

На правах рукописи

Кривошеев Сергей Иванович

ФОРМИРОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМЫХ ИМПУЛЬСОВ ДАВЛЕНИЯ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИЛЬНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТНЫХ  
ПОЛЕЙ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ИССЛЕДОВАНИЯМ МЕХАНИЧЕСКИХ  
СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

Специальность 01.04.13 – Электрофизика, электрофизические установки

Автореферат  
диссертации на соискание  
ученой степени доктора технических наук

Санкт-Петербург - 2006

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет".

Научный консультант: доктор технических наук, профессор  
Шнеерсон Герман Абрамович

Официальные оппоненты: академик РАН, доктор технических наук,  
профессор  
Рутберг Филипп Григорьевич

доктор технических наук,  
старший научный сотрудник  
Кучинский Владимир Георгиевич

доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник  
Абрамова Клара Борисовна

Ведущая организация: ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр  
Всероссийский научно-исследовательский институт  
экспериментальной физики» (г. Саров).

Защита состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2006 г. в \_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.16 при Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет", по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, Главное здание, ауд. 284.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет".

Автореферат разослан "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2006 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
к.т.н., доцент

Н.М. Журавлева

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Сильные (до 100 Т) и сверхсильные магнитные поля (более 100 Т) являются признанным инструментом для проведения исследований, связанных с различными направлениями современной науки. Можно отметить исследования в физике твердого тела, физике плазмы и высоких плотностей энергии. Представляются интересными исследования влияния сильных (СИМП) и сверхсильных импульсных магнитных полей (ССИМП) на жизнедеятельность биологических объектов и на каталитические реакции, на формирование новых свойств поверхности и т.д. Развитие техники получения ССИМП позволяет включить в круг их возможного применения и некоторые сопутствующие процессу генерации СИМП процессы, например, использование возникающего магнитного давления для изучения поведения материалов при импульсном нагружении.

**Актуальность** диссертационной работы связана с большим интересом к генерации сильных и сверхсильных импульсных магнитных полей с точки зрения практических приложений и фундаментальных исследований. Наиболее удобным для проведения таких экспериментов является метод прямого разряда конденсаторной батареи на одновитковый соленоид, главное достоинство которого - неразрушаемость объекта, находящегося в области сильного поля. В отличие от метода сжатия магнитного потока, при котором амплитуда магнитных полей может достигать 2000-3000 Т, метод прямого разряда ограничен в настоящее время областью достижимых полей в 300-400 Т. Генерация СИМП и ССИМП сопровождается совокупностью сложных физических процессов, основные из которых: пластическая деформация (гидродинамическое течение материала), электрический взрыв поверхностного слоя, развитие неустойчивостей на границе поле-проводник. Разрушение материала проводника в процессе генерации ССИМП происходит в условиях, аналогичных возникающим при работе мощных импульсных установок на точечную нагрузку. Изучение закономерностей электрического взрыва позволяет не только выявить общие характеристики возникающего течения, но и оценить влияние продуктов взрыва на изоляционные промежутки таких установок. Определяющим при анализе возникающего течения является выбор модели проводимости материала и уравнения состояния материала. Анализ современного положения показывает недостаточность экспериментальных данных для создания адекватной модели проводимости и уравнений состояния, учитывающих нестационарность процесса формирования гидродинамических течений в условиях больших градиентов давления и температуры, имеющих место при генерации СИМП и ССИМП. Это делает актуальной разработку феноменологической модели, позволяющей сформулировать требования к источникам тока для питания магнитных систем для генерации магнитного поля (МП) с индукцией 300 Т и более.

Проводимые в настоящее время экспериментальные исследования по разрушению материалов в условиях импульсных ударных нагрузок демонстрируют многофакторность и многомасштабность процесса разрушения. Главным фактором, необходимым для анализа процесса разрушения материала, является знание параметров воздействующего импульса давления. Генерация импульсного магнитного поля, при котором не происходит разрушение материала проводника, сопровождается генерацией магнитного давления, параметры которого однозначно связаны с па-

раметрами токораспределения в магнитной системе. Магнитноимпульсный способ (МИС) основан на передаче импульса магнитного давления в образец, что позволяет проводить исследования разрушения материалов в однозначно определенных условиях нагружения. Современное состояние высоковольтной импульсной техники позволяет сформировать управляемые импульсы давления с амплитудой до 1 ГПа в микросекундном интервале длительностей. Эти возможности магнитноимпульсного способа делают актуальным его адаптацию к условиям тестирования материалов и проведения экспериментального изучения их поведения при импульсных воздействиях, создаваемых этим способом.

Диссертационная работа выполнена в рамках выполняемых по единому заказ-наряду Министерства образования РФ госбюджетных НИР № 1.17.92 «Тонкие технологии на основе электрического взрыва проводников и мощных электромагнитных ударных воздействий» (1993-1997 гг.) и № 1.4.98 «Накопители энергии нового поколения для систем мощной импульсной энергетики» (1998-2002 гг.), а также в соответствии с планом НИОКР по темам Российского фонда фундаментальных исследований (гранты РФФИ № 93-02-17419, № 99-02-18048, № 00-01-05020, № 01-01-00250, № 02-01-01035, № 03-01-39010, № 05-08-33371) и Министерства Образования РФ (гранты Е00-4.0-174 и Е02-4.0-90).

**Цели работы** сформулированы следующим образом.

1. Экспериментально обосновать целесообразность использования магнитноимпульсного способа для формирования ударных нагрузок и разработать методики тестирования динамических прочностных свойств материалов в микросекундном интервале длительности нагружения, создаваемые этим способом, выявляющие особенности динамического разрушения материалов.

2. Оценить предельные возможности метода прямого разряда емкостного накопителя по получению импульсов давления, как в управляемом режиме, так и в режиме взрыва скин-слоя.

Поставленные цели достигаются при решении следующих **задач**:

1. Разработать ГИТ и на симметричной схеме нагружения образцов из модельного материала продемонстрировать возможность использования магнитноимпульсного способа для определения пороговых разрушающих нагрузок различной длительности.

2. Разработать и изготовить опытный образец магнитноимпульсной установки на базе генератора импульсных токов малых энергий для генерации управляемых импульсов давления микросекундной длительности.

3. Экспериментально подтвердить применимость магнитноимпульсного способа для формирования импульсов давления с амплитудой до 1 ГПа.

4. Обосновать применимость структурно-временного подхода для описания экспериментов по разрушению материалов.

5. Разработать методики тестирования динамических свойств материалов на базе магнитноимпульсного способа нагружения и структурно-временного подхода к анализу результатов.

6. Провести тестирование различных материалов при импульсном нагружении, создаваемом магнитноимпульсным способом.

7. Провести анализ результатов численного моделирования процессов взаимодействия сверхсильного магнитного поля с материалом проводника.

8. На основе анализа экспериментальных данных по получению ССИМП методом прямого разряда выявить связь достижимых амплитуд магнитного поля с характеристиками материала.

9. Обосновать и разработать феноменологическую модель, позволяющую сформулировать требование к источнику питания и оценить параметры импульса давления, генерируемого при взрыве поверхностного слоя проводника в процессе генерации ССИМП.

10. Провести экспериментальное моделирование для демонстрации возможности расширения диапазона управляемости параметрами импульса давления за счет использования дополнительного внешнего магнитного поля.

По мнению автора, **новыми** являются следующие **результаты**:

Разработаны методики тестирования свойств материалов с использованием магнитноимпульсного способа создания управляемых ударных нагрузок в микросекундном интервале длительностей и структурно-временного подхода к анализу результатов.

По результатам испытаний в условиях импульсного нагружения определено структурное время разрушения материалов (ПММА, сферопластик, некоторые горные породы) и выявлены закономерности их разрушения.

Выявлена связь достижимых амплитуд ССИМП, генерируемых методом прямого разряда конденсаторной батареи, с энергией сублимации материала.

Показана применимость модели ударной волны с внешним энерговодом для описания процесса взаимодействия ССИМП с проводником.

Сформулированы условия выбора источников питания для генерации ССИМП методом прямого разряда.

Экспериментально показано, что расширение диапазона управляемых импульсов давления, создаваемых МИС, возможно при использовании дополнительного внешнего поля.

**На защиту выносятся следующие положения:**

1. Амплитуды достижимых полей при генерации методом прямого разряда определяются не только параметрами источника питания, но и энергией связи материала соленоида.
2. Выбор параметров источника энергии для генерации ССИМП может быть произведен на основе анализа модели ударной волны с внешним энерговодом.
3. Генераторы импульсных токов могут быть использованы для создания управляемых импульсов механического давления с целью тестирования свойств материалов.
4. Процесс разрушения материалов при импульсном воздействии хорошо описывается с использованием структурно-временного подхода, позволяющим определить структурное время разрушения материалов.
5. При импульсном нагружении процесс разрушения инвариантен к свойствам материала.

6. Использование внешнего магнитного поля позволяет существенно расширить диапазон управляемых ударных нагрузок, как в сторону увеличения амплитуды, так и в сторону уменьшения длительности воздействия.

**Научная и практическая ценность.**

1. Выявлены предельные возможности метода прямого разряда генерации ССИМП.
2. Модель ударной волны с внешним энерговодом объясняет выявленное ограничение в амплитудах достижимых магнитных полей мегагауссного диапазона и позволяет сформулировать требования к источнику тока для генерации магнитных полей.
3. Экспериментально обосновано использование генераторов импульсных токов для формирования управляемых импульсов давления с целью тестирования механических свойств материала при ударном нагружении.
4. Выявлены закономерности процесса разрушения материалов в условиях импульсного нагружения микросекундной длительности и показана целесообразность использования структурно-временного подхода для описания поведения материалов в этих условиях.
5. Развитие предложенного и экспериментально смоделированного модифицированного магнитноимпульсного способа создания управляемых ударных нагрузок позволит проводить исследование свойств материалов в существенно более широком диапазоне параметров импульсного воздействия.
6. Магнитноимпульсный способ создания управляемых нагрузок в микросекундном диапазоне длительностей, реализованный на базе малоиндуктивного генератора импульсных токов, и методики тестирования материалов используются в НПО Специальных Материалов при разработке новых броневых и защитных материалов, в НИИ математики и механики им. акад. В.И. Смирнова СПГУ при проведении исследований процессов разрушения материалов.
7. Полученные результаты используются в Центре физико-технических проблем Севера КНЦ РАН и Институте прикладной физики РАН при разработке электрофизического оборудования.

Практическое использование разработок (п.п. 6 и 7) подтверждается соответствующими актами, представленными в диссертации.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается корректностью постановки экспериментов и воспроизводимостью результатов, использованием физико-математического моделирования исследуемых процессов и корреляцией расчетных и экспериментальных данных, а также сравнением с результатами исследований других авторов, изложенных в печати.

**Апробация работы.** Представленные в работе результаты докладывались автором на:

IV-X Международных конференциях по мегагауссным магнитным полям 1989-2004; International Conference Shock Waves in Condensed Matter: Saint-Petersburg, 2004; 1-st international congress on radiation physics, high current electronics and modification of materials. Tomsk, Russia 2000; 12 IEEE International Pulsed Power Conference, Monterey, California USA, 1999; Международных конференциях «Забабахинские научные чтения» РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск, 1998 и 2001 г.; Международных конференциях «Харитоновские тематические научные чтения «Экстремальные состоя-

ния вещества. Детонация. Ударные волны», РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, 2002 и 2005 г.; 4<sup>th</sup> Int. Symposium Strength and Fracture of Materials and Structural Members under Impulse Loading (IMPULSE-2001), Kiev, Ukraine, May 22-24, 2001; Advanced problems in mechanics APM'2002, APM'2003, APM'2005: XXX и XXXI summer school, St. Petersburg.; VIII Всероссийском съезде по теоретической и прикладной механике. Пермь, 2001; XIX и XXI Международных конференциях «Математическое моделирование в механике сплошных сред. Методы граничных и конечных элементов»: 2001, 2005, СПб.; LX Междунар. семин. «Актуальн. проблемы прочности» Структура и свойства перспективных металлов и сплавов. В.Новгород: НГУ, 2002; Междунар. научн. конф. по механике «Третьи Поляховские чтения», 2003 г., СПб.; 1X Международной научной школе «Деформирование и разрушение материалов с дефектами, и динамические явления в горных породах и выработках», Симферополь, 1999; XXXV семинаре «Актуальные проблемы прочности» 15-18 сентября 1999, г. Псков; Intern. Conf. of Plasma Science, Madison, Wisconsin, USA, 5-8 June 1995; научно-технической конференции «Фундаментальные исследования в технических университетах», С-Петербург, 1998; Международных семинарах «Капица» 2001 г., 2003 и 2005 г., РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров.

