Методы граничных и конечных элементов», 4-7 октября 2005 г., С.-Петербург; XVI Международная научная конференция «Физика прочности и пластичности материалов», Самара, 26-29 июня 2006 г.; Международная научная конференция по механике «Четвертые Поляховские чтения», 7-10 февраля 2006 г., С.-Петербург; Всероссийский семинар по аэрогидродинамике, посвященный 90-летию со дня рождения С.В. Валландера, 5-7 февраля 2008 г., С.-Петербург; Международная конференция «Шестые Окуневские чтения», 23-27 июня 2008 г., С.-Петербург; XVIII Петербургские чтения по проблемам прочности кристаллов, 21-24 октября 2008 г., С.-Петербург; Международная научная конференция по механике «Пятое Поляховские чтения», 3-6 февраля 2009 г., С.-Петербург; XXIII Международная конференция «Математическое моделирование в механике деформируемых тел и конструкций. Методы граничных и конечных элементов», 28 сентября - 1 октября 2009 г., С.-Петербург; 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.

Результаты работы неоднократно докладывались автором на семинарах в Институте проблем машиноведения РАН, на заседаниях Научного Совета РАН по горению и взрыву, семинарах секции прочности и пластичности им. Н.Н. Давиденкова в Доме Ученых им. М. Горького РАН, семинарах кафедры теории упругости и центра «Динамика» Санкт-Петербургского государственного университета.

Публикации. По теме работы имеется 42 публикации, в том числе 17 публикаций в журналах, рекомендованных ВАК [1-17]. В приведенных работах **постановка задачи** принадлежит: соискателю в работах (3-6, 8, 10, 12-14, 22, 24, 27, 28, 31-35, 39), совместно: с Мещеряковым Ю.И. (1, 2, 19, 25), с Петровым Ю.В. (15,17, 41), с Альшицем В.И. (7, 11, 16, 38, 42), с Судьенковым Ю.В. (9, 18, 20, 21, 23, 26, 37), с Гунько Ю.Ф. (29), с Федоровским Г.Д. (36, 40); **постановка эксперимента принадлежит:** соискателю в работах (5-8, 11, 13-17, 19, 24, 31, 34, 35, 38, 39, 41, 42), совместно: с Мещеряковым Ю.И. (1, 2, 25), с Судьенковым Ю.В. (9, 18, 20, 21, 26, 37); **проведение экспериментов** осуществлено: соискателем в работах (8, 14, 31, 34), совместно с соавторами (1, 2, 6, 7, 9, 11, 13, 15-17, 18-22, 24-26, 35-42); **математические модели** разработаны: соискателем (3, 4, 10, 12, 22, 23, 30, 31, 33, 34), с Гунько Ю.Ф. (29), с Кацем В.М. (14), с Шипиловым С.С. (39); **численный расчет** проведен: Чужиковой И.И. (3,4), Лукиным А.А. (13), Кацем В.М. (14), Маркеловой Е.В. (29), Семенюк О.В. (33, 34); **обсуждение результатов** с соавторами проводилось во всех совместных работах; **формулировка физической модели** в работах (11, 16, 38, 42) принадлежит Альшицу В.И.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы, насчитывающего 348 наименований. В работе содержится 113 иллюстраций и 4 таблицы. Общий объем работы 330 страниц.

Поддержка. Исследования автора на различных этапах работы поддерживались грантами РФФИ: № 96-01-00606 (руководитель), № 06-01-00202-а (исполнитель), госконтрактом № 02.740.11.5170 Федеральной целевой программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009-2013 годы (отв. исполнитель), контрактом «Исследование и прогнозирование динамической прочности горных пород» (заказчик – корпорация “Shell”).

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении рассматриваются особенности нагружения, деформирования и разрушения материалов в субмикросекундном и наносекундном диапазонах длительностей. Отмечаются два основных момента, характеризующих поведение материалов в условиях такого нагружения. Обосновывается актуальность темы диссертации, указывается цель и методы исследования. Перечислены основные результаты, выносимые на защиту. Кратко описана структура работы и содержание глав.

В первой главе проводится анализ литературных источников по следующим направлениям:

- воздействие мощных импульсных кратковременных пучков электронов на твердые тела;
- электрический взрыв проводников и его применение для нагружения материалов;
- электрический пробой в твердых телах и жидкостях;

- деформирование материалов в условиях сопутствующих электромагнитных полей, магнитоэластический эффект;
- динамические модели и критерии хрупкого разрушения.

Во второй главе рассматривается формирование упруго-пластической волны в неравновесной приповерхностной области при импульсном воздействии в субмикросекундном и наносекундном диапазонах длительностей. Показано, что в этой области формирование волны напряжения осуществляется в два этапа. На первом этапе наблюдается одноволновая структура импульса давления, амплитуда которого быстро и существенно уменьшается. По прошествии релаксации на втором этапе волна распадается на две части: упругую и пластическую. В этой связи корректно считать начало релаксации амплитуды упругого предвестника не от поверхности нагружения (как это делалось в ряде зарубежных работ), а от границы релаксационной области (x_p , рис. 1).

Модельное описание формирования волны производится следующим образом [22]. Для зоны релаксации вблизи ударяемой поверхности определяющее уравнение среды в случае одноосной деформации записывается в следующем виде:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} - (\lambda(t) + 2\mu(t)) \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = 0, \quad (1)$$

где напряжение σ , деформация ε и модули упругости λ и μ являются функциями времени.

Решение системы уравнений движения среды представляется в виде

$$\sigma = (\sigma' - \sigma^p) e^{-kx} + \sigma^p, \quad (2)$$

где $\sigma' = \varepsilon' \rho v_l^2(0, t)$, $x = \int_0^t v_l(t) dt$, $v_l^2(t) = (1/\rho)[\lambda(t) + \mu(t)]$, а значения k и σ^p определяются из эксперимента.

Решение задачи по затуханию упругого предвестника при $t > t_p$, где t_p – время релаксации, ищется в виде

$$\sigma_y = (\rho c v_p - \sigma_*) \exp(-2A\mu_0 S(x/c)) + \sigma_*, \quad (3)$$

где c – продольная скорость звука; σ_* – динамически равновесное значение упругого предела Гюгонио; $A = b^2 N_0 / B$; $S = 2\mu_0 / 3\rho c^2$; N_0 – начальная плотность подвижных дислокаций; B – константа торможения дислокаций в среде. Затем проводится сшивание двух решений при $t = t_p$.

С помощью полученных выражений (2) и (3) были обработаны результаты экспериментов по одноосному нагружению алюминия [22]. Кривая затухания упругого предвестника показана на рис. 1.

Обработка экспериментальных данных Ю.В. Судьенкова в [18] при возбуждении волн напряжений длительностью $7 \cdot 10^{-8}$ с в алюминиевых и медных образцах при взрывном испарении тонкой алюминиевой фольги

(3 мкм), облучаемой импульсом лазера, по приведенной модели показала следующее. В области неравновесного процесса изменение продольных напряжений хорошо описывается выражением (2) (кривая 1, рис. 2), причем для Al значения $\sigma_0 = 350$ МПа, $\sigma^p = 195$ МПа, $k = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$, для Cu $\sigma_0 = 500$ МПа, $\sigma^p = 320$ МПа, $k = 2,45 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$.

При этом следует отметить, что затухание амплитуды упругого предвестника в области равновесного ударноволнового процесса удовлетворительно описывается выражением (3) при значениях начальной плотности дислокаций, не противоречащих экспериментальным данным ($N \approx 10^{11} \text{ м}^{-2}$) – кривые 2 на рис. 2.

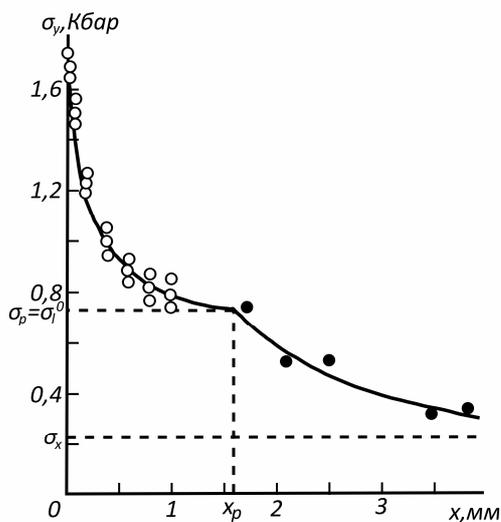


Рис. 1. Затухание амплитуды упругой волны. \circ - с учетом релаксации упругих модулей; \bullet - с учетом динамики дислокаций.

