

*На правах рукописи*



**БАСАЛИН АРТЁМ ВЛАДИМИРОВИЧ**

**РАЗРАБОТКА ИНСТРУМЕНТАРИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО  
ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ В  
МАЛОИЗУЧЕННЫХ СКОРОСТНЫХ ДИАПАЗОНАХ**

01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Нижний Новгород – 2022

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

Научный **Константинов Александр Юрьевич,**  
руководитель: доктор физико-математических наук

Официальные **Пушков Виктор Алексеевич,**  
оппоненты: доктор технических наук, доцент, профессор кафедры  
теоретической и экспериментальной механики Саровского физико-  
технического института - филиал федерального государственного  
автономного образовательного учреждения высшего образования  
"Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ"

**Кривошеев Сергей Иванович,**  
доктор технических наук, доцент, профессор Высшей школы  
высоковольтной энергетики Федерального государственного  
автономного образовательного учреждения высшего образования  
"Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого"

Ведущая Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт  
организация: проблем машиноведения Российской академии наук

Защита состоится " 29 " июня 2022 года в 15:00 часов на заседании  
диссертационного совета Д 212.166.09 при Нижегородском государственном  
университете им. Н.И. Лобачевского по адресу: 603022, Н.Новгород, пр. Гагарина,  
23, корпус 6, ауд. 119.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке  
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского и на сайте  
<https://diss.unn.ru/1243>

Автореферат разослан " 13 " \_\_\_\_\_ мая \_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Горохов Василий Андреевич

**Актуальность исследования.** На современном этапе мирового развития одной из основных задач промышленности является создание в минимальные сроки конкурентоспособной и востребованной продукции нового поколения. Не ослабевает интерес к проблемам обеспечения безопасности военных и промышленных объектов, атомных станций, а также крупных общественных зданий в условиях техногенных аварий, природных катастроф, террористических актов, сопровождающихся воздействиями ударного или взрывного характера. Поэтому уже на стадии проектирования зачастую существенная роль отводится оценке уязвимости рассчитываемой конструкции к возможным внештатным ситуациям, связанным с интенсивными динамическими нагрузками. Для расчета НДС и оценки прочности конструкций используются современные вычислительные комплексы, например, такие как ANSYS, LS-DYNA, ABAQUS, ЛОГОС и др. Создание цифровых двойников реальных элементов конструкций многократно облегчает оптимизацию разрабатываемой конструкции и существенно сокращает сроки проектирования, однако требует большого объема достоверной экспериментальной информации.

Хорошо изученным и проработанным с методологической точки зрения для традиционных материалов является квазистатический диапазон скоростей деформаций от  $10^{-3}$  до  $10^{-1} \text{ с}^{-1}$ , в котором используется серийно выпускаемое стандартное испытательное оборудование и динамический диапазон скоростей деформации от  $5 \cdot 10^2$  -  $5 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ , где применяется метод Кольского. Диапазоны скоростей деформаций от 10 до  $100 \text{ с}^{-1}$  и от  $5 \cdot 10^3$  до  $5 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$  для металлов, сплавов и особенно композиционных материалов на сегодняшний день слабо исследованы, однако, эти интервалы скоростей деформаций критически важны для динамических задач оценки прочности конструкций. Для многослойных композиционных материалов на основе стекло- или углеволокна и пластического связующего (полимерные композиционные материалы или ПКМ), широко используемых в настоящее время в ракетно-космической отрасли, авиастроении, судостроении, автомобилестроении, в строительстве для усиления железобетонных конструкций и т.д., практически весь диапазон динамических нагрузок исследован мало.

Необходимость прогнозировать поведение конструкций в условиях возможных аварийных ситуаций, сопровождающихся ударными нагрузками, требует разработку методик и инструментальных средств для определения динамических характеристик материалов в широком диапазоне изменения скоростей деформаций.

**Степень разработанности темы.** Планомерное изучение динамических свойств материалов начали в конце 19 века Дж. и Б. Гопкинсоны.