ПУБЛИКАЦИИ. Результаты работы представлены в статьях (18), в трудах (40) и тезисах (30) Международных и Всероссийских конференций, а так же в авторских свидетельствах и патентах (4).

СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка цитируемой литературы, включающего 236 наименований, приложения. Общий объем работы 202 страниц, включая 51 рисунок, 7 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### ВВЕДЕНИЕ

На основе анализа современного состояния проблем генерации сильных и сверхсильных магнитных полей и экспериментального исследования процессов разрушения материалов в условиях импульсного нагружения обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследований, научная новизна и практическая значимость работы, приведены защищаемые положения.

### Глава 1. МАГНИТНОИМПУЛЬСНЫЙ СПОСОБ ФОРМИРОВАНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ УДАРНЫХ НАГРУЗОК. ОБОСНОВАНИЕ И ПРОБНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Главной задачей этой части работы являлось экспериментальное подтверждение возможности использования генераторов импульсных токов (ГИТ) в решении задач механики разрушения материалов. При протекании тока разряда ГИТ по магнитной системе с известным токораспределением в образце, находящемся в акустическом контакте с этой системой, формируется импульс сжатия, параметры которого определяются магнитным давлением.

Для проведения экспериментов по определению порога хрупкого разрушения в плоских образцах с макротрещинами разработаны магнитноимпульсные установки с максимальной рабочей частотой 250 кГц и 125 кГц, позволяющие генерировать в нагрузке импульсы давления с амплиту-

дой 250-400 МПа и 1000 МПа. Для управления формой тока использовались нелинейные сопротивления.

Схема нагружения образцов требовала индуктивной нагрузки в виде плоских шин с индуктивностью порядка 20 нГн, поэтому при разработке ГИТ особое внимание отводилось минимизации индуктивности составляющих элементов.

Разработан и экспериментально проверен в режимах коммутации тока мегаамперного диапазона микросекундной длительности многоканальный газовый коммутатор с собственной индуктивностью порядка 3 нГн. Использование этого коммутатора позволило при сравнительно небольшом энергозапасе батареи (например, ГИТ-125 состоит из 2 конденсаторов типа КМК-50-6) сформировать униполярный импульс тока амплитудой 600 кА с длительностью ~ 2-3 мкс.

Результаты экспериментов показали хорошую повторяемость, выявили пороговый характер разрушения и рост пороговых разрушающих нагрузок с уменьшением длительности воздействия. Анализ экспериментальных данных, выполненный на базе структурно-временного подхода, позволил определить структурное время разрушения модельного материала (полиметиметаакрилата - ПММА), составившее 32 мкс.

## Глава 2. ОПЫТНЫЙ ОБРАЗЕЦ МАГНИТНОИМПУЛЬСНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ШИРОКОМАСШТАБНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ НАГРУЖЕНИИ

Приведено описание магнитноимпульсной установки, специально разработанной и адаптированной к проведению экспериментов по изучению разрушения материалов в условиях программируемого импульсного воздействия. Основным элементом установки является ГИТ с запасаемой энергией 12 кДж при зарядном напряжении 50 кВ. В качестве накопительных элементов использованы серийные конденсаторы типа ИК-50/3 (4 шт.). Минимизация собственной индуктивности генератора обеспечена использованием двухмодульной схемы компоновки с элементами объемной ошиновки. Для управления параметрами импульса тока предусмотрена возможность установки

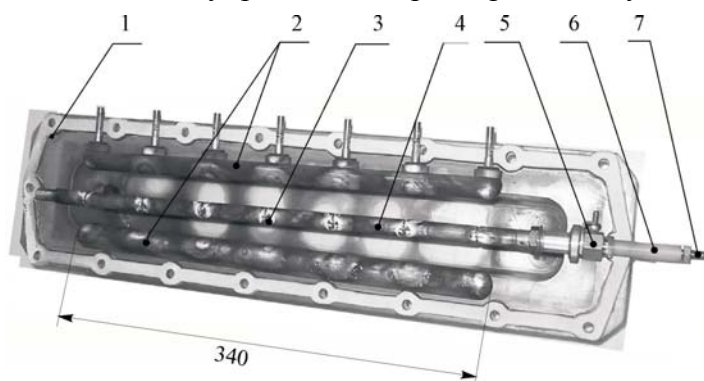


Рис. 1. Общий вид коммутатора со снятой крышкой и электродами после  $5 \cdot 10^3$  рабочих циклов.

блоков нелинейных сопротивлений.

В качестве коммутатора использован модернизированный многоканальный газовый коммутатор, прототип которого использовался в предварительных экспериментах, состоящий из двух блоков. В каждом блоке (рис. 1) обеспечиваются условия для формирования 7 токопроводящих

каналов. Эмпирическим путем установлена оптимальная зависимость давления азота в рабочей камере от рабочего напряжения. По результатам испытаний разрядника при рабочей напряженности  $E \sim 20$  кВ/см задержка срабатывания разрядника не превышает 0.1 мкс и уменьшается с увеличением рабочей напряженности. Проверка токораспределения показала, что разброс токов по ка-



налам не превышал 10-15%. Снижение  $E_{\text{раб}}$  до 10-12 кВ/см приводило не только к увеличению запаздывания до 0.3-0.4 мкс, но и к увеличению дисбаланса токораспределения по каналам до 40%.

Анализ экспериментальных данных определил величину дополнительно вносимого в разрядный контур сопротивления при коммутации тока 300-500 кА при рабочей напряженности 30 кВ/см в атмосфере азота при давлении 2 атм на уровне 0.021 Ом.

Профилактический осмотр разрядников произведен после коммутации примерно  $5 \cdot 10^3$  импульсов тока. Эрозионный износ проявляется в виде формирования зоны поверхностно-расплавленного металла, а ее конфигурация не оказывает влияния на стабильность рабочих характеристик разрядника.

Равномерность токораспределения обуславливается не только требованием малой индуктивности разрядника, но и необходимостью обеспечения равномерной токовой нагрузки в элементах блоков нелинейных сопротивлений, которые могут устанавливаться в разрядный контур каждого модуля для формирования униполярного импульса тока. Блок сопротивлений собран из вилитовых дисков диаметром 72 мм высотой 16 мм. Используются предварительно откалиброванные сопротивления из одной партии, имеющие вольтамперную характеристику со следующими параметрами:  $a_0 = 1100$  [В·см<sup>-1</sup>(А/см<sup>2</sup>)<sup>-α</sup>] и  $\alpha = 0.14$  [В·А<sup>-α</sup>·см<sup>2·α-1</sup>]. С целью снижения индуктивности блока использовано 4 параллельно включенных ветви по 2 таблетки в каждой. Проведенные испытания на макетной установке ГИТ-250 показали, что при плотностях тока порядка 2 кА/см<sup>2</sup> с длительностью импульса 3-10 мкс напряженность по боковой поверхности сопротивления не превышает 3.5 кВ/см. Параметры измеренного импульса тока близки к расчетным.

Проведенные испытания генератора показали, что в режиме короткого замыкания индуктивность системы составляет 18 нГн, амплитуда тока достигает величины 1.2 МА при периоде колебаний 3 мкс. При работе на реальную индуктивность в колебательном режиме разряда обеспечивается амплитуда до 0.9 МА с периодом осцилляций от 4 мкс. В режиме одиночного импульса генерируется импульс тока длительностью 1.6 мкс и амплитудой до 700 кА. В случае разряда через блок нелинейных сопротивлений при напряжении до 25-27 кВ в нагрузке формируется строго одиночный импульс тока. Равнонагруженность элементов генератора по току обеспечивает его нормальное функционирование не менее чем в  $5 \cdot 10^3$  разрядах.

Контрольные опыты по разрушению ПММА показали повторяемость результатов и подтвердили правомерность использования МИС для формирования управляемых импульсов давления.

### Глава 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИК И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ РАЗРУШАЮЩИХ НАГРУЗОК МИКРОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ В РАЗЛИЧНЫХ СХЕМАХ НАГРУЖЕНИЯ

При разработке методик и экспериментальном определении предельных разрушающих нагрузок микросекундной длительности в различных схемах нагружения в качестве модельных материалов выбраны имеющие различное структурное строение и физико-химические свойства полиметилметакрилат (ПММА), сферопластик и габбродиабаз.

С помощью лазерного интерферометра проведена проверка соответствия параметров импульса магнитного давления передаваемому в материал импульсу воздействия. Образцы имели размеры, исключающие возможность влияния его торцов на параметры смещения свободной поверхности в зоне регистрации. Плоская волна сжатия формировалась при протекании тока разряда ГИТ через плоские шины, имеющие акустический контакт с образцом. На свободной поверхности образца нанесено зеркало путем вакуумного напыления алюминия. По измеренному значению скорости смещения свободной поверхности образца в условиях, соответствующих применимости акустического приближения, восстановленное значение импульса давления, переданного в образец, с погрешностью 5-7% соответствует параметрам импульса магнитного давления (рис. 2).

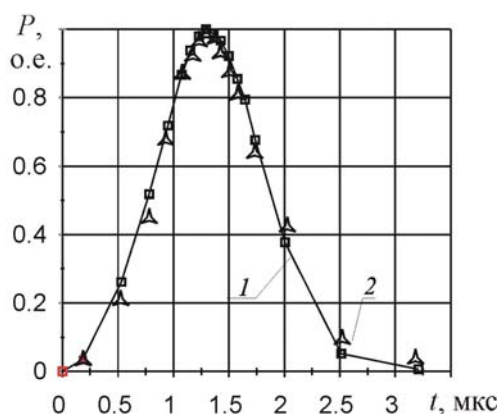


Рис. 2. Импульс магнитного давления 1 и импульс давления, восстановленный из измерений скорости свободной границы 2.

Лазерная интерферометрия используется в эксперименте и для определения скорости распространения в материале продольной  $c_1$  и стержневой  $c_p$  волн.

Магнитноимпульсный способ позволяет реализовать ударно-волновой режим нагружения при исследовании динамической трещиностойкости и прочности материалов.

*Динамическая трещиностойкость.* Эксперименты проводились по схеме нагружения, приведенной на рис. 3, с использованием образцов толщиной 10-16 мм, конструкция которых приведена на этом же рисунке. В паз образца устанавливались плоские медные шины толщиной 0.1-0.2 мм и обеспечивался их акустический контакт с поверхностью паза. При разряде ГИТ на берега паза действует импульс давления, соответствующий магнитному давлению.

паза действует импульс давления, соответствующий магнитному давлению.

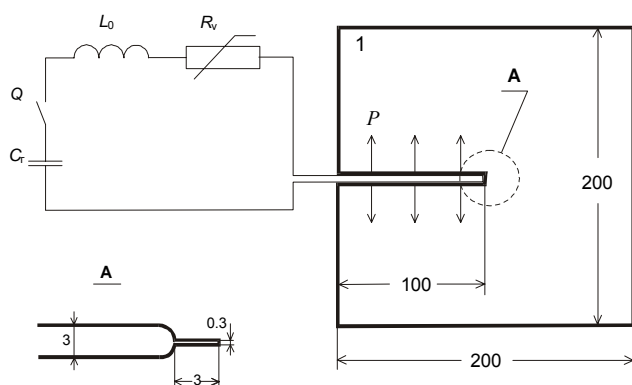


Рис. 3. Принципиальная схема установки и схема нагружения образца (№ 1).

$C$ ,  $L_0$  - накопительная емкость и собственная индуктивность генератора импульсных токов;  $Q$  - высоковольтный коммутатор;  $R_v$  - нелинейное сопротивление; 1 - исследуемый образец.

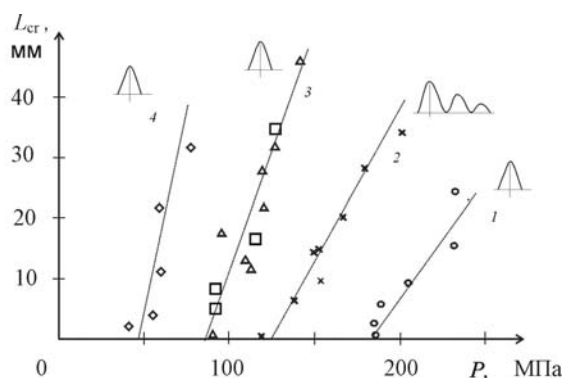


Рис. 4. Экспериментальные результаты по исследованию порога хрупкого разрушения оргстеклянных образцов толщиной 10 мм. Время нарастания до максимума 1, 2 – 1.0 мкс; 3 – 2.0 мкс; 4- 4.3 мкс. □ – с использованием установки «ξ-2».

