

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертацию Константинова Александра Юрьевича

«Экспериментально-теоретический подход к исследованию высокоскоростного деформирования и разрушения материалов с использованием мерных стержней», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

Актуальность темы диссертации

Диссертационная работа посвящена фундаментальному обоснованию и разработке экспериментальных и теоретических подходов по оценке прочности материалов в условиях динамического и ударно-волнового нагружения, что является основой прогнозирования надежности и ресурса перспективных материалов для широкого класса приложений, включая авиационную, космическую отрасли, ряд специальных приложений.

Исследование поведение материалов при интенсивных воздействиях осложняется рядом факторов, обусловленных спецификой нагружения, многомасштабным влиянием структуры (дефектов), которые могут качественным образом сказываться на деформационных реакциях, инициировать процессы локализации деформации и поврежденности, определяющие закономерности разрушения конструкций.

При этом разработка методов оценки прочности должна основываться на модельных представлениях, отражающих специфику поведения материалов в соответствующих диапазонах динамических и ударно-волновых нагружений, в сочетании с возможностью определения параметров моделей на ограниченном наборе лабораторных экспериментов. Решение данной проблемы возможно при проведении вычислительного и методически выверенных лабораторных экспериментов, в том числе при решении обратных задач для идентификации параметров и верификации подхода в целом.

Развиваемый в работе экспериментально-теоретический подход, включающий комплекс экспериментальных методов на оригинальных образцах оборудования, обоснованные модели и методы вычислительного эксперимента применительно к изучению закономерностей высокоскоростного деформирования и разрушения материалов различной физической природы с использованием метода Кольского и его модификаций, несомненно, **актуальны** и востребованы приложениями.

Отмеченные особенности постановок в области оценки прочности материалов при интенсивных воздействиях позволили обосновать основную **цель работы**

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

сформулировать основные задачи:

- обоснование методологии комплексного исследования высокоскоростного деформирования материалов различной физической природы, включающую планирование эксперимента, численный анализ разработанных методик, получение данных о динамических свойствах, идентификацию на этой основе необходимых параметров математических моделей материалов и верификацию этих моделей с помощью набора специальных тестовых экспериментов;

и новизну работы:

обоснование комплексного экспериментально-теоретического подхода к исследованию процессов высокоскоростного деформирования и разрушения материалов различной физической природы с установлением зависимости их свойств от условий нагружения.

Структура и содержание диссертации

Работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы.

Во Введении приводится обоснование актуальности темы диссертационной работы; дана краткая характеристика степени разработанности проблемы; сформулированы цель и задачи работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов диссертации; кратко описаны методология и методы диссертационного исследования; перечислены положения, выносимые автором на защиту; приведены сведения о степени достоверности и апробации полученных в работе результатов; содержится информация о количестве и типе публикаций по теме диссертации, личном вкладе автора, структуре и объеме диссертации, источниках финансирования исследований.

Первая глава посвящена описанию проблем, связанных с экспериментальным исследованием процессов динамического деформирования и разрушения материалов. Отмечается, что одним из наиболее часто используемых на практике экспериментальных методов является метод Кольского или метод разрезного стержня Гопкинсона. Описаны особенности, которые необходимо учитывать при использовании техники мерных стержней для измерения сил и смещений на границах образца (в том числе эффекты

дисперсии упругих волн в стержнях конечного радиуса). Акцент сделан на необходимость разработки фундаментальных и методических основ применения метода для малопрочных материалов, нагружениях при высоких температурах, учет эффектов трения. Обсуждаются методы учета эффектов дисперсии, позволяющие проводить синхронизацию импульсов, определения истинных диаграмм деформирования с учетом локализации пластического течения.

Во второй главе описаны подходы построения математических моделей динамического деформирования вязкопластических материалов, основанные на обобщении понятий поверхности текучести для случаев скоростного упрочнения, проявлений волновых эффектов. Приводится обзор математических формулировок, выражающих зависимость радиуса поверхности текучести от условий нагружения. Отмечается, что определяющие соотношения разделяются на два типа - физические и феноменологические модели, при этом современные тенденции связаны с более широким применением физических широкодиапазонных моделей. Феноменологические представления, по-прежнему, эффективно используются для широкого класса приложений, но их обоснование предполагает проведение методически выверенных лабораторных и верифицирующих экспериментов, определяющих области применимости конкретных феноменологических моделей. Анализ большого количества моделей (более 40!!) позволил сделать вывод о физически обоснованных представлениях предела текучести в виде атермического и термического слагаемых. Представлен содержательный анализ эффектов пластичности в условиях адиабатического разогрева, играющего одну из ключевых ролей в закономерностях локализации деформации при динамическом нагружении. Существенное внимание уделено подходам идентификации моделей и параметров в сопоставлении с постановками лабораторных экспериментов, включая задачи оптимизации и анализ влияния разброса данных на результаты моделирования.

