

КОНСТАНТИНОВ Александр Юрьевич

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПО-
ВЕДЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПОД ДЕЙ-
СТВИЕМ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК**

Специальность 01.02.06
динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

НИЖНИЙ НОВГОРОД 2007

Работа выполнена в научно-исследовательском институте механики
Нижегородского государственного университета
им.Н.И.Лобачевского

Научный руководитель: старший научный сотрудник,
кандидат технических наук
А.К.Ломунов

Научный консультант: доктор технических наук,
профессор
А.М. Брагов

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор А.И.Садырин,
доктор технических наук
В.А. Пушков

Ведущая организация – институт Механики МГУ

Защита состоится " 27 " декабря 2007 года в 16
часов на заседании диссертационного совета Д 212.166.09 Нижего-
родского государственного университета им.Н.И.Лобачевского по
адресу: 603950 Нижний Новгород, ГСП-1000, пр-т Гагарина, 23,
корп.б.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной биб-
лиотеке ННГУ

Автореферат разослан « 26 » ноября 2007 года.

Ученый секретарь Совета
кандидат технических наук,
доцент
Б.В.Трухин

Общая характеристика работы.

Диссертация посвящена решению проблем комплексного экспериментально-теоретического исследования процессов высокоскоростного деформирования конструкционных материалов.

Актуальность темы

В настоящее время интерес к проблемам, связанным с изучением закономерностей процессов высокоскоростного деформирования и разрушения конструкционных материалов, значительно возрос во всем мире. Это связано с тем, что при создании новой техники в авиационной, автомобильной промышленности, ядерной энергетике уже на стадии проектирования необходимо учитывать возможные аварийные ситуации, сопровождающиеся интенсивными динамическими воздействиями ударного или взрывного характера на конструкции и их элементы. Интерес к этим проблемам вызывается также развитием ряда технологических процессов высокоскоростной обработки металлов давлением (взрывная штамповка, непрерывная и бесконечная прокатка).

В связи с развитием численных методов решения сложных двумерных и трехмерных задач динамики деформируемого твердого тела, вычислительный эксперимент из-за его относительной дешевизны стал неотъемлемой частью проектирования ответственных изделий новой техники.

В последние годы для расчета напряженно-деформированного состояния и прочности конструкций в подобных ситуациях широко используются такие вычислительные комплексы как ANSYS, LS-DYNA, ABAQUS, «Динамика-2» и т.д. Одной из важнейших составляющих частей этих комплексов, определяющих достоверность проводимых расчетов, являются используемые в них определяющие соотношения (математические модели поведения) и критерии разрушения. Основным требованием к ним является достоверность и возможность учета влияния на поведение материала многих факторов, таких как скорость деформации, температура, давление и т.д. В настоящее время в известных вычислительных комплексах широко используют теории течения, где в качестве условия текучести используется поверхность Мизеса, радиус которой описывается соотношениями Джонсона-Кука, Зерилли-Армстронга, Купера-Саймондса и рядом других. Для оснащения моделей поведения и критериев разрушения необходимыми параметрами и константами требуется обширная база по динамическим свойствам материалов.

Кроме того, для проверки адекватности применяемых моделей необходимы разработки некоторых тестовых натуральных экспериментов. Однако, как показывает анализ существующего положения в области высокоскоростной деформации конструкционных материалов, большинство работ посвящено либо только экспериментальным, либо только теоретическим исследованиям, в то время как для решения проблем высокоскоростной деформации материалов и конструкций необходим комплексный экспериментально-теоретический подход, сочетающий экспериментальные исследования, математическое моделирование и численный эксперимент. Поэтому систематическая разработка методов и схем, позволяющих реализовать подобный подход, является на сегодняшний день востребованной, актуальной и обоснованной.

Цель работы состоит в комплексном экспериментально-теоретическом изучении процессов высокоскоростного деформирования и разрушения некоторых конструкционных материалов при скоростях деформации $\sim 5 \cdot 10^2 \div 1 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$.

Научная новизна.

- Развита существующий в лаборатории динамических испытаний НИИмеханики ННГУ экспериментальный комплекс, путем использования в его составе современных измерительных систем National Instruments и создания программ, позволяющих осуществлять регистрацию, обработку, в том числе статистическую, экспериментальной информации.
- Предложены новые методики для определения динамических диаграмм деформирования при сдвиге, динамической твердости и трещиностойкости конструкционных материалов, реализованные в рамках метода Кольского.
- Проведены динамические испытания и получены механические свойства и их зависимости от скорости деформации в диапазоне $5 \cdot 10^2 \div 10^4 \text{ с}^{-1}$ для ряда конструкционных сплавов. С использованием полученных данных определены параметры и константы наиболее распространенных определяющих соотношений (материальных функций) теории течения с изотропным упрочнением.
- Реализована система тестовых экспериментов, которая позволяет осуществлять верификацию моделей деформирования, используемых в численных комплексах расчета задач динамики конструкций и их элементов.

- Разработана и численно проанализирована¹ методика определения динамического коэффициента трения и впервые определены его значения для пар трения АК-4 – ВТ-6 и ВТ-6 – ВТ-6.

Практическая ценность.

Результаты выполненных исследований в виде конкретных данных по динамическим свойствам используются в Федеральных Ядерных центрах (ВНИИЭФ, ВНИИТФ и НПО «Сатурн») при расчетах напряженно-деформированного состояния и прочности объектов новой техники, испытывающей интенсивные кратковременные воздействия.

Достоверность полученных результатов и выводов обеспечивается выбором современных методов исследования динамических свойств материалов, их тщательным анализом с целью выявления основных эффектов, влияющих на полученные результаты, совпадением полученных в работе результатов с данными зарубежных и отечественных исследователей.

Основные положения, представляемые к защите:

1. Автоматизация на базе современной измерительной системы National Instruments экспериментального комплекса, позволяющего определять основные динамические свойства конструкционных материалов при растяжении, сжатии, сдвиге.
2. Разработанные и реализованные методики для верификации моделей упруго-пластического поведения конструкционных материалов: модифицированный тест Тейлора, испытание по методу прямого удара и эксперимент на динамическое внедрение.
3. Результаты численного анализа экспериментальной схемы, представляющей модификацию метода Кольского для изучения поведения материалов в условиях ударного растяжения, в том числе образцов с кольцевым надрезом.
4. Реализованные на базе метода Кольского новые модификации для определения характеристик трещиностойкости при растяжении цилиндрических образцов с кольцевым надрезом, а также при трехточечном изгибе балки, ослабленной надрезом.

¹ Численное моделирование процессов высокоскоростного деформирования в работе проводилось с использованием ПП LS-DYNA. Автор выражает глубокую благодарность Абрамову А.В. (ОВЦ «Стрела») за помощь в проведении расчетов.

5. Опытные данные по механическим свойствам ряда металлов и сплавов, полученные при скоростях деформации $5 \cdot 10^2 \div 10^4 \text{ c}^{-1}$, и определенные на их основании параметры и константы материальных функций, в форме соотношений Джонсона-Кука, Купера-Саймондса и др., верификация которых осуществлялась путем сравнения результатов натуральных экспериментов и численного моделирования.
6. Новая методика исследования динамического коэффициента трения на основе метода Кольского и впервые полученные с её помощью опытные данные по динамическому коэффициенту трения для пар материалов АК-4 – ВТ-6 и ВТ-6 – ВТ-6.

