

На правах рукописи

КОНСТАНТИНОВ АЛЕКСАНДР ЮРЬЕВИЧ

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД
К ИССЛЕДОВАНИЮ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО
ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕРНЫХ СТЕРЖНЕЙ**

01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Нижний Новгород – 2018

Работа выполнена в федеральном государственном автономном
образовательном учреждении высшего образования
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского»
(НИИМ Нижегородского университета)

Научный консультант: доктор технических наук,
профессор
Брагов Анатолий Михайлович

Официальные оппоненты: **Морозов Никита Федорович,**
доктор физико-математических наук,
академик РАН, профессор,
Заведующий кафедрой «Теория упругости»
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государствен-
ный университет»

Атрошенко Светлана Алексеевна,
доктор физико-математических наук, профессор,
Ведущий научный сотрудник лаборатории «Физика
разрушения» ФГБУН «Институт проблем машино-
ведения Российской Академии наук»

Наймарк Олег Борисович,
доктор физико-математических наук, профессор,
Заведующий лабораторией физических основ проч-
ности ФГБУН «Институт механики сплошных сред
Уральского отделения Российской академии наук»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учрежде-
ние науки Институт проблем механики им. А.Ю.
Ишлинского Российской академии наук

Защита состоится " 05 " _____ июля _____ 2018 года в 14:30 на заседании диссертационного совета Д 212.166.09 при Национальном исследовательском Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского по адресу: 603950, Н.Новгород, пр. Гагарина, 23, корпус 6.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского и на сайте diss.unn.ru/819

Автореферат разослан " 30 " _____ мая _____ 2018 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Горохов Василий Андреевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена решению проблемы исследования процессов высоко-скоростного деформирования и разрушения материалов различной физической природы.

Актуальность темы исследования

В настоящее время необходимость применения численного моделирования на ранних этапах проектирования объектов новой техники ни у кого не вызывает сомнения. Математическое моделирование, помимо сокращения сроков проектирования, позволяет существенно оптимизировать разрабатываемую конструкцию, так как появляется возможность проанализировать значительно большее число вариантов компоновки (геометрия, материалы, способы соединения и пр.), а также эксплуатационных условий по отношению к традиционному проектированию. Следует отметить, что численные методы и современные вычислительные ресурсы позволяют с достаточной степенью точности решать сложные системы математических уравнений, описывающих процессы, протекающие в конструкции под действием тех или иных факторов, описывать поведение материалов сложными нелинейными математическими моделями, а также учитывать геометрическую и физическую нелинейности. Следует отметить, что адекватность численного решения в основном определяется точностью задания входных данных, одной из важных составляющих которых являются математические модели поведения материалов. Некоторые изделия и элементы конструкций в процессе эксплуатации могут подвергаться интенсивным нагрузкам ударного или взрывного характера. Подобные ситуации могут возникать как в результате нештатных аварийных ситуаций, возникающих вследствие человеческих ошибок, неисправностей техники, природных воздействий, а также в результате целенаправленных действий человека (теракты). Некоторые конструктивные элементы в силу своего функционального назначения проектируются для уменьшения последствий импульсных воздействий (например, системы пассивной и активной безопасности автомобилей, защитные контейнеры для перевозки опасных веществ, поражающие элементы, такие как пули и снаряды и пр.) Для оснащения и верификации феноменологических моделей поведения, используемых при расчете напряженно-деформированного состояния, необходима обширная база данных по динамическим свойствам материалов. В технике динамических испытаний материалов практически отсутствуют стандартизованные методы испытаний и серийно выпускаемые установки и оборудование. Следует

отметить, что динамические свойства ряда традиционных и, тем более, новых материалов изучены недостаточно. Поэтому зачастую проектирование указанных ответственных объектов автомобильной, авиационной, энергетической и др. видов техники выполняется с использованием статических свойств (или данных по известным зарубежным аналогам), что ведет к нерациональному проектированию конструкций, испытывающих импульсные нагрузки. В связи с этим разработка инструментальных и методических средств проведения динамических испытаний, широкомасштабные исследования динамических свойств конструкционных материалов при скоростях деформации 10^2 - 10^5 с⁻¹ является весьма актуальной задачей, а создание банка данных динамических свойств конструкционных материалов в зависимости от скорости деформации, температуры, интенсивности и истории их изменения имеет чрезвычайную важность и значимость.

Степень разработанности темы

В России изучение свойств материалов при высоких скоростях деформации началось в 30-х годах прошлого века Н.Н.Давиденковым и было продолжено Ф.Ф.Витманом, Н.А.Златиным, В.А.Степановым, Г.В.Степановым, Ю.Я.Волошенко-Климовицким, А.А.Ильюшиным, В.С.Ленским, Р.А.Васиным, А.М.Браговым, А.К.Ломуновым и др. За рубежом решению этого вопроса посвящены работы Р.Дэвиса, А.Надаи, Дж.Даффи, Дж.Тейлора, Г.Кольского, Дж.Кэмпбелла, У.Линдхольма, Дж.Белла, А.Кобаяси. К настоящему времени результаты систематических исследований процессов высокоскоростной деформации различных материалов представлены в работах С.А.Новикова, Г.В.Степанова, А.П.Большакова, А.М.Брагова, А.К.Ломунова, К.Альбертини, Дж.Филда, Дж.Грея, У.Прауда, Я.Клепачко, Дж.Хардинга, Ф.Хаузера, Г.Гари, З.Розенберга, С.Немат-Нассера и др.

Основные принципы экспериментально-теоретического подхода к изучению процессов деформирования и разрушения материалов сформулированы в работах А.А.Ильюшина и А.Г.Угодчикова, однако в то время уровень экспериментальных методов, методов численного моделирования и вычислительной техники не позволил в полной мере реализовать эти идеи.

Цель диссертационной работы состоит:

- в разработке новой методологии комплексного экспериментально-теоретического изучения процессов высокоскоростного деформирования и разрушения материалов при скоростях деформации $\sim 5 \cdot 10^2 \div 1 \cdot 10^4$ с⁻¹ и температурах от -60 до 350 °С;

- в развитии и модификации, создании и обосновании современных экспериментальных методик, приборных, аппаратных и программных средств, нестандартного испытательного оборудования для проведения исследований деформационных и прочностных свойств материалов в широком диапазоне изменения условий нагружения;
- проведении динамических испытаний и установлении основополагающих температурно-скоростных зависимостей физико-механических характеристик материалов;
- интеграции инструментов математического моделирования в процесс экспериментального исследования;
- численном анализе экспериментальных схем;
- идентификации и верификации некоторых моделей поведения материалов;
- создании локальной базы данных по динамическим свойствам материалов различной физической природы и идентифицированным и верифицированным математическим моделям.

Для достижения поставленной цели в работе были решены следующие **основные задачи**:

1. Разработана методология комплексного исследования высокоскоростного деформирования материалов различной физической природы, включающая планирование эксперимента, численный анализ разработанных методик, получение динамических свойств, идентификацию на этой основе необходимыми параметрами математических моделей материалов и верификацию этих моделей с помощью набора специальных тестовых экспериментов.
2. Развита экспериментальные методики, позволяющие изучать влияние параметров нагружения на характеристики материалов при различных типах испытаний (сжатие, растяжение, сдвиг, срез и т.д.).
3. Создан автоматизированный экспериментальный комплекс, включающий широкий круг оригинальных схем динамических испытаний, позволяющих получать основные механические свойства материалов (диаграммы динамического деформирования, предельные прочностные и деформационные характеристики и т.д.).

4. Разработано и создано методическое и программное обеспечение, позволяющее осуществлять планирование эксперимента, обработку результатов, построения математических моделей и хранение результатов.
5. Выполнен численный анализ некоторых экспериментальных схем.
6. Создано методическое и программное обеспечение компьютерной интерпретации данных динамического эксперимента.
7. Создан компьютерный инструментарий для аппроксимации экспериментальных предельных поверхностей и хранения экспериментальных данных в локальной базе данных.
8. Проведены исследования и получены данные по динамическим свойствам широкого круга материалов, установлены закономерности влияния условий нагружения на свойства материалов.
9. Получены параметры некоторых известных математических моделей деформирования и критериев прочности и проведена их верификация.

Научная новизна работы заключается в следующем:

В диссертации впервые получил развитие комплексный экспериментально-теоретический подход к исследованию процессов высокоскоростного деформирования и разрушения материалов различной физической природы с установлением зависимости их свойств от условий нагружения. В этой связи:

- Создан автоматизированный аппаратно-программный комплекс для планирования эксперимента, проведения, обработки и хранения его результатов.
- Разработана, численно проанализирована и введена в эксплуатацию новая установка, позволяющая проводить нагружение образцов прямым импульсом растягивающей нагрузки.
- Предложена и реализована комбинированная методика динамических испытаний, которая позволяет в одном эксперименте реализовывать постоянную скорость деформации, получать динамические диаграммы двух разных материалов или одного материала в разных условиях по деформациям и скоростям деформаций.
- Численно проанализирован динамический процесс локализации деформации в образцах в экспериментах на высокоскоростное растяжение вязкопластических

материалов. Показано, что при наличии информации об изменении во времени радиуса наименьшего сечения и радиуса кривизны контура шейки в точке минимального сечения можно с достаточной точностью построить истинную диаграмму деформирования материала вплоть до момента разрыва.

- Создано методическое и программное обеспечение, позволяющее по интегральным усилиям и изменению длины рабочей части образца в эксперименте на высокоскоростное растяжение строить истинную кривую деформирования за точкой локализации (шейка) деформации.
- Создано методическое и программное обеспечение, позволяющее определять диаграмму деформирования материала на основании результатов теста Тейлора. Показано, что для близких скоростей деформации данные, полученные предложенным способом, близки к данным, полученным методом Кольского.
- Создано методическое и программное обеспечение, позволяющее идентифицировать параметры модели разрушения с учетом истории изменения параметров состояния (вид НДС, скорость деформации и температура) в точке инициализации разрушения.
- Идентифицированы и верифицированы модели деформирования и разрушения для ряда металлов: титановые сплавы ВТ6, ВТ8, ВТ20, стали 20Х13, Ст3, 08Х18Н10Т, 09Г2С, алюминиевый сплав Д16.
- Проведены испытания и впервые получены экспериментальные данные о скоростной и температурной зависимости прочностных и деформационных характеристик ряда малоизученных материалов: хрупкие среды (горные породы, мелкозернистый бетон, фибробетон, пресноводный лед), высокопористый композит ФК-75.

Теоретическая значимость работы

Развит экспериментально-теоретический подход к изучению процессов динамического деформирования и разрушения материалов различной физической природы, путем разработки и реализации новых экспериментальных методик и интеграции инструментов численного моделирования в процесс исследования динамического поведения материалов, что является развитием нового направления и вносит значительный вклад в методы решения проблем динамики прочности машин,

приборов и аппаратуры, а также механики деформируемого твердого тела при повышенных скоростях деформации.

Практическая значимость работы

Разработанные комплексы методических, аппаратных и программных средств, автоматизированная система регистрации и обработки экспериментальных данных использовались для получения опытных данных и построения математических моделей высокоскоростного деформирования и разрушения, которые применяются в процессе проектирования изделий в АО «ГосНИИмаш», АО НПП «Салют», АО «Сатурн», АО "ОКБМ Африкантов", АО «ОДК-Авиадвигатель», ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ и др. для расчета НДС и прочности объектов оборонной и авиационной техники, ядерной энергетики и других ответственных конструкций, испытывающих интенсивные кратковременные воздействия. Созданный экспериментальный стенд используется в процессе обучения студентов Института информационных технологий, математики и механики Университета Лобачевского.