У нас в стране систематическое исследование свойств материалов при высоких скоростях деформации началось в 30-х годах 20го столетия Н.Н.Давиденковым и было продолжено Ф.Ф.Витманом, В.А.Степановым, Ю.Я.Волощенко-Климовицким, Н.А.Златиным, А.А.Ильюшиным, В.С.Ленским, Р.А.Васиным, А.М.Браговым, и др. За рубежом этим вопросом занимались Р.Дэвис, Дж.Даффи, А.Надаи, Дж.Тейлор, Г.Кольский, Дж.Кэмпбелл, Дж.Белл, У.Линдхольм, А.Кобаяси. На текущий момент закономерности процессов высокоскоростной деформации разных материалов представлены в работах С.А.Новикова, Г.В.Степанова, А.М.Брагова, А.П.Большакова, А.К.Ломунова, О.Б.Наймайка,

В.А. Пушкова, К.Альбертини, Дж.Грея, Дж.Филда, У.Прауда, Я.Клепачко, Дж.Хардинга, Ф.Хаузера, С.Немат-Нассера, Г.Гари, З.Розенберга, и др.

В скоростном диапазоне  $5 \cdot 10^2$ - $5 \cdot 10^3$   $\text{с}^{-1}$  для исследования деформирования и разрушения материалов успешно применяется метод Кольского и его многочисленные модификации. Диапазоны скоростей деформаций от  $10 \text{ с}^{-1}$  до  $100 \text{ с}^{-1}$  и от  $5 \cdot 10^3$  до  $5 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$  на сегодняшний день мало исследованы, поскольку отсутствуют необходимые испытательные установки и методики измерения усилий, смещений, деформаций. Практически отсутствует систематическая информация по методам динамических испытаний композиционных материалов, а также готовые алгоритмы и программы идентификации и верификации динамических моделей деформирования и разрушения ПКМ.

### **Цели и задачи диссертационной работы**

Цель диссертационного исследования заключается в разработке и развитии методик испытаний и создании инструментария для исследования деформирования и разрушения материалов при скоростях деформаций от  $10$  до  $100 \text{ с}^{-1}$  и от  $5 \cdot 10^3$  до  $5 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ , в том числе в разработке экспериментальных схем и средств определения характеристик прочности и деформативности металлических сплавов и полимерных композиционных материалов в условиях динамического нагружения. Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- Разработаны и созданы новые инструментальные средства: экспериментальные испытательные установки; средства регистрации параметров динамических процессов; алгоритмы обработки экспериментальных данных и их программная реализация, создающие сквозную технологию экспериментального исследования поведения материалов в малоизученных скоростных диапазонах.

- Выполнен численный анализ и обоснование созданных инструментальных средств.

- Проведены эксперименты, получены диаграммы деформирования, предельные характеристики прочности и пластичности, а также их скоростные зависимости для ряда материалов в широком диапазоне изменения скоростей деформаций, в том числе в малоизученных диапазонах.

### **Научная новизна:**

В ходе работы была создана новая оригинальная пневмодинамическая установка (ПДУ) для проведения динамических испытаний образцов в диапазоне скоростей деформации от  $10$  до  $100 \text{ с}^{-1}$ . Разработана методика построения истинной диаграммы деформирования материала при растяжении по данным, полученным с использованием ПДУ. С помощью созданной установки впервые исследовано динамическое деформирование образцов из стали 09Г2С (лист 3 мм) при скоростях деформации порядка  $100 \text{ с}^{-1}$  и проведено сравнение с результатами статических и динамических (по методу Кольского) экспериментов. Разработана, численно проанализирована и обоснована новая модифицированная методика обработки экспериментальной информации по методу прямого удара для диапазона скоростей деформации от  $5 \cdot 10^3$  до  $5 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ , учитывающая интерференцию упругих волн в ударнике, необходимая для достоверного расчета деформации образца по данным, зарегистрированным с помощью мерного стержня. Проведена модификация метода Кольского для определения динамических характеристик

ПКМ. Предложена новая экспериментальная схема для определения характеристик прочности слоистого ПКМ при межслойном сдвиге методом выдавливания. Впервые получены экспериментальные данные о скоростных зависимостях характеристик прочности при межслоевом отрыве и межслоевом сдвиге слоистого ПКМ армированного углетканью, а также скоростная зависимость прочности однонаправленного ПКМ при сжатии в направлении армирования.