Испытания материалов, проведенные по данной схеме нагружения, демонстрируют пороговый характер разрушения и существенный рост амплитуды порогового разрушающего импульса с уменьшением его длительности. Типичные зависимости, демонстрирующие этот эффект, приведены на рис. 4. Величина пороговой нагрузки определяется путем экстраполяции зависимости длины трещины от амплитуды приложенной нагрузки  $L_{cr}(P)$  в область  $L_{cr} \rightarrow 0$ .

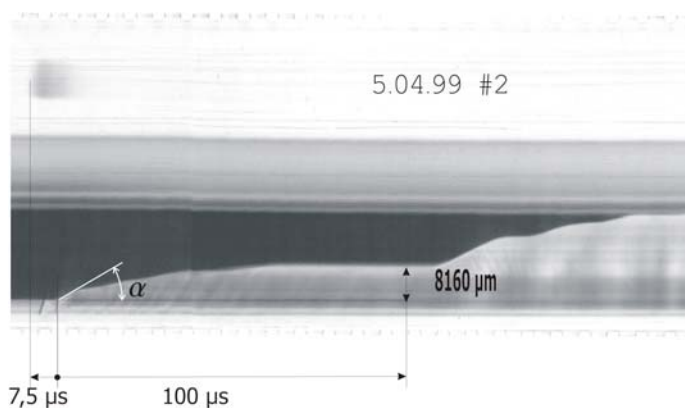


Рис. 5. Типичная СФР-грамма движения развивающейся трещины.

В этой схеме нагружения (№ 1) с помощью скоростного фоторегистратора СФР-2, собранного в режиме фотохронографа, проведена визуализация процесса разрушения ПММА при импульсном воздействии длительностью 5.6 мкс. Типичная СФР-грамма приведена на рис. 5.

*Динамическая прочность.* Волновой режим нагружения бездефектных образцов реализован при испытаниях образцов в виде стержней в откольной схеме нагружения (№ 2), представленной на рис. 6. Образец с полированными торцами устанавливался на плоские медные шины и при разряде ГИТ в нем формировался импульс сжатия, который после прохождения по образцу и отражения от свободной поверхности, трансформировался в импульс растяжения, разрушающий образец.

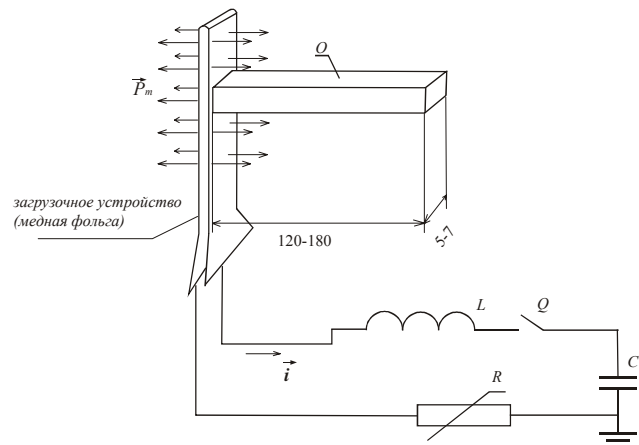


Рис. 6. Генератор импульсных токов и схема нагружения.  $O$  – исследуемый образец,  $L$  – индуктивность,  $C$  – емкость,  $R$  – нелинейное сопротивление.

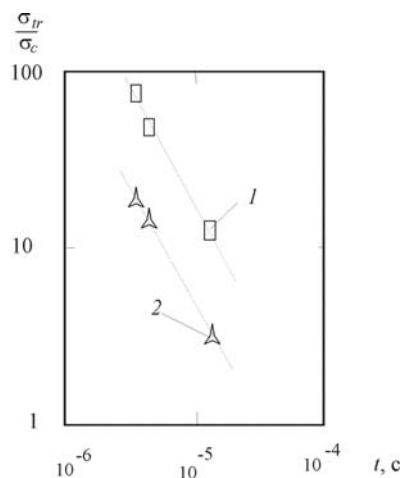


Рис. 7. Зависимость разрушающего напряжения от длительности импульса.  $\sigma_{tr}, \sigma_c$  – динамическая и статическая прочности. 1-габбродиабаз, 2- ПММА.

Как и при испытаниях образцов с макродефектами типа трещин, в этом случае отмечается существенный рост пороговых разрушающих нагрузок с уменьшением длительности разрушающего импульса (рис. 7).

*Квазистатика.* В практике тестирования материалов представляет интерес рассмотреть ситуацию, когда волновой режим не реализуется, но имеет место высокая скорость нагружения. Такая ситуация имеет место при импульсном нагружении малых образцов, размеры которых суще-

ственно меньше пространственной длины импульса. Очевидно, что волновой характер напряженно-деформированного состояния не может формироваться в тех случаях, когда размеры образцов существенно меньше длины волны импульса нагрузки, т.е. если выполняется условие:

$$c_1 \cdot T \gg D_u, \quad (1)$$

где  $c_1$  - скорость распространения волны в материале,  $T$  - длительность импульса давления,

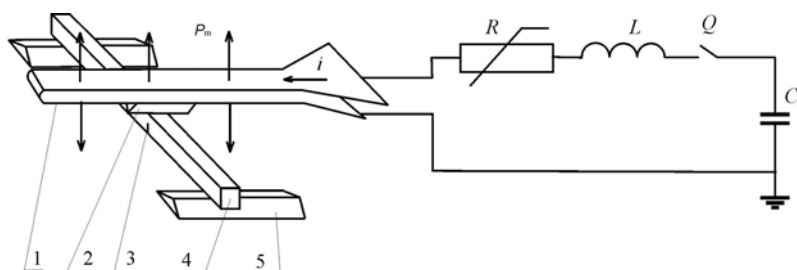


Рис. 8. Эквивалентная электрическая схема магнитноимпульсной установки и схема нагружения (№ 3).  $P_m$  - магнитное давление,  $i$  - ток. 1 – нагружающее устройство (медные шины), 2 – боек, 3 – испытуемый образец, 4 – предварительный разрез; 5 - неподвижные опоры.

$D_u$  - характерный размер образца. Использование в экспериментах образцов, удовлетворяющих условию (1), позволяет производить испытания в условиях быстрого роста нагрузки без учета волнового характера процесса нагружения. При этом напряженно-деформи-

рованное состояние определяется из решения соответствующих статических задач.

Схема эксперимента (№ 3) с малыми образцами приведена на рис. 8. Образец сечением  $5 \times 6 \text{ мм}^2$  длиной 24 мм с разрезом глубиной  $\sim 2$  мм шириной 0.2 мм в центральной части образца устанавливается на жесткие опоры. Нагрузка на образец передается бойком, имеющим акустический контакт с токоведущими шинами. Магнитное давление, создаваемое при протекании тока, трансформируется в усилие, передаваемое на боек, пропорциональное площади контактной поверхности бойка и магнитному давлению. Это усилие передается бойком на образец.

По описанной схеме определены пороговые разрушающие нагрузки для образцов из габбродиабазы и ПММА, размеры которых удовлетворяют условию (1).

#### Глава 4. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО РАЗРУШЕНИЮ МОДЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ.

Анализ экспериментальных данных по разрушению материалов в различных схемах нагружения проведен на основе решения соответствующих задач с использованием структурно-временного подхода к процессу разрушения. Особенностью этого подхода является учет физической дискретности процесса разрушения и введение пространственно-временной ячейки разрушения. Параметры ячейки определяются структурным (инкубационным) временем разрушения и соответствующим для данного масштабного уровня разрушения предельного условия разрыва сплошной среды.

Структурно-временной критерий, основанный на системе фиксированных определяющих параметров, предложенный академиком РАН Морозовым Н.Ф., Петровым Ю.В. и Уткиным А.А., для общего случая имеет следующий вид:

$$\frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t \frac{1}{d} \int_0^d \sigma(r, \theta, t') dr dt' \leq \sigma_c, \quad (2)$$

здесь  $d = 2K_{Ic}^2 / (\pi\sigma_c^2)$  и  $\tau$ - структурный размер и структурное время разрушения,  $(r, \theta)$  - полярные координаты;  $\sigma_c$ ,  $K_{Ic}$  - статические прочность и трещиностойкость материала,  $\sigma(r, \theta, t)$ - растягивающее напряжение у вершины трещины ( $r=0$ ). Критерий (2) позволяет осуществить обобщение принципов линейной механики разрушения на динамику. В соответствии с данным подходом  $\sigma_c, K_{Ic}$  и  $\tau$  образуют систему определяющих параметров, описывающих прочностные свойства материала. Критерий позволяет с единой точки зрения исследовать динамическое разрушение как "бездефектных" сред, так и сред с макродефектами типа трещин.

*Динамическая трещиностойкость.* Реализованная в эксперименте по разрушению образцов с макродефектами типа трещин схема нагружения до момента прихода отраженных от границ образца волн соответствуют следующей задаче. Бесконечная упругая плоскость, содержащая полу-бесконечный разрез,  $\mathbf{R}^2 \setminus \{(x, y): x \leq 0, y=0\}$ , подвергается ударному воздействию, приложенному к его берегам  $\sigma_y = -p(t)$ ,  $\sigma_{xy} = 0$ , при начальном условии  $\mathbf{U}|_{t \leq 0} = 0$  и условии, обеспечивающими однозначность решения задачи –  $\forall t > 0: U = const + O(r^\beta)$ ,  $r \rightarrow 0$ ,  $\beta > 0$ . В экспериментах было реализовано импульсное нагружение  $P(t) = P_m \cdot Q(t)$  в виде униполярных импульсов.

Решение такой задачи реально отражает реализуемую в опытах ситуацию до момента прихода в вершину трещины волн, отраженных от границ модели. Для использованных при проведении эксперимента образцов из ПММА это время  $\sim 100$  мкс. Значение коэффициента интенсивности напряжений для такой задачи имеет вид:

$$K_I(t) = \int_0^t \frac{\alpha \cdot P(s)}{\sqrt{t-s}} ds, \quad \text{где } \alpha = 2 \cdot c_2 \sqrt{c_1^2 - c_2^2} / (c_1 \cdot \sqrt{\pi c_1}). \quad (3)$$

Структурно-временной критерий для образцов с макродефектами типа трещин может быть преобразован к виду:

$$\int_{t-\tau}^t K_I(s) ds \leq K_{Ic} \tau, \quad (4)$$

где  $K_I(t)$  – текущий коэффициент интенсивности. Из (4) следует, что минимальная разрушающая (пороговая) амплитуда импульса определяется по формуле:

$$P = \tau K_{Ic} / \varphi(c_1, c_2) \max_{t-\tau}^t \int f(s) ds, \quad (5)$$

где  $f(t) = \int_0^t Q(s) f_0(t-s) ds$ ,  $f_0(t) = 1/2 \cdot t^{-1/2}$  находится из решения динамической начально-краевой задачи.

Значения пороговых разрушающих нагрузок определяются из экспериментальных зависимостей. С использованием соотношения (5) может быть определено структурное время разрушения материала  $\tau|_{K_{1c}}$ . Для ПММА это значение составило 32 мкс. Для габбродиабазы структурное время разрушения, определенное по (5), дает значение  $\tau|_{K_{1c}}=130$  мкс. Это время существенно больше времени пробега волной нагрузки двойного расстояния от берегов трещины до границ образца  $2 \cdot l/c_1$ . Следовательно, к моменту разрушения напряженное состояние уже не соответствует условиям задачи, в отличие от ПММА, и параметр  $\tau$ , определенный по (5) для габбродиабазы не соответствует условиям эксперимента.

*Динамическая прочность.* Откольное нагружение позволяет осуществить импульсное растягивающее напряжение. В такой ситуации ответственным за разрушение, кроме характеристик материала, являются амплитуда, форма и длительность импульса. Напряженное состояние в этих экспериментах наиболее простое для анализа, т.к. полностью определяется волной растяжения. Для разрушения образцов в этих условиях структурно-временной критерий преобразуется к виду:

$$\frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t \sigma(s, x) ds \leq \sigma_c, \quad (6)$$

где  $\sigma(s, x)$  – напряжение в точке с координатой  $x$  в момент времени. МИС формирует импульс нагрузки, параметры которого точно известны, что позволяет, при известном пороговом значении амплитуды импульса, определить структурное время разрушения материала  $\tau|_{\sigma}$ .