Методология и методы диссертационного исследования

Построение достоверных моделей деформирования и разрушения материалов различной физической природы в широком диапазоне условий нагружения (скорость деформации, температура, вид напряженного состояния) является сложной задачей. Она складывается из обширных экспериментальных исследований на представительных образцах для получения характеристик материала (базовые эксперименты), анализа полученных данных для выявления зависимостей этих характеристик от параметров нагружения, описания полученных закономерностей математическими моделями и верификацию построенных определяющих соотношений с использованием методов численного моделирования и специальных натуральных испытаний (тестовые эксперименты). Наиболее эффективной и современной методологией исследования процессов деформирования и разрушения материалов является экспериментально-теоретический подход, подразумевающий совместное применение экспериментальных и численных методов [5]. В этом симбиозе численное моделирование используется на этапе планирования эксперимента, при разработке и обосновании новых экспериментальных методик, а также для определения характеристик материалов из полученных в эксперименте данных, когда это невозможно сделать стандартными методами (например, если не соблюдается условие равномерности полей напряжений и деформаций в объеме образца или исследуется достаточно сложный эволюционный процесс, например, накопления повреждений).

Эксперимент же в свою очередь используется для построения информационной базы по динамическим свойствам материалов (базовые эксперименты) и получения данных о поведении элементов конструкции в специальных видах тестовых экспериментов, используемых для проверки работоспособности математических моделей (верификация). Схематично изложенный подход представлен на рисунке 1. В случае, если результаты верификации математической модели окажутся неудовлетворительными, можно вернуться на начальный этап, расширив программу исследования (добавив испытания по существующим методикам в измененном диапазоне условий нагружения), либо включив в неё новые виды экспериментов.



Рисунок 1 – Схема экспериментально-теоретического исследования процессов деформирования и разрушения материалов

Экспериментальная база созданного комплекса построена на методе Кольского и его модификациях, методе прямого удара, методе Тейлора. В качестве нагружающих устройств использовались газовые пушки различного калибра. Регистрация первичной экспериментальной информации осуществлялась методами динамической тензометрии с помощью современных цифровых осциллографов.

Программная база построена на свободно распространяемых кроссплатформенных решениях: языке python для кодирования алгоритмов и ПО Calculix для моделирования процессов высокоскоростного деформирования. При проведении идентификации параметров математических моделей использовался метод аппроксимации экспериментальных данных теоретическими функциями, а также расчетно-экспериментальный подход, основанный на согласовании результатов натурных испытаний и численных экспериментов.

Положения, выносимые на защиту

1. Методология комплексного экспериментально-теоретического подхода к изучению проблемы высокоскоростной деформации материалов, сочетающая в себе:

- Современные методики экспериментального исследования процессов высокоскоростного деформирования и разрушения широкого круга материалов;
- Применение численного моделирования для интерпретации результатов динамического эксперимента.
- Систему верификационных экспериментов для проверки работоспособности математических моделей.

3. Оригинальная модификация метода Кольского, реализующая комбинированную схему, которая позволяет в одном эксперименте реализовывать постоянную скорость деформации, получать динамические диаграммы двух разных материалов или одного материала в разных условиях.

4. Аппаратно-программный комплекс на базе метода Кольского и его модификаций, включающий современные экспериментальные методики и программное обеспечение, позволяющее планировать эксперимент, получать и обрабатывать первичную экспериментальную информацию, использовать численное моделирование для интерпретации результатов эксперимента, а также проводить аппроксимацию экспериментальных данных, систематизировать и хранить информацию.

5. Результаты численного исследования процесса локализации деформации и образования шейки в эксперименте на высокоскоростное растяжение.

6. Экспериментально-расчетный метод определения истинной диаграммы деформирования вязкопластического материала при высокоскоростном растяжении, учитывающий локализацию деформации и образование шейки.

7. Экспериментально-расчетный метод определения диаграммы деформирования материалов с использованием результатов теста Тейлора.

8. Экспериментально-расчетный метод определения параметров модели вязкопластического разрушения Джонсона-Кука, учитывающий историю изменения условий нагружения в процессе испытания образцов.

9. База опытных данных по физико-механическим свойствам разнообразных материалов, в том числе металлов и сплавов, горных пород, пресноводного льда, и их температурно-скоростным зависимостям, параметрам математических моделей, используемых в программных комплексах расчета НДС и прочности конструкций авиационной, энергетической, военной видах техники.

Степень достоверности результатов

Достоверность полученных в диссертационной работе результатов, определенных параметров и свойств обеспечивается выбором современных методов исследования динамических свойств материалов, их тщательным анализом с целью выявления основных эффектов, влияющих на полученные результаты, совпадением полученных в работе опытных данных с аналогичными результатами зарубежных и отечественных исследователей. Достоверность математического моделирования обеспечивается совпадением результатов опытных данных, получаемых с использованием набора специальных тестовых экспериментов с результатами виртуальных (численных) экспериментов.

Апробация результатов

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: X 10-й Международной конференции «10-th International Conference on the Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading (DYMAT-2012)» (Фрайбург, 2012 г.); симпозиуме «Fib Symposium. Engineering a Concrete Future: Technology, Modeling and Construction» (Тель-Авив, 2013 г.); 20-й Европейской конференции «20th European Conference on Fracture (ECF20)» (Тронхейм, 2014 г.); Международной конференции «Hopkinson Centenary Conference Cambridge», (Кембридж, 2014); Всероссийских съездах по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Нижний Новгород, 2011, Казань, 2015); 24th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM 2016) (Montreal, Canada, 2016); Третьей международной конференции «Полярная механика» (Владивосток, 2016); Научной конференции «Проблемы прочности, динамики, ресурса и оптимизации», посвященной 80-летию со дня рождения В.П.Малкова (Нижний Новгород, 2016); 7th International Conference “Progress in Mechanics and Materials in Design” (Albufeira, Portugal 2017); DYMAT 23rd TM International Conference on Dynamic Fracture of Ductile Materials, (DynFrac) (Тронхейм, Норвегия 2017); XXVII Международной конференции “Mathematical and Computer Simulations in Mechanics of

Solids and Structures” (С.Петербург, 2017); Международной конференции «Проблемы прочности, динамики, ресурса» (Нижний Новгород, 2017).

Публикации

Все основные результаты диссертации опубликованы в 22 работах в изданиях, входящих в Перечень ВАК Минобрнауки России [1-22], 22 работы [1-5, 23-39] индексируются международными библиографическими базами (WoS и Scopus).

Личный вклад автора

Основные результаты диссертации (методические разработки, программная реализация алгоритмов, экспериментальные данные, а также идентификация и верификация математических моделей материалов) получены лично А.Ю. Константиновым. Во всех работах, опубликованных в соавторстве, Константинову А.Ю. принадлежат результаты экспериментальных исследований с применением РСГ, метода прямого удара, метода Тейлора и их анализ. В совместных работах [2, 11, 13, 14, 23-35] автору принадлежат результаты экспериментальных и численных исследований, а также методические разработки. В совместных работах [6, 10, 18, 21, 24-27, 29, 30, 33] Константиновым А.Ю. экспериментально исследованы и описаны математическими моделями температурно-скоростные зависимости прочностных и деформационных характеристик материалов. А.М. Брагов осуществлял общее руководство исследованиями. А.К. Ломунов оказывал помощь в систематизации и анализе экспериментальных данных. Филиппов А.Р. и Ламзин Д.А. оказывали помощь и содействие при проведении экспериментов. Петров Ю.В. и Смирнов И.В. осуществляли методическую помощь при описании зависимостей динамической прочности хрупких сред от скорости деформации с использованием критерия инкубационного времени. Баландиным В.В. и Баландиным Вл.Вл. получены данные о высокоскоростном взаимодействии ударников со льдом и бетоном в прямой и обращенной постановках, а также данные по откольной прочности, методом плосковолнового эксперимента. Лапшин Д.А., Виленский О.Ю., Пристром С.А., Малыгин М.Г. выполняли расчет конструкций ядерной техники с применением моделей, идентифицированных Константиновым А.Ю.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы; содержит 276 рисунков, 29 таблиц, библиографический список из 414 источников – всего 304 страницы.

Диссертационная работа выполнена при поддержке

Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» соглашение № 14.578.21.0246 от 26.09.2017 (уникальный идентификатор работ (проекта) RFMEFI57817X0246) (Главы 1 и 2); грантов РНФ 16-19-10237 (раздел 4.3), 15-19-10032 (разделы 3.1-3.2); грантов РФФИ 12-01-31082мол_а, 15-38-20759мол_а_вед, 18-08-00808а, 16-01-00524а, 15-08-05517а (разделы 3.3, 4.1, 5.3), ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2012-2013 годы №2012-1.2.2-12-000-2007-9243 (раздел 5.2).

Благодарности

Автор выражает благодарности: Брагову А.М. и Ломунову А.К. за консультации и ценные советы по работе над диссертацией; Баландину В.В. и Баландину Вл.Вл. за помощь в получении данных о высокоскоростном взаимодействии элементов конструкций; Филиппову А.Р. и Ламзину Д.А. за помощь в подготовке и проведении экспериментов; Горохову А.Н., Жегалову Д.В., Казакову Д.А., Модину И.А. за предоставленные экспериментальные данные о деформировании и разрушении материалов в условиях статического нагружения; Петрову Ю.В. и Смирнову И.В. за помощь и консультирование в вопросах касающихся критерия инкубационного времени.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационного исследования, содержится информация о степени ее разработанности, целях и задачах, научной новизне, теоретической и практической значимости работы, методологии и методах исследования, положениях, выносимых на защиту, степени достоверности результатов, апробации, публикациях, личном вкладе автора, а также структуре и объеме диссертации.

Первая глава посвящена обзору современного состояния методов экспериментальной механики для исследования процессов высокоскоростного деформирования и разрушения материалов различной физической природы. Отмечено, что наиболее популярным методом исследования процессов деформирования и разрушения материалов при скоростях деформации от 10^2 до 10^4 с⁻¹ в настоящее время является метод Кольского и его многочисленные модификации. Однако, существует ряд областей (испытания малопрочных материалов, высокотемпературные испытания, испытания на высокоскоростное растяжение) в которых необходимо

развитие указанного метода для получения более достоверного результата экспериментального исследования. Сильное влияние на результат обработки данных оказывает дисперсионный характер распространения упругих волн в мерных стержнях, эффекты трения. Для уменьшения эффекта дисперсии используют формирователи импульсов. Существует математический аппарат, позволяющий проводить синхронизацию импульсов, замеренных в мерных стержнях, с учетом дисперсии.

Во второй главе описаны основные тенденции в области математического моделирования вязкопластического деформирования материалов, выполнен обзор методов и подходов к идентификации моделей. Отмечено, что в настоящее время различными авторами в рамках теории течения предложено большое число формулировок зависимостей радиуса поверхности текучести от параметров нагружения (скорости деформации и температуры). Это свидетельствует о том, что закономерности поведения материалов при динамическом нагружении столь разнообразны, что не удастся описать их в рамках единой модели с приемлемой точностью во всем диапазоне изменения условий нагружения. Большинство предложенных моделей носят феноменологический характер, однако, в последнее время существует тенденция к росту популярности определяющих соотношений, имеющих физическую основу. Для идентификации применяют как прямой (аппроксимация набора кривых деформирования), так и обратный методы. И в том, и в другом случае результат поиска оптимального решения во многом зависит от формулировки целевой функции, характеризующей отклонение модели от данных эксперимента. Изложены основные принципы построения целевых функций. На примере задачи высокоскоростной резки металла показано, каким образом разброс данных в виде параметров математической модели для одного и того же материала полученных из разных источников может повлиять на результаты численного моделирования. Последний факт доказывает, что для получения достоверного результата численного моделирования необходимо проводить предварительно комплексное экспериментально-теоретическое исследование закономерностей деформирования и разрушения материала с целью получения достоверных определяющих соотношений.