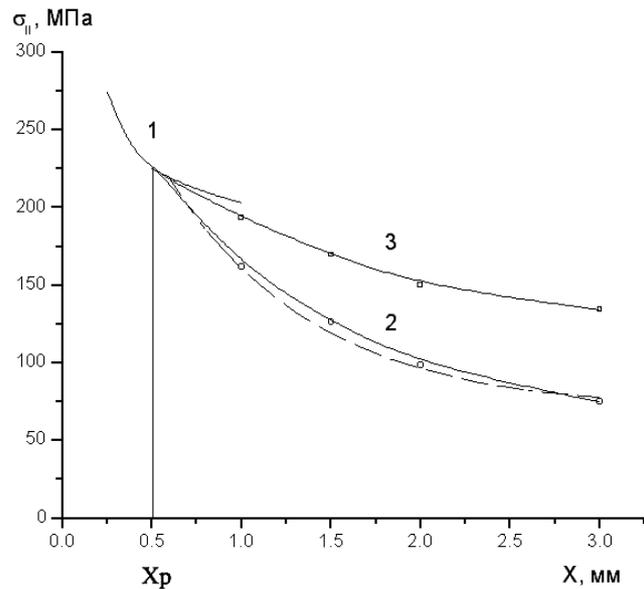


Рис. 2. Изменение амплитуды волны в зоне релаксации (1), амплитуды упругой (2) и пластической (3) волн в поликристаллическом алюминии.

Система одномерных уравнений движения сплошной среды, с целью определения релаксации амплитуды упругого предвестника, решалась также методом характеристик [10]. В результате решения получена зависимость изменения амплитуды упругой волны от координаты

$$\ln \left| \sigma^* - \frac{\rho c^2 \tau_0}{\mu \sigma_0} \right| = \frac{4}{3} \frac{\mu^2 b^2 N_0}{\rho c^2 B} l(z-k), \quad (4)$$

где k - постоянная интегрирования, $z = x/l$, l - толщина деформируемого образца, $\sigma^* = \sigma/\sigma_0$, σ_0 - максимальная амплитуда импульса напряжения. Данное уравнение содержит три неопределённых параметра τ_0, N_0, k . Для их определения проведено сопоставление экспериментальных и расчетных

данных и найдены оптимальные значения параметров задачи и алюминиевой среды:

$$\rho = 2,7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3, \quad c = 6,3 \cdot 10^3 \text{ м/с}, \quad l = 3 \text{ мм}, \quad \mu = 2,564 \cdot 10^{10} \text{ Па}, \quad b = 2,86 \cdot 10^{-10} \text{ м}, \\ V = 5,6 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}, \quad k = -0,08, \quad N_0 = 6,5 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-2}, \quad \tau_0 = 0,167 \cdot 10^8 \text{ Па}.$$

Расчетная кривая изменения амплитуды напряжения σ упругой части волны (пунктирная линия) от координаты x и экспериментальная кривая (сплошная линия) приведены на рис. 2.

Отметим, что полученная величина плотности дислокаций близка по порядкам величин к наблюдаемым в экспериментах.

Применение предложенной модели формирования импульсных напряжений при больших амплитудах ударных нагрузок [26] показало также её работоспособность и подтвердило факт двухэтапного формирования волны. На основе полученных данных может быть решён ряд вопросов взаимодействия сильноточных пучков с преградами, в частности, оценена роль коллективных взаимодействий электронов и других эффектов.

На основе предложенной дислокационной модели деформирования [23] описаны экспериментальные результаты Ю.В.Судьенкова по высокоскоростному нагружению алюминиевых и медных образцов импульсами лазера ($\lambda = 1,06 \text{ мкм}$) длительностью 50нс. В опытах на одной части образцов наблюдались осцилляции пластического течения за фронтом упругого предвестника. На другой части образцов обнаружен монотонный переход от упругого предвестника к пластическому фронту.

Модель позволила выявить зону проявления колебаний, которая ограничена снизу гидростатической скоростью волны, а сверху – значением скорости пластического фронта, определяемой структурными параметрами среды.

Проведено моделирование движения слабонеравновесной релаксирующей среды при кратковременном импульсном нагружении [33, 34]. Такая среда описывается некоторой дополнительной переменной ξ . Считается, что процесс релаксации ξ к своему равновесному значению ξ_0 происходит по закону

$$\xi = \xi_0 + [\xi(0) - \xi_0] \exp\left(\frac{-t}{\tau_p}\right), \quad (5)$$

где τ_p – время релаксации, а разность $\xi - \xi_0$ мала.

Рассматриваются небольшие отклонения от состояния равновесия:

$$\rho' = \rho - \rho_0 \ll \rho_0, \quad P' = P - P_0 \ll P_0, \quad v \ll C_0,$$

где ρ_0 , P_0 , v , C_0 — соответственно невозмущенные плотность, давление, массовая и акустическая скорости. При этом считаются $\frac{v}{C_0}$, $\frac{\rho'}{\rho_0}$, $\frac{\xi - \xi_0}{\xi_0} \approx \mu$

величинами первого порядка малости. Тогда уравнение состояния $P = P(\rho, \xi)$ удобно представить в виде разложения по степеням ρ' , $\xi - \xi_0$.

Сохраняя члены первого порядка малости в разложении для $P = P(\rho, \xi)$, после несложных математических преобразований приходим к уравнению состояния среды

$$P' = C_0^2 \rho' + m C_0^2 \int_{-\infty}^t \exp\left(-\frac{t-t'}{\tau_p}\right) \frac{d\rho'}{dt'} dt', \quad (6)$$

где $m = \frac{C_\infty^2 - C_0^2}{C_0^2}$, $C_\infty^2 = \left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_{\xi_0}$, $\xi = \xi_0$ при $T \ll \tau_p$, T — период волны.

Сохраняя члены до второго порядка малости в разложении $P = P(\rho, \xi)$ получим уравнение состояния в виде

$$P' = C_0^2 \rho' + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 P}{\partial \rho^2}\right)_{\xi_0} \rho'^2 + m C_0^2 \int_{-\infty}^t \exp\left(-\frac{t-t'}{\tau_p}\right) \frac{d\rho'}{dt'} dt'. \quad (7)$$

где $\left(\frac{\partial^2 P}{\partial \rho^2}\right)_{\xi_0} = \frac{(\gamma-1)C_0^2}{\rho_0}$, γ — показатель адиабаты.

Отметим, что для уравнений (6) и (7) характерна немгновенная зависимость $P'(t)$ и $\rho'(t)$. Значение ρ' в момент времени t определяется изменением плотности среды ρ' во все предшествующие времена, т.е. среда обладает «памятью».

Под интегралом в (6) и (7) имеется экспоненциальное ядро. Его вид обязан принятому в (5) закону релаксации. В общем случае под интегралом может стоять функция от $t-t'$ сложного вида. Конкретизация этих функций является достаточно сложной задачей механики.

Для случая распространения плоской волны перейдём к одномерной записи системы уравнений движения с полученными уравнениями состояния (6), (7):

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} + \rho_0 \frac{\partial v}{\partial x} = 0, \quad \rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{\partial P'}{\partial x}$$

$$P' = C_0^2 \rho' + m C_0^2 \int_{-\infty}^t \exp\left(-\frac{t-t'}{\tau_p}\right) \frac{d\rho'}{dt'} dt', \quad (8)$$

$$\left(P' = C_0^2 \rho' + \frac{1}{2} \frac{(\gamma-1)C_0^2}{\rho_0} \rho'^2 + m C_0^2 \int_{-\infty}^t \exp\left(-\frac{t-t'}{\tau_p}\right) \frac{d\rho'}{dt'} dt' \right).$$

Данная система уравнений может быть сведена к одному уравнению второго порядка относительно ρ' или массовой скорости v . Далее, используя известный «метод медленно меняющегося профиля волны», когда $\frac{\partial v}{\partial x} \ll \frac{\partial v}{\partial t}$, получим интегродифференциальное уравнение для среды с релаксацией в линейном приближении

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{m}{2C_0} \frac{\partial}{\partial \tau} \int_{-\infty}^t \exp\left(-\frac{\tau - \tau'}{\tau_p}\right) \frac{dv}{d\tau'} d\tau'. \quad (9)$$

Для нелинейного случая это уравнение будет иметь вид

$$\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{1+\gamma}{2C_0^2} v \frac{\partial v}{\partial \tau} = \frac{m}{2C_0} \frac{\partial}{\partial \tau} \int_{-\infty}^t \exp\left(-\frac{\tau - \tau'}{\tau_p}\right) \frac{dv}{d\tau'} d\tau'. \quad (10)$$

Для уравнений (9) и (10) точных нестационарных решений не найдено. Нами получено численное решение методом сеток линейного уравнения (9), которое сравнивается с нашими экспериментальными данными. Решение осуществлялось при двух амплитудах импульса нагружения: 70 и 1200бар.

В пределах точности эксперимента рассмотренная модель адекватно описывает распространение импульса нагружения в релаксирующей среде до достаточно больших амплитуд импульса (1200бар).

На примере широко применяемого на практике импульса нагружения колоколообразной формы дан анализ двух асимптотических решений нелинейного интегродифференциального уравнения: $T \ll 1$ и $T \gg 1$, где $T = \tau_p \cdot \omega_0$, ω_0 – частота или обратная длительность возмущения.

В третьей главе рассматривается гидродинамический подход к решению задач высокоскоростного нагружения материалов [32]. Показывается, при каких условиях нагружения такой подход возможен.

Приводятся уравнения движения в осесимметричном случае в форме законов сохранения в эйлеровых координатах.

Процессы взаимодействия излучения с веществом, особенно плотных потоков, представляют довольно сложную задачу. Основная сложность заключается в определении эффективного объема, в который вкладывается энергия излучения. А удельная энергия определяет суммарный механический импульс, передаваемый в преграду, который нас интересует.