Работа выполнена по программам и грантам:

1. Грант РФФИ: 04-01-00454а, 07-01-00257а
2. Грант ведущие научные школы РФ № НШ-1136.2003.8
Апробация работы. Результаты работы докладывались на конференциях и симпозиумах:
 - Всероссийская научная конференция «Волновая динамика машин и конструкций» (Нижний Новгород, 1-5 июня 2004)
 - XIII международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов 2006» (Москва, МГУ им. М.В.Ломоносова, 12-15 апреля 2006г.)
 - 11-я Нижегородская сессия молодых ученых (технические науки). («Татинец», 12-16 февраля 2006 г.).
 - IX Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике. (Нижний Новгород, 22-28 августа 2006 г.).
 - «VII Харитоновские тематические научные чтения». Международная конференция «Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны». (Саров, ВНИИЭФ, 14-18 марта 2005г.).
 - «VIII Харитоновские научные чтения». (Саров, ВНИИЭФ, 21-24 марта 2006г.).
 - EURODYMAT 2006. 8th INTERNATIONAL CONFERENCE ON MECHANICAL AND PHYSICAL BEHAVIOUR OF MATERIALS UNDER DYNAMIC LOADING. (11-15 сентября, 2006, Dijon, Франция).
 - Всероссийская научно-техническая конференция “Фундаментальные проблемы машиноведения: Новые технологии и материалы”, посвященная 20-летию Нижегородского филиала Инсти-

тута машиноведения им.А.А.Благоднравова РАН, Н.Новгород, 28-30 ноября 2006г.

– Международная конференция IX Харитоновские тематические научные чтения. Саров, 12-16 марта 2007 г.

Публикации. Основные результаты исследований опубликованы в 5 научных статьях и 9 тезисах.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы. Работа содержит 144 страниц печатного текста, 172 рисунков, 9 таблиц; список литературы включает 221 наименования.

Содержание работы.

Во введении обоснована актуальность проблемы, ее научная новизна и практическая значимость, сформулированы цели работы. Отмечено, что разработке методов определения динамических характеристик конструкционных материалов посвящены работы Н.Н.Давиденкова, Д.Даффи, Р.Дэвиса, Ф.Ф.Витмана и Н.А.Златина, А.А.Ильюшина и В.С.Ленского, Г.Тейлора, Г.Кольского, Д.Кэмпбелла, В.А.Степанова и др. Результаты систематических исследований процессов высокоскоростной деформации различных материалов представлены в работах К. Альбертини, А.М. Брагова, Р.Грея, А.К. Ломунова, В.Пруда, С.А.Новикова, Я.Клепачко, Д.Филда и др. В работах Ф.Зерилли и Р.Армстронга, Г.Джонсона, В.Кука, Я.Клепачко, Д.Штейнберга и др. предложены определяющие соотношения, позволяющие моделировать пластическое поведение материалов в широком диапазоне скоростей деформаций. Идентификации и верификации определяющих соотношений посвящены труды Г.Тейлора, В.Янга, В.Рула, М.Мейерса, Г.Джонсона, А.Гавруса, Дж.Роха и др. Как показывают регулярно проводимые конференции и симпозиумы по высокоскоростной деформации (EURODYMAT и др.), интерес к данной проблеме не ослабевает, что вызвано как появлением новых материалов, так и усовершенствованием численных методов, позволяющих использовать все более сложные модели поведения, что в свою очередь приводит к необходимости разработки новых экспериментальных методов, для оснащения их необходимыми параметрами.

В первой главе проведен анализ современного состояния проблемы экспериментально-теоретических исследований процессов

высокоскоростного деформирования конструкционных материалов. Рассмотрены и проанализированы модели, описывающие поведение металлов, подверженных ударному нагружению, методы динамических испытаний, получившие наибольшее развитие, способы определения параметров и констант, входящих в определяющие соотношения теории пластичности, а также методы верификации этих соотношений.

Отмечено, что чаще всего в современных пакетах численного моделирования (ABAQUS, LS-DYNA и т.д.) для описания пластического поведения материала используется поверхность текучести Мизеса с изотропным упрочнением, радиус которой зависит от мгновенных значений пластической деформации ε^p , скорости деформации $\dot{\varepsilon}^p$, температуры T и т.д.: $\frac{3}{2}s_{ij}s_{ij} = \sigma^2(\varepsilon^p, \dot{\varepsilon}^p, T)$, где s_{ij} - компоненты девиатора напряжений. Отмечено, что основное внимание уделяется определению вида функциональной зависимости $\sigma(\varepsilon^p, \dot{\varepsilon}^p, T)$. В настоящее время наибольшее распространение получил феноменологический подход построения определяющих соотношений, основанных на полученных в эксперименте закономерностях. В данном случае, для описания влияния температуры, скорости деформации и т.д. на радиус поверхности текучести используются математические аппроксимации экспериментальных данных, которые в научной литературе у нас в стране и за рубежом носят названия: материальных функций, определяющих соотношений, моделей деформирования и т.п.

Проведен анализ наиболее часто используемых определяющих соотношений теории пластичности и рассмотрены основные методы идентификации и верификации этих соотношений.

На сегодняшний день существует ряд экспериментальных методик, позволяющих исследовать поведение материала в условиях динамического нагружения. Среди них можно выделить: копровые испытания, методику раздачи кольцевых образцов, тест Тейлора, метод Кольского и его модификации.

Существенными недостатками копровых испытаний являются сложности, связанные с заданием, поддержанием и контролем в процессе испытания условия $\dot{\varepsilon} \approx const$.

При раздаче кольцевого образца под действием симметричного импульсного радиального давления в тонком кольце реализуются

условия одноосного напряженного состояния, а в трубчатом образце при высоких скоростях деформации - условия плоской деформации. При свободной раздаче кольцевых образцов в основном регистрируют только радиальное смещение, однако, для вычисления напряжений требуется процедура двукратного дифференцирования полученной экспериментальной кривой, при которой может возникнуть существенная погрешность. В связи с этим методика раздачи кольца пока не получила широкого распространения.

Метод Тейлора из-за простоты в реализации широко используется для определения динамического предела текучести материалов, поведение которых близко к идеально-пластическому. Отмечается, что в настоящее время этот метод является базовым для верификации уравнений состояния и моделей поведения материала на основе сравнения текущей или конечной формы образца. Как правило, для регистрации текущего формоизменения образца при соударении применяется высокоскоростная киносъемка.

Наибольшее распространение среди методов динамических испытаний получил метод Кольского с использованием разрезного стержня Гопкинсона (РСГ), ввиду своей хорошей теоретической обоснованности и простоты реализации. Эта методика позволяет проводить испытания широкого круга материалов в диапазоне скоростей деформации $10^2 \div 10^4 \text{ с}^{-1}$.

К настоящему времени кроме основной схемы на сжатие образца разработаны другие варианты РСГ (растягивающий, крутильный, двухосный и т.д.).

