

## УТВЕРЖДАЮ

Врио директора Института проблем

механики им. А.Ю. Ишлинского

Российской академии наук,

Ф-М.Н.

С.Е. Якуш

«31» мая 2018 г.



## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук» 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

Экспериментальное исследование и математическое моделирование закономерностей высокоскоростного деформирования и разрушения материалов различной физической природы является очень важным и ответственным этапом процесса рационального проектирования объектов новой техники, испытывающих в процессе своей эксплуатации интенсивные нагрузки ударного или взрывного характера. Именно от полноты и достоверности информации о поведении материалов, из которых изготовлены элементы конструкции, во многом зависит качество результатов вычислительного эксперимента. В свою очередь повышение достоверности виртуального эксперимента позволяет уменьшить число натурных испытаний, а значит удешевить и ускорить процесс проектирования. В настоящее время, несмотря на успехи экспериментальной механики в области высокоскоростных испытаний и наличие общепринятых методик (например, методики, основанные на технике мерных стержней), можно констатировать отсутствие стандартов на подобные исследования, что приводит к появлению разрозненных и порой противоречивых данных о температурно-скоростных зависимостях характеристик прочности материалов. В связи с этим развитие методологии и методов всестороннего изучения процессов, протекающих в материалах при ударном нагружении, несомненно является актуальной задачей. Решение этой задачи на уровне, отвечающем современным

требованиям, продиктованным текущим состоянием развития численных методов и вычислительной техники, невозможно без глубокой интеграции инструментов численного моделирования в исследовательский процесс. Диссертационное исследование Константинова А.Ю. посвящено важной проблеме создания комплексной методологии исследования динамического поведения материалов, в которой виртуальный эксперимент активно используется на всех этапах: разработка, анализ и обоснование новых экспериментальных схем, планирование эксперимента, интерпретация экспериментальных данных, идентификация и верификация определяющих соотношений. Кроме того, автором получены и описаны математически новые экспериментальные данные о температурно-скоростных зависимостях для ряда материалов различной физической природы.

### **Содержание диссертации**

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

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы. Определены цели и задачи работы, сформулированы научная новизна и положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** выполнен обзор современного состояния проблемы экспериментального исследования деформирования и разрушения материалов при ударном нагружении при скоростях деформации от  $10^2$  до  $10^4$  с<sup>-1</sup>.

**В параграфе 1.1.** кратко описана история развития метода Кольского с использованием разрезного стержня Гопкинсона, обозначено место указанной методики среди других средств экспериментального исследования, описаны особенности применения техники мерных стержней: учет влияния упругого промятия в случае испытания жестких образцов малого размера, учет дисперсионного характера движения волн в стержне конечного радиуса, эффекты инерции и трения и т.д.

**Параграф 1.2** посвящен описанию особенностей применения техники мерных стержней для исследования динамического поведения хрупких материалов. Приводятся приемы, позволяющие регистрировать малые усилия – отклик малопрочных материалов на динамическое воздействие.

**В параграфе 1.3** описаны известные из литературы модификации метода Кольского, позволяющие исследовать влияние температуры на деформационные и прочностные динамические характеристики материалов. Обозначены проблемы, с которыми сопряжены высокотемпературные испытания.

Параграф 1.4 посвящен обзору методик на базе мерных стержней, позволяющих получать данные о динамических процессах в образцах в условиях ударного растяжения. Описаны различные варианты получения динамической растягивающей нагрузки.

В параграфе 1.5 кратко формулируется проблема определения истинных кривых деформирования вязкопластических материалов из эксперимента на высокоскоростное растяжение с учетом локализации пластической деформации (образования шейки).

В параграфе 1.6 сформулированы выводы по главе 1, которые заключаются в том, что наиболее популярным методом исследования процессов деформирования и разрушения материалов при скоростях деформации от  $10^2$  до  $10^4$  с<sup>-1</sup> 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. Для уменьшения эффекта дисперсии используют формирователи импульсов. Существует математический аппарат, позволяющий проводить синхронизацию импульсов, замеренных в мерных стержнях, с учетом дисперсии.

Вторая глава посвящена описанию математического моделирования динамического деформирования вязкопластических материалов. Описаны общие принципы построения моделей, приводится обзор методов их идентификации.