На основе проведенного анализа исследования формирования и распространения в твердом теле короткого ударного импульса предлагается методика определения эффективных параметров в модели численного расчета взаимодействия излучения с веществом на примере воздействия сильноточного релятивистского пучка электронов на алюминиевую преграду [5].

Для описания процесса поглощения энергии применяется система уравнений движения в газодинамической одномерной постановке в переменных Эйлера:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v) = 0, \quad \frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial x}(p + \rho v^2) = 0, \quad (11)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x}[(p + \rho E)v] = Q,$$

где ρ - плотность вещества, p - давление, v - скорость, E - полная удельная энергия, Q - описывает поглощение энергии излучения.

Считается, что импульс излучения имеет некоторую временную конфигурацию и поглощается веществом по экспоненциальному закону, т.е.

$$Q = \chi \rho_0 q_0 e^{-\chi \rho x} f(t), \quad (12)$$

где χ - коэффициент поглощения, ρ_0 - начальная плотность вещества, q_0 - мощность излучения, x - глубина проникновения излучения в среду, $f(t)$ - временная конфигурация поглощения импульса излучения.

Замыкание системы уравнений осуществляется уравнением состояния в форме Ми-Грюнайзена

$$p = \Gamma \rho (E - v^2/2), \quad (13)$$

где Γ - коэффициент Грюнайзена.

Для решения нелинейной системы дифференциальных уравнений в частных производных используется метод «крупных частиц».

В результате численного расчёта [3] получены распределения плотности, давления, скорости, полной и кинетической энергий в зависимости от времени. Численные расчёты [4] позволили также получить зависимость максимальной амплитуды давления от массового коэффициента поглощения в достаточно широком диапазоне его изменения. Коэффициент поглощения χ позволяет определить глубину зоны энерговыделения $l = 1/\rho\chi$. Амплитуда давления в зоне энерговыделения определялась по предложенной модели (2) в экспериментах по воздействию импульсного сильноточного электронного пучка с параметрами: $E = 700$ кэВ, $I = 250$ кА, $t_{имп} = 5 \cdot 10^{-8}$ с; площадь облучения $(1-3) \cdot 10^{-4}$ м²; плотность потока энергии $q_0 = 3,3 \cdot 10^{14}$ Вт/м². Эта амплитуда составила $p_0 \approx 4 \cdot 10^9$ Па. Зная давление, по кривой $p_m(\chi)$ (см. рис. 3) можно определить эффективное значение коэффициента поглощения $\chi_{эф}$, реализуемого в данном конкретном опыте, и, следовательно $l_{эф}$.

Далее находится эффективный объём $V_{эф}$, в который вкладывается энергия излучения, $V_{эф} = S l_{эф}$. В проведенном нами эксперименте эффективные параметры оказались следующими: $\chi_{эф} = 5$ м²/кг, $l_{эф} = 7,4 \cdot 10^{-5}$ м, $V_{эф} = 1,85 \cdot 10^{-8}$ м³.

Проиллюстрированная методика позволяет, не рассматривая сложной физической картины взаимодействия излучения с веществом, найти недостающие эффективные параметры математической модели и решить поставленную задачу.

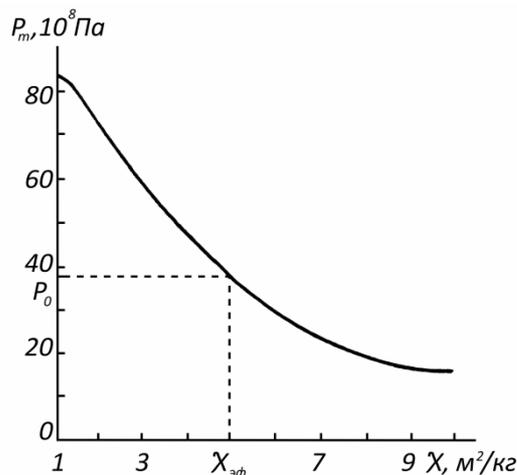


Рис. 3. Зависимость амплитуды импульса сжатия от массового коэффициента поглощения.

Рассмотрена модельная задача разлета вещества под действием энергии излучения электронного пучка [29]. Вещество представляет собой изотропное твердое тело, имеющее форму плоской пластинки. Размеры области вклада энергии много меньше характерных размеров пластинки. Импульс излучения имеет прямоугольную форму. Длительность импульса излучения значительно меньше характерного времени разлета вещества. В результате нагрева вещества от границы вещество-вакуум и от границы между нагретым и холодным веществом идут волны разрежения, которые встречаются в слое нагретого вещества, а по холодному веществу вглубь идет волна сжатия. Даже если энергия вещества не достигла энергии испарения, но возникшее в твердом теле напряжение превышает предельное, может произойти откол вещества. Предполагается известной часть энергии, приходящаяся на кинетическую энергию разлета вещества. Исследуется эволюция разлетающегося вещества в пространстве вблизи пластинки с течением времени.

В этой модели в отличие от изложенных выше работ рассматривается кинетический подход к решению задачи. Поставленная нами задача решается следующим образом. Разлет частиц моделируется кинетической функцией распределения. Источник частиц действует в течении конечного времени (длительность импульса излучения). Весь процесс описывается моделью бесстолкновительного разлета частиц с максвелловской функцией распределения по скоростям.

В рамках этой модели на основе предложенного метода проведен численный расчёт пространственновременной эволюции плотности разлетающегося вещества. Было найдено распределение плотности по продольной и поперечной координате для нескольких моментов времени, а также получена зависимость плотности от угла.

В четвертой главе рассмотрены вопросы разрушения материалов при кратковременных импульсных нагрузках в субмикросекундном и наносекундном диапазонах нагружения.

Были подготовлены и выполнены эксперименты по регистрации механических напряжений, возникающих на аноде сильноточного диода [19,24]. С этой целью использовались две схемы лазерной интерферометрии, имеющие высокое временное ($5 \cdot 10^{-9}$ с) и пространственное ($5 \cdot 10^{-8}$ м) разрешения: лазерный интерферометр Майкельсона [20, 21] – для измерения смещения свободной поверхности образца, лазерный дифференциальный интерферометр – для измерения скорости движения свободной поверхности образца.

Результаты экспериментов [25] показали, что предложенная методика позволяет не только измерять величину механических напряжений, возникающих в элементах конструкций ускорителей, таких как диод, диафрагмы, коммутаторы, но и получить данные о процессах в сильноточном диоде, а также о прочностных свойствах материалов.

На основе предложенной методики изучалось откольное разрушение анода сильноточного ускорителя электронов «Нева-01» [2]. Параметры ускорителя: $E_c = 700$ кэВ, $I = 250$ кА, $\tau = 50$ нс. В качестве анода использовали образцы из состаренного дюралюминия Д16 диаметром 50 мм и толщиной (1,5 – 15) мм. Площадь облучения $(1 - 3) \cdot 10^{-4}$ м².

Результаты анализа фрактограмм свидетельствуют о наличии неодинаковых по масштабу структурных уровней деформации и разрушения в зависимости от длительности нагружения. Для короткоимпульсного разрушения оказалось характерным наличие более широких гребней отрыва и присутствие ямок с плоским рельефом дна. Последнее свидетельствует о возможности хрупкого отрыва при напряжениях, близких к теоретической прочности кристалла. Смену масштабного уровня деформации дает анализ боковых поверхностей откольных «тарелочек». На фрактограммах наблюдаются три явно выраженные зоны. Ближний к свободной поверхности слой наиболее однороден, толщина его лежит в пределах $(0,5 - 1) \cdot 10^{-5}$ м. При скорости распространения волны $v = 6400$ м/с этому слою соответствует длительность процесса $\tau = 10^{-9}$ с. Второй наблюдаемый масштабный уровень имеет размер $(0,2 - 0,3) \cdot 10^{-3}$ м, что соответствует $(3 - 4) \cdot 10^{-8}$ с по длительности. Размеры третьего масштабного уровня ограничены толщиной откольной «тарелочки». Структура двух последних уровней состоит из полос, ориентированных вдоль направления распространения волны. Поперечный размер полос во втором слое примерно на порядок меньше, чем в третьем.

Интерферометрические измерения скорости свободной поверхности, проведенные при различных длительностях импульсов нагружения, также свидетельствуют о наличии неодинаковых по масштабу уровней деформации в зависимости от длительности импульса давления.

Таким образом, можно сделать следующие выводы: фрактографический панорамный анализ откольных поверхностей показал, а интерферометрические измерения скорости свободной поверхности косвенно подтвердили, что при переходе от наносекундного диапазона длительностей

нагружения к микросекундному происходит смена механизма деформирования и разрушения: первому уровню соответствует пространственный масштаб структурных элементов $(1-2) \cdot 10^{-6}$ м, второму $(10-11,5) \cdot 10^{-6}$ м.

Проведённое исследование по разрушению твёрдых диэлектриков в условиях приповерхностного электрического пробоя субмикросекундной длительности [9] показало, что при высокоскоростном импульсном нагружении материалов электроразрядным способом, как и при любом кратковременном импульсном нагружении, существует принципиальное отличие прочностных свойств образцов от аналогичного процесса при медленных квазистатических воздействиях. Задача может быть разрешена, например, на основе структурно-временного подхода, учитывающего кинетические процессы формирования макроразрывов.