Отмечено, что в процессах ударного взаимодействия, а также в ряде технологических высокоскоростных процессов обработки металлов давлением, важное значение играет трение. Известно несколько работ, в которых предприняты попытки измерения динамического коэффициента трения. Отмечено, что методики определения динамического коэффициента трения требуют дальнейшего развития.

В конце главы на основании литературного обзора сформулированы цели работы.

Во второй главе приводятся описания новых методик испытаний, основанных на известном методе Кольского. Для определения динамических диаграмм деформирования конструкционных материалов при сдвиге предложена и реализована модификация метода Кольского на кольцевой сдвиг, в которой образец специальной формы 1 нагружается в системе «нагружающий стержень 2 – опорная трубка 3» (рис.1).

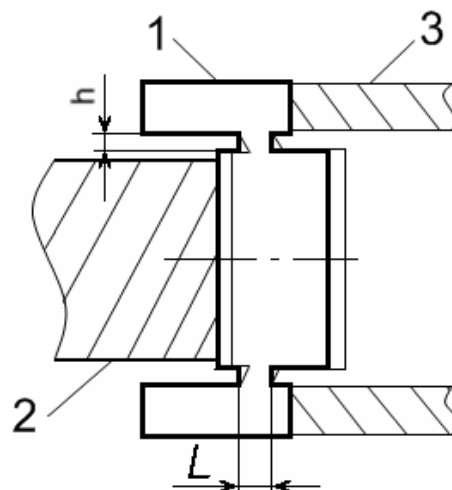


Рис.1 – Испытания на кольцевой сдвиг

С целью определения характеристик трещиностойкости предложены и реализованы две экспериментальные схемы, позволяющие определять критическую величину динамического коэффициента интенсивности напряжений. Первая схема аналогична модификации метода Кольского на растяжение, однако при этом используются образцы, ослабленные кольцевым надрезом. Во втором виде испытаний коэффициент интенсивности напряжений определяется при трехточечном изгибе балки с надрезом. Последняя схема представляет собой также модификацию метода Кольского и использует три мерных стержня (один нагружающий и два опорных).

Для определения динамического предела текучести при скорости деформации $\sim 10^4 \text{ с}^{-1}$ и верификации материальных функций, константы которых найдены по результатам испытаний по методу РСГ, был реализован модифицированный тест Тейлора. Основное его отличие от классической схемы заключается в том, что короткий стержень-образец из исследуемого материала наносит удар не по жесткой преграде, а по упругому мерному стержню большего, чем образец диаметра. При этом в последнем возбуждается упругая волна $\varepsilon^I(t)$, которая регистрируется при помощи тензорезисторов. Подобная схема позволяет помимо распределения остаточных деформаций в образце получить временную зависимость усилия, действующего на образец со стороны опорного стержня в процессе удара.

Для оценки сопротивления материалов динамическому внедрению и определения динамической твердости предложена методика,

основанная на методе Кольского с использованием РСГ. Экспериментальная установка аналогична установке для испытаний материалов на сжатие. Отличие состоит в том, что между нагружающим стержнем и образцом устанавливается твердосплавный сменный индентор с конической или сферической головной частью (рис.2). В качестве материала индентора используются твердые сплавы типа ВК-2.

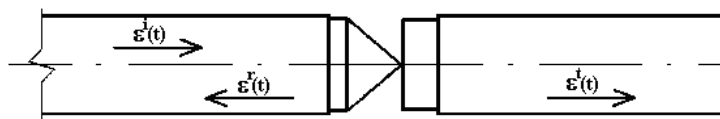


Рис.2

Регистрация падающего $\varepsilon^i(t)$ и отраженного $\varepsilon^r(t)$ импульсов позволяет на основании одномерной теории распространения упругих волн определить глубину внедрения индентора в образец:

$$h(t) = c \int_0^t [\varepsilon^i(t) - \varepsilon^r(t)] \cdot dt$$

Данное соотношение в случае известной геометрии индентора позволяет произвести вычисление площади $S(t)$ поверхности отпечатка в любой момент времени приложения нагрузки.

Импульс $\varepsilon^t(t)$ в опорном стержне позволяет определить процесс развития во времени усилия $F(t)$, возникающего при внедрении индентора в образец: $F(t) = EA\varepsilon^t(t)$, где E – модуль Юнга и A – площадь поперечного сечения опорного стержня.

На основании приведенных выше зависимостей можно определить динамическую твердость $HD(t)$, как отношение действующей силы сопротивления индентору к площади отпечатка:

$$HD(t) = \frac{F(t)}{S(t)}$$

Таким образом, имеется возможность вычислить величину HD в любой момент времени процесса индентирования. Данный эксперимент применялся также для верификации определяющих соотношений путем сравнения экспериментальной и расчетной сил сопротивления внедрению.

В работах В.Пракаша, Р.Клифтона, К.Огавы, Х.Эспинозы, Р.Фенга предложены методы определения характеристик динамического трения. Однако, все эти методы достаточно громоздки и сложны, требуют привлечения вычислительного эксперимента (численного моделирования процесса). В работе предложен простой способ определения динамического коэффициента трения с

использованием модифицированной схемы метода Кольского. Для экспериментов использовалось напряженное соединение (тугая посадка) двух деталей (штулки-сердечника диаметром 14 мм и охватывающей обоймы диаметром 20 мм, длина сборки составляла 15 мм) с гарантированным натягом, величина которого изменялась от 0.015 до 0.025 мм. Натяг был реализован с использованием термической посадки. Из теории упругости известно, что при тугой посадке с известным натягом на контактной поверхности между сопрягаемыми деталями развивается вполне определенное статическое давление, зависящее от величины натяга. Сборка “сердечник-обойма” размещается между торцами мерного стержня и опорной трубки. При испытаниях сборка нагружалась в системе РСГ, при этом сердечник выдавливался из обоймы. Наклеенные на опорную трубку тензодатчики фиксировали усилие выдавливания, что в совокупности с известным усилием посадки, позволяет определить динамический коэффициент трения.

Третья глава посвящена численному анализу некоторых экспериментальных схем динамических испытаний.

В разделе 3.1 анализируется модификация РСГ для экспериментального исследования поведения материалов в условиях ударного растяжения. Известно, что при испытаниях на растяжение длина рабочей части образца должна быть определенной величины, такой чтобы уменьшить влияние на однородность НДС в рабочей области резьбовой части и условий закрепления в испытательной машине. Для испытаний по методу Кольского с использованием РСГ на одноосное сжатие существуют конкретные рекомендации по выбору соотношения длины и диаметра. Однако, вопрос о выборе оптимальной базы образца, используемого в схеме на растяжение, до сих пор остается открытым. В связи с этим в работе проведен экспериментальный и численный анализ влияния длины рабочей части образца на получаемые механические свойства.

Результаты экспериментальных и численных исследований процесса растяжения образцов с длиной рабочей части 5, 10 и 15 мм показали, что образцы длиной 10 мм деформируются в условиях однородного напряженного состояния. Кроме того, численный анализ показал (рис.3), что до образования шейки показатель жесткости напряженного состояния (НС), определяемый отношением $(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / \sigma_i$, равен единице, т.е. процесс нагружения образца происходит в условиях одноосного растягивающего напряжения. По-

сле образования шейки начинается процесс разрушения, причем на оси образца и в прилегающих к ней областях начинает преобладать объемное напряженное состояние с главными растягивающими напряжениями, тогда как ближе к свободной поверхности образца показатель жесткости НС остается близким к единице, т.е. в прилегающих к свободной поверхности слоях деформирование и разрушение происходит под действием преимущественно осевого напряжения. Такие выводы качественно соответствуют известным результатам, полученным в работах Н.Н.Давиденкова, П.Бриджмена, Д.Каррена и др.