В параграфе 2.1 приводится обзор принципов построения и известных форм описания зависимости радиуса поверхности текучести от пластической деформации, скорости деформации и температуры. Рассмотрен как физический, так и эмпирический и полуэмпирический подходы.

Параграф 2.2 посвящен анализу эффекта адиабатического разогрева пластически деформируемых материалов. Приводятся критерии перехода от изотермического режима деформирования к адиабатическому при росте скорости деформации.

В параграфе 2.3 рассмотрены различные подходы к идентификации математических моделей необходимыми параметрами и константами (прямой и обратный методы идентификации). Показано, что 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 целевой функции.

В параграфе 2.4 на примере задачи 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 материала, с целью получения работоспособного определяющего соотношения.

В третьей главе приводится описание методик и экспериментальных схем, позволяющих получать разнообразные характеристики материалов при высокоскоростном растяжении. Описан оригинальный комплекс программ, используемых для получения и обработки экспериментальных данных на каждом этапе исследования: от планирования эксперимента до систематизации и хранения итоговых данных.

Параграф 3.1 посвящен описанию аппаратной базы экспериментального комплекса, реализующего большинство известных на сегодняшний день передовых методик испытаний и регистрации и позволяющий проводить широкий спектр исследований материалов различной физической природы: металлы и сплавы, композиты и керамики, грунты и горные породы, древесину, полимеры и т.д. при температурах от -60 до 350 °С. 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 используются сменные комплекты мерных стержней диаметром 10, 20 и 60 мм из стали, титана и алюминиевого сплава Д16Т, а также мерные трубки. Получение информации о прочностных и деформационных характеристиках материалов производится с использованием метода Кольского и его модификаций. Приводятся формулы Кольского для расчета деформации, скорости деформации и напряжения в образце по импульсам, зарегистрированным в мерных стержнях. Описаны экспериментальные схемы, позволяющие исследовать температурно-скоростные зависимости прочностных и деформационных характеристик материалов различной физической природы при сжатии, растяжении, сдвиге, а также определять характеристики динамического трения для пар материалов. Дано описание нового оригинального комбинированного метода, который предполагает совместное использование в одном эксперименте способа формирования импульса для получения постоянной скорости деформации, метода прямого удара и метода Кольского. Выполнен численный анализ



указанной схемы. Кроме того, выполнен численный анализ и оптимизация конструкции новой экспериментальной установки, позволяющей получать растягивающий импульс нагрузки с применением трубчатого ударника. Описана система экспериментов для верификации моделей вязкопластических материалов: модифицированный тест Тейлора, динамическое индентирование, динамическое диаметрально сжатие. Данная система также использует технику мерных стержней для регистрации временных зависимостей действующих на образец сил.

В параграфе 3.2 приводится описание программных средств, используемых для получения и обработки данных на всех этапах экспериментального исследования и позволяющих: планировать эксперимент, осуществлять управление и считывать данные с измерительно-регистрирующей аппаратуры, проводить первичную обработку сигналов, а также выполнять аппроксимацию экспериментальных данных, систематизировать и накапливать полученную информацию. Приводится описание и верификация (путем сравнения с известными решениями и собственными экспериментальными данными) алгоритмически-программного аппарата, позволяющего осуществлять дисперсионный сдвиг импульсов в мерных стержнях. Получены решения частотного уравнения Почгамера-Кри для мерных стержней, применяемых в экспериментальном комплексе.

Четвертая глава посвящена описанию созданных в ходе диссертационного исследования экспериментально-расчетных методик, в которых численное моделирование используется для интерпретации данных динамического эксперимента.

Параграф 4.1 посвящен проблеме построения истинной кривой деформирования по данным эксперимента на высокоскоростное растяжение вязкопластических материалов с учетом локализации пластической деформации и образования шейки. Выполнен численный анализ динамического процесса локализации деформации и проведено сравнение различных корректирующих формул (методы Бриджмена, Давиденкова-Спиридоновой, Шепинского, Малинина-Петросяна и др.), позволяющих на основании геометрических параметров шейки (радиус минимального сечения  $a$  и радиус кривизны контура шейки  $R$ ) оценить истинное напряжение. Показано, что все методы дают ошибку по истинному напряжению не более 10%. Истинная необратимая деформация в шейке с достаточной точностью определяется как двойной логарифм отношения исходного радиуса рабочей части образца к текущему радиусу образца в шейке. Для случая, когда экспериментальные данные об изменении во времени величин  $a$  и  $R$  отсутствуют, реализована экспериментально-расчетная процедура определения кривой деформирования с учетом образования шейки, которая в качестве входных данных использует только