В условиях проведенных нами экспериментов [9] выявлено, что при электроразрядном импульсном нагружении образцов горных пород основной вклад в разрушение вносит тепловой механизм пробоя.

При многократных экспозициях происходит, видимо, прорастание магистральных трещин, что приводит к отколу на поверхности образца. При малых напряжениях число экспозиций, приводящих к разрушению, резко возрастает. С увеличением амплитуды импульса напряжения число экспозиций убывает, стремясь к одной, что соответствует динамическому порогу разрушения.

Изложенные результаты продемонстрировали возможность практического применения данного высокотехнологичного и высокоэффективного способа разрушения при сравнительно малых энергозатратах, связанных с возможностью многократного малоамплитудного импульсного воздействия с применением уже имеющихся малогабаритных высоковольтных генераторов.

Предложен метод электрического взрыва проводников (ЭВП) для исследования процессов высокоскоростного соударения тел [37]. ЭВП инициировался на двух установках с примерно одинаковой энергией взрыва (~ 60 Дж), но с разной длительностью электрического импульса ($\tau_1 \sim 2$ мкс, $\tau_2 \sim 100 - 300$ нс).

При использовании низковольтной установки разработан метод разгона ударника в каналах различной длины в условиях атмосферного воздуха и вакуума. Каналы были выполнены в виде отверстий в ПММА диаметром 11 мм, длиной от 5 до 40 мм, а так же ствола из латуни длиной 43 мм того же диаметра. В первом случае в качестве взрываемого проводника использовались полоски длиной 16 мм и шириной 11 мм с нанесенным на бумажную основу слоем алюминия. Во втором - медная проволочка диаметром 0.2 мм и длиной 25 мм.

Как показали эксперименты, более эффективным с точки зрения КПД установки, т.е. части энергии взрыва, идущей на формирование плазменной струи для разгона либо ударника, либо мелкодисперсных частиц, оказался взрыв проволочки в камере, отделенной от ствола диафрагмой из полиэти-

леновой пленки. В опытах использовались пленки толщиной 30 и 70 мкм. Ударники выполнялись либо в виде диска диаметром 11 мм и толщиной 3 мм, либо цилиндрического стаканчика высотой 12 мм, на который помещался диск из ПММА толщиной 3 мм.

Была разработана методика измерения скорости движения ударника в стволе при полете к мишени. Луч He-Ne лазера расщеплялся на два параллельных друг другу с расстоянием между ними 3 мм вблизи мишени. Лучи проходили через прорезы в стволе и далее на фотодиоды, электрический сигнал с которых подавался на цифровой осциллограф Tektronix TDS 2012.

В качестве мишеней при ударе использовались пластинки из ПММА толщиной 3 мм и 4.5 мм, на которых наблюдались откольные разрушения. На рис. 4 приведены фотографии пластин с откольным разрушением при различных условиях эксперимента. Рис. 4а иллюстрирует их откольное разрушение при использовании канала из ПММА длиной 6 мм на воздухе, а рис. 4б и рис. 4в – латунного ствола с взрывной камерой в воздухе и в вакууме соответственно. Как нетрудно видеть, наиболее эффективным является откольное разрушение, продемонстрированное на рис. 4в.

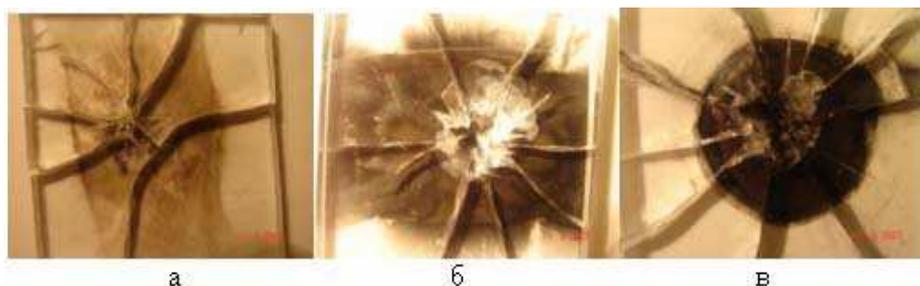


Рис. 4. Фотографии разрушенных мишеней из ПММА

В процессе проведения экспериментов с помощью специально разработанного пьезодатчика на основе тонкой пьезопленки измерялись импульсы давления в преграде из ПММА.

Таким образом, разработанные методы разгона ударников в стволе с использованием эффекта электрического взрыва проводников продемонстрировали возможность их эффективного использования для исследования откольной прочности материалов.

В рамках «балочного» подхода на основе построения уравнения Лагранжа выведено уравнение движения трещины при импульсном кратковременном нагружении [12]:

$$2\ddot{l}l^7t + 7\dot{l}^2l^6t - 10\dot{l}l^7 = -\frac{\gamma Ea^7}{6\sigma^2}t^6 - \frac{a^4}{4}l^4t^3, \quad (14)$$

где l – длина трещины, γ – удельная поверхностная энергия, E – модуль Юнга, σ – напряжение, a – поперечная скорость звука.

Уравнение (14) есть нелинейное дифференциальное уравнение второго порядка для трещины, распространяющейся тогда, когда напряжение постоянной амплитуды σ приложено мгновенно.

Рассмотрены асимптотическое и частное решения полученного уравнения, позволяющие оценить стационарную скорость движения трещины и характерные временные параметры. Сформулирован динамический критерий распространения трещины при импульсных нагрузках

$$\frac{\sigma^2 \tau}{E} \approx k \frac{\gamma}{a}, \quad (15)$$

где τ минимальная длительность воздействующего импульса напряжения, при которой начинается движение трещины, k – константа порядка 1.

Размерность величин в левой и правой частях уравнения (15) представляет собой некоторое “удельное действие” (произведение удельной энергии (объёмной плотности энергии) на время). Выражение (15) показывает, что волна напряжения, которая характеризуется амплитудой σ и длительностью τ , должна иметь некоторое наименьшее “действие” γ/a , для того чтобы произошло распространение трещины. Это уравнение может быть интерпретировано как применение принципа наименьшего действия Гамильтона.

В качестве примера рассмотрено движение трещины в полиметилметакрилате (ПММА). Из примера следует, что динамическая величина эффективной поверхностной плотности энергии на разрыв в 20 раз превышает ее статическое значение. Данный факт подтверждает полученное ранее в работах Ю.В. Петрова с соавторами подобное соотношение величин $\gamma_{эф}^{стат} / \gamma_{эф}^{дин}$ из принципиально другого подхода, основанного на критерии инкубационного времени.

Разработаны два экспериментальных метода инициирования роста трещин в ПММА и метод измерения скорости их движения при импульсном нагружении с помощью электрического взрыва проводников [13]. Определено пороговое значение амплитуды разрушающей нагрузки в условиях динамического воздействия. Проведено численное решение задачи [13] для движения трещины в материале из ПММА в интервале времени от 0 до $5 \cdot 10^{-5}$ с. В результате расчета была получена зависимость длины трещины от времени, т.е. траектория её движения. Полученные расчётные данные близки к экспериментальным.

Разработан и апробирован магнитно-импульсный метод разрушения и фоторегистрации момента разрушения кольцевых металлических образцов при существенно коротких импульсах нагружения [15,17,41]. Были реализованы две модификации нагружения (при периоде тока $T=7.4$ мкс и $T=1$ мкс) на базе генератора коротких высоковольтных импульсов ГКВИ-300, обеспечивающего формирование электрических напряжений с амплитудами 30 – 300 кВ. При разрыве кольца, коаксиально закрепленного на середине катушки, по которой пропускался ток от генератора напряжения, возникала искра, которая позволяла с помощью фотодиода фиксировать момент разрушения образца. Осуществлялось исследование поверхностей разрушения кольцевых алюминиевых образцов после испытаний на оптическом микроскопе НЕОРНОТ-32 в темном поле. При большей длительности

нагрузки образцы разрушаются более вязко, т.е. оказываются более пластичными, чем при более коротких нагрузениях. Разработанный метод позволяет регистрировать момент разрушения, что очень важно в условиях динамического воздействия, а также вязко-хрупкий переход.

В пятой главе приводятся результаты исследования генерирования и высокоскоростного столкновения частиц с преградой.

Дается приближенное решение задачи о взаимодействии потока твердых частиц с преградой (случай малых скоростей) [30]. Так как во многих практически важных задачах скоростными эффектами можно пренебречь, рассматривается случай статического распределения напряжений в преграде без учета скорости деформирования. При этом предполагается, что распределение напряжений в преграде при столкновении с ней частиц потока будет таким же, как для полого шара. Отметим также, что возможно распространение решения задачи на случай линейного и степенного упрочнения материала преграды. Полученные результаты позволяют по известной скорости падающих частиц определять глубину их внедрения в преграду и наоборот. Данный результат может быть использован для оценки эрозии поверхности материалов.