*Квазистатика.* В трехточечной схеме нагружения нагрузка передавалась через ударник (стальную призму), находящийся в непосредственном контакте с исследуемым образцом и токоведущими шинами. К ударнику прикладывалось импульсное воздействие  $F(t) = P(t) \cdot s$  – сила, действующая на ударник,  $P = P_m (\sin(\omega t))^2$  – давление токоведущих шин, действующее на площадь основания ударника  $s$ , длительностью  $t_1$ . В линейно-упругом приближении длительность и амплитуда импульса силы, действующей на образец с учетом инерционных свойств системы, могут быть определены следующими соотношениями:

$$t_2 = \frac{\pi}{\nu} + \frac{t_1}{2} \text{ и } G_{\max} = \frac{A}{1 - (\nu/\omega)^2} \sin \frac{\nu t_1}{2}, \quad (7)$$

где  $\nu = \sqrt{k/m}$  – собственная частота колебаний системы,  $m$  – масса ударника,  $k$  – жесткость балки. Инерционные свойства системы существенно влияют на параметры импульса нагрузки, действующей на образец. Это проявляется в снижении амплитуды и увеличении длительности импульса. Так, импульс длительностью 12.7 мкс трансформируется в импульс длительностью 217 мкс.

Так как в этом случае реализуется режим квазистатической стабилизации поля напряжений в образце, то коэффициент интенсивности пропорционален действующей на образец нагрузке и может быть определен следующим образом:

Таблица 1. Параметры модельных материалов.

	Величина	Сферо-пластик	ПММА	Габбро
1	$\sigma_c$ , МПа	$12.4 \pm 0.9$	$72 \pm 5.4$	$17.54 \pm 1.1$
2	$K_{Ic}$ , МПа $\cdot\sqrt{м}$	$0.52 \pm 0.03$	$1.1 \pm 0.1$	$2.4 \pm 0.3$
3	$\tau _{K_{Ic}}$ , мкс	$11 \pm 0.8$	$32 \pm 5$	$130 \pm 5$
4	$\tau _{\sigma}$ , мкс	-	$34 \pm 5$	$77 \pm 5$
5	$\tau _{3p}$ , мкс	-	$32 \pm 5$	$72 \pm 5$
6	$c_1$ , м/с	$2196 \pm 40$	$2350 \pm 54$	$5630 \pm 76$
7	$c_p$ , м/с	-	$2130 \pm 50$	$5000 \pm 50$
8	$\rho_0$ -плотность, г/м <sup>3</sup>	$0.79 \pm 0.04$	$1.14 \pm 0.05$	$2.89 \pm 0.2$

$$K_1(t) = \frac{K_{Ic}}{G_c} \cdot G(t), \quad (8)$$

где  $G_c$  – усилие, разрушающее образец при статическом нагружении. При известном виде  $G(t)$  структурное время разрушения  $\tau|_{3p}$  определяется из соотношений (4), (8).

В таблице 1 приведены некоторые физико-механические характеристики исследованных материалов и значения струк-

турного времени разрушения, определенные по экспериментальным данным. Эксперименты по динамическому разрушению материалов проводились в СПбГПУ на кафедре ИЭ и ТВН с использованием установки ГИТ-50/250 и в ЦКП «Динамика» СПбГУ на установке « $\xi$ -2».

*Задержка разрушения.* Обработка СФР-грамм позволила выявить экспериментальную зависимость времени старта трещины от амплитуды приложенной нагрузки, описываемую в рамках структурно-временного подхода.

На рис. 9 представлены экспериментальные данные и расчетная кривая зависимости амплитуды приложенного импульса и времени начала разрушения. Пунктирная линия  $t \approx 1.7$  мкс соответствует времени достижения коэффициентом

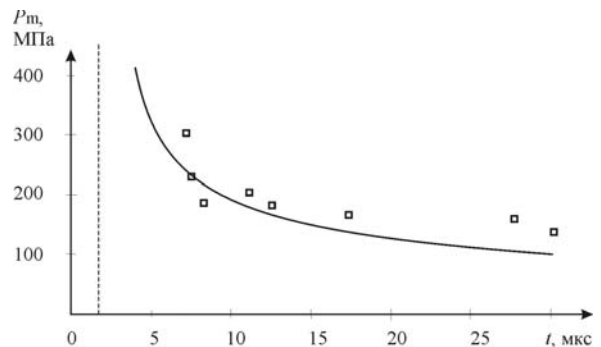


Рис. 9. Зависимость амплитуды приложенного импульса от времени до начала разрушения при нагружении импульсом длительностью 5.6 мкс. Пороговая амплитуда  $P_m = 94.7$  МПа

интенсивности напряжений максимального значения. Время на графике отсчитывается от момента приложения нагрузки.

Движение трещины начинается по истечении некоторого времени, после того как локальное силовое поле в вершине трещины – коэффициент интенсивности достигает максимума. Такое явление называется задержкой разрушения. На рис. 9 задержка разрушения представляет собой расстояние от расчетной кривой или экспериментальной точки до пунктирной линии.

*Особенности развития трещины.* Из данных по скоростной фоторегистрации разрушения образцов из ПММА определена зависимость скорости роста трещины в момент ее старгивания при импульсном воздействии в симметричной схеме нагружения. Стартовая скорость определялась путем

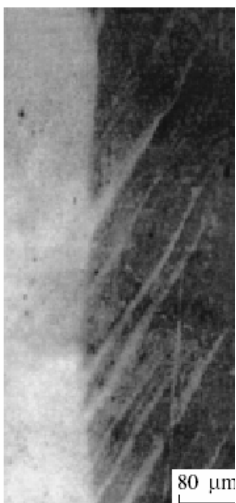


Рис. 10. Развившиеся в зоне скола мезотрещины.

измерения угла наклона траектории движения в момент старта (см. рис. 5) и вычислялась по формуле  $V_s = k \cdot tg\alpha$ , где  $k$  - коэффициент пропорциональности, определяемый масштабом записи процесса на फिल्मовом пути СФР. При длительности импульса 5.6 мкс зависимость стартовой скорости от превышения нагрузкой  $P$  порогового значения  $P_0 = 94.7 \text{ МПа}$  может быть аппроксимирована зависимостью  $V_s = 2.6 \cdot (P - P_0) \cdot 10^{-6} \text{ м/с}$ . По мере распространения трещины из вершины надреза характер разрушения меняется - скол, квазискол, чашечный излом. При дальнейшем распространении трещины эти основные виды изломов чередуются. Корреляция между скоростью продвижения трещины и характером поверхности разрушения отсутствует. От основной трещины на участках скола и квазискола ответвляются мезотрещины (рис. 10), наличие которых при статическом разрушении не наблюдается. Угол наклона этих мезотрещин меняется немонотонно по мере удаления от вершины надреза.

*Поверхностная энергия* разрушения является важной характеристикой материала и определяется изменением полной энергии системы  $\mathcal{E}$  при росте трещины. Для пластинки единичной толщины условие роста трещины записывается в виде:  $-\partial\mathcal{E}/\partial L = 2\gamma$ . (9)

Величину  $2\gamma$  следует трактовать, как полную работу (в том числе пластическую) в зоне разрушения. Изучение этой характеристики распадается на выяснение ее физической сущности (различной для различных классов материалов) и ее экспериментальное определение.

Для разрушения у вершины трещины, нагружаемой по моде I, критерий (9) оказывается эквивалентным критерию критического коэффициента интенсивности напряжений:  $K_I = K_{Ic}$  и для линейно-упругого тела константа Гриффитса оказывается равной:

$$\gamma = K_{Ic}^2 / 2E. \quad (10)$$

Определение поверхностной энергии разрушения возможно при выполнении следующих условий: контроль за введенной в образец энергией и формирование образца как энергетически замкнутой системы до момента начала процесса разрушения. Эти условия выполняются в описанных выше экспериментах по определению пороговых разрушающих нагрузок для образцов с макродефектами типа трещин.

Зависимости длины проросшей трещины от амплитуды нагрузки при испытаниях на динамическую трещиностойкость хорошо описываются зависимостью  $\Delta L = k(A - A_0)$ ,  $A > A_0$ . Величина  $A_0$  имеет смысл пороговой амплитуды, при превышении которой начинался рост трещины. При нагружении образцов импульсами с длительностью меньше инкубационного времени разрушения вся энергия внешнего воздействия переходит в упругую и кинетическую энергию материала, и процесс продвижения трещины определяется в дальнейшем величиной этой внутренней энергии. В силу равенства нулю потенциала внешних сил на момент разрушения у вершины трещины, можно считать, что функция  $\mathcal{E}$  в соотношении (10) совпадает с внутренней энергией образца.

Решение задачи о распространении плоской волны в полупространстве позволяет определить энергию, переданную образцу (на единицу площади поверхности):



$$\varepsilon = \int_0^T P(t) dU(0,t) \Rightarrow \varepsilon = \frac{1}{c\rho} \int_0^T P^2(t) dt \Rightarrow \varepsilon = \frac{3DHA^2T}{8c\rho}, \quad (12)$$

где  $U$  - координата и смещение в продольном направлении,  $c$  - скорость продольной волны,  $t$  - время,  $\rho$  - плотность,  $D$  - длина выреза,  $H$  - толщина пластины.

Пороговая разрушающая нагрузка  $A_0$  определяет значение энергии  $\varepsilon_0$ , которую образец может принять без разрушения. В предположении, что избыток энергии полностью диссипируется в зоне разрушения и что площадь образующейся поверхности равна  $dS=HdL$ , энергоёмкость разрушения при старте трещины определяется из следующего соотношения:

$$\left. \frac{d\varepsilon}{dS} \right|_{\Delta L=0} = \frac{3TA_0D}{4kc\rho}. \quad (13)$$

При расчете энергоёмкости разрушения следует учитывать не всю длину выреза, а только эффективную зону  $D^*=ct^*$ , где  $t^*$  - время до старта трещины. С учетом второго берега выреза изменение внутренней энергии в момент старта трещины определяется выражением:

$$\frac{3TA_0t^*}{2k\rho} = 2\gamma_d. \quad (14)$$

Величина  $\gamma_d$  является аналогом величины  $\gamma$  в формуле (10). Для исследуемых материалов значение  $\gamma_d$  более существенно превосходит соответствующее значение, определенное на основе квазистатических испытаний, см. рис. 11. Анализ результатов численного 3-d моделирования, соответствующего условиям описанных выше экспериментов, показал, что при длительности импульса воздействия существенно меньшим структурного времени разрушения, определенное из экспериментов значение поверхностной энергии отличается от расчетного не более чем на 10%.

Для демонстрации возможностей описанных выше методик исследованы процессы разрушения некоторых горных пород в условиях импульсного нагружения. Эксперименты проводились на образцах, изготовленных из одной партии материала. Размеры образцов определялись технологическими особенностями поставляемого материала и возможностью его обработки. Ограниченные размеры исходных блоков некоторых материалов не позволили изготовить образцы, размеры которых были бы достаточны для определения структурного времени разрушения в схеме нагружения в образцах с макродефектами типа трещин. Статические параметры определены по стандартным методикам.

Для демонстрации возможностей описанных выше методик исследованы процессы разрушения некоторых горных пород в условиях импульсного нагружения. Эксперименты проводились на образцах, изготовленных из одной партии материала. Размеры образцов определялись технологическими особенностями поставляемого материала и возможностью его обработки. Ограниченные размеры исходных блоков некоторых материалов не позволили изготовить образцы, размеры которых были бы достаточны для определения структурного времени разрушения в схеме нагружения в образцах с макродефектами типа трещин. Статические параметры определены по стандартным методикам.

*Общие закономерности разрушения.* Исследование горных пород позволило существенно расширить спектр материалов, испытанных с помощью разработанных методик. Следует отме-

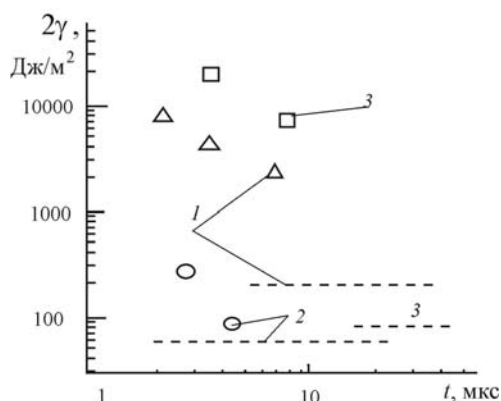


Рис. 11. Поверхностная энергии разрушения при импульсном нагружении в зависимости от длительности импульса нагружения. 1-ПММА; 2-сферопластик; 3-габбродиабаз.