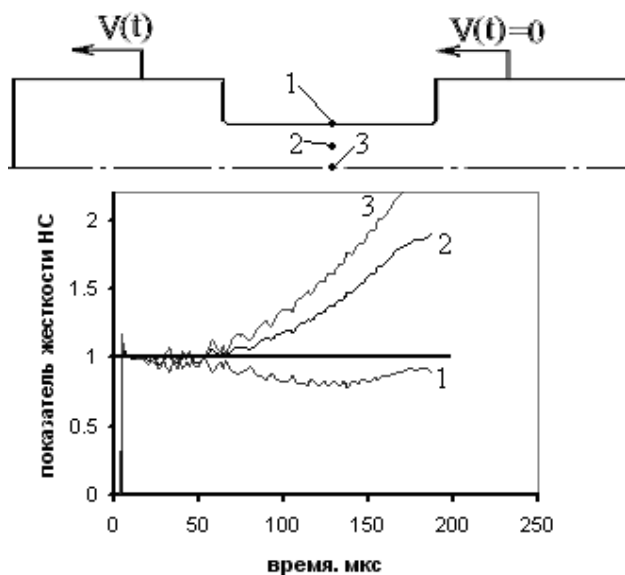


Рис. 3

Моделирование процесса растяжения образца с кольцевым надрезом показало, что жесткость НС в этом случае в области надреза практически в два раза превосходит таковой для случая одноосного растяжения сплошного образца.

В разделе 3.2 проводится численный анализ модификации РСГ для исследования характеристик высокоскоростного трения. Показано, что данный вид испытания позволяет адекватно определить коэффициент трения скольжения по величине силы, замеренной при помощи опорного мерного стержня.

В разделе 3.3 проводится численный анализ эксперимента по методу прямого удара. В данном методе, предложенном Ф.Хаузером и развиваемом в последнее время Я.Клепачко, образец устанавливается на торце мерного стержня и нагружается ударником. В эксперименте регистрируется скорость ударника и импульс деформации в мерном стержне, что позволяет определить диаграмму деформирования. В настоящее время этот метод широко используется за рубежом для получения диаграмм при скоростях деформации $\sim 10^4 \text{ с}^{-1}$. Показано, что трение оказывает существенное влияние на однородность полей напряжений, деформаций и вид НДС в образце. Для уменьшения влияния сил трения необходимо прово-

дить тщательную обработку (шлифовку) поверхностей образца, мерного стержня и ударника и использовать смазку.

В четвертой главе приводятся результаты экспериментального и расчетного анализа динамического поведения ряда материалов.

Описаны результаты динамических испытаний алюминиевых сплавов АМг-6, Д-16 и АК-4, титана ВТ-6, а также промышленной меди высокой чистоты (99.95 %) С101, полученной из Кавендишской лаборатории. Испытания на сжатие в диапазоне скоростей деформаций $\sim 500-8000 \text{ с}^{-1}$ выполнены с помощью РСГ. Для оценки влияния истории изменения скорости деформации на динамическую диаграмму проводилось нагружение составным ударником (рис.4). Эксперименты со скачком скорости деформации показали, что для исследованных материалов этим влиянием можно пренебречь.

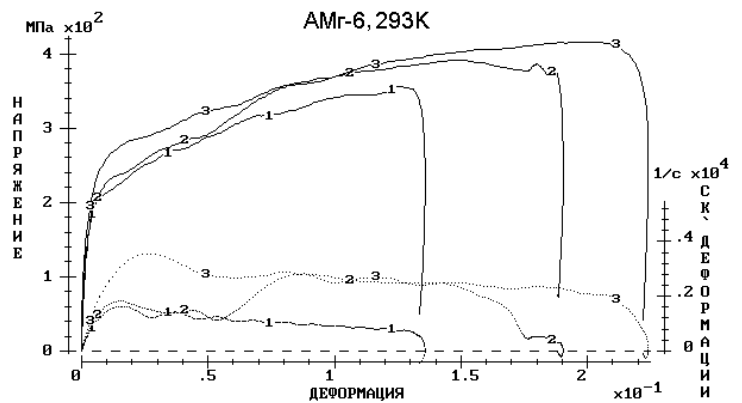


Рис.4

Как показали испытания, скорость деформации в диапазоне $1000-11000 \text{ с}^{-1}$ не оказывает существенного влияния на характеристики меди С101 (рис.5).

Для алюминиевого сплава АК-4 и титана ВТ-6 определены диаграммы деформирования в условиях сжатия, растяжения, а также предельные характеристики разрушения σ_B , δ , ψ и характеристики трещиностойкости при температурах 20 и $200 \text{ }^\circ\text{C}$.

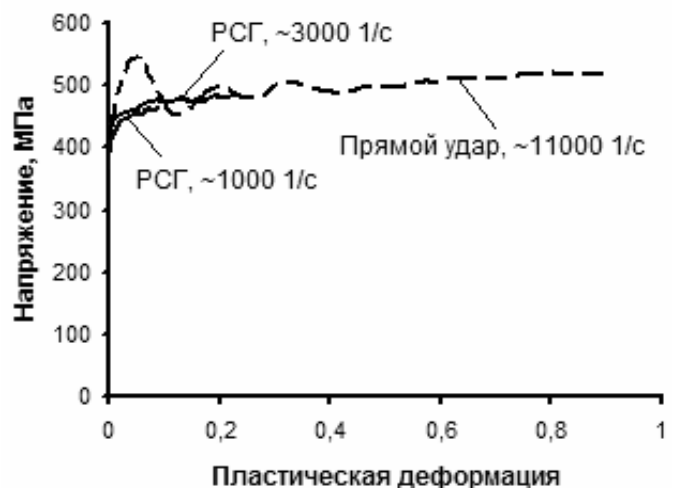


Рис.5

При растяжении цилиндрических образцов с V-образным надрезом получены значения разрушающих усилий $P \approx 6 \text{ кН}$ (для сплава АК4) и $P \approx 18 \text{ кН}$ (для титана ВТ6). Коэффициент интенсивности напряжений при этом составил $K_{Id} \approx 15 \text{ МПа} \cdot \sqrt{\text{м}}$ (для сплава АК4) и $K_{Id} \approx 45 \text{ МПа} \cdot \sqrt{\text{м}}$ (для титана ВТ6). Отмечено, что для

исследованных материалов величина разрушающих напряжений и коэффициент интенсивности напряжений практически не зависят от скорости деформации. Температура (в испытанном диапазоне) также не оказывает заметного влияния на эти характеристики.