В третьей главе приводится описание методик и экспериментальных схем, позволяющих получать динамические кривые деформирования материалов в условиях растяжения, сжатия, сдвига, определять характеристики трения, трещиностойкости, предельные характеристики разрушения, а также проводить специальные эксперименты, данные из которых используются для проверки работоспособности определяющих соотношений. Для исследования поведения различных материалов в широком диапазоне скоростей деформации и нагрузках до 2 ГПа был создан экспериментальный комплекс, реализующий передовые методики испытаний и регистрации, позволяющий проводить широкий спектр исследований материалов различной физической природы: металлы и сплавы, композиты и керамики, грунты и горные породы. Приводится описание и

численный анализ новой оригинальной методики, включающей способ формирования импульса для получения постоянной скорости деформации, метод прямого удара и метод Кольского. Следует отметить важное развитие для широкого класса приложений методологии экспериментов по соударению стержня с жесткой или деформируемой преградой (тест Тейлора), динамическому внедрению, высоко (и низкотемпературных) испытаний, которые занимают особое место в исследованиях процессов деформирования твердых тел. Это объясняется широким использованием подобных схем нагружения в экспериментальных работах и возможностью проведения теоретического или численного анализа процессов деформирования в задачах в подобной постановке. Методическая экспериментальная часть включает анализ модификаций метода Кольского и позволяет получать самую разнообразную информацию о свойствах материала, описан набор базовых экспериментов, для проверки работоспособности математических моделей, что является важной частью экспериментально-расчетного подхода к изучению процессов высокоскоростного деформирования и разрушения материалов. Содержательной является часть главы, посвященная описанию оригинального комплекса программ, используемых для получения и обработки экспериментальных данных на каждом этапе исследования: от планирования эксперимента до систематизации и хранения итоговых данных.

Фундаментально выверенной и методически законченной является **Четвертая глава**, посвященная описанию экспериментально-расчетных подходов, в которых вычислительный эксперимент используется для интерпретации результатов динамического эксперимента. Результаты позволяют характеризовать поведение материала по интегральным усилиям, действующим на образец в процессе нагружения, и глобальным изменениям размеров образца в условиях нарушения однородности и равномерности полей деформаций и напряжений в рабочем объеме образца. Важнейшим элементом анализа являются методы определения истинных диаграмм деформирования материала на базе экспериментов на высокоскоростное растяжение до точки разрушения образца с учетом локализации деформации результатов, полученными различными методами (методы Давиденкова, Бриджмена и др.) определения истинных деформаций и напряжений в шейке для пластических и хрупких материалов. Экспериментально-расчетная схема идентификации параметров модели разрушения, учитывающая историю изменения параметров состояния в материале в процессе деформирования образца, позволяет получать деформационные зависимости (эксперимент по методу Тейлора) до скоростей деформаций, превышающих 10^4 с^{-1} , - важной переходной области от динамического к ударно-волновому нагружению материалов.

Сочетание методов инструментального исследования и численного моделирования позволило обосновать три схемы идентификации свойств материалов по данным динамического эксперимента, позволившие расширить диапазон условий нагружения и определения характеристик материала.

Пятая глава посвящена иллюстрациям возможностей развитого подхода для экспериментального исследования динамического деформирования и разрушения ряда материалов: вязкопластические материалы - титановые сплавы ВТ6, ВТ8, ВТ20, сталь 09Г2С, алюминиевый сплав Д16), хрупкие материалы (габбро-диабаз, гранит, мрамор, известняк, фибробетон CARDIFRC, бетон, пресноводный лед). Кривые деформирования, определенные при сжатии и растяжении при разных скоростях деформации (от статики до $\sim 2500 \text{ с}^{-1}$) и температурах (от 20 до 300°C), аппроксимировались различными математическими моделями с последующей верификацией последних в условиях качественно отличающихся экспериментальных постановок (эксперименты по схемам Тейлора, динамическое внедрение конического и сферического инденторов). Для указанных материалов получены температурно-скоростные зависимости предельных характеристик пластичности δ и ψ . Оригинальные постановки посвящены обоснованию моделей, учитывающим объемную сжимаемость вспененного композита ФК-75 в условиях ударного сжатия с использованием схемы «ограничивающей облоймы». Получены температурно-прочностные зависимости предельных характеристик прочности при сжатии и растяжении (методом раскалывания) для ряда хрупких материалов. Экспериментальные данные позволили установить рост предельных напряжений с увеличением скорости деформации или скорости роста напряжений.

В Заключение сформулированы выводы по результатам выполненных исследований.

Новизна результатов, полученных в диссертации

В целом диссертационная работа Константинова А.Ю. является уникальным экспериментально-теоретическим исследованием, синтезирующим современные достижения в области экспериментального изучения поведения материалов при динамических условиях нагружения и методов вычислительного эксперимента как неотъемлемой составляющей комплексной проблемы – верификации широкодиапазонных определяющих соотношений – ключевой проблемы механики деформирования твердого тела.