титель, что во всех испытаниях был реализован ударно-волновой режим нагружения, что позволяет с единой точки зрения провести анализ полученных результатов.

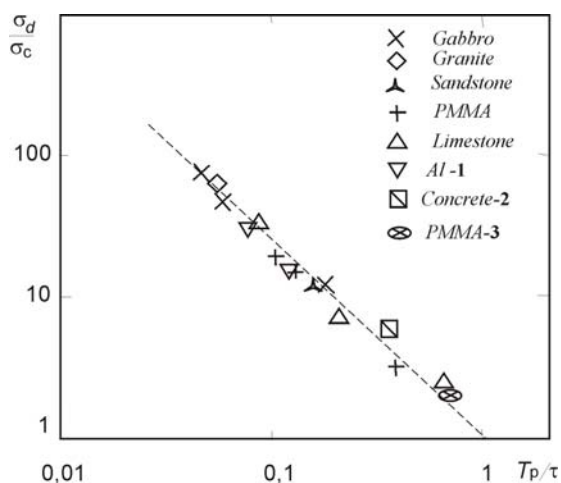


Рис. 12. Зависимость разрушающих пороговых нагрузок в откольной схеме нагружения от относительной длительности импульса. 1, 2, 3 – литературные данные.

характер разрушения и линейность зависимости длины проросшей трещины от амплитуды нагрузки. Типичный характер развития процесса разрушения позволяет и для горных пород применить

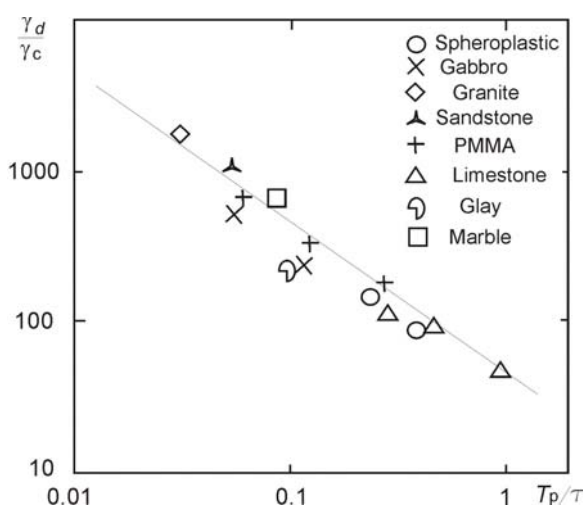


Рис. 13. Зависимость поверхностной энергии разрушения от относительной длительности импульса.

Эксперименты, проведенные на различных материалах, демонстрируют пороговый характер разрушения и увеличение разрушающей амплитуды  $\sigma_d$  с уменьшением длительности импульса нагрузки  $T_p$  при разрушении, как бездефектных образцов, так и образцов с макродефектами типа трещин. Экспериментальные данные, представленные на рис. 12, хорошо описываются зависимостью:

$$\sigma_d = \sigma_c \cdot \left( \frac{T_p}{\tau} \right)^{-\alpha}, \quad \alpha \approx \sqrt{2}. \quad (15)$$

При испытаниях образцов с макродефектами типа трещин по схеме нагружения № 1 для всех исследованных материалов имеет место пороговый

процедуру определения структурного времени и поверхностной энергии разрушения, результаты которой приведены на рис. 15 и хорошо описываются зависимостью:

$$\gamma_d = \gamma_0 \cdot A \cdot \left( \frac{\tau}{T_p} \right), \quad A \approx 50. \quad (16)$$

Приведенные на рис. 12 и 13 зависимости критических параметров свидетельствуют об общем характере развития процесса разрушения и его инвариантности в системе выбранных определяющих параметров к характеристикам материала.

Анализ полученных экспериментальных данных по разрушению материалов показывает совпадение с точностью ~10% значений структурного времени разрушения, определенного из опытов с использованием различных схем нагружения ( $\tau|_{K_{1c}} \approx \tau|_{\sigma} \approx \tau|_{3p}$  - ПММА,  $\tau|_{\sigma} \approx \tau|_{3p}$  - габбродиабаз,  $\tau|_{K_{1c}} \approx \tau|_{\sigma}$  - известняк). Это позволяет использовать для определения структурного времени разрушения наиболее удобные для испытаний схемы нагружения и обосновывает применение структурно-временного подхода для описания процесса разрушения в различных ситуациях динамического нагружения.

## Глава 5. О ПРЕДЕЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЯХ ГЕНЕРАЦИИ СВЕРХСИЛЬНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Выполнен анализ экспериментальных данных по генерации сверхсильных импульсных магнитных полей (ССИМП) и особенностей течения проводящей среды в таких полях по результатам численного моделирования с точки зрения выявления предельных возможностей методов.

Наиболее удобным и простым, с точки зрения получения сверхсильных импульсных магнитных полей, является прямой разряд конденсаторной батареи на одновитковый соленоид.

Анализ экспериментальных результатов (типичная осциллограмма приведена на рис. 14), полученных различными авторами позволяет выделить некоторые общие особенности процесса получения сверхсильных импульсных магнитных полей, а именно:

- \* амплитуды индукции почти во всех экспериментах достигается на фронте импульса тока;
- \* не удается воспроизводимо получать магнитные поля с амплитудой индукции более 360 Т;

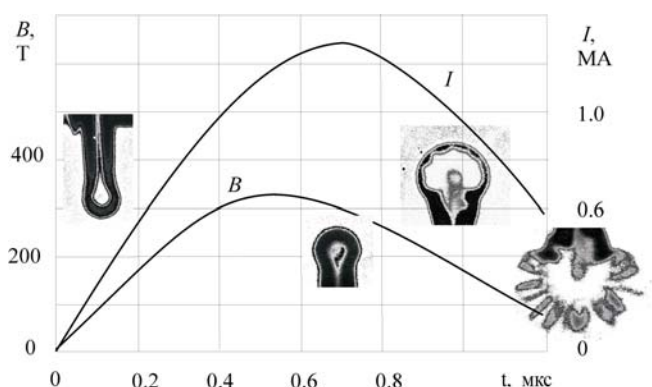


Рис. 14. Типичная осциллограмма и эволюция соленоида в процессе генерации ССИМП.

- \* ни в одном эксперименте не наблюдается скачкообразного увеличения индукции на фронте импульса, свидетельствующего о пробое металлической плазмы, образываемой на внутренней поверхности соленоида вследствие электрического взрыва последней;

- \* наблюдается некоторая корреляция между амплитудой получаемых полей и мощностью источника.

На амплитуду индукции достижимых магнитных полей оказывают влияние как начальный геометрический фактор соленоида  $g = B/I$ , где  $B$ ,  $I$  - соответственно индукция магнитного поля в центре и ток в соленоиде, так и параметры источника. Изменение геометрического фактора в процессе генерации ССИМП происходит в результате смещения эффективной границы поле-проводник вследствие нелинейной диффузии тока и формирования гидродинамического течения проводящей среды.

При генерации ССИМП на внутреннюю поверхность одновиткового соленоида направлен поток электромагнитной энергии, характеризуемый напряженностями электрического  $E$  и магнитного  $H$  полей. Так как почти во всех опытах по генерации ССИМП амплитуда магнитного поля достигается на фронте импульса тока, можно допустить, что изменение напряжения, приложенного к соленоиду, к этому моменту незначительно. С учетом уменьшения ширины соленоида  $b$  за счет диффузии тока с торцов поток электромагнитной энергии в момент максимума индукции может быть определен из соотношения:

$$E_m H_m = L_c \cdot \frac{1}{l} \cdot \left. \frac{di}{dt} \right|_{t=0} \cdot \frac{I_{Bm}}{b - \Delta_h}, \quad (17)$$

где  $L_c$  - индуктивность соленоида,  $di/dt|_{t=0}$  - скорость нарастания тока в начальный момент разряда,  $l$  - длина соленоида ( $l = 2\pi \cdot R_1 - h$ ,  $R_1$  - внутренний радиус соленоида,  $h$  - размер изолирующей

щели),  $I_{Bm}$  - ток в момент максимума индукции,  $\Delta_h \approx \frac{B}{B_c} \cdot \sqrt{\frac{\tau_r}{\pi \cdot \sigma \cdot \mu}}$  - глубина проникновения поля в проводник,  $\sigma$  и  $\mu$  проводимость и магнитная проницаемость материала,  $\tau_r$  - характерное время процесса,  $B_c$  - характерная для каждого материала величина (для меди  $B_c=40$  Т).

Величина  $\Pi = E_m \cdot H_m$  определяет поток мощности, подведенной к внутренней поверхности соленоида энергии в момент максимума индукции магнитного поля.

В рамках выбранных допущений может быть оценена для каждого эксперимента плотность тепловой энергии, выделившейся в скин-слое соленоида к моменту  $t_m$  максимума индукции:

$$w_j = \frac{\int_0^{t_m} \rho \cdot j^2 \cdot dt}{(2\pi \cdot R_1 - h) \cdot \Delta_h \cdot b}, \quad (18)$$

где  $j$  - плотность тока,  $\rho = 1/\sigma$ .

На рис. 15 приведены зависимости максимальной плотности магнитной энергии  $w_m = \frac{B_m^2}{2 \cdot \mu_0}$  и плотности тепловой энергии  $w_j$ , определенной с использованием аппроксимации зависимости удельного сопротивления в полях мегагауссного диапазона, предложенной А.Р. Вруант, в зависимости от потока мощности  $\Pi$ . При достаточно хорошем соответствии этих зависимостей наблюдается тенденция к ограничению достигаемых в экспериментах плотностей

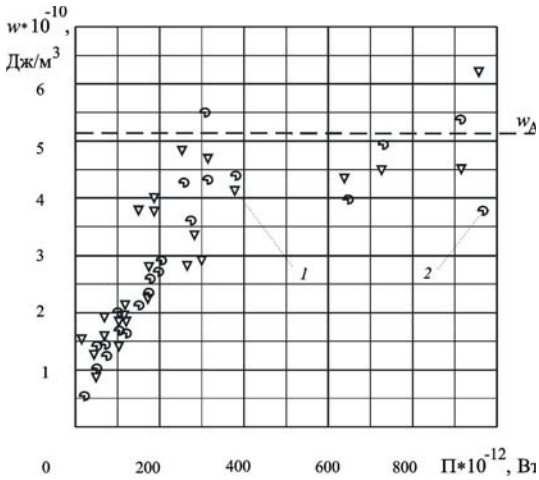


Рис. 15. Экспериментальные данные достигнутых плотностей энергии  $w$  в полях мегагауссного диапазона в зависимости от подведенного потока мощности. 1 - плотность магнитной энергии  $w_m$ , 2 - плотность тепловой энергии  $w_j$ .

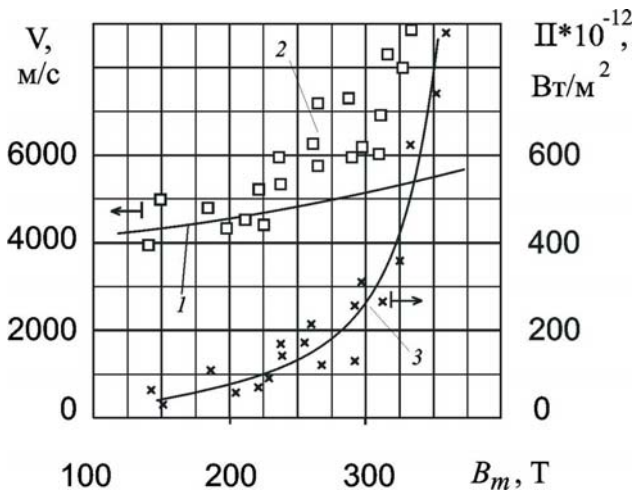


Рис. 16. Экспериментальные данные скорости фронта поглощения энергии  $V$  и подведенного потока мощности  $\Pi$  в медных соленоидах.

1 - скорость фронта ударной волны в меди, 2 - скорость фронта поглощения энергии, 3 - подведенный поток мощности.

энергии уровнем  $5 - 5.5 \cdot 10^{10}$  Дж/м<sup>3</sup>. Эта плотность энергии близка к энергии связи материала  $w_A$  и соответствует амплитудам магнитного поля 360-430 Т.