Третья глава посвящена описанию аппаратно-программного комплекса, реализующего методологию экспериментально-теоретического подхода к исследованию поведения материалов при интенсивном высокоскоростном нагружении. В первом разделе приводится описание экспериментальных методов и средств на

базе техники мерных стержней, которые позволяют получать разнообразные характеристики широкого круга материалов в диапазоне скоростей деформации от 10^2 до 10^4 с⁻¹ и при температурах от -60 до 350 °С. Экспериментальный комплекс реализует практически все известные на сегодняшний день передовые методики испытаний (в том числе оригинальные модификации, предложенные автором) и регистрации. Для разгона ударников используются газовые пушки калибром 10, 20 и 57 мм с затворами золотникового типа и электрическими пневмоклапанами. Для передачи усилия на образец и регистрации отклика применяются сменные комплекты стержней диаметром 10, 20 и 60 мм из стали, титана и алюминиевого сплава Д16Т, а также мерные трубки. Основные схемы нагружения для определения характеристик материалов при разных видах напряженно-деформированного состояния (сжатие - а, растяжение - б, сдвиг - в, сжатие в ограничивающей обойме - г) по методу Кольского и его модификаций приводятся на рисунке 2. Синим цветом выделены образцы, стрелка указывает направление нагрузки. Указанные экспериментальные стенды позволяют также исследовать скоростную чувствительность характеристик прочности хрупких материалов при растяжении (методами прямого растяжения, раскалывания и откола в стержне), при срезе, а также определять динамический коэффициент трения для пар материалов методом динамической выпрессовки [2].

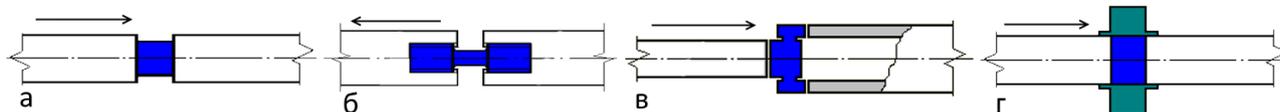


Рисунок 2 – Основные схемы нагружения образцов в системе мерных стержней

В соответствии с концепцией активного применения инструментов численного моделирования на всех этапах исследования, в том числе и при разработке новых схем испытаний и соответствующих экспериментальных установок, численный анализ использовался при разработке и оптимизации метода получения растягивающей нагрузки в стержне путем использования трубчатого ударника и газовой пушки соответствующей конструкции (рисунок 3). В данной схеме форма волны нагрузки зависит от конфигурации наковальни. Для выбора длины и диаметра наковальни, обеспечивающих форму волны, близкую к трапецевидной и максимальную амплитуду нагружающего импульса (наилучшее использование кинетической энергии ударника), применялось численное моделирование. Подобранная таким образом оптимальная конфигурация наковальни использовалась для

создания экспериментальной установки, которая была введена в эксплуатацию и применяется для получения данных о характеристиках материалов в условиях высокоскоростного растяжения.

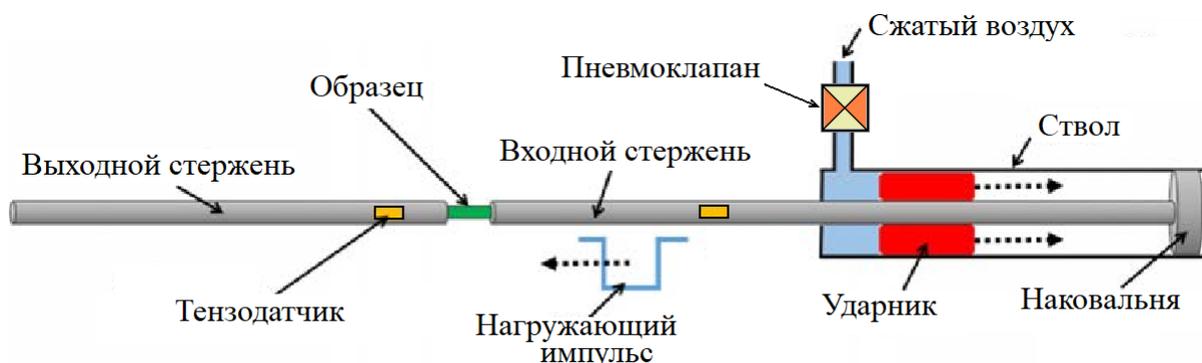


Рисунок 3 – Схема экспериментальной установки на растяжение

Предложен, численно проанализирован и апробирован новый оригинальный комбинированный метод, который предполагает совместное использование в одном эксперименте способа формирования импульса для получения постоянной скорости деформации, метода прямого удара и метода Кольского (рисунок 4) и позволяет в одном испытании определять динамические диаграммы двух разных материалов (рисунок 5а), либо одного материала, но в разных условиях (при разных скоростях деформации, рисунок 5б).

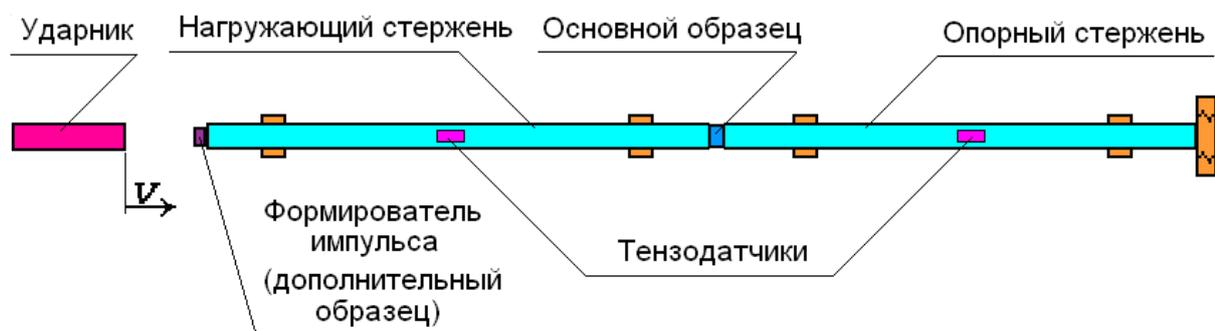


Рисунок 4 – Схема, реализующая комбинированный метод

На рисунке 5 представлены результаты применения предложенного комбинированного метода при динамических испытаниях. На рисунке 5а изображены диаграммы деформирования стали и алюминиевого сплава, на рисунке 5б – диаграммы алюминиевого сплава Д16, полученные в одном эксперименте при разных степенях и скоростях деформации. Представляется, что предложенный способ получит широкое распространение в практике динамических испытаний.

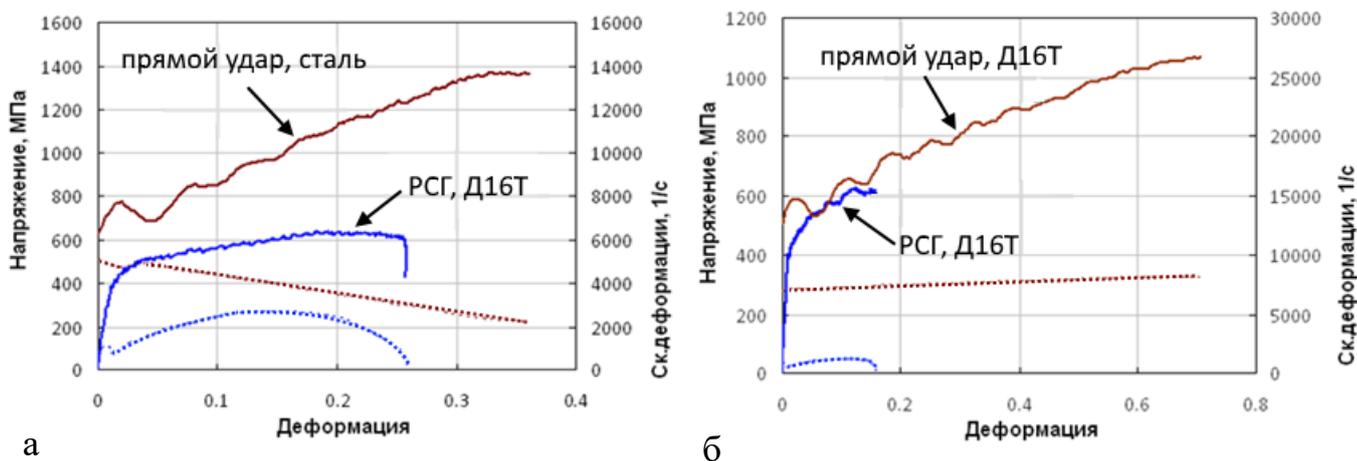


Рисунок 5 – Диаграммы деформирования – сплошные линии, пунктир – скорость деформации

Разработана система верификационных экспериментов для проверки математических моделей (рисунок б): модифицированный тест Тейлора, динамическое внедрение инденторов с конической и полусферической головными частями, высокоскоростное диаметрально сжатие вязкопластических образцов, которая также использует мерные стержни для регистрации временной зависимости силового отклика образцов на динамическое воздействие в процессе нагружения. Данная информация используется наряду с остаточной формой образцов после динамического воздействия при сравнении результатов виртуальных и натуральных экспериментов.

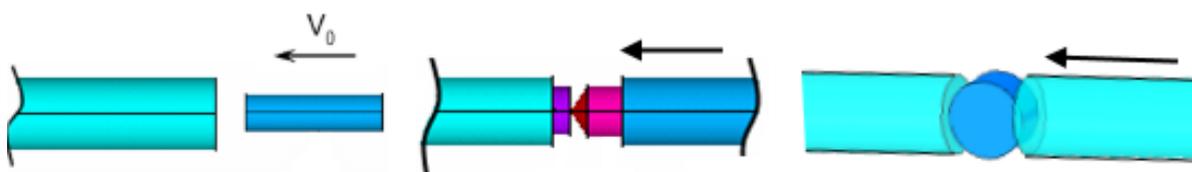


Рисунок б

Для проведения испытаний при повышенных температурах используется компактная печь трубчатой конструкции, которая надевается на мерные стержни в зоне установки образца. Для охлаждения образцов применяются пары жидкого азота. Для контроля температуры образца используется ХК-термопара.

Получение информации о динамическом деформировании и разрушении материалов является сложным многостадийным процессом, который включает планирование эксперимента, работу с измерительной аппаратурой (управление и съем информации), первичную обработку сигнала, синхронизацию импульсов во

времени, построение диаграмм по формулам Кольского, статистическую обработку данных, аппроксимацию экспериментальных зависимостей и накопление информации в локальном банке данных. Для облегчения этого процесса и снятия ряда рутинных операций с экспериментатора создан комплекс оригинальных авторских программ, сопровождающих движение информации на всех этапах исследования. Описанию программных средств посвящена вторая часть третьей главы.

Особенностью метода Кольского является то, что скорость деформации в эксперименте определяется откликом образца на силовое воздействие, т.е. для образцов одинакового размера, выполненных из разного материала, при одной и той же скорости ударника будут реализовываться разные условия по скорости деформации. Поскольку скорость ударника ограничена предпосылками методики (деформирование мерных стержней должно иметь упругий характер), для определения кривых деформирования в широком диапазоне изменения скоростей деформаций требуется использование образцов нескольких размеров. Для прогнозирования условий испытаний на этапе планирования эксперимента предложена простая расчетная методика, в основе которой лежат формулы Кольского для определения напряжений и деформаций образца по импульсам в мерных стержнях, условия динамического равновесия образца (равенство сил, действующих на него со стороны нагружающего и опорного мерного стержней), а также уравнение, связывающее напряжения, возникающие в образце, с его деформацией. Метод позволяет на основе данных о параметрах испытания (скорость, длина и материал ударника), параметрах установки (материал и диаметры мерных стержней), а также геометрических размерах образца и квазистатических данных о свойствах материала, из которого он изготовлен, получать оценку уровня импульсов деформации в мерных стержнях и реализуемых условий испытания (скорость деформации и достигаемые степени деформации).