**Теоретическая значимость** заключается в развитии экспериментальных методик для получения достоверной информации о поведении конструкционных материалов в малоизученных скоростных диапазонах.

#### **Практическая значимость**

Разработанный инструментарий, включающий пневмодинамическую установку, метод прямого удара и модификации метода Кольского, позволяет испытывать материалы в мало изученных на сегодняшний день диапазонах скоростей деформации и может быть использован совместно с другим экспериментальным оборудованием и методиками в процессе комплексного исследования поведения конструкционных материалов в широком диапазоне изменения скоростей деформаций. Полученные экспериментальные данные имеют большое значение для авиакосмической и атомной отраслей, и могут быть также использованы при проектировании защитных контейнеров и современных автомобилей, а также во многих других сферах, где конструкции могут испытывать интенсивные динамические нагрузки, и могут быть рекомендованы к использованию ведущими конструкторами отечественных исследовательских центров (РФЯЦ-ВНИИЭФ, РФЯЦ-ВНИИТФ, ОКБМ Африкантов, ОА ИК АСЭ, ОАО «Атомэнергопроект», АО «ГосНИИмаш» и др.). Предложенные экспериментальные схемы позволяют определять динамические характеристики ПКМ с использованием установок, реализующих модификации метода Кольского, востребованные в том числе при проектировании деталей авиационных двигателей, силовых и несущих элементов корпуса самолетов нового поколения.

**Методология и методы исследования** основаны на методе динамической тензометрии и современном методе корреляции цифровых изображений по данным высокоскоростной видеосъемки для регистрации процессов динамического деформирования и разрушения образцов, на применении метода Кольского на основе разрезного стержня Гопкинсона (РСГ) и ряда его модификаций, реализованных на оригинальных испытательных установках в НИИМ ННГУ. Численное моделирование динамических процессов проводилось с помощью расчетной программы LS-DYNA (лицензия Customer #244793) с применением метода конечных элементов и явной схемы интегрирования уравнений по времени.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Новые инструментальные средства для исследования деформирования и разрушения материалов в малоисследованном диапазоне скоростей деформаций от 10 до 100 с<sup>-1</sup>, включающие оригинальную пневмодинамическую установку для испытания конструкционных материалов при растяжении, средства регистрации динамических процессов, алгоритмы обработки экспериментальных данных и их программная реализация.

2. Модифицированный алгоритм и программа обработки информации, полученной в эксперименте по методу прямого удара для исследования скоростного диапазона от  $5 \cdot 10^3$  до  $5 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ , учитывающий интерференцию волн в ударнике.

3. Экспериментальные данные о деформационных и прочностных характеристиках, а также их скоростных зависимостях для стали 09Г2С в диапазоне скоростей деформаций от  $10^{-3}$  до  $3 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ .

4. Модификации метода Кольского для определения различных характеристик прочности ПКМ (прочность при межслоевом отрыве, при межслоевом сдвиге, а также сжатии в направлении армирования), в том числе оригинальные (выдавливание центральной части образца-параллелепипеда для определения прочности при межслоевом сдвиге и схема крепления образца при сжатии).

5. Экспериментальные данные о скоростных зависимостях характеристик прочности слоистого (сдвиг, отрыв) и однонаправленного (сжатие) ПКМ.

#### **Степень достоверности и апробация результатов**

Достоверность экспериментальных результатов обеспечивается использованием проверенных методов регистрации (тензометрия, метод корреляции цифровых изображений), анализом хронологии высокоскоростной фотосъемки, совпадением данных, полученных разными методами, применением высокоточного экспериментального оборудования.