Новыми научными результатами диссертации являются:

- аппаратные и программные средства, составляющие автоматизированный экспериментальный стенд.

- новая оригинальная экспериментальная комбинированная методика.
- методики обработки экспериментальных данных в схемах на ударное растяжение и Тейлора с использованием численного моделирования.
- новые экспериментальные данные о поведении титановых сплавов BT6, BT8, BT20, сталей 20X13, Ст3, 08X18H10T, 09Г2С, алюминиевого сплава Д16 при высокоскоростном деформировании.
- идентифицированные и верифицированные определяющие соотношения для титановых сплавов BT6, BT8, BT20, сталей 20X13, Ст3, 08X18H10T, 09Г2С, алюминиевого сплава Д16
- температурно-скоростные зависимости прочности габбро-диабаз, гранита, мрамора, известняка, фибробетона CARDIFRC, бетона, пресноводного льда.
- динамическая кривая объемной сжимаемости и модель деформирования вспененного композита ФК-75.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Для получения информации о поведении материалов в работе используются современные экспериментальные методы, широко распространенные и признанные во всем мире. Достоверность численного моделирования подтверждается совпадением с соответствующими экспериментальными данными.

Обоснованность выводов и рекомендаций, сформулированных в работе, определяется всесторонним, тщательным анализом экспериментальных зависимостей и данных виртуальных экспериментов.

Публикации по теме диссертационной работы

Результаты, представленные в диссертации опубликованы в 22 работах в изданиях, входящих в Перечень ВАК Минобрнауки России, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора наук, 22 работы индексируются международными библиографическими базами (WoS и Scopus).

Замечания по диссертации

1. Представляет интерес верификация динамических экспериментов с использованием физических моделей, отражающих роль структурных изменений (обусловленных дефектами) на релаксационные свойства, развитие пластичности, в том числе в терминах пороговых напряжений пластического течения, включающих разделение на атермические и термические слагаемые. Используемые в работе феноменологические модели основаны на предположении об «адиабатичности» структурных переменных, что с увеличением скорости деформации не является справедливым в общем случае.

2. Закономерности локализации деформации и поврежденности, предшествующие образованию шейки при динамическом нагружении, определяются на начальных стадиях не изменением геометрических факторов образца, а являются следствием нелинейных эффектов кинетики зарождения и роста дефектов и их влияния на механизмы структурной релаксации (пластичности). Используемые феноменологические модели не учитывают роль данных механизмов, поэтому целесообразным является определение областей применимости развитых подходов с идентификацией стадии локализации деформации, где развитые подходы могут быть надежно применены для инженерных приложений.

3. Обобщение развитых подходов и экспериментальных методик для переходной области скоростей деформаций, превышающих 10^4 с^{-1} (например, в тесте Тейлора), предполагает верификацию данных и модельных представлений в условиях ударно-волнового эксперимента с регистрацией пластических волновых фронтов, обнаруживающих универсальные признаки (степенная автомодельность пластического фронта), которая должна описываться определяющими соотношениями.

Заключение

Настоящие замечания не снижают научную и методическую ценность исследований, относятся к перспективам развития последних, не влияют на общую положительную оценку диссертации и не снижают научной и практической значимости полученных результатов.

Представленный в диссертации материал прошел хорошую **апробацию** при обсуждении на международных и российских конференциях. Количество и качество публикаций соответствуют рекомендациям ВАК.

Считаю целесообразным рекомендовать результаты диссертации к включению в курсы механики деформируемого твердого тела, физики прочности и пластичности, динамики и прочности машин.

Работа написана образным языком, последовательность изложения хорошо продумана и отражает логику исследования, стиль изложения доказательный.

Текст автореферата и публикаций достаточно полно и точно отражают содержание диссертации.

Считаю, что диссертация «Экспериментально-теоретический подход к исследованию высокоскоростного деформирования и разрушения материалов с использованием мерных стержней» является научно-квалификационной работой, соответствующей всем требованиям, предъявляемым Положением о присуждении ученых

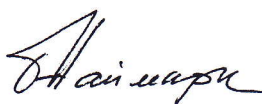
степеней (утверждено постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842) к докторским диссертациям, а ее автор Константинов Александр Юрьевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры.

Официальный оппонент

доктор физ.- мат. наук,

01.04.07- физика конденсированного состояния,

профессор, заведующий лабораторией Физических основ прочности



Наймарк Олег Борисович

Email: naimark@icmm.ru

Институт механики сплошных сред

Уральского отделения Российской академии наук

филиал Федерального государственного

бюджетного учреждения науки Пермского

федерального исследовательского центра (ИМСС

УрО РАН).

Адрес: ул. Академика Королева, 1, Пермь,

Пермский край, 614061,

Тел.: +7 (342) 237 83 12,

Email: mvp@icmm.ru

Подпись зав.лабораторией,

профессора Наймарка Олега Борисовича заверяю:



Ученый секретарь ИМСС УрО РАН

к.ф.м.н

18.06.2018

Н.А.Юрлова