При допущении, что в материале может выделиться энергия, плотность которой  $w$  не превышает энергии связи атомов в материале, отношение  $E \cdot H/w$  может быть интерпретировано как

скорость фронта поглощения энергии. Из рис. 16 видно, что эта скорость несколько превышает скорость фронта ударной волны (УВ) в меди, причем с увеличением амплитуды достигаемого магнитного поля величина превышения увеличивается. В поле 300 Т эта скорость достигает величины 7000 м/с, что равно скорости УВ при давлении, соответствующем магнитному полю порядка 500 Т. Связь подведенного потока мощности с достижимыми амплитудами магнитного поля может быть представлена выражением:

$$P(B_m) = 28.7 \cdot 10^{12} \cdot \exp\left(1.65 \frac{w_m}{w_A}\right). \quad (19)$$

Зависимость  $P = f(B_m)$  показывает, что получение полей с амплитудой индукции 400 Т требует использования ГИТ, обеспечивающих подвод мощности к нагрузке порядка  $10^{15}$  Вт/м<sup>2</sup>. Для получения МП с амплитудой индукции 400 Т в соленоиде с индуктивностью 5 нГн и геометрическим фактором 70 Т/МА ( $b=10$  мм и  $R_1=5$  мм) требуется ГИТ, обеспечивающий ток 5.5 МА и поддерживающий на соленоиде напряжение 60 кВ при запасаемой энергии порядка 200 кДж.

Из приведенного анализа экспериментальных данных следует, что амплитуда достигаемых магнитных полей определяется энергией сублимации материала соленоида.

Анализ экспериментов по сжатию магнитного потока взрывом также показывает хорошую корреляцию достижимых амплитуд магнитного поля с энергией сублимации материала лайнера и условиями его ускорения. Например, в эксперименте по сжатию магнитного потока в трехкаскадном генераторе, проведенного во ВНИИЭФ, амплитуда достигнутого поля в 28 МГц близка к сделанной с использованием этого подхода оценке в 25 МГц.

Сложная задача взаимодействия ССИМП с материалом проводника может быть проанализи-

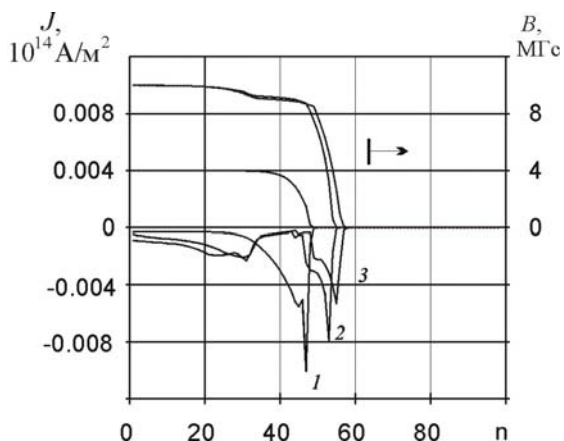


Рис. 17. Распределение плотности тока  $J$  и магнитной индукции  $B$  в различные фазы течения: 1 - 0.8 мкс, 2 - 2.5 мкс, 3 - 3.5 мкс.

рована на основе решения модельных задач и /или численного моделирования. Анализ динамики процесса проникновения поля в проводник при генерации сверхсильного магнитного поля выполнен по результатам численного моделирования, проведенного с помощью программы «Эра», разработанной во ВНИИТФ. Проводимость меди при температурах от  $10^{-4}$  эВ до 3 эВ рассчитывается по таблицам Бакулина-Лучинского. Решалась задача в плоской постановке. К поверхности медного проводника толщиной 24 мм подводится МП линейно нарастающее за 2 мкс до 1000 Т, остаю-

щееся затем на этом же уровне в течение 2 мкс. Расчетный временной интервал определяется временем выхода фронта УВ на свободную границу проводника.

Распределение тока резко неоднородно по толщине проводника. Заметно проявление «пик-эффекта» - образование резкого максимума плотности тока и соответствующего ему крутого фронта в распределении индукции (рис. 17). Расчет показывает, что скорость движения элементов

среды за фронтом УВ становится близкой к скорости нелинейной диффузии поля. Резкий спад плотности тока после его максимума является следствием снижения проводимости в плотной среде вследствие ее нагрева в результате сжатия УВ. Последующий локальный максимум есть следствие некоторого увеличения проводимости за счет перехода среды в плазменное состояние без существенного увеличения удельного объема. Дальнейший спад плотности тока обусловлен спадом проводимости из-за снижения плотности среды.

Гидродинамическая картина характеризуется распределением давления и скорости. В стадии установившегося течения вблизи границы имеет место не только спад газокинетического давления, обусловленный спадом плотности, но и спад суммарного давления (газодинамического и магнитного). При этом создается объемная сила, направленная в сторону поля и замедляющая течение среды. Поэтому граница (первая лагранжевая точка) отстает от среды, движущейся за фронтом ударной волны, а в ранних стадиях имеет место даже остановка границы. Определяющим, с точки зрения генерации ССИМП, является процесс диффузии МП в проводник. Параметром, характеризующим этот процесс, является глубина проникновения поля (скиновая глубина), которая может быть найдена следующим образом:

$$\Delta(t) = \frac{1}{B_0(t)} \int_0^s B(t, x) dx, \quad (20)$$

где  $B_0(t)$  — индукция МП на границе проводника,  $s$  — эйлерова координата. Увеличение зоны, занятой МП, происходит как вследствие диффузии поля, так и в результате гидродинамического течения среды (рис. 18).

Фронт импульса давления (ударной волны) опережает процесс диффузии поля в проводник, причем это опережение начинает проявляться с момента, когда плотность энергии МП близка к энергии связи атомов материала ( $\sim 400$  Тл), при этом, несмотря на высокую степень сжатия, формируется зона пониженной проводимости. С этого же момента можно говорить о формировании УВ, наличие которой является характерной особенностью процесса.

В стадии, близкой к установившемуся режиму, давление на фронте близко к магнитному, а скорость фронта УВ несколько ниже (на 10-12%) скорости, соответствующей этому давлению, определенному из соотношений Ренкина-Гюгонио.

Волновой характер диффузии обуславливает различное состояние проводника по мере удаления от поверхности. Для близких к поверхности точек имеет место быстрое увеличение температуры вследствие джоулева нагрева до величины порядка 10 эВ. Близость поверхности объясняет резкий спад плотности из-за расширения продуктов взрыва в сторону поля и сравнительно низкое давление. При продвижении вглубь проводника влияние границы уменьшается и формируется зона, для которой характерно возрастание давления и незначительное увеличение плотности. По ме-

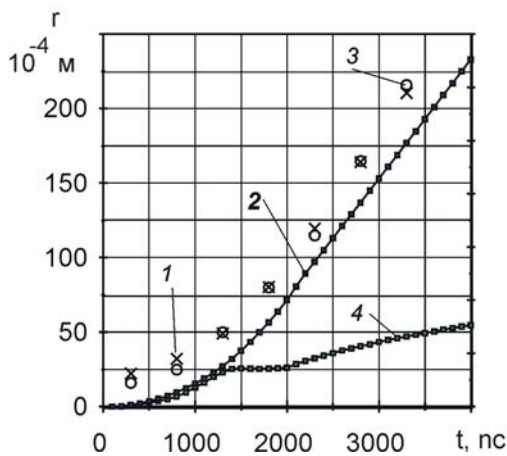


Рис. 18. Координата фронта плотности тока 1, фронта магнитного поля 2, границы поле-проводник 3, введенная скиновая глубина 4.

ре продвижения токовой волны в этой зоне плотность материала падает в 2-3 раза при одновременном росте температуры. В наиболее удаленной точке среды имеет место существенное увеличение плотности материала (в 2 раза) за счет сформированной к этому времени ударной волны. Давление при этом достигает значения, соответствующего магнитному.

Очевидно, что определяющим фактором для формирования структуры течения является проводимость материала в области пересжатых состояний, для описания которых нет достоверных экспериментальных данных. Известные модели проводимости хорошо описывают область нормальной и низкой плотности, что позволяет считать поведение материала в этих зонах достаточно достоверно. Процесс диффузии поля оказывается чувствительным к параметрам модели проводимости. Например, экстраполяция значений проводимости с использованием формулы Кнопфеля, приводит к изменению структуры токовой волны, в которой отсутствует второй максимум. Качественно режимы течения при генерации ССИМП совпадают с описанием аналогичных режимов, рассчитанных с использованием модели проводимости Волкова, Гаранина или Полищука.

Проведенный выше анализ экспериментальных результатов и численных расчетов показывает, что основным фактором, ограничивающим рост МП, может быть ударная волна, распространяющаяся в материале проводника совместно с токовым слоем на ее фронте. Представляет интерес рассмотреть в качестве модельной задачи распространение в материале проводника стационарной УВ с внешним энерговодом, осуществляемым протекаемым поперек движения волны током. Для плоской волны в пренебрежении шириной зоны внешнего энергетического воздействия хорошо известны определяющие соотношения, описывающие распространение УВ, а именно уравнения сохранения потоков массы, импульса и энергии, которые могут быть записаны в виде:

$$D^2 = V_0^2 \cdot \frac{p^* - p_0}{V - V_0}, \quad (21.1)$$

$$u^2 = (V_0 - V) \cdot (p^* - p_0), \quad (21.2)$$

$$\varepsilon - \varepsilon_0 = \frac{1}{2} \cdot (p^* + p_0) \cdot (V_0 - V), \quad (21.3)$$

где  $D$  и  $u$  – волновая и массовая скорости,  $p^*$ ,  $p_0$  и  $\varepsilon$ ,  $\varepsilon_0$  – давление и внутренняя энергия за фронтом и перед фронтом. Для распространяющейся в меди УВ связь скорости фронта и массовой скорости с высокой степенью точности описывается соотношением:

$$D = c_0 + s \cdot u + A \cdot u^2, \quad (22)$$

при этом  $c_0=3.9209$  км/с,  $s=1.5121$ ,  $A=0.00009999$  с/км в диапазоне давлений до 0.5 ТПа.

Рассмотрим распространение УВ в случае, когда внешний энерговод определяет состояние системы, т.е. изменение внутренней энергии происходит за счет нагрева среды токовым слоем. Правомочность такого рассмотрения обусловлена тем, что в УВ, описываемой соотношениями (21, 22), изменение внутренней энергии при давлениях, соответствующих мегагауссным МП, существенно меньше плотности энергии МП. Так, давление, соответствующее магнитному давлению в поле с индукцией 360 Т, приводит к росту внутренней энергии на фронте до значения

0.528 МДж/кг, при этом магнитная энергия  $w_m = 5.794$  МДж/кг. При этом условии в соотношении (21.3) вводится  $w_m$  вместо  $\varepsilon - \varepsilon_0$ . Осуществляемый за счет взаимодействия импульсного МП с материалом проводника энерговыход сопровождается появлением дополнительного давления, действующего на фронт волны – магнитного давления  $p_m = B^2 / (2\mu_0)$ . Давление за фронтом волны складывается из давления  $p_s = p^*$ , определяемого соотношением (21.3) при отсутствии магнитного давления, и магнитного давления  $p_m$ , т.е.  $p^* = p_s + p_m$ .

Внешний энерговыход приводит к существенному ускорению распространения фронта УВ. Так, отношение скоростей распространения волны при наличии и отсутствии внешнего энерговыхода увеличивается с ростом индукции МП, асимптотически приближается к значению 1.62, и для магнитного поля с индукцией 400 Т составляет 1.53. Высокая скорость распространения УВ с внешним энерговыходом обусловлена существенным увеличением давления на ее фронте. Давление на фронте УВ с внешним энерговыходом, определенное с использованием стационарных уравнений состояния, превышает давление на фронте простой УВ в 4.5-5 раз. Скорость фронта поглощения энергии в полях с амплитудой индукции до 300 Т близка к скорости распространения УВ, инициируемой давлением, соответствующим магнитному, и при увеличении амплитуды индукции ее значения лежат в границах, определяемых скоростью распространения УВ и УВ с внешним энерговыходом.

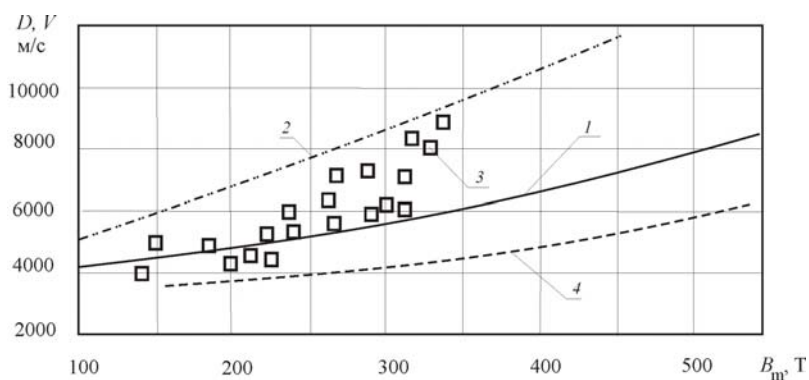


Рис. 19. Скорости фронта ударной волны 1, ударной волны с внешним энерговыходом 2, скорость фронта волны поглощения энергии -3, эффективной границы полепроводник по расчету на программе «Эра» - 4.