Основные результаты исследования докладывались: на международном симпозиуме по проблемам механики деформируемых тел, посвященного 110-летию со дня рождения А. А. Ильюшина (Москва, 2021); XXII Зимней школе по механике сплошных сред (Пермь, 2021г.); Международной конференции «International Conference on Nonlinear Solid Mechanics (ICoNSoM2019)» (Рим, 2019 г.); XXV и XXVI Международных симпозиумах «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им.А.Г.Горшкова (Кременки, 2019, 2020 гг.); XIV Международной научно-технической конференции «Dynamic of Technical Systems» (Ростов-на-Дону, 2018 г.)

**Публикации.** Результаты диссертационного исследования опубликованы в 6 научных статьях [1-6], проиндексированных в международных базах цитирования (Web of Science или Scopus), из них 2 [1, 6] опубликованы в журналах из перечня ВАК. Опубликовано 7 тезисов докладов на конференциях различного уровня. Получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ [14].

#### **Личный вклад:**

- Создание новой экспериментальной установки и методологии проведения динамических испытаний образцов при скоростях деформаций порядка  $100 \text{ 1/с}$  [3]
- Проведение экспериментальных исследований поведения материалов при динамических нагрузках [1-13]
- Численный анализ экспериментальных схем динамических испытаний материалов с использованием ПДУ и метода прямого удара [1-3], [6,7], [11-13]
- Разработка модифицированной методики обработки экспериментальной информации, получаемой по методу прямого удара [1, 2]

- Разработка новых экспериментальных схем динамических испытаний композиционных материалов [6, 13, 12]
- Анализ полученных экспериментальных данных и построение скоростных зависимостей характеристик прочности исследованных материалов [1-13]

Разработка программного комплекса обработки экспериментальных данных [14] выполнена в коллективе соавторов. Постановка задач и общее руководство исследованиями принадлежит А.Ю. Константинову. В обсуждении результатов исследований активное участие принимали Л.А. Игумнов, А.М. Брагов и А.К. Ломунов. Помощь при изучении экспериментальных установок и методик проведения экспериментов, а также при проведении экспериментов оказывал А.Р. Филиппов. Результаты статических испытаний стали 09Г2С (лист 3 мм) предоставлены Д.А. Казаковым. Результаты статических испытаний однонаправленного композита предоставлены И.В. Сергеевичевым (Сколковский институт науки и технологий).

**Диссертационная работа выполнена при поддержке** различных фондов, ведомств и государственных программ:

- аналитический обзор, приведенный в главе 1, выполнен при финансовой поддержке гранта Правительства Российской Федерации в рамках Постановления №220 от 09.04.2010 (№14.У26.31.0031 от 05.02.2018)
- Создание новой пневмо-динамической установки в главе 2 выполнено при финансовой поддержке Государственным заданием Минобрнауки России (№0729-2020-0054);
- экспериментальное исследование конструкционной стали 09Г2С, представленное в главе 2 выполнено за счет гранта РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90217;
- глава 3 выполнена при финансовой поддержке Программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» (внутренний номер Н-496-99\_2021-2023);
- экспериментальное исследование поведения ПКМ в главе 4 выполнены при поддержке проекта РНФ № 21-19-00283.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения и списка использованной литературы из 149 наименования, 135 страниц текста, 130 рисунков и 4 таблиц.

### **Благодарности**

Автор выражает благодарность научному руководителю д.ф.-м.н. А.Ю. Константинову, А.М. Брагову, А.К. Ломунову, А.Р. Филиппову, а также всем сотрудникам лаборатории динамических испытаний материалов НИИМ ННГУ за ценные советы и помощь в проведении экспериментов.

## **Содержание работы**

**Во введении** приводится обоснование актуальности темы исследования, научной новизны и практической значимости, сформулирована цель исследования и основные задачи.

**Первая глава** представляет собой обзор литературы, посвященной проблеме диссертационного исследования. В п. 1.1 рассмотрены основные методики изучения динамического отклика конструкционных материалов в диапазоне высоких и средних скоростей деформаций. В п.1.2 рассмотрены основные средства регистрации экспериментальной информации. В п. 1.3 проанализированы схемы динамических испытаний композитов и данные по динамическим характеристикам композитов.