Параметры разрушения при испытании на изгиб балок с V-образным вырезом составили: $P \approx 12$ кН (для сплава АК4) и $P \approx 31$ кН (для титана ВТ6), а также $K_{Id} \approx 55$ МПа $\cdot\sqrt{м}$ (для сплава АК4) и $K_{Id} \approx 150$ МПа $\cdot\sqrt{м}$ (для титана ВТ6). Отмечено, что эти характеристики также практически не зависят от скорости деформации и температуры испытаний (в исследованном диапазоне этих параметров). Отличие средних значений параметров трещиностойкости, полученных при растяжении цилиндрических образцов с надрезом и при изгибе балок с V-образным вырезом для обоих материалов, по-видимому, связано с различием напряженно-деформированного состояния образцов.

Выполнен ряд тестовых экспериментов: динамическое внедрение инденторов со сферической и конической головными частями, модифицированный тест Тейлора и эксперимент по методу прямого удара.

В разделе 4.1.3 приведены результаты исследования динамического коэффициента трения для пар АК-4 – ВТ-6 и ВТ-6 – ВТ-6 (рис.6). Исследования проводились с использованием предложенной модификации РСГ при относительной скорости скольжения ~ 10 м/с. В результате впервые были получены значения динамического коэффициента трения. Было установлено, что величина натяга в исследованном диапазоне практически не влияет на коэффициент трения.

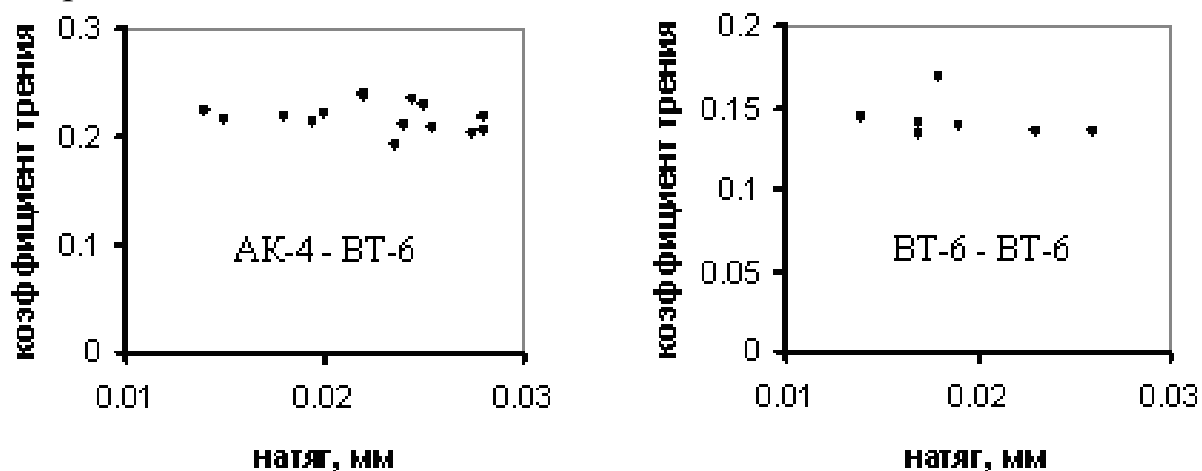


Рис. 6

В разделе 4.2.1 описаны алгоритмы определения параметров и констант некоторых материальных функций, учитывающих влияние скорости деформации. Параметры находились с использованием метода наименьших квадратов. Раздел 4.2.2 посвящен описанию способов верификации определяющих соотношений с использованием различных экспериментальных схем. Приводятся постановки натуральных тестовых экспериментов и соответствующие им расчетные схемы. В качестве тестовых верификационных экспериментов использовались: модифицированный тест Тейлора, испытания по методу прямого удара и эксперимент на динамическое внедрение инденторов с конической и сферической головными частями. Вычислительные эксперименты проводились в осесимметричной постановке. При численном моделировании испытаний по методу прямого удара (рис.7) рассматривались упругий мерный стержень 1, образец из исследуемого материала 3 и ударник 4. Начальная скорость ударника соответствовала скорости, замеренной в эксперименте. Сравнение импульса осевой деформации в конечном элементе 2 в мерном стержне и зарегистрированного тензодатчиками в натурном испытании позволяет сделать вывод об адекватности верифицируемой материальной функции. В данном виде испытания степени деформаций достигают 70÷90 % при средней скорости деформирования $\sim 10^4 \text{ с}^{-1}$.

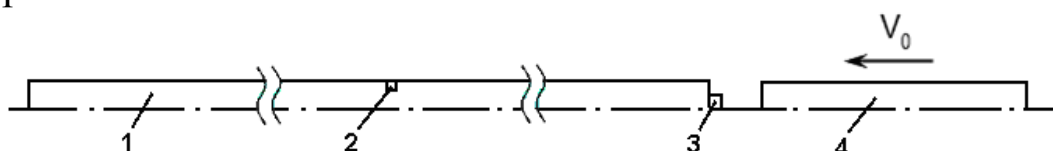


Рис.7

Схема моделирования модифицированного теста Тейлора показана на рис.8.

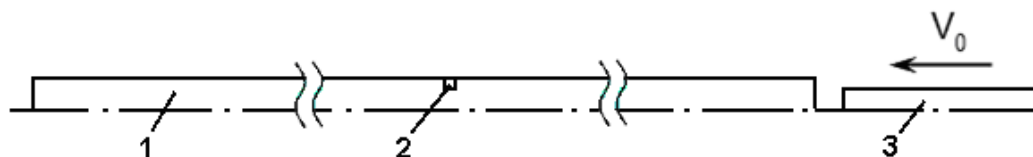


Рис.8

На образце-ударнике 3, свойства которого определяются верифицируемым соотношением, задавались начальные условия в виде осевой скорости, величина которой соответствует экспериментальной скорости метания. Сравнивались экспериментальная и расчетная остаточные формы образцов, а также импульс деформации в

мерном стержне *1*. Для сокращения расчетного времени использовалась также упрощенная постановка, в которой образец соударяется с жесткой стенкой, а контактная сила определяется интегрированием осевого напряжения в ударяемом торце образца. Расчет показал, что относительное отклонение остаточных форм полученных в полной и сокращенной постановках составляет $\sim 1.5\%$ для армко-железа и $\sim 0.8\%$ - для алюминиевого сплава АМг-6.

Схема моделирования эксперимента на высокоскоростное внедрение представлена на рис.9.

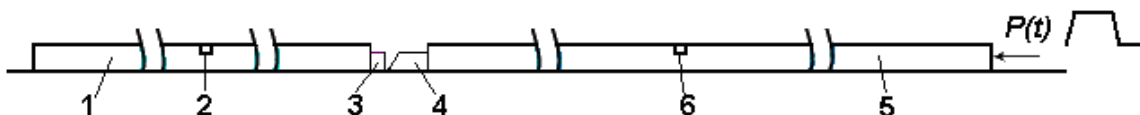


Рис.9: 1-опорный мерный стержень, 3-образец, 4-индентор, 5-передающий мерный стержень, 2,6-датчики деформации.

На рис.10 показаны типичные осциллограммы, получаемые в данном виде испытания.