Для накопления и обработки экспериментальных данных (построения динамических моделей поведения материалов) разработан и создан специальный программный инструментарий (рисунок 7), который позволяет хранить, систематизировать, визуализировать и аппроксимировать экспериментальные таблицы. Информация хранится в локальном банке данных в виде набора записей для различных материалов. Каждая запись представляет собой совокупность текстового описания, наборов скалярных и табличных данных, а также, набор аппроксимирующих зависимостей.

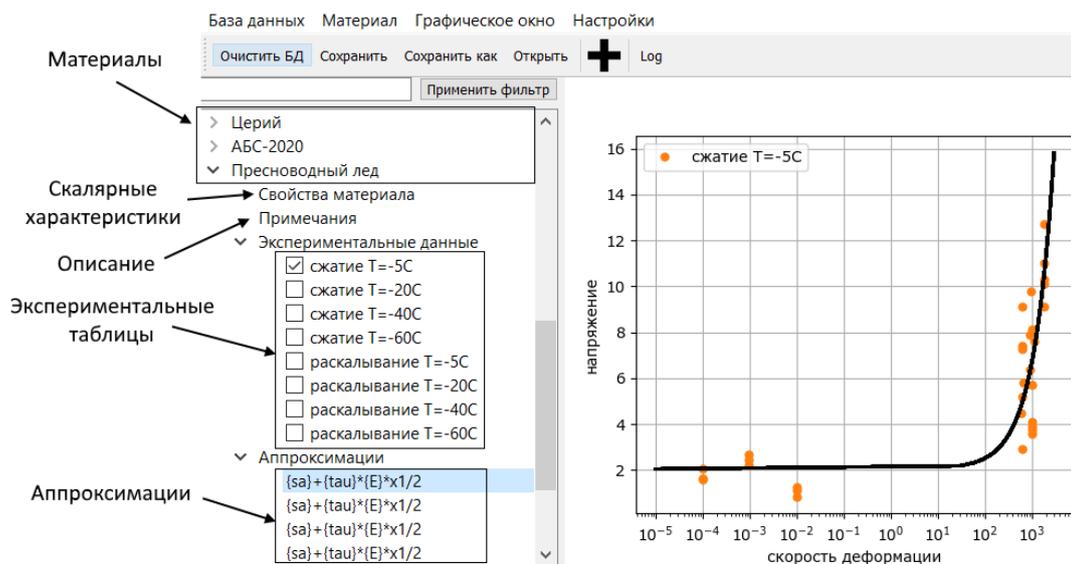


Рисунок 7

Аппроксимация экспериментальных таблиц производится произвольной функцией, которую пользователь вводит в специальном поле или выбирает из списка. Может выполняться одновременная аппроксимация нескольких наборов данных (например, несколько кривых деформирования, полученных при разных скоростях деформации и температурах). Один из столбцов таблицы является зависимой переменной (экспериментальной функцией), остальные представляют из себя независимые переменные. Параметры математической модели определяются методом наименьших квадратов в ходе решения оптимизационной задачи, минимизирующей невязку между данными и математической моделью.

Четвертая глава посвящена численному анализу некоторых экспериментальных схем и описанию разработанных в ходе диссертационного исследования экспериментально-расчетных методик, позволяющих определять характеристики материалов путем совместного использования средств экспериментального исследования и инструментов математического моделирования.

Практически все экспериментальные методы и схемы строятся на том, что исходными данными для определения характеристик материалов являются интегральные усилия, действующие на образец в процессе нагружения, и глобальные изменения размеров образца – удлинение или укорочение рабочей части. Предположение об однородности и равномерности полей деформаций и напряжений в рабочем объеме образца дает возможность от интегральных характеристик перейти к напряжениям и деформациям в точке образца. В ряде случаев однородность полей в образце может нарушаться в силу краевых эффектов, сил трения, инерции, либо

вследствие особенностей процессов, происходящих в материале в ходе нагружения. В таком случае интерпретация полученной в эксперименте информации затруднительна или вовсе невозможна без привлечения инструментов численного моделирования.

Эксперимент на растяжение образцов, изготовленных из вязкопластических материалов, занимает важное место в процессе исследования поведения металлов и сплавов. Из данного эксперимента помимо кривой деформирования определяют предельные характеристики прочности и пластичности (относительного удлинения δ , относительного сужения ψ при разрыве, а также временного сопротивления σ_B). Традиционные методы обработки информации, полученной в этом эксперименте, позволяют строить кривую деформирования лишь до момента образования шейки, который определяется из условия:

$$\frac{d\sigma_T}{d\varepsilon_T} = 0 \text{ или } \frac{d\sigma_e}{d\varepsilon_T} = \frac{\sigma_e}{1 + \varepsilon_T} \text{ или } \frac{d\sigma_e}{d\varepsilon_e} = \sigma_e$$

где ε_T и σ_T – технические деформация и напряжение, $\sigma_e(t) = \sigma_T(t) \cdot (1 + \varepsilon_T(t))$, $\varepsilon_e(t) = \ln(1 + \varepsilon_T(t))$.

При этом не используется участок диаграммы за точкой локализации, который по степени деформации может в два и более раза превышать интервал равномерного деформирования рабочей части образца.

Различными авторами предложен ряд методов, которые позволяют с использованием дополнительных данных о процессе локализации, а именно информации об изменении во времени радиуса минимального сечения образца a и радиуса кривизны контура шейки в точке минимального сечения R строить истинные диаграммы деформирования вплоть до момента разрыва (метод Бриджмена, Давиденкова-Спиридоновой, Малинина-Петросяна, Шепинского и др.)¹. Эти подходы разрабатывались для случая статического нагружения. С целью проверки применимости указанных методов для интерпретации данных динамического эксперимента проведен численный анализ процесса локализации деформации в испытаниях на высокоскоростное растяжение пластического материала. Виртуальные эксперименты проводились на образцах с базами 5 и 10 мм и диаметром 5 мм для двух

¹ Gromada M., Mishuris G., Öchsner A. Correction Formulae for the Stress Distribution in Round Tensile Specimens at Neck Presence // SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology Computational Mechanics, 2011, p. 1-89. DOI 10.1007/978-3-642-22134-7

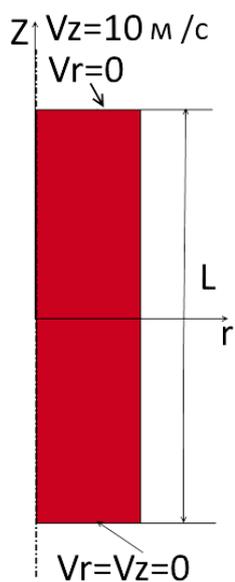


Рисунок 8

типов материалов (большое упрочнение и малое упрочнение). Малое пластическое упрочнение материала приводит к более выраженной локализации деформации и сокращению длительности этапа равномерного деформирования рабочей части образца. Постановка задачи показана на рисунке 8. В ходе численного эксперимента определялась история изменения интегральной силы, действующей на образец в осевом направлении (F_z), а также законы изменения радиуса минимального сечения a и радиуса кривизны контура шейки в точке минимального сечения R (рисунок 9) в процессе деформирования. Показано, что максимальная пластическая деформация в шейке хорошо согласуется с величиной, рассчитанной по следующей формуле: $\varepsilon_{true} = 2 \cdot \ln\left(\frac{r_0}{a}\right)$

здесь r_0 – исходный радиус рабочей части образца.

Затем в соответствии с разными методиками определялась истинная диаграмма деформирования. Относительное отклонение построенных таким образом диаграмм от кривой, заложенной в расчет, позволило провести сравнительную оценку точности разных методов. Оказалось, что все методы дают ошибку по истинному напряжению не более 10%. Наилучшую точность (в пределах 3%) обеспечила следующая эмпирическая модель:

$$\sigma_{eq} = \frac{F_z}{\pi a^2 \left(1 + \frac{a}{4R} + \frac{19a}{488R}\right)}.$$

Для случая, когда экспериментальные данные об изменении во времени величин a и R отсутствуют, реализована экспериментально-расчетная процедура определения кривой деформирования с учетом образования шейки², которая в качестве входных данных использует только экспериментально измеренную интегральную силу, действующую на образец в процессе растяжения $F_{экс}(t)$, а также временную зависимость скорости изменения длины рабочей части образца $V(t)$. В случае использования метода Кольского для проведения эксперимента на

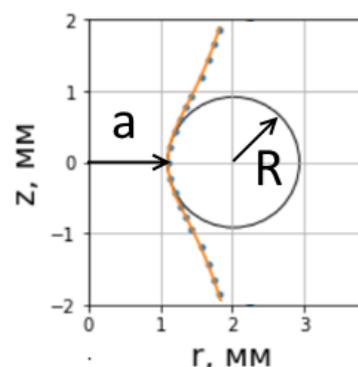


Рисунок 9

²В.Г. Баженов, В.К. Ломунов, С.Л. Осетров, Е.В. Павленкова. Экспериментально-расчетный метод исследования больших упругопластических деформаций цилиндрических оболочек при растяжении до разрыва и построение диаграмм деформирования при неоднородном НДС//ПМТФ, Т.54, №1(317), 2013, с.116-124

высокоскоростное растяжение образцов, входные данные могут быть рассчитаны по формулам:

$$V(t) = c_I \cdot (\varepsilon^I(t) - \varepsilon^R(t)) - c_T \varepsilon^T(t), F_{\text{экс}}(t) = E_T \cdot S_T \cdot \varepsilon^T(t)$$

здесь ε^I , ε^R и ε^T – падающий, отраженный и прошедший импульсы деформации, зарегистрированные в мерных стержнях, c_I и c_T – стержневые скорости звука в нагружающем и опорном стержнях соответственно, E_T и S_T – модуль Юнга и площадь поперечного сечения опорного стержня соответственно.

Определение истинной диаграммы происходит с использованием итерационной процедуры, которая заключается в последовательной корректировке кривой деформирования (заданной кусочно-линейной функцией) до получения совпадения интегральных сил, действующих на образец в реальном и виртуальном экспериментах. На каждой итерации кривая определяется набором точек $(\varepsilon_p^i, \sigma_m^i \cdot \frac{F_{\text{экс}}(t_i)}{F_{\text{расч}}(t_i)})$. Здесь ε_p^i – максимальная эффективная пластическая деформация, полученная в численном эксперименте σ_m^i – напряжение по Мизесу в соответствующей точке, индексы i отвечают за деление времени процесса деформирования на отдельные интервалы.

Приводятся примеры применения процедуры определения истинных кривых деформирования по данным динамического эксперимента для следующих случаев (рисунок 10): растяжение образца из меди М1 с малой базой (длина рабочей части порядка 5 мм, диаметр 6 мм), когда имеет место неоднородность напряжений и деформаций в рабочей части практически с начала процесса деформирования; растяжение образца из сплава ЭП-718 - практически равномерное деформирование рабочей части образца до разрыва; растяжение образца из алюминиевого сплава 1575 - наличие ярко-выраженной шейки. Результаты приводятся на рисунке 10.