экспериментально измеренную интегральную силу, действующую на образец в процессе растяжения, а также временную зависимость скорости изменения длины рабочей части образца. При этом истинная кривая деформирования определяется в ходе итерационной процедуры, при которой происходит корректировка кривой из условия совпадения интегральных сил, действующей на образец и полученных в натурном и численном экспериментах. Указанная процедура применена для определения динамических диаграмм деформирования трех материалов: медь М1, алюминиевый сплав 1575 и сплав ЭП-718. Показано, что использование описанной процедуры существенно расширяет 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%.

В параграфе 4.2 описана экспериментально-расчетная процедура определения кривой деформирования материала с использованием данных эксперимента по методу Тейлора. Процедура состоит в определении параметров деформационного упрочнения материала путем минимизации отклонения расчетного профиля образца-ударника от экспериментального. Для поиска оптимального набора параметров используется симплекс-метод Нелдера-Мида. Разработанная процедура использована для определения динамических кривых деформирования образцов из меди С101 в состоянии поставки и после отжига. Полученные кривые хорошо согласуются с данными, полученными с использованием метода Кольского. Максимальное значение скорости деформации в экспериментах по методу Тейлора составило порядка  $10^5 \text{ с}^{-1}$ , что на порядок превышает верхний достижимый предел в методе разрезного стержня.

Параграф 4.3 посвящен описанию экспериментально-расчетной процедуры идентификации параметров вязкопластической модели разрушения Джонсона-Кука. Данная модель учитывает влияние скорости деформации, температуры и вида напряженного состояния на процесс накопления повреждений. Для оценки влияния вида НС на характеристики прочности в экспериментах используются образцы различных конфигураций. В ходе численного анализа показано, что в процессе нагружения в зоне инициирования разрушения параметры состояния могут меняться, поэтому процедура определения параметров модели должна учитывать всю историю нагружения образца. История изменения параметров состояния  $\eta(t)$ , а также история накопления пластической деформации  $\varepsilon_p(t)$  определяются в ходе численных экспериментов. На основании этих данных для каждого такого эксперимента рассчитывается степень поврежденности в момент разрушения, который определяется из соответствующего натурного испытания по данным с мерных стержней. Оптимальный набор параметров определяется из условия

разрушения образцов в виртуальных экспериментах в те же времена, что и в реальных испытаниях. С использованием описанной процедуры определены параметры критерия разрушения для трех сталей: Ст3, 08X18H10T и 20X13.

Описанные в четвертой главе схемы позволили расширить диапазон условий нагружения, в котором можно определить характеристики материала.

Данные о высокоскоростном деформировании и разрушении ряда материалов, полученные с использованием созданного аппаратно-программного комплекса, приводятся в пятой главе.

В параграфе 5.1 описаны результаты исследования характеристик динамического деформирования и разрушения некоторых вязкопластических материалов: титановых сплавов ВТ-6, ВТ-8 и ВТ-20, стали 09Г2С и алюминиевого сплава Д16. Для сплава ВТ-8 сравниваются данные для двух поставок, испытанных в 2012 и в 2016 годах. Отличие кривых деформирования составляет порядка 3.5 %. Показано, что ВТ-8 и ВТ-20 обладают приблизительно одинаковым деформационным упрочнением, однако начальный предел текучести материала ВТ-20 оказывается несколько ниже, чем у ВТ-8 (около 8%). Упрочнение сплава ВТ-6 заметно выше. Отмечается, что рост скорости деформации приводит к увеличению значения пластической деформации, при которой происходит разрыв образцов для всех исследованных титановых сплавов. Для математического описания температурно-скоростных зависимостей радиуса поверхности текучести исследованных сплавов использовались классическая и модифицированные модели Джонсона-Кука. Указанные модели верифицировались с помощью эксперимента на высокоскоростное внедрение инденторов с конической и сферической головной частью.