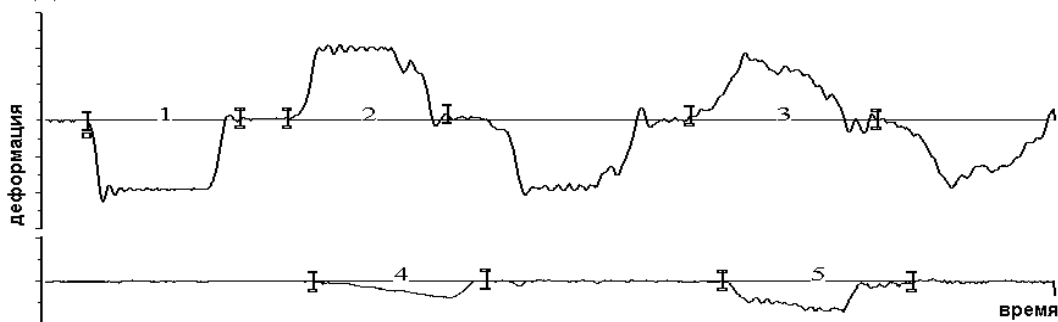


Рис.10

Падающий импульс *1* использовался для задания условий нагружения в виде импульса давления $P(t)$ на торце передающего мерного стержня. Сравнение экспериментальных и расчетных импульсов деформации 4,5 в опорном мерном стержне для нескольких циклов нагружения (рис.13,14) позволяет сделать вывод об адекватности определяющего соотношения, описывающего свойства образца.

В разделе 4.3 приводятся результаты определения параметров и результаты верификации некоторых материальных функций ряда металлов и сплавов.

Как указывалось выше, диаграммы деформирования при различных скоростях деформации определялись с использованием РСГ и прямого удара.

Для моделирования пластического поведения материалов с учетом скоростного упрочнения использовались следующие соотношения:

- Упрощенная модель Джонсона-Кука:

$$\sigma = (A + B\varepsilon_p^n) \left(1 + C \ln(\dot{\varepsilon}^*)\right)$$

- Степенная модель пластичности с множителем Купера-Саймондса для учета скоростного упрочнения:

$$\sigma = k\varepsilon^n \left(1 + (\dot{\varepsilon}^*/C)^{\frac{1}{p}}\right)$$

- Кусочно-линейное задание диаграмм деформирования в табличном виде.
- Модель с линейным упрочнением, в которой таблично задаются зависимости предела текучести и модуля упрочнения от скорости деформации.

Поскольку в исследованном диапазоне скорость деформации не оказывает существенного влияния на диаграмму деформирования меди С101, для моделирования поведения данного материала использовать простые определяющие соотношения, не учитывающие влияние скорости деформации. Верификация проводилась на базе эксперимента по методу прямого удара и модифицированного теста Тейлора. В тесте Тейлора использовались цилиндрические образцы диаметром 9.98 мм и длиной 15 мм (масса образца - 10.5 г). Образцы разгонялись при помощи газовой пушки до скоростей 114 и 143 м/с (по два образца на режим) и ударялись в упругий стержень. Сравнение остаточных форм образцов (рис.11а), полученных в натурном эксперименте и расчете, хорошее их соответствие. Форма расчетного импульса деформации в мерном стержне и характер его колебаний качественно согласуется с экспериментальными данными, однако количественное расхождение достигает 30% (рис.11б).

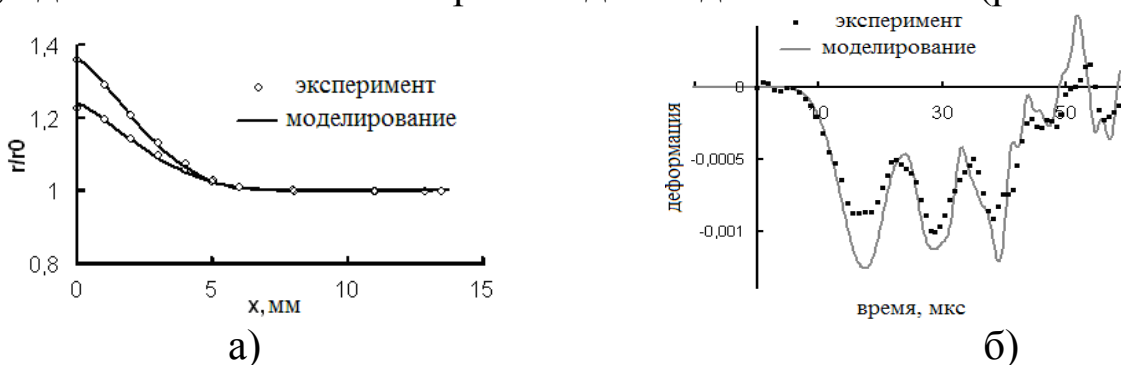


Рис.11

Оснащенные на основании диаграмм, полученных при скоростях $0.003-7200 \text{ с}^{-1}$, модели пластического поведения АМг-6 верифицировались с помощью эксперимента по методу прямого удара и

динамического внедрения инденторов различной формы. Все идентифицированные модели позволили достаточно точно предсказать результаты эксперимента, за исключением билинейной модели, при использовании которой величина расчетной силы в мерном стержне превысила на 11 % экспериментальную величину при больших степенях деформации образца.

Диаграммы деформирования сплава Д16 были получены при скоростях деформирования $900-5000 \text{ с}^{-1}$. Для верификации использовался модифицированный тест Тейлора. Испытаны образцы диаметром 9.8 мм и длиной 70 мм при трех скоростях удара: $\sim 98 \text{ м/с}$, $\sim 188 \text{ м/с}$ и $\sim 207 \text{ м/с}$. Сравнение экспериментальных и расчетных профилей образцов после удара (слева) и импульсов деформации в мерном стержне (справа) представлено на рис.12.

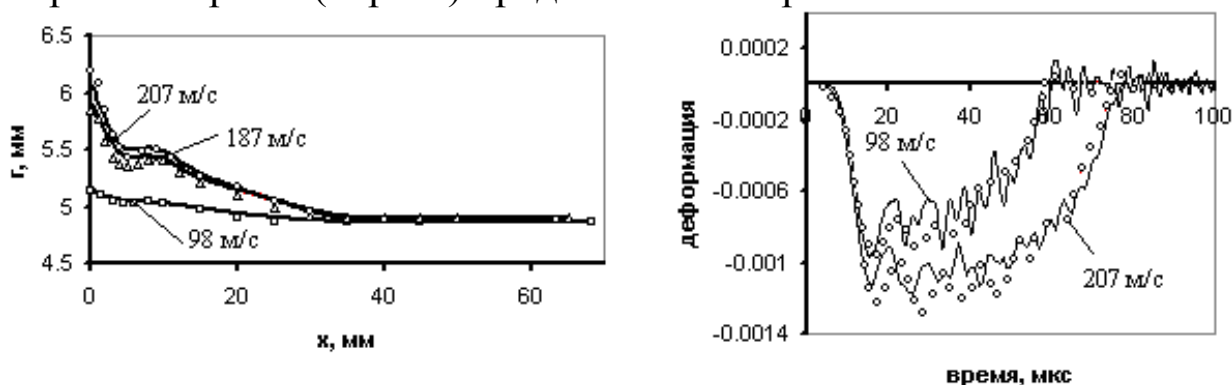


Рис.12 – Сравнение результатов эксперимента (маркеры) и расчета для Д16.