Красные линии соответствуют классическому методу обработки эксперимента, справедливому до момента образования шейки, черные пунктирные линии – экспериментально-расчетной процедуре. Использование описанной процедуры позволило существенно расширить диапазон деформаций, в котором исследован характер упрочнения испытанных материалов: для меди с 25 до 65%, для ЭП-718 – с 25 до 37%, для 1575 – с 15 до 45%.

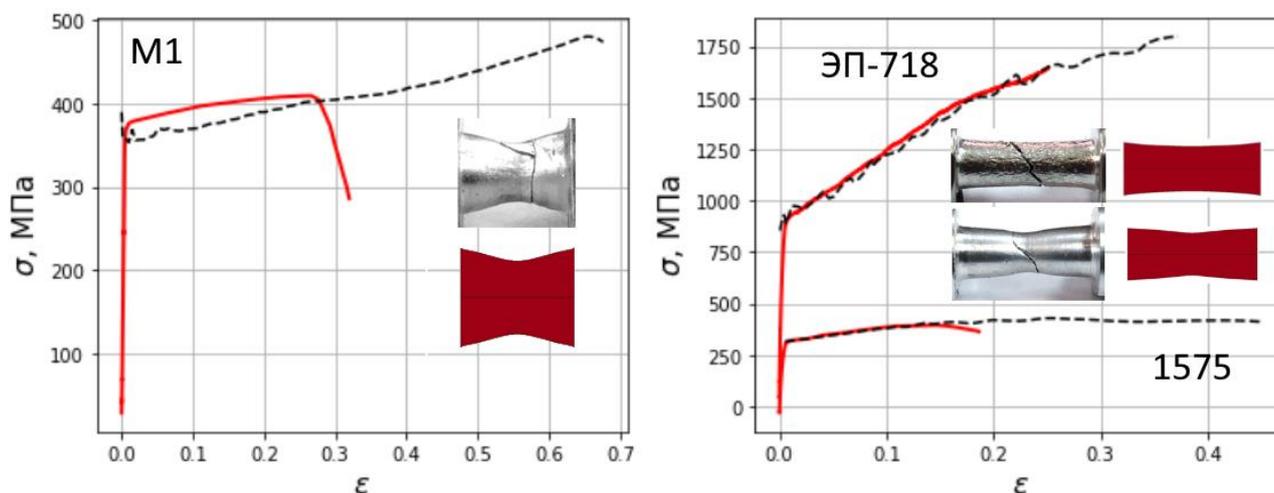


Рисунок 10

Для расширения диапазона исследования вязкопластического поведения материалов по скоростям деформаций (свыше 10^4 c^{-1}) используется тест Тейлора, который состоит в соударении упругопластического образца-цилиндра с недеформируемой преградой. Классическая процедура, предложенная Тейлором, позволяет оценить лишь начальный предел текучести с использованием информации о контуре образца после соударения с преградой. Для определения полной кривой деформационного упрочнения по данным указанного эксперимента реализована экспериментально-расчетная процедура, в которой параметры деформационного упрочнения определяются из условия совпадения форм образцов в натурном и виртуальном испытаниях (рисунок 11). Целевая функция задается следующим образом:

$$f = \sum_{j=1}^M w_j \sum_{i=1}^{N_j} \frac{|(r_{ji}^{exp})^2 - (r_{ji}^{calc})^2|}{N_j}.$$

здесь M – число экспериментов, w_j – весовой коэффициент $j^{\text{го}}$ эксперимента, N_j – количество точек на профиле образца из $j^{\text{го}}$ эксперимента, r_{ji}^{exp} – экспериментальный радиус образца в точке i , r_{ji}^{calc} – рассчитанный радиус образца в точке i . f характеризует сумму разностей площадей сечений образца в эксперименте и расчете и является функцией параметров модели материала. Для её минимизации и поиска оптимального набора параметров модели, используется симплекс метод Нелдера-Мида.

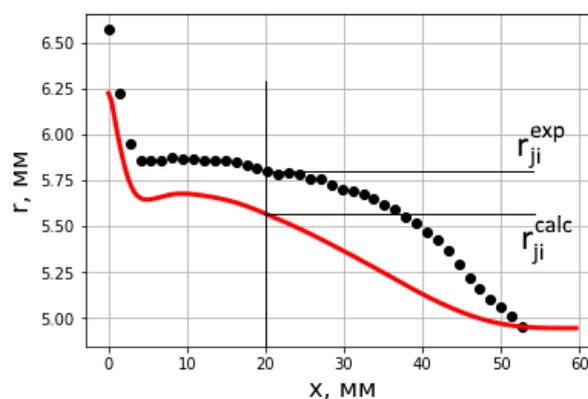


Рисунок 11

Сравнение кривых, полученных из теста Тейлора с диаграммами, определенными с использованием разрезного стержня Гопкинсона дано на рисунке 12. Такое сравнение вполне корректно, поскольку указанный материал в динамическом диапазоне нагружения, по результатам предварительного исследования, не показал заметной скоростной чувствительности. Пунктирная линия отвечает истории изменения скорости деформации в тесте Тейлора. Максимальное значение скорости деформации составило порядка 10^5 с^{-1} . На рисунке 13а показано сравнение экспериментальных (маркеры) и расчетных (сплошные линии) профилей образцов для меди c101 в состоянии поставки для разных скоростей соударения. Рисунок 13б иллюстрирует аналогичную информацию для меди c101 в состоянии отжига.

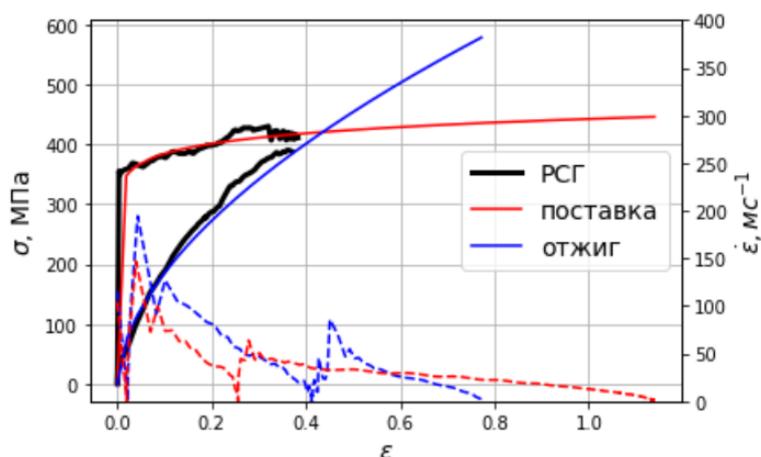


Рисунок 12

Пунктирная линия отвечает истории изменения скорости деформации в тесте Тейлора. Максимальное значение скорости деформации составило порядка 10^5 с^{-1} . На рисунке 13а показано сравнение экспериментальных (маркеры) и расчетных (сплошные линии) профилей образцов для меди c101 в состоянии поставки для разных скоростей соударения. Рисунок 13б иллюстрирует аналогичную информацию для меди c101 в состоянии отжига.

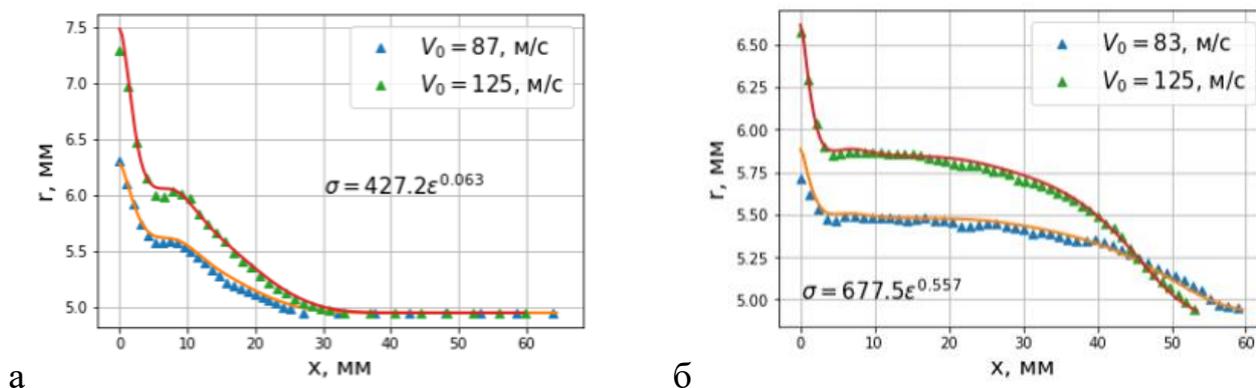


Рисунок 13

В конце четвертой главы приводится описание экспериментально-расчетной процедуры идентификации критерия вязкопластического разрушения Джонсона-Кука³, учитывающего влияние жесткости НДС η , скорости деформации $\dot{\epsilon}$ и температуры T на процесс накопления повреждений:

$$D = \int \frac{d\epsilon_p}{\epsilon^f} = 1, \text{ где } \epsilon^f = (d_1 + d_2 \exp(d_3 \eta)) \left(1 + d_4 \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right) \right) (1 + d_5 T^*)$$

³ Johnson GR, Cook WH. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures, and pressures. Eng. Fracture Mech. 1985; 21: 31-48.

Методика использует данные экспериментов на разрушение образцов при разных видах НДС. В качестве примера рассмотрен динамический разрыв осесимметричных образцов различных конфигураций (сплошных цилиндрических образцов и образцов с кольцевыми надрезами u-образной и v-образной формы, рисунок 14). История изменения параметров состояния $\eta(t)$, $\dot{\varepsilon}(t)$ и $T(t)$, а также история накопления пластической деформации $\varepsilon_p(t)$ определяются в ходе численных экспериментов. На

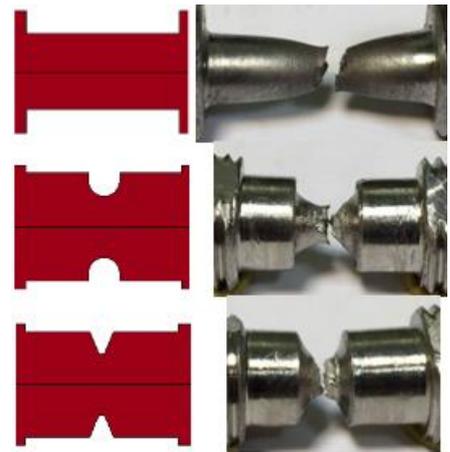


Рисунок 14

основании этих данных для каждого такого эксперимента рассчитывается степень поврежденности D^j в момент разрушения $(t^*)^j$, который определяется из соответствующего натурного испытания по данным с мерных стержней:

$$D^j(d_1, d_2, d_3, d_4, d_5) = \sum_{t=0}^{(t^*)^j} \frac{\Delta \varepsilon_p}{\varepsilon^f(\eta(t), \dot{\varepsilon}(t), T(t))}$$

Оптимальный набор параметров модели d_1-d_5 определяется из решения оптимизационной задачи: $\sum_{j=1}^N [D^j(d_1, \dots, d_5) - 1]^2 \xrightarrow{d_1, \dots, d_5} \min$, N —число испытаний.

что является выражением условия разрушения образцов в виртуальных экспериментах в те же времена, что и в реальных испытаниях.

С использованием описанной процедуры определены параметры критерия для трех сталей: Ст3, 08X18H10T и 20X13.