Дана формулировка проблемы лабораторного моделирования высокоскоростных соударений мелкодисперсных частиц (МДЧ) с преградами [35,39]. Предложены два способа моделирования, один из которых основан на разгоне частиц разлетающимся веществом при электрическом взрыве проводников, а другой – на их иницировании из мишени, служащей анодом сильноточного импульсного электронного ускорителя. В качестве преграды в эксперименте использовались элементы покрытия космического аппарата. Установка, на которой реализуется предлагаемый метод, достаточно проста, малоэнергоёмка, не требует дорогостоящего обслуживания, имеет сравнительно малые габариты. Для определения размеров частиц нами применялась методика тонких плёнок. В проведенных исследованиях осуществлялось прямое измерение скорости частиц. Для этого была разработана специальная методика на базе авторского свидетельства на изобретение № 766544 (1980г.). Методика основана на измерении смещения поверхности преграды с помощью лазерного интерферометра. Сделана оценка подобия исследуемых явлений в лабораторном и натурном (космическом) эксперименте, основанная на экспериментах по измерению размера и скорости частиц, выбору их сорта.

Предложена математическая модель и проведен численный расчёт параметров движения мелкодисперсных частиц при электрическом взрыве проводников. Результаты расчетов по этой модели совпадают с результатами проведенных нами экспериментов.

В шестой главе рассмотрены вопросы микро- и макропластичности кристаллов при комбинированном воздействии механических и магнитных полей (МП), а также гармонического переменного МП, скрещенного с МП Земли.

В процессе исследования подвижности краевых дислокаций в кристаллах NaCl и LiF при механическом импульсном нагружении электронным пучком [1] было обнаружено, что коэффициент динамического торможения для кристаллов NaCl в 4,5 раза меньше, чем в традиционных опытах, использующих механическое ударное нагружение. Изучение природы такого расхождения привело к обнаружению перемещения дислокаций в кристаллах NaCl под действием импульсного МП.

Было проведено исследование по изучению влияния импульсного электромагнитного поля на подвижность краевых дислокаций в кристаллах NaCl при механическом нагружении посредством электронного пучка.

В экспериментах [7] удалось разделить два указанных эффекта и показать их аддитивность, что иллюстрируется рис.5.

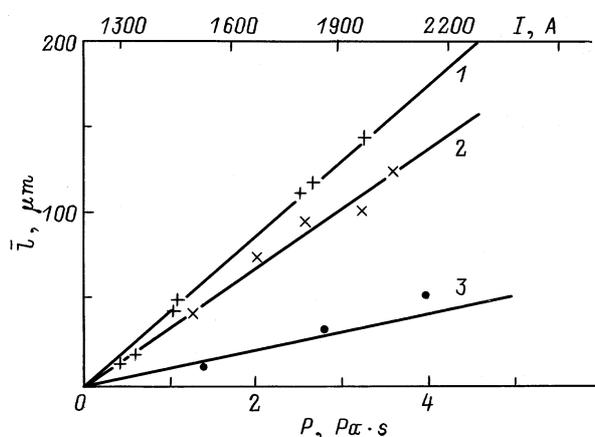


Рис. 5. Средняя длина пробега дислокаций l в кристаллах NaCl в функции от импульса давления механического поля и тока электронного пучка. 1 — при суммарном воздействии механического и магнитного импульсов; 2 — при воздействии импульсов электромагнитного поля; 3 — при воздействии механических импульсов давления.

Как было показано в ряде работ по магнитопластичности кристаллов, преобразование состояния дефектов можно осуществить не только путем спиновой эволюции в **статическом** магнитном поле, но и в **резонансном** режиме в схеме ЭПР, т.е. в скрещенных магнитных полях, постоянном и переменном.

Нами было осуществлено наблюдение и систематическое изучение эффекта движения дислокаций в условиях не только импульсного, а и **гармонического переменного магнитного поля \tilde{B} , скрещенного с магнитным полем Земли B_{Earth}** [11,16,38,42]. В опытах варьировались взаимная ориентация кристалла NaCl и скрещенных полей, время t экспозиции образцов, а также частота и амплитуда \tilde{B}_m поля накачки. В результате, была установлена связь между резонансной частотой и геометрией опыта, показано, что высота l_m пика пробега $l(\nu)$ линейна по $\tilde{B}_m^2 t$, и найден порог эффекта по амплитуде \tilde{B}_m .

Для проведения экспериментов по воздействию на кристаллы NaCl скрещенных магнитных полей, поля Земли $\mathbf{V}_{\text{Earth}}$ и осциллирующего поля $\tilde{\mathbf{V}}$ переменного тока, была создана установка. Магнитное поле накачки $\tilde{\mathbf{V}}$ создавалось прямолинейным проводником (центральным проводом коаксиальной линии), по которому протекал переменный ток от генератора.

Измерение горизонтальной и вертикальной компонент магнитного поля Земли $\mathbf{V}_{\text{Earth}}$ производилось в месте постановки образца NaCl в камере с помощью выносного зонда феррозондового магнетометра. Значения этих компонент геомагнитного поля составили, соответственно:

$B_{\text{Earth}}^{\leftarrow} = 45 \pm 6 \text{ мкТл}$, $B_{\text{Earth}}^{\downarrow} = 108 \pm 6 \text{ мкТл}$, откуда полный вектор индукции магнитного поля Земли может быть оценен как $B_{\text{Earth}} \approx 117 \text{ мкТл}$.

Опыты проводились на хорошо отоженных образцах, выколотых из одного куска кристалла NaCl. Суммарная концентрация примесей в кристаллах не превышала 10ppm. Примерные размеры образцов составляли 2×3×6 мм. Ориентация граней отвечала плоскостям спайности {100}. Измерения строились преимущественно на краевых дислокациях. Введенные дислокации были в основном прямолинейными, а их направления \mathbf{L} были примерно ортогональными граням образца, т.е. $\mathbf{L} \parallel \langle 100 \rangle$. На рис. 6, а схематически показан образец в виде параллелепипеда с ребрами, направленными вдоль единичных векторов \mathbf{a} , \mathbf{b} и \mathbf{c} . Во всех случаях образец ориентировался так, чтобы его грань $\{\mathbf{b}, \mathbf{c}\}$ была параллельна паре векторов $\mathbf{V}_{\text{Earth}}$ и $\tilde{\mathbf{V}}$. При этом мы следили за перемещениями дислокаций \mathbf{a} -типа ($\mathbf{L} \parallel \mathbf{a}$) и \mathbf{b} -типа ($\mathbf{L} \parallel \mathbf{b}$), выходящих на боковые грани, соответственно $\{\mathbf{b}, \mathbf{c}\}$ и $\{\mathbf{a}, \mathbf{c}\}$.

На рис. 6, б показаны зависимости среднего дислокационного пробега l от частоты ν магнитного поля накачки с амплитудой $\tilde{B}_m = 2.67 \text{ мкТл}$ для двух разных направлений этого поля. Пики $l(\nu)$ получены в условиях (см. врезки на рис. 6, б), когда образец стоял на горизонтальной подставке так, что магнитное поле Земли оставалось параллельным плоскости его боковой грани $\{\mathbf{b}, \mathbf{c}\}$, а поле $\tilde{\mathbf{V}}$ ориентировалось в той же плоскости, вертикально (первый пик) или горизонтально (второй пик). Как видно из рис. 6, б, подвижность дислокаций \mathbf{a} -типа ($\mathbf{L} \parallel \mathbf{a}$) в зависимости от частоты поля накачки демонстрирует яркий резонансный отклик на экспозицию образца в скрещенных магнитных полях. Как видно из рис. 6, б, подвижность дислокаций \mathbf{a} -типа ($\mathbf{L} \parallel \mathbf{a}$) в зависимости от частоты поля накачки демонстрирует яркий резонансный отклик на экспозицию образца в скрещенных магнитных полях. Дислокации с ориентацией $\mathbf{L} \parallel \mathbf{b}$ тоже формируют максимумы в области тех же резонансных частот, но они сильно сглажены, будучи значительно ниже и шире пиков, относящихся к дислокациям $\mathbf{L} \parallel \mathbf{a}$. Нетрудно убедиться, что измеренные резонансные частоты наблюдаемых пиков $l(\nu)$, $\nu_1 \approx 1.3 \text{ МГц}$, $\nu_2 \approx 3.0 \text{ МГц}$, хорошо описываются формулой $h\nu = g\mu_B B$, где g – фактор Ланде, μ_B – магнетон Бора, при $g \approx 2$, если подставить в нее $B_1 = 45 \text{ мкТл} \approx B_{\text{Earth}}^{\leftarrow}$, $B_2 = 108 \text{ мкТл} \approx B_{\text{Earth}}^{\downarrow}$, соответственно.