**Во второй главе** приведено описание пневмодинамической установки созданной в НИИ механики ННГУ в ходе решения задач диссертационного исследования, изложена методика получения и обработки экспериментальных данных. Проведен численный анализ деформирования образца и приводятся результаты испытаний стали 09Г2С в широком диапазоне изменения скоростей деформации, в том числе, полученных с использованием созданной оригинальной установки.

Общая схема экспериментальной установки представлена на рисунке 1.

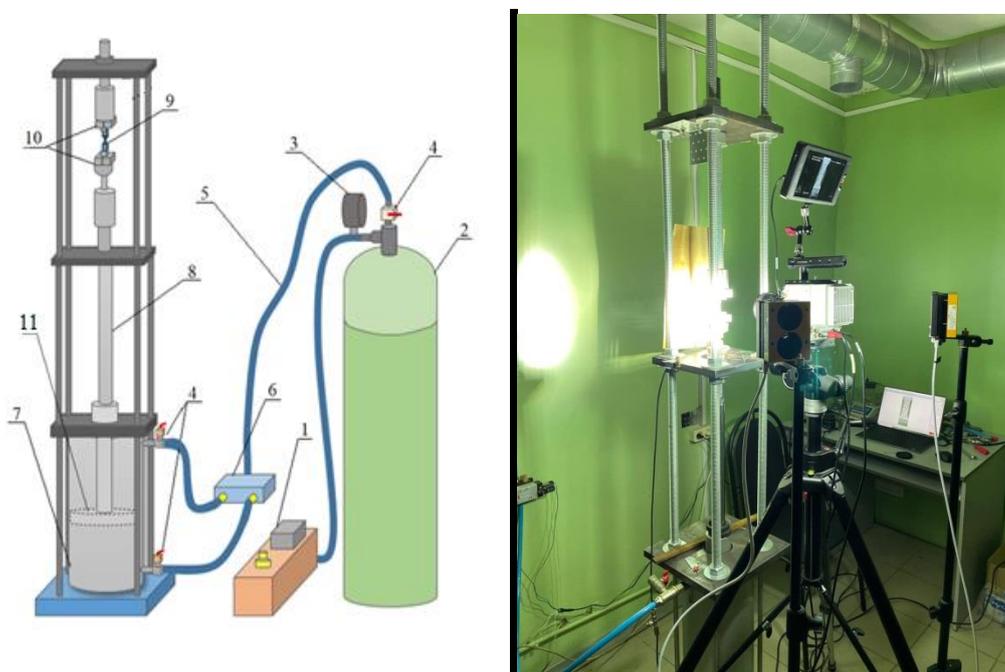


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

Цифрами обозначены: 1 - компрессор, 2 – камера высокого давления, 3 - манометр, 4 - шаровые краны, 5 - соединительные шланги, 6 – электромагнитный пневмораспределитель, 7 - пневмоцилиндр, 8 - нижняя подвижная штанга, 9 - образец, 10 - захваты, 11 - поршень. Для проведения эксперимента на пневмо-динамической установке сжатый воздух нагнетается компрессором (1) в камеру высокого давления (2). Контроль давления производится с помощью манометра (3). После достижения в КВД требуемого давления открывается шаровый кран (4) и сжатый воздух по пневматическому шлангу (5) поступает в электропневматический пневмораспределитель (6). Далее при открытии нижнего шарового крана подается давление в пневматический цилиндр (7), тем самым подводя шток пневмоцилиндра (8) на нужную высоту для фиксации экспериментального образца (9) в специальные захваты (10), которые крепятся к штоку пневмоцилиндра

посредством резьбовых переходников. Чтобы произвести динамическое растяжение образца необходимо чтобы давление выше и ниже поршня (11) пневмоцилиндра было одинаковым. Далее открывается нижний шаровый кран пневмоцилиндра и шток с некоторым усилием растягивает образец. Максимальное усилие, создаваемое пневмоцилиндром, равняется 31 кН. Величина приложенной силы контролируется давлением в камерах цилиндра.