В **пятой главе** приводятся результаты экспериментального исследования динамического деформирования и разрушения некоторых материалов разного класса (вязкопластических металлов и сплавов, объемно сжимаемого пористого композита и нескольких хрупких сред), свойства которых представляют практический интерес. Титановые сплавы характеризуются лёгкостью и высокой прочностью в широком интервале температур, а также коррозионной стойкостью. В связи с этим данные сплавы нашли широкое применение в качестве конструкционных материалов в авиации, ракетостроении, химическом машиностроении. Сталь 09Г2С, благодаря своим высоким прочностным, деформационным и вязкостным свойствам, широко используется в качестве материала корпусов взрывозащитных камер. Основное применение сплав Д16 нашёл при изготовлении силовых элементов конструкций самолетов, кузовов автомобилей, труб и т.д. Огнезащитная вспучивающаяся композиция ФК-75 на основе фенольной смолы, огнестойкого наполнителя и

противотлеющей добавки предназначена для устройства огнепреградительных поясов, заделки кабельных проходов, огнезащиты транспортно-упаковочных комплектов (ТУК), сейфов. Изучение динамических свойств горных пород представляет значительный интерес в связи с рядом проблем гражданского характера: использование энергии удара и взрыва при добыче полезных ископаемых, строительстве каналов, анализ распространения сильных взрывных и сейсмических волн, их взаимодействия с надземными и подземными сооружениями. Прочностные свойства льда в динамическом диапазоне условий нагружения изучены слабо, однако данные о температурно-скоростных зависимостях предельных характеристик этого материала крайне востребованы в задачах ударного воздействия ледяных осколков на элементы конструкций, например для оценки прочности лопаток вентилятора газотурбинного двигателя при попадании в него ледяных гранул (градин).

Проведены экспериментальные исследования и получены температурно-скоростные зависимости кривых деформирования титановых сплавов ВТ6, ВТ8 (две поставки), ВТ20, а также стали 09Г2С и алюминиевого сплава Д16. Отмечается существенная влияние как скорости деформации, так и температуры на величину напряжения течения. Математически зависимости радиуса поверхности текучести от пластической деформации, скорости деформации и температуры для исследованных материалов описаны моделью Джонсона-Кука с различными формами скоростного множителя, а также модифицированной моделью:

$$\sigma = \sigma_A + B \cdot e^{-(\beta_0 - \beta_1 \ln \dot{\varepsilon})T} + A \cdot \varepsilon^n \cdot e^{-(\alpha_0 - \alpha_1 \ln \dot{\varepsilon})T}$$

Полученные параметры модели приводятся в таблице 1. Диапазон условий нагружения, в котором идентифицировались модели приводится в таблице 2. Верификация определяющих соотношений проводилась на базе эксперимента на динамическое внедрение конического и сферического инденторов в образцы из указанных материалов (рисунок 15), а также на базе модифицированного теста Тейлора.

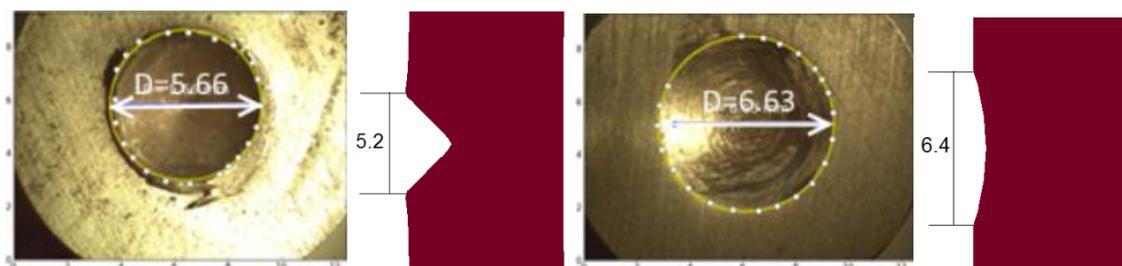


Рисунок 15

Относительное отклонение результатов виртуальных экспериментов от результатов натуральных испытаний для исследованных материалов находится в пределах 10%.

Таблица 1

Параметр	BT-6	BT-8 (2016)	BT-8 (2012)	BT-20	09Г2С	Д16	Размерность
σ_A	528	578	546	635	219	417	МПа
B	1895	1371	1539	1368	654	2779	МПа
β_0	0.0045	0.0025	0.0035	0.0039	0.0058	0.0319	-
β_1	$2.2 \cdot 10^{-4}$	$1.3 \cdot 10^{-4}$	$2.2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	0.0024	-
A	699	650	1237	1692	1987	1130	МПа
n	0.426	0.48	0.83	0.773	0.94	0.36	-
α_0	$-1.56 \cdot 10^{-4}$	$-3.1 \cdot 10^{-4}$	$2.55 \cdot 10^{-4}$	0.0014	$6 \cdot 10^{-4}$	0.0038	-
α_1	$4.97 \cdot 10^{-5}$	$-3.22 \cdot 10^{-5}$	$5.03 \cdot 10^{-5}$	$3.04 \cdot 10^{-5}$	$-1.8 \cdot 10^{-5}$	$6.1 \cdot 10^{-5}$	-

Таблица 2

Параметр	BT6	BT8(2016)	BT8(2012)	BT20
$\dot{\epsilon}, c^{-1}$	0.01-1600	0.01-2400	0.005-1800	0.005-2200
T, 0C	20-300	20-300	20-200	20-200

Проведены экспериментальные исследования высокоскоростного деформирования пористого композита ФК-75. Показано, что скорость деформации для данного материала не оказывает существенного влияния на кривую объемной сжимаемости (рисунок 16а). Данные, полученные из статического и динамического экспериментов использовались для построения модели материала. Модель верифицировалась на базе динамического сжатия композита в ограничивающей обойме в системе РСГ. Получено хорошее соответствие результатов натурального и виртуального экспериментов (импульсов деформации с мерных стержней, рисунок 16б).

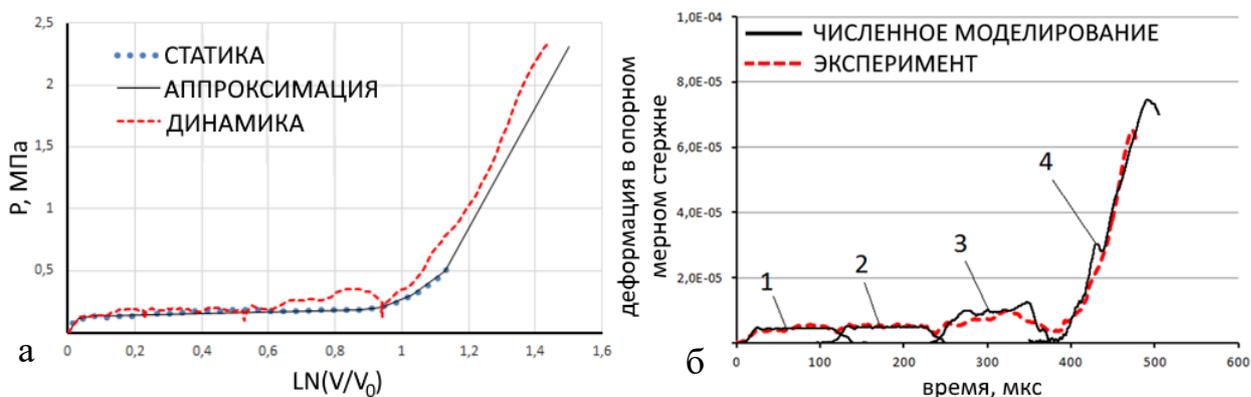


Рисунок 16

В ходе экспериментального исследования определены скоростные зависимости прочности при сжатии (рисунок 17) и растяжении (методом раскалывания, рисунок 18) для некоторых горных пород и бетонов. Бетоны и известняк испытывались в сухом состоянии (с), водонасыщенном состоянии (в), а также после замораживания в холодильной камере при температуре -15°C в течение двух дней (з). Согласно полученным экспериментальным данным, предельные напряжения для обоих методов испытаний увеличиваются с увеличением скорости деформации или скорости роста напряжений. Кроме того, степень упрочнения разных материалов с ростом скорости деформации оказывается различной. Обнаружено, что при квазистатических нагрузках наибольшую прочность показали замороженные материалы, а наименьшую – водонасыщенные. При динамических испытаниях более существенный рост предельных напряжений показали водонасыщенные материалы, а наименьший - замороженные.

Математически скоростные зависимости прочности описаны критерием инкубационного времени Морозова-Петрова: $\frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t \sigma(t') dt' \geq \sigma_c$.

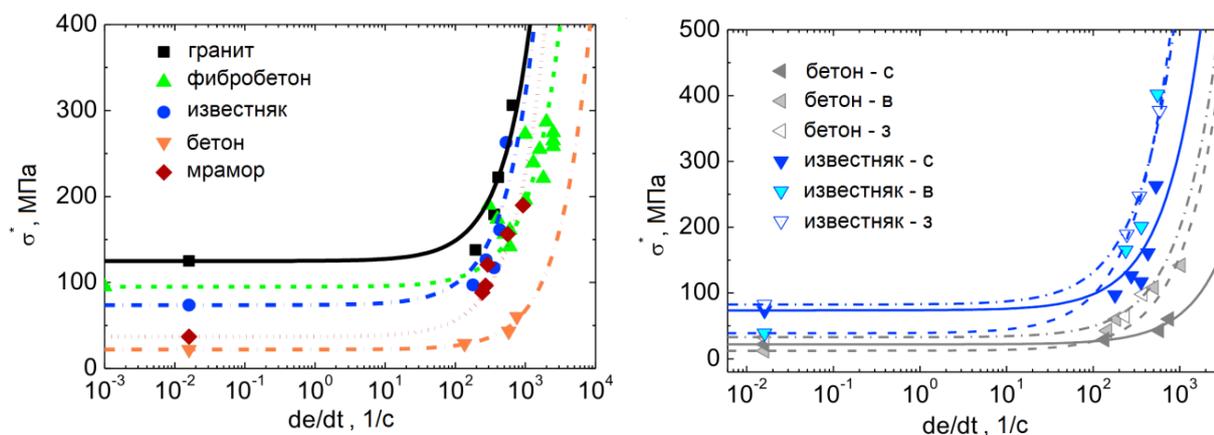


Рисунок 17 – Скор. зависимости предельных напряжений при сжатии

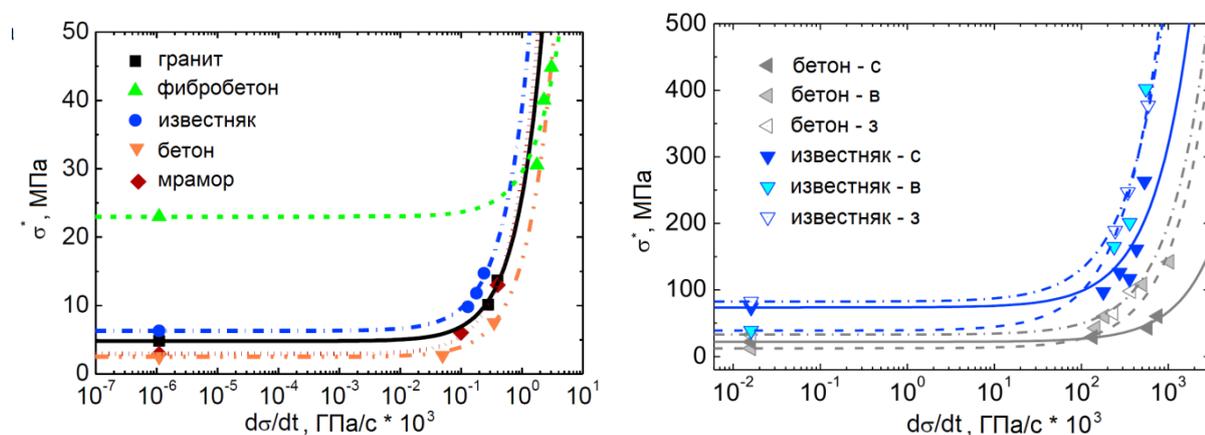


Рисунок 18 – Скор. зависимости предельных напряжений при раскалывании

Параметры модели инкубационного времени для исследованных материалов сведены в таблице 3. В ней σ_c^c - статическая прочность на сжатие; σ_c^t - статическая прочность на растяжение; τ^c - инкубационное время разрушения при сжатии; τ^t - инкубационное время разрушения при раскалывании.