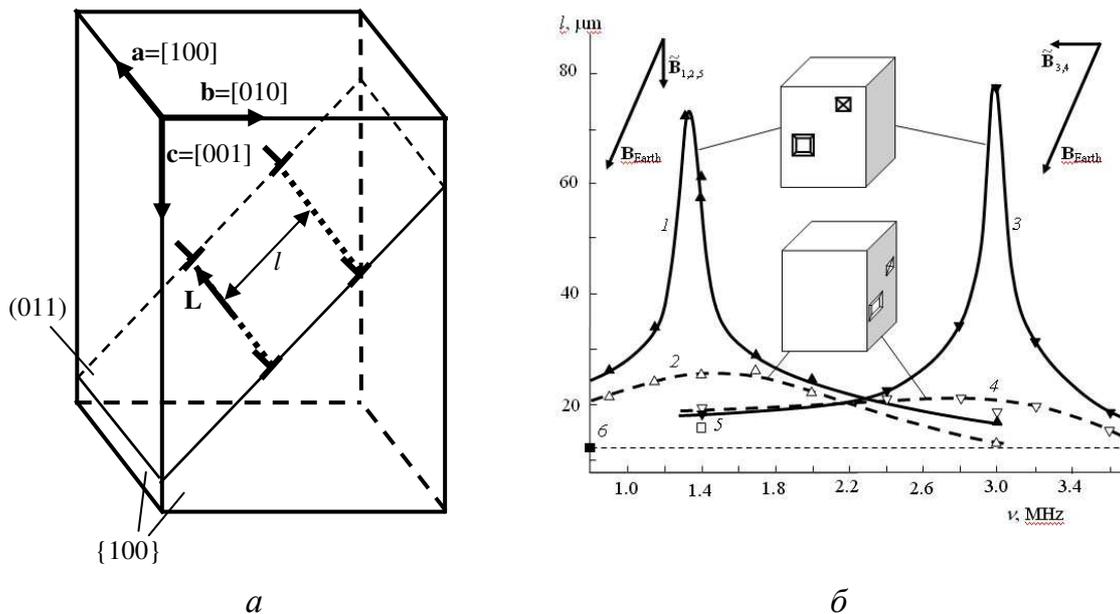


Рис. 6. а – схематическое изображение ориентации образца и перемещения l краевой дислокации ($\mathbf{L} \parallel \mathbf{a}$) в плоскости скольжения (011); б – два ЭПР пика дислокационных пробегов $l(\nu)$ под действием скрещенных магнитных полей: статического поля Земли $\mathbf{V}_{\text{Earth}}$ и переменного поля накачки $\tilde{\mathbf{V}}$ регулируемой частоты. 1, 3, 5 – пробеги дислокаций **a**-типа, ортогональных плоскости $\{\mathbf{V}_{\text{Earth}}, \tilde{\mathbf{V}}\}$; 2, 4 – пробеги дислокаций **b**-типа, параллельных плоскости $\{\mathbf{V}_{\text{Earth}}, \tilde{\mathbf{V}}\}$; 1, 2, 5 – для вертикального поля накачки; 3, 4 – для горизонтального поля накачки; 5 – для образца за магнитным экраном; б – уровень фона травления. $\tilde{V} = 2.67$ мкТл, $t = 5$ мин.

Таким образом, не вызывает сомнений, что обнаруженные пики имеют ЭПР природу. Тем не менее, наблюдаемый резонанс имеет свою специфику. Во-первых, частоты резонанса определяются не полным постоянным полем $\mathbf{V}_{\text{Earth}}$, а его компонентами. Во-вторых, в отличие от аналогичных пиков, ранее наблюдавшихся в кристаллах NaCl в области СВЧ, изучаемый нами низкочастотный резонанс обладает ярко выраженной анизотропией по отношению к взаимной ориентации скрещенных магнитных полей и дислокаций. Судя по тому, что оба пика на рис. 6, б наблюдаются при одной и той же ориентации кристалла по отношению к магнитному полю Земли $\mathbf{V}_{\text{Earth}}$, избирательность их проявления, по-видимому, связана с конкретным выбором направлений поля $\tilde{\mathbf{V}}$, исключаяющим либо один резонанс, либо другой. Кроме того, как мы видели (рис. 6, б), дислокации **a**- и **b**-типа в одних и тех же скрещенных магнитных полях демонстрируют совершенно разную подвижность в резонансных условиях.

Контрольный опыт, когда образец находился за ферромагнитным экраном (точка 5 на рис. 6, б.), дал пробег на уровне фона травления, т.е. магнитное экранирование поля Земли полностью устраняет ЭПР на заданной частоте. Найдена зависимость резонансного эффекта от амплитуды поля накачки \tilde{V}_m и времени экспозиции образца t . Величина пробега l_m линейна

как по t , так и по \tilde{B}_m^2 . Обнаружен порог эффекта по амплитуде поля накачки в условиях нашего эксперимента. Он составил $\tilde{B}_m^{\text{th}} \sim 1 \text{ мкТл}$. Найденный уровень порогового поля \tilde{B}_m^{th} позволяет оценить порядок величины времени спин-решеточной релаксации в нашей системе: $\tau_{sl}^d \sim \tau_{dp}(\tilde{B}_m^{\text{th}})$. Искомая оценка составляет $\tau_{sl}^d \sim 10^{-4} \text{ с}$, что примерно совпадает с независимыми оценками, основанными на свойствах МПЭ в постоянном магнитном поле.

Дана упрощенная физическая модель наблюдаемого резонанса, сформулированная В.И. Альшицем. Из неё вытекают вполне определённые предсказания относительно положения резонансных частот пиков дислокационных пробегов при изменении взаимной ориентации образца и магнитного поля Земли. Нами была проведена экспериментальная проверка предсказанной модели.

Проведено исследование по проявлению МПЭ на **макроскопическом** уровне при комбинированном воздействии механических и магнитных импульсов, создаваемых электронным пучком [8]. Была предусмотрена возможность воздействия на образец как одного механического импульса, так и в комбинации с электромагнитным импульсом. Механический импульс давления создавался за счёт взаимодействия импульсного электронного пучка с алюминиевой мишенью и далее передавался в NaCl образец. Импульс магнитного поля создавался током электронного пучка в момент облучения мишени.

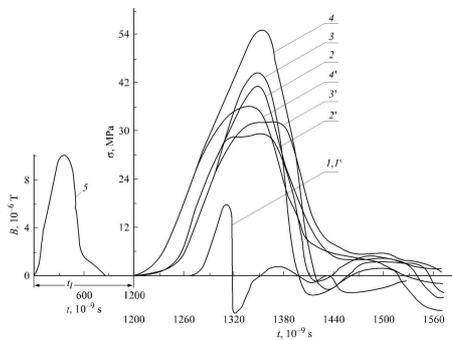


Рис. 7. Осциллограммы импульсов механического нагружения (1 - 4, 1' - 4') и электромагнитного поля (5) в кристалле NaCl. 1 - 4 - импульсное магнитное поле отсутствует, 1' - 4' - приложено, t_l - время задержки начала механического импульса напряжения относительно магнитного импульса.

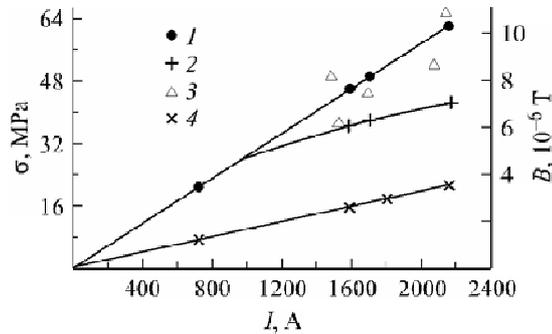


Рис. 8. Зависимость амплитуд импульсов механического напряжения и индукции магнитного поля в кристалле NaCl от тока пучка. 1 – $\sigma(I)$ без магнитного поля в Al мишени, 2 – то же с магнитным полем, 3- $B(I)$, 4 – $\sigma(I)$ в стальной мишени.

На рис. 7 приведены осциллограммы импульсов механического напряжения в кристалле NaCl при различных значениях их амплитуды как при воздействии импульса магнитного поля (кривые 1' - 4'), так и без него (кривые 1-4). Форма магнитного импульса (кривая 5) также представлена на этом рисунке. Когда амплитуда механического импульса в образце доста-

точно далека от его динамического предела текучести (рис. 7, кривая 1), включение магнитного поля не влияет на форму сигнала. В этом случае зависимость амплитуды импульса механического напряжения от тока электронного пучка (или вкладываемой в мишень энергии пучка), представленная на рис. 8, носит линейный характер. При приближении амплитуды механического импульса к динамическому пределу текучести образца, включение вихревого высокочастотного магнитного поля создает условия для его понижения, что проявляется в уплощении формы импульса (рис. 7, кривые 2'-4') и отклонении от линейной зависимости $\sigma(I)$ (рис. 8, кривая 2). По мере повышения интенсивности сигнала, как видно из рис. 7, 8, разность амплитуд импульсов при воздействии магнитного поля и без него увеличивается.

На основании полученных экспериментальных данных можно сделать следующий вывод. Так как электромагнитный импульс предвещает действие на кристалл механического импульса, то к моменту начала воздействия последнего произошло открепление дислокаций от примесных парамагнитных центров и это время составляет не более 10^{-6} с.

Проведено численное моделирование движения среды [14] под действием высокоскоростного нагружения в присутствии импульсного магнитного поля (МП) с целью выявления для конкретного материала (кристаллов NaCl) и конкретных условий нагружения параметров дислокационной структуры, ответственных за изменение характеристик распространяющейся волны напряжения при воздействии МП.