Для определения полей перемещений и деформаций в образце используется высокоскоростная съемка с применением камеры Photron VEO-710L и методика DIC (digital image correlation или метод корреляции цифровых изображений). Перед испытанием на рабочую часть образца наносится хаотичный высококонтрастный точечный спекл-рисунок для обработки цифровых изображений (рисунок 2а). Расположение реперных точек для анализа процессов деформирования образца показано на рисунке 2б. Полученная информация позволяет определить, как среднюю техническую деформацию рабочей части образца (по положению точек P0 и P1), так и локальную эффективную деформацию (область R0).

Для регистрации усилий, действующих на образец в процессе нагружения, на лопаточной части образца наклеивались тензодатчики (рисунок 2в). Выбор положения тензодатчиков обосновывался с использованием численного моделирования. Так как лопаточная часть образца деформируется упруго, то силу в каждый момент времени можно посчитать по формуле:

$$F(t) = \varepsilon_e(t) \cdot E \cdot w_g \cdot h_g$$

где  $\varepsilon_e(t)$  – упругая деформация некоторого сечения лопаточной части образца,  $E$  – модуль Юнга материала образца,  $w_g$  и  $h_g$  – ширина и толщина лопаточной части образца соответственно.

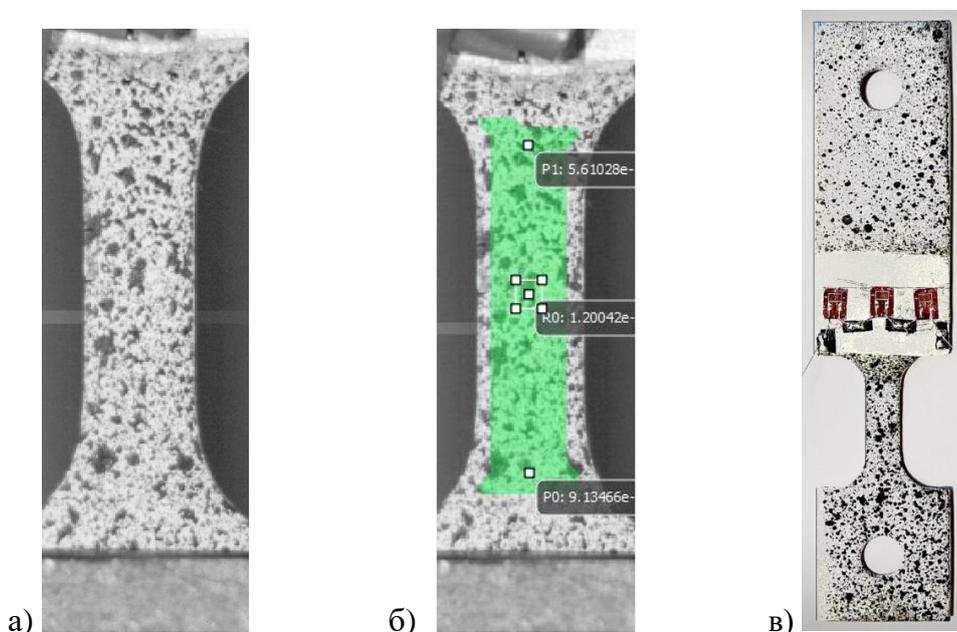


Рисунок 2 – Образец для испытаний на ПДУ

Для определения истинного напряжения в центральной части образца в каждый момент времени определялась ширина рабочей части по данным высокоскоростной видеорегистрации (рисунок 3). Эта информация позволяет посчитать напряжения с учетом

изменения площади сечения образца в ходе деформирования:

$$\sigma_{\text{ист}}(t) = \frac{F(t)}{w(t) \cdot h(t)}$$

где  $w(t)$  – ширина рабочей части образца в момент времени  $t$ ,  $h(t)$  – толщина рабочей части образца в момент времени  $t$ .