Таблица 3

Материал	σ_c^c , МПа	σ_c^t , МПа	τ^c , мкс	τ^t , мкс
Габбро-диабаз	189	27.4	13	17
Гранит	125	4.8	40	42
Мрамор	37	2.9	69	51
Известняк сухой	74	6.3	68	65
Известняк водонасыщенный	39	5.1	109	54
Известняк замороженный	83	7.8	63	34
Фибробетон CARDIFRC	95	23	15	15
Бетон сухой	22	2.5	27	28
Бетон водонасыщенный	12	2.3	65	39
Бетон замороженный	33	8.9	59	21

Проведены испытания и получены температурно-скоростные зависимости предельных напряжений пресноводного льда при сжатии (рисунок 19а), растяжении (методом раскалывания, рисунок 19б) и срезе. Отмечено существенное влияние скорости деформации на характеристики прочности. Температура в исследованном диапазоне слабо влияет на предельное напряжение при сжатии. Прочность при раскалывании заметно возрастает при уменьшении температуры от -5 до -60 $^{\circ}\text{C}$. Отношение прочности при сжатии к прочности при раскалывании составило порядка 4.

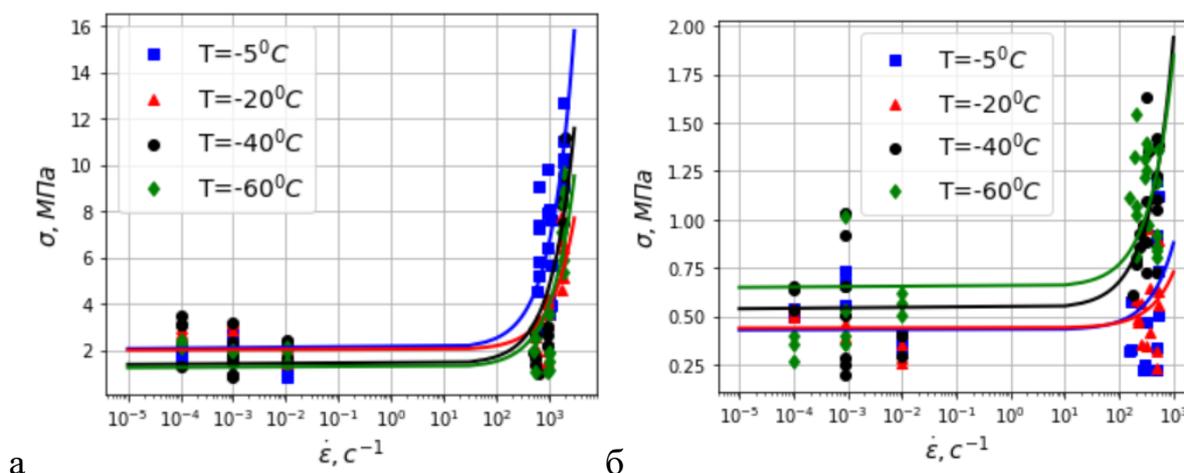


Рисунок 19 –Зависимости прочности пресноводного льда

Параметры модели инкубационного времени, определенные для льда, сведены в таблице 4. Получено, что при сжатии параметр модели, определяющий статическую прочность, несколько уменьшается с уменьшением температуры, при раскалывании – ситуация обратная, наблюдается небольшое увеличение этого параметра при изменении температуры от -5 до -60 °С.

Таблица 4

сжатие	T, °С	τ , мкс	σ_c , МПа	Раскалывание	T, °С	τ , мкс	σ_t , МПа
	-5	45.8	2.05		-5	4.5	0.43
	-20	19	1.99		-20	2.9	0.44
	-40	34	1.37		-40	14	0.54
	-60	27.6	1.23		-60	12	0.65

Проведены эксперименты по соударению образцов изо льда с титановыми пластинами толщиной 5 мм со скоростью порядка 330 м/с (рисунок 20). Измерены остаточные формы пластин и определены временные зависимости вертикального и горизонтального смещений верхней точки пластины во время удара. Эти данные могут быть использованы для верификации математических моделей поведения льда для задач соударения с элементами конструкций.

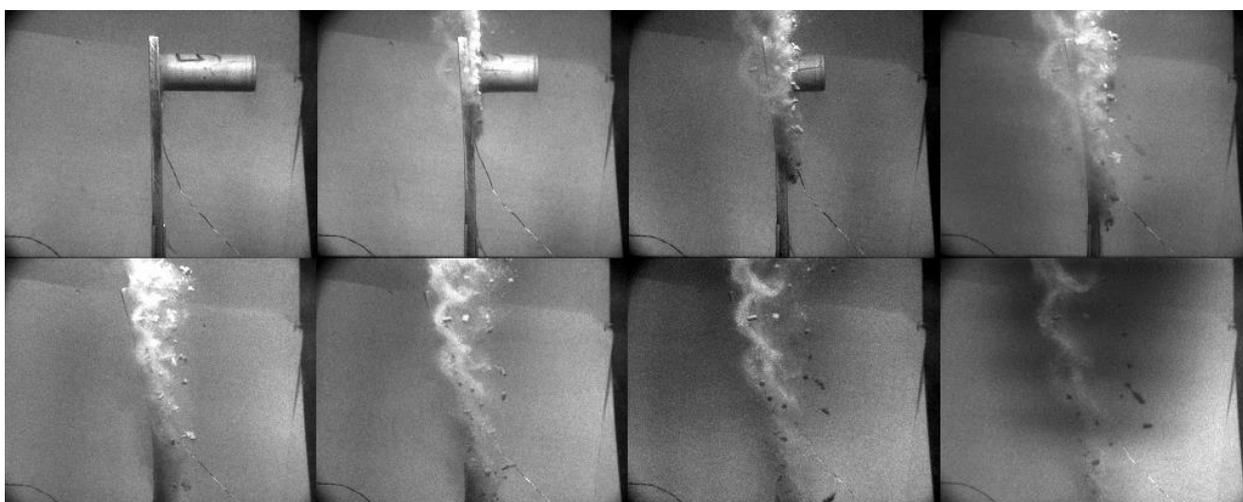


Рисунок 20 - Взаимодействие ударника с пластиной. Интервал между кадрами 50 мкс. Начало регистрации - в момент удара

В заключении сформулированы итоги выполненного исследования:

В диссертации на базе современных экспериментальных методов динамических испытаний и методов математического моделирования создан аппаратно-программный комплекс, впервые реализующий современный экспериментально-

теоретический подход к исследованию процессов деформирования и разрушения материалов при действии интенсивных динамических нагрузок. Для этого:

1. Развита аппаратно-программная база экспериментального стенда:
 - a. Развита экспериментальные методики, основанные на технике мерных стержней. Предложены и реализованы новые оригинальные модификации метода Кольского: метод прямого нагружения волной растяжения, методики испытаний на сдвиг (срез) и на динамическое трение, что позволило расширить класс исследуемых материалов и условий нагружения.
 - b. Впервые предложен оригинальный комбинированный метод динамических испытаний материалов, который позволил в одном эксперименте получать динамические диаграммы двух различных или одного материала при различных степенях и скоростях деформации, обеспечить практически постоянную скорость деформации в течение эксперимента.
 - c. Создан автоматизированный экспериментальный комплекс, включающий большой набор передовых экспериментальных схем (в том числе оригинальных авторских разработок), позволяющий исследовать температурно-скоростные зависимости широкого спектра характеристик (кривые деформирования, предельные характеристики прочности и пластичности, коэффициент трения и пр.) материалов различной физической природы.
 - d. Создано программное обеспечение, существенно упрощающее процесс экспериментального исследования путем автоматизации большей части рутинных операций: управление измерительной аппаратурой и съем информации, первичную обработку сигналов, синхронизацию импульсов во времени, расчет временных зависимостей деформации, напряжения и скорости деформации в образцах, статистическую обработку результатов экспериментов и определение параметров математических соотношений, аппроксимирующих экспериментальные данные.
 - e. Создан программный инструментарий для накопления информации в виде результатов динамического эксперимента и математических моделей материалов в локальной базе данных.

2. Выполнен численный анализ некоторых схем динамических испытаний:
- a. Впервые подробно проанализирован метод прямого удара, который позволяет проводить испытания при скоростях 10^4 с^{-1} и выше. Отмечено существенное влияние сил трения, которое приводит к неоднородности и неоднородности НДС образца.
 - b. Численно проанализировано влияние параметров наковальни на форму импульса нагрузки в новой экспериментальной схеме на прямое растяжение. Данный анализ позволил подобрать оптимальные размеры (длину и диаметр) наковальни для получения близкого к трапециевидному импульса растяжения с максимальной для заданной скорости ударника амплитудой нагрузки.
 - c. С использованием виртуальных испытаний (вычислительный эксперимент) выполнен сравнительный анализ методов построения истинных кривых деформирования в эксперименте на высокоскоростное растяжение пластических материалов с учетом образования шейки (методы Бриджмена, Давиденкова-Спиридоновой и др.). Показано, что истинная деформация в шейке достаточно точно определяется по формуле: $\varepsilon_{true} = 2 \cdot \ln\left(\frac{r_0}{a}\right)$; все методы позволяют определять эффективное напряжение в шейке с погрешностью менее 10%; оценка данной величины по эмпирической формуле $\sigma_{eq} = \frac{F_Z}{\pi a^2 \left(1 + \frac{a}{4R} + \frac{19a}{488R}\right)}$ дает наилучшее приближение истинной кривой деформирования (погрешность в пределах 3%).
 - d. Выполнен численный анализ динамического разрыва образцов с различными кольцевыми надрезами. Показано, что в сплошных цилиндрических образцах и образцах с U-образным надрезом разрушение начинается на оси образца, в образце с V-образным надрезом – в вершине надреза. Показано, что параметры, определяющие кинетику накопления поврежденности (вид напряженного состояния, скорость деформации и температура) в точке разрушения, могут существенно меняться в процессе нагружения, поэтому при идентификации критерия разрушения необходимо учитывать историю изменения этих параметров.

3. Реализовано и применено на практике несколько экспериментально-расчетных методов определения кривых деформирования и критериев разрушения вязко-пластических материалов:
 - a. Построены кривые деформирования меди М1 (до деформации 64%, против 25%, доступных для традиционного варианта обработки данных), сплава ЭП-718 (до деформации 37%, против 25%), алюминиевого сплава 1575 (до деформации 50%, против 15%) по данным эксперимента на высокоскоростное растяжение с учетом образования шейки.
 - b. Определены динамические кривые деформирования на базе данных экспериментов по методу Тейлора для отожженной меди и меди в состоянии поставки. Максимальная скорость деформации в указанных экспериментах достигала 10^5 с^{-1} .
 - c. Идентифицированы и верифицированы параметры модели разрушения Джонсона-Кука, учитывающей влияние вида напряженно деформированного состояния на процесс разрушения, для трех сталей: Ст3, 08Х18Н10Т и 20Х13.
4. Для ряда материалов различной физической природы получены новые данные базовых экспериментов, идентифицированы параметры математических моделей деформирования и разрушения. Проведена верификация полученных определяющих соотношений. Отмечено существенное влияние условий нагружения (скорость деформации и температура) на деформационные и прочностные характеристики материалов. Полученная информация послужила основой для формирования локальной базы данных по динамическим характеристикам материалов (медь, алюминиевые и титановые сплавы, стали, композиты, горные породы, лед и т.д.).