Численно методом конечных разностей с применением искусственной вязкости решается следующая система уравнений

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial \sigma}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = 0, \\ \frac{\partial \sigma}{\partial t} - (\lambda + 2\mu) \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = -\frac{2}{3} \mu b^2 \frac{N_0}{B} \left(\frac{\mu \sigma}{\lambda + 2\mu} - \tau_0 \right), \end{aligned} \quad (16)$$

где ρ – плотность материала, σ – напряжение, ε – полная деформация, u – скорость смещения частиц среды, λ , μ – константы Ламе, N_0 – плотность дислокаций, b – модуль вектора Бюргерса, B – коэффициент торможения дислокаций, τ_0 – характеристическое напряжение в плоскости скольжения дислокаций.

Начальные и граничные условия: $t = 0$, $0 < x < \infty$, $\varepsilon = \sigma = v = 0$; $x = 0$, $0 < t < t_*$, $\sigma = \sigma(t)$ – берётся из эксперимента.

В результате решения задачи выявлено, что именно параметр дислокационной вязкости B ответственен за влияние магнитного поля на изменение характеристик импульса механического напряжения при его распространении по диамагнитному кристаллу NaCl с парамагнитными центрами. Большая чувствительность к магнитному полю наблюдается при повышении амплитуды напряжения и меньшая – с уменьшением

напряжения, т.е. при приближении к пределу текучести, что является закономерным и подтверждает известные литературные данные.

Предложен метод построения динамической диаграммы напряжение-деформация ($\sigma - \varepsilon$) для кристаллов NaCl с целью получения количественной оценки увеличения динамического предела текучести по сравнению со статическим. Исследована зависимость предела текучести в этих кристаллах от предварительной обработки образца в поле постоянного магнита при последующем импульсном механическом нагружении.

Импульсное механическое нагружение образцов осуществлялось на специально созданной магнитоиндукционной установке с длительностью импульса ~ 25 мкс.

Основная идея метода построения динамической диаграммы ($\sigma - \varepsilon$) заключалась в том, что при определённой амплитуде генерируемого в алюминиевой пластине механического импульса напряжения он является упругим в алюминии, а в кристалле NaCl уже упругопластическим. При построении диаграммы ($\sigma - \varepsilon$) для NaCl использовалась известная схема Прандтля, т.е. аппроксимация двумя отрезками прямых.

Образцы NaCl в виде прямоугольной пластинки размером $8 \times 5 \times 4 \text{ мм}^3$ с суммарной концентрацией примесей 10ppm перед нагружением в магнитоиндукционной установке помещались в поле постоянного магнита с индукцией $B \sim 0,37$ Тл, где выдерживались в течение 4 и 8 минут. С увеличением времени выдержки образцов в постоянном МП предел текучести кристаллов существенно понижался.

Таким образом, показано, что экспозиция кристаллов NaCl в магнитном поле позволяет управлять одной из основных макроскопических деформационных характеристик кристалла – пределом текучести.

Получена оценка влияния скорости деформации на механические свойства материала: если статический предел текучести кристаллов NaCl находится в пределах (0,2–0,4) МПа, то динамический составил ~ 4 МПа, т.е. повысился на порядок и более. Выдержка образцов в постоянном МП с индукцией $B \approx 0,37$ Тл в течение 4 минут понизила предел текучести с 4 до 2,7 МПа (в 1,5 раза), а в течение 8 минут – до 1,1 МПа (в 3,6 раза).

В заключении формулируются основные результаты и выводы.

1. Создан комплекс экспериментальных установок по исследованию высокоскоростного нагружения материалов в субмикросекундном и наносекундном диапазонах длительностей и по изучению магнитопластичности диамагнитных кристаллов. Разработаны методы, созданы методики и построены приборы по регистрации основных параметров нагружения и разрушения твердых тел с высоким временным и пространственным разрешением.
2. На основе анализа экспериментальных исследований сформулирован подход и разработаны математические модели формирования упругопластической волны в приповерхностной области при нагружении короткими

импульсами в субмикросекундном и наносекундном диапазонах длительностей.

3. Проведено моделирование движения слабонеравновесной релаксирующей среды при кратковременном импульсном нагружении.

4. Сформулирован гидродинамический подход и проведено моделирование высокоскоростного нагружения материалов при воздействии короткого интенсивного электроннопучкового излучения.

5. Создана система регистрации с применением лазерного дифференциального интерферометра и исследован механизм откольного разрушения анода сильноточного ускорителя при воздействии импульсного наносекундного электронного пучка.

6. Проведено систематическое исследование разрушения горных пород новым электроразрядным способом в субмикросекундном диапазоне нагружений. Выявлены основные механизмы и динамические пороги разрушения. Показаны возможности практического применения данного высокотехнологичного и высокоэффективного способа разрушения при сравнительно малых энергозатратах.

7. Предложен метод и проведено исследование высокоскоростного соударения тел с преградой на основе использования явления электрического взрыва проводников в широком диапазоне длительностей и амплитуд нагружения.

8. В рамках «балочного» подхода на основе построения уравнения Лагранжа выведено уравнение движения трещины при импульсном кратковременном нагружении. Рассмотрены асимптотическое и частное решения полученного уравнения, позволяющие оценить стационарную скорость движения трещины и характерные временные параметры. Сформулирован динамический критерий распространения трещины при импульсных нагрузках. Разработаны два экспериментальных метода инициирования роста трещины в полиметилметакрилате (ПММА) и метод измерения скорости их движения при импульсном нагружении с помощью электрического взрыва проводников. Определено пороговое значение амплитуды разрушающей нагрузки в условиях динамического воздействия.

9. Разработан и апробирован магнитно-импульсный метод разрушения и фоторегистрации момента разрушения кольцевых металлических образцов при существенно коротких импульсах нагружения. Разработанный метод позволяет регистрировать момент разрушения, что очень важно в условиях динамического воздействия, а также вязко-хрупкий переход.

10. Дана формулировка проблемы лабораторного моделирования высокоскоростных соударений мелкодисперсных частиц (МДЧ) с преградами, предложен способ моделирования, основанный на разгоне частиц разлетающимся веществом при электрическом взрыве проводников (ЭВП). Разработана и отлажена в лабораторных условиях методика, позволяющая измерять скорость МДЧ. Предложена математическая модель описания процесса разгона МДЧ при ЭВП. Дано приближённое решение задачи о взаимодействии потока твёрдых частиц с преградой.

11. Проведено исследование движения дислокаций в кристаллах NaCl и LiF при комбинированном воздействии кратковременных импульсных, механических и магнитных полей посредством электронного пучка.

12. Установлен факт сильного воздействия на дислокационную подсистему кристалла NaCl таких слабых магнитных полей как поле Земли (~ 100 мкТл) и гармоническое поле (~ 1 мкТл). В магнитном поле Земли в схеме электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) реализован и исследован резонанс дислокационных перемещений.

13. Обнаружен и исследован эффект понижения динамического предела текучести в кристаллах NaCl, предварительно выдержанных в постоянном магнитном поле с индукцией ~ 0,4 Тл, последующим импульсным нагружением микросекундной длительности, а также в условиях нагружения механическим импульсом субмикросекундной длительности посредством электронного пучка, которому предшествовал импульс вихревого электромагнитного поля с задержкой во времени 10^{-6} с.

14. Проведено моделирование распространения короткого упругопластического импульса в кристаллах NaCl в условиях воздействия импульсного магнитного поля. Выявлено, что магнитное поле влияет существенным образом через параметр дислокационной вязкости на характеристики эволюции упругопластического импульса при его распространении.

Публикации по теме диссертации.

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК:

1. Даринская Е.В., Макаревич И.П., Мещеряков Ю.И., Морозов В.А., Урусовская А.А. Исследование подвижности краевых дислокаций в кристаллах LiF и NaCl при импульсном нагружении электронным пучком // ФТТ. - 1982. - Т.24, №5, С. 1564-1566.
2. Белогорский В.В., Печерский О.П., Чернобровин В.И., Лихачев В.А., Мещеряков Ю.И., Морозов В.А. Откольные процессы на аноде сильноточного ускорителя электронов // Физика и химия обработки материалов. - 1987. - № 1. - С. 42-44.
3. Морозов В.А., Чужикова И.И. Численный расчет пространственно-временных характеристик среды, поглощающей излучение короткого импульса, в газодинамической одномерной постановке // Вестник СПбГУ. Сер.1. - 1992. - Вып.3(№15). - С.55-58.
4. Морозов В.А., Чужикова И.И. Зависимость максимальной амплитуды давления от массового коэффициента поглощения короткого импульса. // Вестник СПбГУ. Сер.1. - 1993. - Вып.3 (№15). - С.142-143.
5. Морозов В.А. Некоторые особенности нагружения и деформирования твердых тел в субмикросекундном и наносекундном диапазонах длительностей // Вестн. С.-Петербур. ун-та. Сер.1. - 1993. - Вып. 3. (№ 15). - С. 89-92.
6. Жаворонков В.И., Морозов В.А. Осциллографический метод измерения характеристик ударно-волновых процессов // Измерительная техника. - 1996. - № 10. - С. 43-44.