Представлены результаты испытаний стали 09Г2С (которая благодаря своим высоким прочностным, деформационным и вязкостным свойствам, широко используется в качестве материала корпуса взрывозащитных камер) при сжатии, растяжении и сдвиге, проведенных по методике Кольского и ее модификации. С использованием плосковолнового ударного эксперимента исследована откольная прочность этого материала.

Для всех исследованных материалов получена положительная скоростная и отрицательная температурная зависимости радиуса поверхности текучести.

В разделе 5.2 приводятся результаты экспериментального исследования и математического моделирования динамического поведения объемно-сжимаемого пористого огнеупорного композита ФК-75.

Раздел 5.3 посвящен анализу влияния скорости деформации на характеристики прочности хрупких сред (при сжатии и растяжении методом раскалывания): некоторых горных пород (гранита, габбро-диабазы, известняка, мрамора), мелкозернистого бетона и пресноводного льда. Согласно экспериментальным данным, предельные напряжения для обоих методов испытаний увеличиваются с увеличением скорости деформации или скорости роста напряжений. Полученные данные позволяют оценивать степень скоростного упрочнения разных материалов. Например, известняк имеет меньшую квазистатическую прочность, чем гранит или фибробетон, но при скорости деформации свыше 100 1/с его предельные напряжения превышают предельные напряжения фибробетона и близки к предельным напряжениям гранита. 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. Анализ экспериментальных результатов показывает увеличение предельного напряжения при уменьшении длительности нагрузки.

Определены температурные и скоростные зависимости прочности пресноводного льда при разных видах напряженного состояния (сжатие, растяжение и сдвиг). Отмечено существенное влияние скорости деформации на характеристики прочности. Приводятся результаты верификационных экспериментов, которые могут быть использованы для отработки математических моделей поведения льда в задачах соударения с элементами конструкций.

Скоростные зависимости прочности исследованных хрупких материалов описаны с использованием критерия инкубационного времени разрушения Морозова-Петрова.

В заключении сделаны выводы по результатам выполненных исследований. Предложены актуальные направления дальнейших исследований.

### **Новизна результатов, полученных в диссертации**

Совокупность результатов, полученных в диссертации можно охарактеризовать как новые научные положения в области экспериментального исследования закономерностей динамического деформирования и разрушения материалов. Следует особо отметить комплексность используемого в работе подхода, в котором численное моделирование наряду с экспериментальными методами является важной частью процесса исследования, что позволило расширить диапазон условий (по достигаемым степеням и скоростям



деформации), при которых определяются характеристики материалов, что является несомненным достоинством и новизной рецензируемой работы.

Новыми научными результатами диссертации являются:

- автоматизированный аппаратно-программный комплекс, позволяющий получать и накапливать разнообразную информацию о поведении материалов различной физической природы при сжатии, растяжении, сдвиге, объемном напряженном состоянии, а также определять характеристики динамического трения.
- новая комбинированная методика динамических испытаний, объединяющая метод прямого удара, метод формирования постоянной скорости деформации и традиционную схему Кольского.
- сравнительная оценка различных методов (Бриджмена, Давиденкова-Спиридоновой, Шепинского, Малинина-Петросяна и др.) определения истинных диаграмм деформирования упругопластических материалов за точкой локализации деформации выполненная с использованием численного моделирования.
- экспериментально-расчетная методика построения истинной диаграммы деформирования по результатам эксперимента на высокоскоростное растяжение вязкопластических материалов.
- экспериментально-расчетная методика построения истинной диаграммы деформирования по результатам эксперимента по схеме Тейлора.
- экспериментально-расчетная процедура идентификации критерия разрушения Джонсона-Кука для вязкопластических материалов.
- идентифицированные и верифицированные модели деформирования и разрушения для ряда металлов: титановые сплавы ВТ6, ВТ8, ВТ20, стали 20Х13, Ст3, 08Х18Н10Т, 09Г2С, алюминиевый сплав Д16.
- новые экспериментальные данные о температурно-скоростных зависимостях характеристик ряда малоизученных материалов: хрупкие среды (горные породы, мелкозернистый бетон, фибробетон, пресноводный лед), высокопористый композит ФК-75.