Дальнейшее развитие диссертационного исследования может быть связано с: анализом чувствительности результатов предложенных экспериментально-расчетных схем к ошибкам исходных данных; наполнением банка данных новой информацией; практическим использованием разработанных методик и программных средств для решения актуальных задач оценки прочности динамически нагруженных конструкций.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых изданиях, входящих в Перечень ВАК Минобрнауки России:

1. Bragov A.M., Igumnov L.A., Konstantinov A.Yu., Lomunov A.K., Antonov F.K., and Mossakovskii P.A. Impact Compressibility of a Poly(ethylene glycol)-Based Nanocomposite Fluid // *Technical Physics Letters*, 2014, Vol. 40, No. 10, pp. 943–945. ISSN 1063-7850
2. Bragov A.M., Konstantinov A.Yu. and Lomunov A.K. Determining dynamic friction using a modified Kolsky method // *Technical Physics Letters*, Vol.34, No 5, 2008, pp.439-440.
3. Bragov A.M., Lomunov A.K., Konstantinov A.Yu., Lamzin D.A. Modified Kolsky Method for Determining the Shear Strength of Brittle Materials // *Technical Physics Letters*, 2017, Vol.43, No 1, pp.130-132.
4. Bragov A.M., Konstantinov A.Yu., Lomunov A.K., Petrovtsev A.V. The dynamic properties of zirconium-containing magnesium alloy MA14-T1 // *Materials Physics and Mechanics*, 28 (2016) 101-105.
5. Konstantinov A. Yu. A modern experimental-theoretical approach to rationally designing novel technological objects // *Materials Physics and Mechanics*, 28 (2016) 106-109.
6. Абрамов А.В., Брагов А.М., Константинов А.Ю., Ломунов А.К., Сергеевичев И.В. Экспериментально-расчетный анализ высокоскоростного деформирования алюминиевого сплава АМг6 // *Проблемы прочности и пластичности. Межвуз.сб., вып.66. Н.Новгород, 2004, с.93-100.*
7. Брагов А.М., Жегалов Д.В., Константинов А.Ю., Кочетков А.В., Модин И.А., Савихин А.О. Экспериментальное исследование деформационных характеристик пакетов плетеных металлических сеток при динамическом и квазистатическом нагружении // *Вестник ПНИПУ. Механика. 2016. № 3. С. 252-262.*
8. Брагов А.М., Карихалоо Б., Константинов А.Ю., Ламзин Д.А., Ломунов А.К. Исследование механических свойств фибробетона с помощью методики Кольского и ее модификаций // *Вестник ННГУ, 2011, №4(1), с.123-129.*

9. Брагов А.М., Константинов А.Ю., Кочетков А.В., Модин И.А. Экспериментальное исследование динамических и квазистатических деформационных свойств пакетов плетеных сеток // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб., 2016, Вып. 78(3), с.245-251.
10. Брагов А.М., Константинов А.Ю., Лапшин Д.А., Новосельцева Н.А., Татарский А.М., Татарский Ю.Н., Ламзин Д.А. Применение комплексного подхода к решению задач прочности элеватора реакторной установки БН-800 для аварийного случая схода каретки // Проблемы прочности и пластичности, т. 80, №1, 2018 г. стр. 72-82.
11. Брагов А.М., Константинов А.Ю., Ломунов А.К. Модификация метода Кольского для определения динамического коэффициента трения // Вестник ННГУ, 2008, №6, с.125-130.
12. Брагов А. М., Константинов А. Ю., Ломунов А. К., Молев И. В. Экспериментально-расчетное исследование механических свойств бескислородной меди при высокоскоростной деформации // Приволжский научный журнал, 2012, №1, с. 7-16.
13. Брагов А.М., Константинов А.Ю., Медведкина М.В. Дисперсия волн в разрезных стержнях Гопкинсона при динамических испытаниях хрупких материалов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, 2011, № 6 (1), с. 158–162.
14. Брагов А.М., Константинов А.Ю., Ломунов А.К. Экспериментально-теоретическое изучение процессов высокоскоростного деформирования конструкционных материалов // Приволжский научный журнал, 2008, №3, с.27-33.
15. Брагов А.М., Ломунов А.К., Константинов А.Ю., Ламзин Д.А. Модификация метода Кольского для испытаний хрупких материалов на растяжение // Приволжский научный журнал, 2016 №2 с. 9-17.
16. Брагов А.М., Константинов А.Ю., Ломунов А.К., Ламзин Д.А. Исследование механических свойств мелкозернистого бетона при динамическом нагружении // Приволжский научный журнал, 2014, №4, с.11-21.

17. Брагов А.М., Ломунов А.К., Константинов А.Ю., Ламзин Д.А. Исследование энергоемкости мелкозернистых бетонов при динамическом нагружении // Приволжский научный журнал, 2015, №2, с.23-31.
18. Виленский О.Ю., Константинов А.Ю., Лапшин Д.А., Малыгин М.Г., Пристром С.А. Расчетный анализ прочности катковых опор при падении балки перекрытия на корпус реактора БН-600 // Проблемы прочности и пластичности, 2016, Вып. 78(4), с.359-367.
19. Колобов Ю.Р., Перевезенцев В.Н., Манохин С.С., Кудымова Ю.Е., Колобова А.Ю., Брагов А.М., Константинов А.Ю. Особенности формирования структуры и развития пластической деформации при динамическом нагружении крупнозернистого и наноструктурированного титана // Композиты и наноструктуры. 2016. Т. 8, № 1. С.16-28.
20. Константинов А.Ю. Идентификация модели деформирования меди для задач динамики удара // Вестник ННГУ, 1(2), 2014, стр. 256-261.
21. Ломакин Е.В., Брагов А.М., Константинов А.Ю., Колотников М.Е., Моссаковский П.А., Костырева Л.А., Антонов Ф.К. Моделирование поведения титанового сплава ВТ20 при ударном взаимодействии // Вестник ННГУ, 2011, №1, с.129-132.
22. Исаев С.А., Капустин С.А., Игумнов Л.А., Константинов А.Ю., Ломунов А.К. Концептуальные основы автоматизированного банка для информационного обеспечения расчетов прочности // Проблемы прочности и пластичности, 2016, Вып. 78(3), с.252-261.

Статьи в журналах, индексируемых в базах WebofScience и Scopus

23. Bragov A.M., Konstantinov A.Y., Lamzin D.A., Lomunov A.K., Karihaloo B.L., Petrov Y.V., Smirnov I.V. High-rate deformation and fracture of fiber reinforced concrete // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, Vol. 53, No. 6, pp. 926–933.

24. Balandin V.I., Balandin V.I., Bragov A.M., Igumnov L.A., Konstantinov A.Yu., Lomunov A.K. High-rate deformation and fracture of steel 09G2S // *Mechanics of Solids*, 2014 Vol.49, p.666-672.
25. Bragov A.M., Igumnov L.A., Kaidalov V.B., Konstantinov A.Yu., Lapshin D.A., Lomunov A.K., Mitenkov F.M. Experimental study and mathematical modeling of the behavior of St.3, 20Kh13, and 08Kh18N10T steels in wide ranges of strain rates and temperatures // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2015, Vol.56, No6, p.977-983.
26. Bragov A.M., Lomunov A.K., Abramov A.V., Konstantinov A.Yu., Sergeichev I.V., Braithwaite C., Proud W.G., Church P.D., Cullis I.G., Gould P. The dynamic response of Copper 101 under high-rate loading // *J.Phys. IV. France* 134, 2006, p. 311-315.
27. Abramov A.V., Bragov A.M., Lomunov A.K., Konstantinov A.Yu., Kruszka L., Sergeichev I.V. Experimental and numerical analysis of high strain rate behavior of aluminum alloys AMg-6 and D-16 // *J.Phys. IV. France* 134, 2006, p. 487-491.
28. Bragov A., Konstantinov A., Lomunov A., Sadyrin A., Sergeichev I., Kruszka L. Dynamic compressibility of high-porosity dampers of thermal and shock loadings: modeling and experiment // *International Journal of Modern Physics B*. 2008, Vol.22, No 9/11, pp.1183-1188.
29. Bragov A.M., Konstantinov A.Yu., Lomunov A.K., Sergeichev I.V., Filippov A.R.; Shmotin Yu.N. Integrated study of dynamical properties of AK4-1 aluminum alloy // *International Journal of Modern Physics B*. 2008, Vol.22, No 9/11, pp.1189-1194.
30. Bragov A., Konstantinov A., Lomunov A., Sergeichev I., Fedulov B. Experimental and numerical analysis of high strain rate response of Ti-6Al-4V titanium alloy // *Journal de Physique IV*. 2009, p.1465-1470.
31. Bragov A., Kruszka L., Lomunov A., Konstantinov A., Lamzin D., Filippov A. High-speed deformation and fracture of the dioxide-zirconium ceramics and zirconium alumina concrete // *The European Physical Journal. Web of Conferences* 2012, 26, 01055
32. Bragov A.M., Petrov Yu.V., Karihaloo B.L., Konstantinov A.Yu., Lamzin D.A., Lomunov A.K., Smirnov I.V. Dynamic strengths and toughness of an ultra high

- performance fibre reinforced concrete // *Engineering Fracture Mechanics* 110 (2013) p.477–488.
33. Bragov A., Igumnov L., Konstantinov A., Lomunov A., Filippov A., Shmotin Yu., Didenko R., Krundaeva A. Investigation of Strength Properties of Freshwater Ice // *The European Physical Journal. Web of Conferences* 94, 2015, 01070.
34. Smirnov I., Konstantinov A., Bragov A., Lomunov A., Petrov Yu. The structural–temporal approach to dynamic and quasi-static strength of rocks and concrete // *Procedia Structural Integrity* 6 (2017) 34–39.
35. Bragov A.M., Igumnov L.A., Karihaloo B.L., Konstantinov A.Yu., Lamzin D.A., Lomunov A.K., Petrov Yu.V., Smirnov I.V. The investigations of the dynamics of fracture of brittle media on the basis of experimental data and theoretical analysis // *Procedia Structural Integrity* 6 (2017) 161–167.
36. Bragov A.M., Konstantinov A.Y., Petrov Y.V., Evstifeev A.D. Structural-temporal approach for dynamic strength characterization of rock // *Materials Physics and Mechanics* 23 (2015) 61-65.
37. Bragov A.M., Petrov Yu.V., Karihaloo B.L., Konstantinov A.Yu., Lamzin D.A., Lomunov A.K, Smirnov I.V. Experimental–theoretical investigation of fiber reinforced concrete under dynamic loading // *Engineering a Concrete Future: Technology, Modelling & Construction: Proceedings of the International Symposium on The International Federation for Structural Concrete (fib) Tel-Aviv, 2013*, p.633-636.
38. Smirnov I., Petrov Yu., Volkov G., Abramian A., Verichev S., Bragov A., Konstantinov A., Lamzin D. Dynamic strength of limestone in terms of the incubation fracture time criterion // *Procedia Materials Science* 3 (2014) 778–783.
39. Balandin V.V., Bragov A.M., Igumnov L.A., Konstantinov A.Yu., Kotov V.L., Lomunov A.K. Dynamic deformation of soft soil media: Experimental studies and mathematical modeling // *Mechanics of Solids*, 2015 Volume 50, Issue 3, pp 286-293.

Подписано в печать 04.04.2018 г. Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 2. Заказ № 214. Тираж 100 экз.

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии ННГУ им. Н.И. Лобачевского.
603000, г. Нижний Новгород, ул. Б. Покровская, 37