7. Альшиц В.И., Даринская Е.В., Легеньков М.А., Морозов В.А. Движение дислокаций в кристаллах NaCl при комбинированном воздействии механических и электромагнитных импульсов, создаваемых электронным пучком // ФТТ. - 1999. - Т.41, №11. - С. 2004-2006.
 8. Морозов В.А. Пластификация кристаллов NaCl при комбинированном воздействии коротких механических и магнитных импульсов ФТТ. - 2003. - Т.45, № 10. - С. 1839-1841.
 9. Лукин А.А., Морозов В.А., Судьенков Ю.В. Разрушение твердых диэлектриков в условиях приповерхностного электрического пробоя субмикросекундной длительности // Вестн. С.-Петербург. ун-та. Сер.1. - 2008. - Вып. 2. - С. 133-140.
 10. Морозов В.А., Богатко В.И. Формирование упругопластической волны в приповерхностной области при кратковременном нагружении // ДАН. - 2008. - Т. 421, №6. - С. 765-768.
 11. 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.
 12. Морозов В.А. Движение трещины при кратковременных импульсных нагружениях // Вестн. С.-Петербург. ун-та. Сер.1. -2010. Вып. 1. - С. 105-111.
 13. Лукин А.А., Морозов В.А. Инициирование роста трещин при кратковременных импульсных нагружениях// Вестн. С.-Петербург. ун-та. Сер.1. - 2010. - Вып. 2. - С. 134-139.
 14. Кац В.М., Морозов В.А. Моделирование распространения короткого упругопластического импульса в кристаллах NaCl в условиях воздействия слабого импульсного магнитного поля// Вестн. С.-Петербург. ун-та. Сер.1. - 2011. - Вып. 1. - С. 115-121.
 15. Морозов В.А., Петров Ю.В., Лукин А.А., Кац В.М., Удовик А.Г., Атрошенко С.А., Федоровский Г.Д. Исследование прочности металлических колец при ударном воздействии магнитно-импульсным методом // ЖТФ. - 2011. - Т. 81, №6. - С. 51-56.
 16. 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.
 17. Морозов В.А., Петров Ю.В., Лукин А.А., Кац В.М., Удовик А.Г., Атрошенко С.А., Федоровский Г.Д. Растяжение металлических колец при ударном воздействии магнитно-импульсным методом// ДАН. - 2011. - Т. 439, №6. - С. 761-763.
- Другие публикации:
18. Воробьев Б.Ф., Даубаев У., Макаревич И.П., Морозов В.А., Недбай А.И., Судьенков Ю.В. Экспериментальные исследования высокоскоростного нагружения материалов // Физическая механика. Л.: Изд-во ЛГУ, 1984. - Вып. 5. - С. 144-169.

19. Белогорский В.В., Печерский О.П., Чернобровин В.И., Мещеряков Ю.И., Морозов В.А. Измерение механических напряжений в элементах конструкций сильноточных ускорителей // Докл. 3-й Всесоюзной конференции по инженерным проблемам термоядерных реакторов (Л-д, 20-22 июня 1984 г.). - М.: ЦНИИАтоминформ, 1984 - Т. 1. - С. 309-315.
20. Судьенков Ю.В., Даубаев У., Макаревич И.П., Морозов В.А., Недбай А.И. Интерферометры для измерения динамических смещений // Вестник ЛГУ, Серия: Математика, Механика, Астрономия, Л. 1985, деп. в ВИНТИ, № 4024-85, 15 с.
21. Даубаев У., Макаревич И.П., Морозов В.А., Недбай А.И., Судьенков Ю.В. Повышение чувствительности интерферометрических методов измерений импульсных деформаций // Аннот. докл. VI Всесоюзн. съезда по теор. и прикл. механике (Ташкент, 24-30 сент. 1986г.). - С. 239-240.
22. 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. - С. 187-191.
23. Байзаков О.Д., Макаревич И.П., Морозов В.А., Судьенков Ю.В. Осцилляция пластического течения в металлах за фронтом упругого предвестника // Проблемы динамических процессов в гетерогенных средах: Всесоюз. межвуз. сб. науч. тр. / Калинин. политехн. ин-т. – Калинин: КГУ, 1987. - С. 127-132.
24. Pechersky O.P., Chernobrovin V.I., Morozov V.A. Measurement of pulse mechanical stress in high current accelerated diode. VII Intern. Conference on High Power Particle Beams, 1988, Karlsruhe, FRG, V. 2, XP-8, pp. 1455-1457.
25. Белогорский В.В., Печерский О.П., Чернобровин В.И., Мещеряков Ю.И., Морозов В.А. Исследование процессов в диоде сильноточного ускорителя методом лазерной интерферометрии // Диагностика плазмы / под ред. М.И. Пергамент. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - Вып. 6. - С. 84-89.
26. Морозов В.А., Судьенков Ю.В. Формирование и развитие импульсных напряжений в твердых телах с учетом релаксационных явлений в приповерхностной зоне ударного нагружения // Физическая механика. - Л.: Изд-во ЛГУ, 1990. - Вып. 6. - С. 150-159.
27. Морозов В.А. Особенности динамического деформирования материалов в субмикросекундном и наносекундном диапазонах нагружений // Труды XIII сессии Международной школы по моделям механики сплошной среды / под ред. Б.В. Филиппова. - СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 1996. - С.191-200.
28. Морозов В.А. Особенности нагружения, деформирования и разрушения материалов в субмикросекундном и наносекундном диапазонах длительностей // Модели механики сплошной среды: Сб. обзорных докладов и лекций XIV Международной школы по моделям механики сплошной среды. - М., 1997. - С. 105-117.

29. Гунько Ю.Ф., Морозов В.А., Маркелова Е.В., Ожерельев С.Г. Модельная задача о разлете вещества под действием энергии излучения // Физическая механика. - СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 1998. - Вып. 7. - С. 80-91.
30. Богатко В.И., Морозов В.А. Приближенное решение задачи о взаимодействии потока твердых частиц с преградой// Механизмы деформации и разрушения перспективных материалов. - Сборник трудов XXXV семинара «Актуальные проблемы прочности». - Псков, 1999. - С 187-191.
31. Морозов В.А. Особенности распространения коротких импульсов напряжения // Труды XV сессии Международной школы по моделям механики сплошной среды. – СПб.: НИИХ СПбГУ, 2001. - С.70-78.
32. Морозов В.А. Динамика высокоскоростного нагружения материалов: учебное пособие. - СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2003. - 112с.
33. Морозов В.А., Семенюк О.В. Решение интегро-дифференциального уравнения для слабонервновесной релаксирующей среды // Третьи Поляховские чтения: Тезисы докладов международной научной конференции по механике, (С.-Петербург, 4-6 февраля 2003г.) - СПб.: Изд. НИИХ С.-Петерб. ун-та, 2003. - С. 205-206.
34. Морозов В.А., Семенюк О.В. Моделирование движения слабонервновесной релаксирующей среды при кратковременном импульсном нагружении // Физическая механика. - СПб.: С.-Петерб. гос. ун-т, 2004. - Вып. 8. - С. 183-195.
35. Лукин А.А., Морозов В.А., Судьенков Ю.В. Новый метод генерирования мелкодисперсных частиц и высокоскоростное столкновение их с преградой // Четвертые Поляховские чтения: Избранные труды. - СПб.: Изд. «ВВМ», 2006. - С. 520-527.
36. Федоровский Г.Д., Морозов В.А. Исследование физико-механических свойств объемных наноструктурных керамик // XVI Петербургские чтения по проблемам прочности. (С.-Петербург, 14-16 марта 2006г.): сборник тезисов. - СПб., 2006. - С. 137.
37. Лукин А.А., Морозов В.А., Судьенков Ю.В. Применение электрического взрыва проводников для исследования процессов высокоскоростного соударения тел // Межд. конф. «Шестые Окуневские чтения » (С.-Петербург, 23-27 июня 2008г): материалы докладов. СПб.: Балт. гос. техн. ун-т., 2008. - Т. 1. - С. 145-149.
38. 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., 2009 г. - С. 27.
39. Лукин А.А., Морозов В.А., Шипилов С.С. Лабораторное моделирование высокоскоростных столкновений мелкодисперсных частиц с покрытиями КА // Пятые Поляховские чтения: Избранные труды Международной научной конференции по механике (С.-Петербург, 3-6 февраля 2009г.). - СПб., 2009. - С. 260-264.
40. Федоровский Г.Д., Гинзбург Б.М., Иванов Е.К., Крылов Н.А., Лукин А.А., Морозов В.А., Петров Ю.В., Скотникова М.А., Темнов О.В., Туйчиев

Ш, Шаров Т.В. Экспериментальное изучение физикомеханических свойств композитных пленок из ПММА // Математическое моделирование в механике деформируемых тел и конструкций. Методы граничных и конечных элементов. Труды 23 Международной конференции (С.-Петербург 28 сентября - 01 октября 2009г.). - СПб., 2009. - Т.2. - С. 491-500.

41. Кац В.М., Лукин А.А., Морозов В.А., Петров Ю.В., Удовик А. Г., Федоровский Г.Д. Об экспериментальном исследовании прочности металлических кольцевых образцов при ударном воздействии распределенной радиальной нагрузки магнитно- импульсным методом // XIX Петербургские чтения по проблемам прочности: сборник материалов. - С.-Петербург, 2010. - Ч.1. - С. 200-202.

42. 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. - С.-Петербург, 2010. - Ч.2. - С. 21-22.