оценить  $S_f = 2\pi \cdot (D_x^2 \cdot t + r_0 \cdot D_x)$ , где  $D_x$  - скорость фронта соответствующей волны, для двух крайних случаев. Первый – увеличение зоны обусловлено УВ, инициированной магнитным давлением ( $S_{f1}$ ); второй – УВ с дополнительным энерговыходом ( $S_{f2}$ ). Это представляется целесообразным, так как полученные из обработки экспериментальных данных по получению ССИМП значения скорости фронта поглощения энергии лежат в области, ограниченной этими случаями (рис. 19). Отношение скоростей расширения  $S_{f2}/S_{f1}$  в поле с индукцией 350 Т составляет 2.23 и увеличивается с ростом амплитуды индукции, асимптотически приближаясь к значению 4.04. Таким образом, для получения импульса магнитного поля на требуемом уровне (например, генерация магнитного поля с индукцией 600 Т в соленоиде диаметром 1 см и длиной 1см) длительностью,

Для открытых систем (соленоид) с точки зрения определения параметров источников питания для получения ССИМП определяющим фактором является изменение объема, занятого магнитным полем. Для цилиндрической магнитной системы радиусом  $r_0$  скорость изменения области, занимаемой магнитным полем с индукцией  $B$ , пренебрегая влиянием торцов соленоида, можно





давления. Первый – создание малоиндуктивного генератора импульсных токов с амплитудой тока 1-5 МА с рабочим напряжением от 300 кВ с длительностью импульса тока 10-100 нс. Очевидно, что создание такого рода генератора само по себе является сложной технической задачей, решение которой требует привлечения больших финансовых и человеческих ресурсов. Второй – необходимость проведения исследований, с целью установления функциональной связи параметров импульса тока с формируемым при взрыве скин-слоя импульсом давления. Многофакторность процесса электрического взрыва проводников в ССИМП отражена в предыдущей главе и ставит под сомнение наличие простой функциональной однозначной связи между параметрами импульса тока и давления.

Дополнительным фактором, влияющим на параметры импульса давления, может быть внешнее МП. Если систему плоских шин установить в однородном МП  $H_e$ , то на них действует магнитное давление:

$$P_m^* = \mu \cdot H_i^2 / 2 + \mu \cdot H_i \cdot H_e. \quad (23)$$

В такой системе ответственность за амплитуду импульса можно переложить на внешнее МП, при этом основной функцией источника тока будет формирование формы и длительности импульса давления. Длительность импульса внешнего МП должна быть таковой, чтобы глубина проникновения этого поля в проводник основных шин была существенно больше их толщины. Это необходимо для исключения взаимодействия этого поля с проводником в отсутствие основного тока и влияния его на параметры формируемого импульса давления.

Проверка этого способа формирования импульса давлений проведена на макетной установке, состоящей из двух генераторов импульсных токов. Однородное магнитное поле с амплитудой 3 Т создавалась в системе трековых катушек Гемгольца и имело период осцилляций до 120 мкс. Система

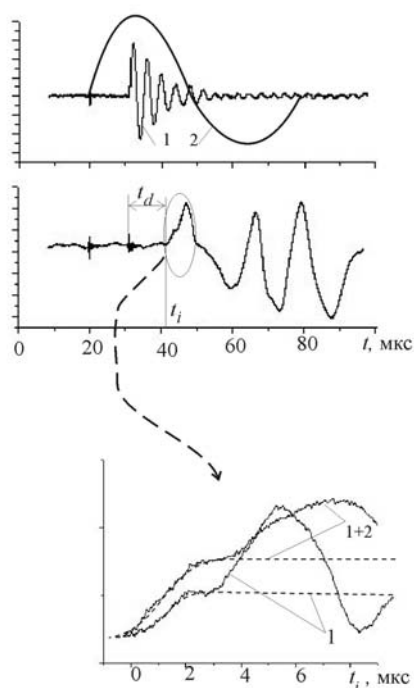


Рис. 21. Осциллограммы токов в основной 1 и дополнительной 2 магнитных системах и сигналов с интерферометра при отсутствии 1 и наличии 1+2 дополнительного поля.

плоских шин запитывалась в момент максимума дополнительного поля от ГИТ с периодом 2 мкс. Интерферометром Майкельсона измерялось смещение свободной поверхности, установленного на плоские шины образца. Схема эксперимента приведена на рис. 20.

Обработка экспериментальных данных выявила хорошее соответствие передаваемого в образец и рассчитанного по (25) импульсов давления. На рис. 21 приведены осциллограммы токов в основной и дополнительной магнитных системах и сигнала с интерферометра для опыта, в котором реализованы амплитуды основного и дополнительного поля 0.15 Т и 0.32 Т соответственно. В качестве образца использовался цилиндр из сферопластика диаметром 8 мм длиной 25 мм, уста-

новленный на токоведущих шинах толщиной 40 мкм при ширине 10 мм. Малые амплитуды полей формируют импульсы давления на уровне 50 кПа. В этих условиях допустимо акустическое приближение для восстановления профиля давления по измеренной скорости движения свободной поверхности. При малых смещениях свободной поверхности образца (не превышающих четверть длины волны излучения лазера) интерферометр Майкельсона работает в линейном режиме и изменение интенсивности сигнала пропорционально смещению свободной поверхности образца.

На фрагменте осциллограммы сигнала с интерферометра приведены и рассчитанные в акустическом приближении смещения свободной поверхности образца, соответствующие первой полуволне воздействующего импульса, для двух режимов нагружения. Имеется хорошее соответствие расчетных и измеренных смещений на протяжении действия первой полуволны импульса. Дальнейшая интерпретация сигнала затруднена из-за дополнительной деформации свободной поверхности образца за счет прихода волн, взаимодействующих с его границами.

Оценим параметры генераторов и магнитной системы, требуемых для формирования импульса давления и длительностью 100 нс в случае использования внешнего магнитного поля. Толщина шины определяется длительностью импульса и пусть, как и в рассматриваемом выше случае, равна 20 мкм. Амплитуда тока, допустимая для такой толщины проводника, определяется интегралом действия и составляет 0.15 МА. Магнитное давление составляет при этом 180 МПа. Размещение такой системы во внешнем МП порядка 100 Т позволит сформировать импульс давления 1.6 ГПа, то есть почти на порядок превышающий возможности простого МИС.

Реализация такого способа создания управляемых ударных нагрузок на уровне 100 ГПа потребует не только адаптации современных способов формирования импульсов тока наносекундной длительности к работе на индуктивную нагрузку, но и разработку магнитных систем, обеспечивающих формирование однородного магнитного поля в заданной области. Очевидно, что в качестве источника тока для генерации импульсов наносекундного диапазона использование ГИТ становится весьма затруднительным, даже при использовании не только традиционных способов обострения тока, но и специальных обостряющих устройств. Современный уровень развития сильноточной техники позволяет рассчитывать на формирование импульсов тока наносекундной длительности с амплитудой в десятки и сотни килоампер.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации проведены исследования, направленные на адаптацию электрофизических способов генерации сильных и сверхсильных магнитных полей к задачам создания импульсов механического давления. Выявлены особенности взаимодействия сверхсильных магнитных полей с проводником и связь амплитуд достижимых магнитных полей с характеристиками проводника и параметрами источника энергии. Экспериментально обосновано использование генераторов импульсных токов для формирования управляемых импульсов давления и проведены экспериментальные исследования разрушения различных материалов в условиях ударного нагружения, создаваемого магнитноимпульсным способом. Выявленные особенности разрушения при импульсном

нагружении имеют общий характер и подтверждают актуальность и целесообразность использования и развития магнитноимпульсного метода для тестирования свойств материалов.

**Основные результаты** работы можно сформулировать следующим образом.

1. На основе предварительных экспериментов разработана и создана магнитноимпульсная установка с применением генератора импульсных токов с энергией 12 кДж. Установка обеспечивает формирование управляемых импульсов давления с амплитудой до 1 ГПа и адаптирована к проведению исследований динамических свойств материалов в условиях импульсного воздействия.
2. Разработаны методики тестирования свойств материалов в условиях ударного нагружения, создаваемого магнитноимпульсным способом.
3. На основе структурно-временного подхода к анализу экспериментальных данных определено структурное время разрушения исследованных материалов и показана независимость этого параметра от схем нагружения.
4. Показано существенное увеличение пороговых разрушающих нагрузок и поверхностной энергии разрушения при уменьшении длительности разрушающего импульса.
5. На основе анализа экспериментальных данных по генерации ССИМП показана связь амплитуд достижимых магнитных полей с энергией сублимации материала.
6. На основе анализа экспериментальных данных и результатов численного моделирования течения проводящей среды разработана модель ударной волны с внешним энерговодом, определяющая верхнюю границу параметров гидродинамического течения, возникающего при генерации ССИМП.
7. Электрический взрыв скин-слоя в магнитных полях более 300 Т формирует импульс давления, параметры которого могут быть определены по модели ударной волны с внешним энерговодом. В рамках этой модели сформулированы требования к источнику энергии.
8. Предложен модифицированный магнитноимпульсный способ, основанный на взаимодействии токоведущих элементов с внешним МП. Экспериментальное моделирование показало возможность использования внешнего однородного магнитного поля для управления параметрами импульса давления, создаваемого магнитноимпульсным способом.

Результаты работы демонстрируют сложный и многофакторный характер взаимодействия ССИМП с проводником и ставят задачи дальнейших исследований этих процессов, направленные в первую очередь на экспериментальное изучение проводимости металлов в условиях высоких плотностей и температур, а также влияния нестационарности процессов электрического взрыва поверхностного слоя проводника на характер гидродинамического течения. Магнитноимпульсный способ создания управляемых ударных нагрузок и его модификация позволяют проводить исследования динамических характеристик широкого спектра материалов в микро- и наносекундном интервале длительностей нагружения.

Автор считает своим долгом выразить признательность академику РАН, д.ф.-м.н., профессору Морозову Н.Ф. за инициирование интереса и поддержку в адаптации магнитноимпульсного способа создания управляемых ударных нагрузок к задачам разрушения материалов.

**Основное содержание диссертации опубликовано в работах:**

1. Кривошеев, С.И. Двухмерная диффузия и МГД-течение при электрическом взрыве одновитковых соленоидов малого объема в мегагауссном магнитном поле / С.И. Кривошеев, В.В. Титков, Г.А. Шнеерсон // ЖТФ.- 1997.- Т. 67, № 4.- С. 32-47.
2. Многовитковый соленоид для создания сильных импульсных магнитных полей / Ю.Н. Бочаров, С.И. Кривошеев, А.И. Кручинин, В.А. Чураев.- 1987.- А. с. СССР.- № 1349578.
3. Кривошеев, С.И. Экспериментальная установка и методика исследования пороговых разрушающих нагрузок для образцов с макротрещинами при кратковременных ударных воздействиях, создаваемых импульсным магнитным полем / С.И. Кривошеев, Ю.В. Петров // СПб.: ИПМАШ РАН, 1997. - Препринт № 142.- 33 с.
4. Адамьян, Ю.Э. Малоиндуктивный многоканальный газовый коммутатор тока / Ю.Э. Адамьян, В.М. Василевский, С.И. Кривошеев, В.Л. Шутов // ПТЭ.- 1995.- № 2. - С. 122-125.
5. Adamin, Y.E. The Low Inductivity Multichannel Gas Switch for Megaampere Diapason / Y.E. Adamin, S.I. Krivosheev, V.M.Vasilevsky // Proc. of 1st Intern. congress on radiation physics, high current electronics and modification of materials.- Tomsk, Russia. - 24-29 sept. 2000.- Vol. 2.- P. 357-359.
6. Krivosheev, S.I. Spatial busses and Their Application for Current Generators Creation / S.I. Krivosheev, G.A. Shneerson. Proc. of 1-st International congress on radiation physics, high current electronics and modification of materials. - Tomsk, Russia. - 24-29 sept. 2000.- Vol. 2.- P. 353-356
7. Adamian, Y.E. Pulse current generator for microsecond duration pressure pulse generation / Y.E. Adamian, S.I. Krivosheev, V.M. Vasilevsky, A.P. Nenashev // Proc. of 1-st International congress on radiation physics, high current electronics and modification of materials. - Tomsk, Russia. - 24-29 sept. 2000.- Vol. 2.- P. 259-262.
8. Кривошеев, С.И. Исследование пороговых характеристик разрушения материалов при кратковременных нагрузках, создаваемых электромагнитными силами / С.И. Кривошеев, Н.Ф. Морозов, Ю.В. Петров и др. // Труды Международной научной конференции «Забабахинские научные чтения-98».- Снежинск: Федеральный ядерный центр.- 20-26 сент. 1998.
9. Кривошеев, С.И. Инициирование разрушения твердых тел при интенсивном импульсном нагружении / С.И. Кривошеев, Н.Ф. Морозов, Ю.В. Петров, Г.А. Шнеерсон // Известия Академии наук: Механика твердого тела.- 1999.- № 5.- С. 165-172.
10. Груздков, А.А. Функционально-механические свойства сплава NiTi при высокоскоростном магнитно-импульсном нагружении / А.А. Груздков, С.И. Кривошеев, А.И. Разов и др. // Структура и свойства перспективных металлов и сплавов. - Тр. LX Междунар. семин. «Актуальн. проблемы прочн.» (30 сен. - 04 окт. 2002). - Великий Новгород: НГУ, 2002.
11. Эффект запаздывания старта трещины при пороговых импульсных нагрузках / А.Н. Березкин, С.И. Кривошеев, Ю.В. Петров, А.А. Уткин // Доклады РАН.- 2000.- Т. 3, № 375.- С. 328-331.
12. Груздков, А.А. Энергоемкость разрушения материалов в условиях импульсного нагружения микросекундной длительности / А.А. Груздков, С.И. Кривошеев, Ю.В. Петров // Физика твердого тела.- 2003.- Т. 45, вып. 5.- С. 842-845.