В данном эксперименте мы выходим за границу исследованного диапазона по скоростям деформации, поскольку в отдельных областях образца скорости деформации в процессе удара превышают 10^4 с^{-1} . Поэтому на основании сравнения результатов натурального испытания и моделирования можно расширить область применения модели. Степенная зависимость предела текучести с моделью скоростного упрочнения Купера-Саймондса предсказывает чрезмерное упрочнение материала с ростом скорости деформации. Остальные модели показали достаточно хорошее согласие результатов расчета и эксперимента. Максимальное относительное отклонение рассчитанных от экспериментальных профилей при использовании табличного задания диаграмм деформирования не превысило 2 % для всех скоростей метания, при использовании модели Джонсона-Кука – 4 %, для билинейной модели максимальная ошибка составила 5.5 % для скорости 207 м/с.

По результатам верификации с использованием метода прямого удара и высокоскоростного внедрения можно сделать вывод, что использование всех моделей позволяет достаточно точно предсказать результаты натурного эксперимента.

На основании диаграмм деформирования в условиях одноосного сжатия для алюминиевого сплава АК-4 определены константы ряда определяющих соотношений: Купера-Саймондса, Джонсона-Кука и билинейной модели. Их верификация проводилась с использованием модифицированного теста Тейлора. При этом использовались образцы диаметром 9.8 мм и длинами 60 и 15 мм. Длинные образцы ударялись в мерный стержень со скоростями 117-214 м/с, короткие – 140-316 м/с. Следует отметить, что в экспериментах с короткими образцами при скоростях 316 и 260 м/с на ударяемом торце появлялись радиальные трещины. Максимальное относительное отклонение расчетных профилей образцов от экспериментальных составило:

- при использовании табличного задания диаграмм деформирования: 2 % на образцах длиной 60 мм и 4 % на образцах длиной 15 мм.
- при использовании упрощенной модели Джонсона-Кука: 3 % на длинных образцах и 6 % на коротких.
- при использовании степенной модели пластичности: 4 % и 6%.
- при использовании билинейной модели с зависимостью от скорости деформации: 7 % в обоих случаях.

Проведено также сравнение импульсов деформации в опорном мерном стержне, полученных в эксперименте на динамическое внедрение в образцы из исследуемого материала, и соответствующие расчетные импульсы (рис.13, маркеры – эксперимент, сплошная линия - расчет). Из представленных рисунков хорошо видно, что расчетные импульсы близки к экспериментальным.

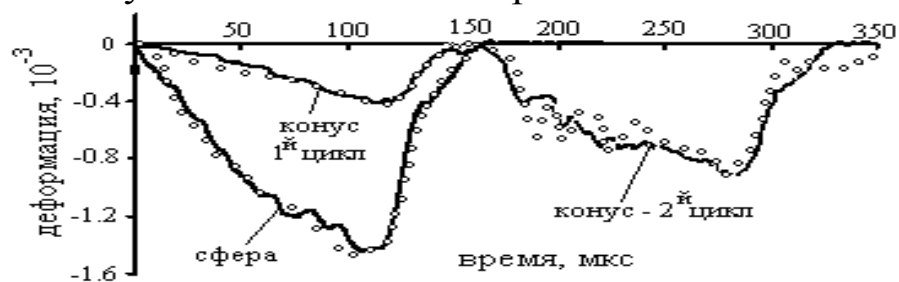


Рис.13

Как показали эксперименты, диаграмма деформирования титанового сплава ВТ-6 на участке упрочнения близка к линейной, а её наклон пластического участка практически не зависит от скорости деформации. В этой связи, помимо описанных выше определяющих соотношений, нами была использована её билинейная модель, в которой модуль упрочнения является постоянной величиной $E_T=1335$ МПа, а начальный предел текучести зависит от скорости деформации в соответствии с моделью Купера-Саймондса: $\sigma_T = 906 \cdot \left(1 + (\dot{\epsilon}/8.04e4)^{1/2.932}\right)$ МПа.

Определяющие соотношения, описывающие пластическое поведение титанового сплава ВТ-6 верифицировались с использованием эксперимента на динамическое внедрение конического и полусферического инденторов. Сравнение экспериментальных импульсов с расчетными (рис.14) показало хорошее их соответствие друг с другом. Таким образом, на основании проведенных исследований можно сделать вывод том, что все используемые в работе материальные функции достаточно хорошо описывают результаты натуральных тестовых экспериментов, в которых имеют место процессы активного нагружения и разгрузки без смены знака деформации.

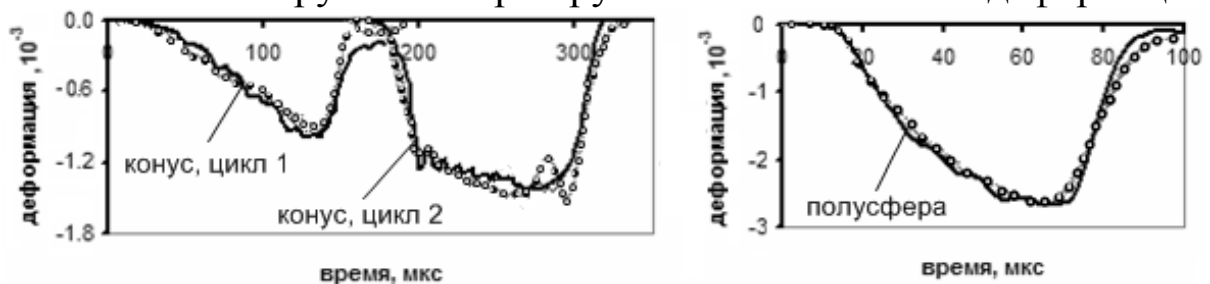


Рис. 14.

В следующих таблицах приведены постоянные идентифицированных и верифицированных в работе моделей пластического поведения некоторых материалов:

Постоянные степенной модели пластичности:

Материал	k, МПа	n	C	p
С101	505	0.03	-	-
АМг-6	365	0.14	$1.712 \cdot 10^4$	2.338
Д16	613.607	0.076	$1.7485 \cdot 10^4$	0.74849
АК-4	321.128	0.1199	$1.50 \cdot 10^3$	6.09
ВТ-6	1170	0.0621	$1.0825 \cdot 10^5$	3.2

Постоянные упрощенной модели Джонсона-Кука:

Материал	A, МПа	B, МПа	n	C	$\dot{\epsilon}_0, \text{c}^{-1}$
С101	407.2	103.3	-	-	-
Д16	173.56	108.46	0.443	0.203	1
АК-4	334	373.75	0.4278	0.091	1000
ВТ-6	1036.5	554.5	0.4117	0.07945	1000

Билинейная модель с зависимостью от скорости деформации:

Материал	$\dot{\epsilon}_0, \text{c}^{-1}$	$\sigma_0, \text{МПа}$	$E_T, \text{МПа}$
С101	10^3 -	463	87
	$11 \cdot 10^3$		
АМГ-6	0.003	151	1715
	1000	230	1357
	3000	300	855
	7200	378	536
Д16	865	442	1125
	2470	479	760
	4860	537	713
АК-4	416	317	2428
	1110	354	1447
	2927	410	997
	4755	440	900
ВТ-6	11976	524	509
	10^{-3}	907	1335
	1200	1130	1335
	6000	1259	1335
	9000	1345	1335

Основные результаты и выводы.