#### **Обоснованность и достоверность научных положений, результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Экспериментальная база созданного комплекса построена на известном методе Кольского и его модификациях, методе прямого удара, методе Тейлора. Техника мерных

стержней, используемая в работе, имеет хорошее теоретическое обоснование и широко распространена как у нас в стране, так и за рубежом. Регистрация первичной экспериментальной информации осуществлялась методами динамической тензометрии с помощью современных цифровых осциллографов.

Достоверность математического моделирования обеспечивается совпадением результатов опытных данных, получаемых с использованием набора специальных тестовых экспериментов с результатами виртуальных (численных) экспериментов.

Таким образом, можно сделать вывод об обоснованности и достоверности основных научных результатов рецензируемой диссертации.

### **Научная и практическая значимость результатов диссертации**

В работе получил развитие экспериментально-теоретический подход к изучению процессов динамического деформирования и разрушения материалов различной физической природы. Для этого разработаны и реализованы новые методики испытаний, в процесс исследования динамического поведения материалов интегрированы инструменты численного моделирования. В целом работа является развитием нового направления экспериментальной науки 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 заключается в том, что экспериментальные данные полученные в работе в виде определяющих соотношений применяются в процессе проектирования изделий в АО «ГосНИИ-маш», АО НПП «Салют», АО «Сатурн», АО "ОКБМ Африкантов", АО «ОДК-Авиадвигатель», ФГУП РЯЦ-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.

### **Публикации по теме диссертационной работы**

Основные 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).

## **Рекомендации по использованию результатов и выводов, приведенных в диссертации**

Методические и программные разработки, изложенные в диссертации, могут быть использованы для исследования закономерностей высокоскоростного деформирования и разрушения материалов в НИИ и лабораториях, связанных с задачами оценки прочности динамически нагруженных конструкций. Полученные в работе экспериментальные данные, а также идентифицированные определяющие соотношения могут применяться для численного моделирования поведения материалов при высокоскоростном деформировании. Банк данных по характеристикам материалов может служить источником информации для инженеров-расчетчиков, выполняющих численный анализ динамических процессов в элементах конструкций.

### **Замечания**

1. Расчетная схема для оценки условий в динамическом эксперименте по методу Кольского предложенная в работе не учитывает волновые эффекты и переходные процессы в образце.

2. В разделе 3.2.4 проводится численный анализ влияния формы импульса на его формоизменение при движении в мерных стержнях за счет эффекта дисперсии, однако не сформулированы практические рекомендации для минимизации этого эффекта.

3. В работе не указаны численные методы, которые используются для оптимизации функций нескольких переменных в задачах аппроксимации экспериментальных данных.

4. В работе не приводится обоснование правомерности использования упрощенной постановки задачи численного моделирования высокоскоростного растяжения образца, когда рассматривается лишь рабочая часть, а наличие галтелей и мерных стержней заменяется граничными условиями. Было бы неплохо сравнить параметры состояния в области локализации при использовании упрощенной постановки и полной постановки, в которой мерные стержни присутствуют явно.

### **Заключение**

Отмеченные замечания не снижают положительной оценки диссертации, научной и практической значимости результатов.

Диссертация «Экспериментально-теоретический подход к исследованию высокоскоростного деформирования и разрушения

материалов с использованием мерных стержней» является законченной научно-квалификационной работой, соответствующей всем требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям Положением о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842, 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.

Отзыв на диссертационную работу обсужден и одобрен после её рассмотрения на объединенном заседании Лаборатории моделирования в механике деформируемого твердого тела и Лаборатории механики технологических процессов в рамках Семинара Проблем механики сплошной среды (руководители Д.В. Георгиевский, С.В. Нестеров), протокол № 11 от «31» мая 2018 г.

Главный научный сотрудник

Лаборатории моделирования в механике деформируемого твердого тела

ИПМех РАН, д.ф.-м.н.,

профессор



Нестеров Сергей Владимирович

*Сведения о ведущей организации:*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук» (ИПМех РАН).

Адрес: 119526, г. Москва, проспект Вернадского, д. 101, корп. 1.

Тел.: +7 (495) 434-00-17;

E-mail: [ipmnet.ru](mailto:ipmnet.ru);

Официальный сайт [ipmnet.ru](http://ipmnet.ru)

Подпись Нестерова  
Ученый секретарь



Засверено  
М.А. / Козлов М.А.