13. Кривошеев, С.И. Исследование порогов хрупкого разрушения при кратковременных нагрузках, создаваемых электромагнитными силами / С.И. Кривошеев, Г.И. Шнеерсон // Прочность и разрушение материалов и конструкций.- Вып. 18.- СПб.: Изд-во СПбГУ, 1999.- С. 116-122.
14. Исследование трещиностойкости сферопластика при статических и динамических нагрузках / Атрошенко С.А., Кривошеев С.И., Петров Ю.В. и др. // Межд. конф. 3-ие Харитоновские тематические научные чтения. «Экстремальное состояние вещества. Детонация. Ударные волны»- Саров: ВНИИЭФ, 2001.- С. 131-132.
15. Инициирование разрушения твердых тел при интенсивном импульсном нагружении / С.И. Кривошеев, Н.Ф. Морозов, Ю.В. Петров, Г.А. Шнеерсон // Изв. РАН: Мех. тверд. тела.- 1999.- № 5, вып. 165.- С. 78-85.
16. Получение сверхсильных импульсных магнитных полей в одновитковых тонкостенных соленоидных / Ю.Н. Бочаров, С.И. Кривошеев, А.И. Кручинин и др. // Сверхсильные магнитные поля. Физика. Техника. Применение. - М.: Наука, 1984.- С. 77-83.
17. Study of Explosive Destruction of Small Volume Coils in Ultrahigh Magnetic Fields / Yu.N. Bocharov, S.I. Krivosheev, G.A. Shneerson at al. // Megagauss fields and pulsed power systems.- Proc. of 5 Int. conf. on Megagauss magnetic field generation. – NY.: Nova Science Publisher, 1990.- P. 33-43.
18. Numerical and experimental studies of destruction of coils in high-speed megagauss magnetic field / Yu.N. Bocharov, S.I. Krivosheev, G.A. Shneerson at al. // Megagauss technology and Pulse power applications. - Proc. of 4 Int. conf. on Megagauss magnetic field generation. - NY. Plenum Press, 1987. - P. 65-77.
19. Dynamics of solenoid expansion in a megagauss magnetic field / Yu.N. Bocharov, S.I. Krivosheev, G.A. Shneerson at al. // Megagauss magnetic field generation and pulsed power application. I. - Proc. of 6 Int. conf. on Megagauss magnetic field generation.- NY.:Nova Science Publisher Inc., 1994.- P. 41-51.
20. Krivosheev, S.I. Physical constraint to superstrong magnetic fields generation by a method of direct discharge / S.I. Krivosheev // Proc. XII IEEE International Pulsed Power Conference.- Monterey, California, USA.- June 27-30, 1999.- P. 750-753.
21. Кривошеев, С.И. Экспериментальное изучение разрушения габбродиабазы в условиях импульсного нагружения / С.И. Кривошеев // Научно-технические ведомости СПбГТУ.- 2003. № 2.- С. 115-117.
22. Экспериментальное исследование природы макроразрушения материалов при кратковременных импульсных нагрузках / С.И. Кривошеев, Н.Ф. Морозов, Ю.В. Петров, Г.А. Шнеерсон // Механика разрушения и прочность конструкций (выпуск 2): в 3 Т. - Под общ. ред. В.В. Панасюка - Львов: Каменяр, 1999. - Т. 1.- С. 170-177.
23. Кривошеев, С.И. Экспериментальное изучение старта трещины при импульсном нагружении / С.И. Кривошеев, Ю.В. Петров // Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках.- Труды 1X Международной научной школы.- 1999.- Симферополь.- С. 47-48.

24. Ферромагнитный размыкатель тока / Ю.Н. Бочаров, И.П. Ефимов, С.И. Кривошеев, Г.А. Шнеерсон // Письма в ЖТФ.- 1999.- Т. 25, вып. 4.- С. 35-36.
25. Кривошеев, С.И. Энергетические ограничения при генерации сверхсильных магнитных полей / С.И. Кривошеев // Труды Международной конференции «VI Забабахинские научные чтения». 24-28 сентября 2001. – Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2001.- С. 90-92
26. Исследование деформационно-прочностных свойств и структурных превращений в металлах при высокоскоростном ударном нагружении / А.Е. Волков, С.И. Кривошеев, Ю.В. Петров и др. // Механика разрушения и прочность конструкций (выпуск 2): в 3 Т. - Под общ. ред. В.В. Панасюка - Львов: Каменяр, 1999. - Т.1.- С. 156-159.
27. Демидова, Н.В. Исследование пороговых разрушающих нагрузок в образцах с макротрещинами / Н.В. Демидова, С.И. Кривошеев, Ю.В. Петров / Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках.- Труды X Международ. научной школы.- Симферополь.- 2000.- С. 41-45.
28. Атрошенко, С.А. Распространение трещины при динамическом разрушении полиметилметакрилата / С.А. Атрошенко, С.И. Кривошеев, А.Ю. Петров // Труды Международной конференции III Харитоновские тематические научные чтения «Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны».- Ред. А.Л. Михайлов.- Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2002.- С. 207-211.
29. Атрошенко, С.А. О разрушении полиметилметакрилата при импульсном нагружении / С.А. Атрошенко, С.И. Кривошеев, А.Ю. Петров // Математическое моделирование в механике сплошных сред. Методы граничных и конечных элементов: Труды XIX Международной конференции.- 30 мая – 2 июня 2001.- СПб., 2001.- Т.1.- С. 33-34.
30. Функционально-механические свойства сплава NiTi при высокоскоростном магнитно-импульсном нагружении / А.А. Груздков, С.И. Кривошеев, А.И. Разов и др. // Структура и свойства перспективных металлов и сплавов. -Тр. LX Междунар. семин. «Актуальн. проблемы прочн.» - 30 сен. - 04 окт. 2002. – В.Новгород: НГУ, 2002.- С. 56-60.
31. Кривошеев, С.И. Энергетические ограничения при генерации сверхсильных магнитных полей / С.И. Кривошеев // Научно-технические ведомости СПбГТУ.- 2002.- № 4.-С. 109-116.
32. Investigation of fracture of glass microballons filled compozite static and dynamic loads / S.A. Atroshenko, S.I. Krivosheev, G.D. Fedorovsky at al. // Advanced problems in mechanics APM'2002: Proceedings of XXX summer school (June27-Jule 6,2002 St. Petersb. (Repino), Russia): IPMME-RAS GAMM, 2003. - P. 86-91.
33. Атрошенко, С.А. Распространение трещины при динамическом разрушении полиметилметакрилата / С.А. Атрошенко, С.И. Кривошеев, А.Ю. Петров // ЖТФ.- 2002.- Т. 72, вып. 2.- С. 52-58.
34. Разрушение сферопластика при статических и динамических нагрузках / С.А. Атрошенко, С.И. Кривошеев, Ю.В. Петров и др. // ЖТФ.- 2002.-Т. 72, вып. 12.- С. 54-58.
35. Кривошеев, С.И. Исследование индукционного ускорения проводящих тел применительно к сепарации цветных металлов / С.И. Кривошеев, А.П. Ненашев, Г.А. Шнеерсон // Известия Академии наук: Энергетика.- 2004.- № 2.- С. 116-124.

36. Krivosheev, S.I. Testing of dynamic property of materials under microsecond duration pressure created by the pulse current generator / S.I. Krivosheev, Yu. V. Petrov // Proc. of IX inter. Conf. On Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics.- M.-SPb.- July 7-14, 2002. - Eds. V.D. Selemir and L.N. Plyashkevich.- Sarov: VNIIEF, 2004.- P. 112-115.
37. Krivosheev, S.I. Peculiarities of conducting medium MHD flow under skin layer electrical explosion in a megagauss magnetic field / S.I. Krivosheev, N.G. Karlykhanov, G.A. Shneerson // Proc. of IX inter. Conf. On Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics.- M.-SPb.- July 7-14, 2002. - Eds. V.D. Selemir and L.N. Plyashkevich.- Sarov: VNIIEF, 2004.- P. 529-536.
38. Impact loading of rocks / S.I. Krivosheev, Y.V. Petrov, G.D. Fedorovsky et al. // Shock Waves in Condensed Matter: International Conference.- Saint-Petersburg, Russia.- 18-23 July 2004.- St.-Petersburg.- 2004. P. 17-19.
39. Krivosheev, S.I. Development and Achievements of Single-Turn-Coil technique / S.I. Krivosheev, G.A. Shneerson // Proc. of Xth Inter. Conf. On Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics.- Berlin. Humboldt-Univ.- 18-23 July 2004.- P. 29-38.
40. Krivosheev, S.I. The Magnetoimpuls Method of Creation of Short Pulses Mechanical Pressure for Material Testing / S.I. Krivosheev // Proc. of X Inter. Conf. On Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics.- Berlin. Humboldt-Univ.- 18-23 July 2004.- P. 354-356.
41. Об энергетическом балансе при инициировании роста трещины в условиях импульсного нагружения / В.А. Братов, А.А. Груздков, С.И. Кривошеев, Ю.В. Петров // Доклады РАН.- 2004.- Т. 396, № 3.- С. 345-348.
42. Кривошеев, С.И. Магнитно-импульсная методика тестирования материалов при импульсном нагружении / С.И. Кривошеев // ЖТФ.- 2004.- Т. 75, вып. 3.- С. 47-53.
43. Кривошеев, С.И. Особенности процесса разрушения при динамическом нагружении / С.И. Кривошеев // Научно-технические ведомости СПбГТУ, № 2, 2005, С. 173-176.
44. Бочаров, Ю.Н. Задержка начала разрушения одновиткового соленоида в мегагауссном магнитном поле / Ю.Н. Бочаров, С.И. Кривошеев, Г.А. Шнеерсон // Письма в Журнал технической физики.- 1982.- Т. 8, вып. 4. – С. 212-215.
45. Removal of surface layer of concrete by a pulse-periodical discharge / V. Goldfarb, G. Shneerson, Yu. Adamian., S.I. Krivosheev et al. // Proc. of XI IEEE International Pulsed Power Conference.-1997.- Maryland, Baltimore, USA.-Vol. 1.- P. 1078-1084, 1997.
46. The first Force-Free pulsed Magnet (computer and nature modeling)/ G.A. Shneerson, H.J. Shnaider-Muntau, Y.E. Adamian, S.I. Krivosheev et al. // Proc. of X Inter. Conf. On Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics.- Berlin. Humboldt-Univ.- 18-23 July 2004.- P. 68-71.
47. Импульсное разрушение горных пород / С.А. Атрошенко, С.И. Кривошеев, Ю.В. Петров и др. // Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны.: Труды Международной конференции «7 Харитоновские научные чтения».- Ред. А.Л. Михайлов.- Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005.- С. 390-394.