1. Проведен анализ современного состояния исследований поведения конструкционных материалов при скоростях деформации $5 \cdot 10^2 - 1 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$. Отмечено, что наиболее успешные исследования в этой области связаны с совместным использованием экспериментальных и теоретических подходов.
2. На базе современных компьютерных систем развит существующий в лаборатории динамических испытаний НИИмеханики ННГУ экспериментальный комплекс, позволяющий проводить динамические испытания конструкционных материалов при растяжении, сжатии и сдвиге с использованием метода Кольского, метода прямого удара, модифицированного метода Тейлора. Предложены и реализованы методики, позволяющие также определять характеристики динамической трещиностойкости в рамках метода Кольского.
3. Выполнен численный анализ некоторых схем динамических испытаний материалов: на растяжение цилиндрических образцов с различной рабочей базой, в том числе с надрезом, и сжатие (прямой удар) при скоростях деформации $\sim 10^4 \text{ с}^{-1}$.
4. Для верификации определяющих соотношений разработан ряд тестовых экспериментов, включающий модифицированный тест Тейлора, метод прямого удара и динамическое внедрение инденторов различной формы.
5. С использованием метода Кольского и его модификаций проведено комплексное исследование влияния скорости деформации и истории её изменения на механические свойства меди С101, алюминиевых сплавов АМг-6, Д-16, АК-4 и титанового сплава ВТ-6. Получены динамические свойства этих материалов и определены параметры и константы ряда материальных функций, учитывающих влияние скорости деформации на радиус поверхности текучести.
6. Проведен анализ применимости аппроксимаций уравнений поверхности текучести дифференциальной теории пластичности с изотропным упрочнением путем сравнения данных тестовых экспериментов с результатами компьютерного моделирования.
7. Предложена, апробирована и численно проанализирована новая методика на базе метода Кольского для исследования динамического коэффициента трения. Впервые получены динамические

коэффициенты трения для пар АК-4 – ВТ-6 и ВТ-6 – ВТ-6 при скорости скольжения контактирующих поверхностей ~ 10 м/с.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. А.М.Брагов, А.Ю.Константинов, А.К.Ломунов, И.В.Сергеичев Моделирование процесса динамического внедрения инденторов различной формы в образцы сплава АМг6 и меди М1 // Всероссийская научная конференция «Волновая динамика машин и конструкций», Нижний Новгород, 1-5 июня 2004, тезисы докладов, с.24.

2. А.В.Абрамов, А.М.Брагов, А.Ю.Константинов, А.К.Ломунов, И.В.Сергеичев Экспериментально-расчетный анализ высокоскоростного деформирования алюминиевого сплава АМг6 // Проблемы прочности и пластичности. Межвуз.сб., вып.66. Н.Новгород, 2004, с.93-100.

3. А.М.Брагов, Э.Влодарчик, А.Ю.Константинов, Л.Крушка, А.К.Ломунов, И.В.Сергеичев, А.В.Абрамов Экспериментальный и расчетный анализ высокоскоростного деформирования алюминия и его сплавов // «VII Харитоновские тематические научные чтения». Сборник тезисов докладов Международной Конференции «Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны». Саров, ВНИИЭФ, 14-18 марта 2005, с.215-216.

4. А.М.Брагов, Э.Влодарчик, А.Ю.Константинов, Л.Крушка, А.К.Ломунов, И.В.Сергеичев Экспериментальные исследования и численное моделирование высокоскоростного деформирования алюминиевых сплавов // «VII Харитоновские тематические научные чтения». Сборник трудов Международной Конференции «Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны». Саров, ВНИИЭФ, 14-18 марта 2005, с.471-477.

5. А.Ю.Константинов, А.В.Абрамов, А.М.Брагов, А.К.Ломунов, И.В.Сергеичев Экспериментально-расчетная схема определения параметров разрушения для металлов и сплавов // XIII международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов 2006», Материалы конференции, том 4, стр. 105-106.

6. Константинов А.Ю. Экспериментально-расчетное исследование поведения меди при высоких скоростях деформирования // 11-я Нижегородская сессия молодых ученых (технические науки). «Татинец», 12-16 февраля 2006 г. Тезисы докладов.

7. А.В.Абрамов, А.Ю.Константинов. Развитие экспериментальных методов, основанных на методе разрезного стержня Гопкинсона, для определения динамической прочности конструкционных материалов // IX Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике. Аннотации докладов. (Нижний Новгород, 22-28 августа 2006 г.) Том 3. стр. 7-8.
8. A.M.Bragov, A.K.Lomunov, A.V.Abramov, A.Yu.Konstantinov, I.V.Sergeichev, C.Braithwaite, W.G.Proud, P.D.Church, I.G.Cullis and P.Gould. The dynamic response of Copper 101 under high-rate loading// Journal de Physique IV, France, Volume 134 (2006), pp. 311-315.
9. A.V.Abramov, A.M.Bragov, A.K.Lomunov, A.Yu.Konstantinov, L.Kruszka and I.V.Sergeichev. Experimental and numerical analysis of high strain rate behavior of aluminum alloys AMg-6 and D-16// Journal de Physique IV, France, Volume 134 (2006), pp. 487-491.
10. А.М.Брагов, А.Ю.Константинов, А.К.Ломунов, А.В.Абрамов Экспериментально-численный анализ высокоскоростного деформирования алюминия и меди // Всероссийская научно-техническая конференция “Фундаментальные проблемы машиноведения: Новые технологии и материалы”, посвященная 20-летию Нижегородского филиала Института машиноведения им.А.А.Благонравова РАН, Н.Новгород, 28-30 ноября 2006г. С.19.
11. А.М.Брагов, А.Ю.Константинов, А.К.Ломунов, И.В.Сергеичев Способ определения динамического коэффициента трения // Всероссийская научно-техническая конференция “Фундаментальные проблемы машиноведения: Новые технологии и материалы”, посвященная 20-летию Нижегородского филиала Института машиноведения им.А.А.Благонравова РАН, Н.Новгород, 28-30 ноября 2006г. С.18.
12. А.М.Брагов, А.Ю.Константинов, А.К.Ломунов, А.В.Абрамов. Экспериментальный и численный анализ высокоскоростного деформирования конструкционных материалов // VIII Харитоновские чтения, Саров, 21-24 марта 2006 г. Тезисы докладов. стр. 70-71.
13. А.М.Брагов, А.Ю.Константинов, А.К.Ломунов, И.В.Сергеичев, А.Р.Филиппов, Ю.Н.Шмотин. Высокоскоростная деформация алюминиевого сплава АК4-1 и титана ВТ6 // Международная конференция IX Харитоновские тематические научные чтения. Саров, 12-16 марта 2007 г. Сборник тезисов докладов. Стр. 179-180.
14. А.М.Брагов, А.Ю.Константинов, А.К.Ломунов, И.В.Сергеичев, А.Р.Филиппов, Ю.Н.Шмотин. Высокоскоростная деформация алю-

миниевого сплава АК4-1 и титана ВТ6// Труды международной конференции IX Харитоновские тематические научные чтения, 12-16 марта 2007г., РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, стр.339-344.