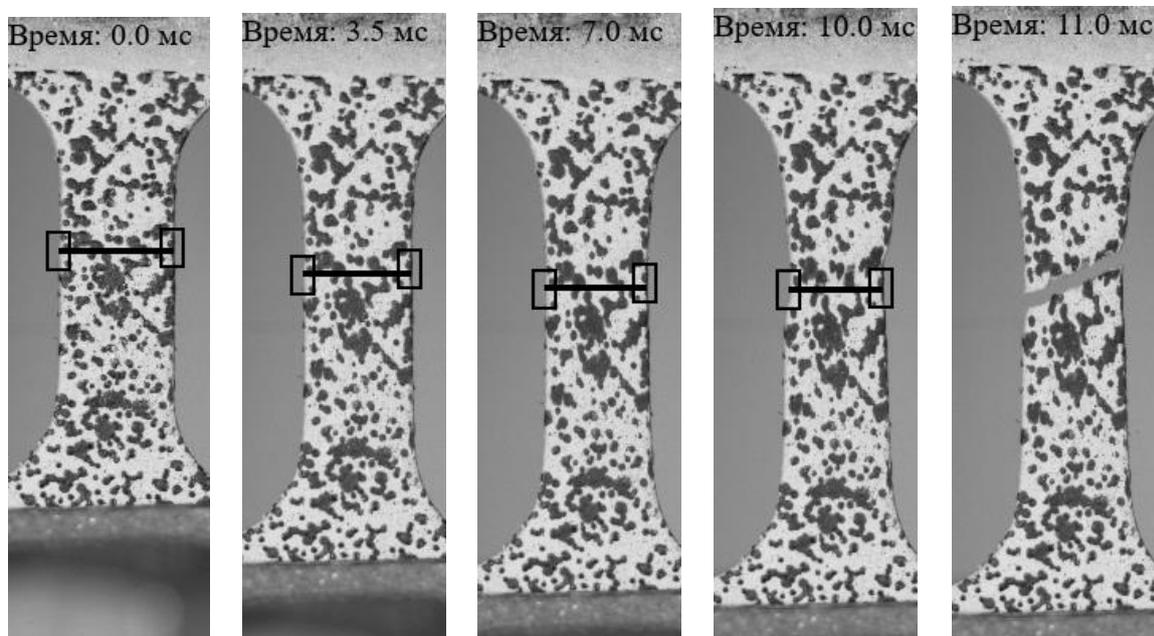


Рисунок 3 – Определение ширины рабочей части образца в процессе растяжения

С применением статической испытательной установки Z100 ZWICK-ROEL<sup>1</sup>, созданного испытательного стенда ПДУ и установок, реализующих метод Кольского и его модификации, получены диаграммы деформирования стали 09Г2С при разных скоростях деформации. Результаты исследования сведены на рисунках 4 и 5. На рисунке 4 представлено сравнение диаграмм деформирования при растяжении, полученных в разных условиях по скоростям деформаций. На рисунке 5 показаны скоростные зависимости условного предела текучести (слева) и относительного сужения после разрыва (справа). Можно сделать вывод о том, что напряжение течения исследованного материала подвержено влиянию скорости деформации. В то же время, величина относительного сужения после разрыва, характеризующая предельную пластическую деформацию разрушения, оказалась нечувствительна к скорости деформации. Условный предел текучести при растяжении для стали 09Г2С меняется от 350 МПа до ~800 МПа при изменении скорости деформации от  $10^{-3} \text{ с}^{-1}$  до  $3 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ . Среднее значение предельного сужения составляет 55 %. Полученные зависимости могут быть использованы в прикладных научных исследованиях для оценок прочности конструкций, подвергающихся динамическим воздействиям, с применением различных программно-вычислительных комплексов.

<sup>1</sup> Результаты статических испытаний стали 09Г2С предоставлены лабораторией НИИ Механики ННГУ (руководитель Д.А. Казаков).

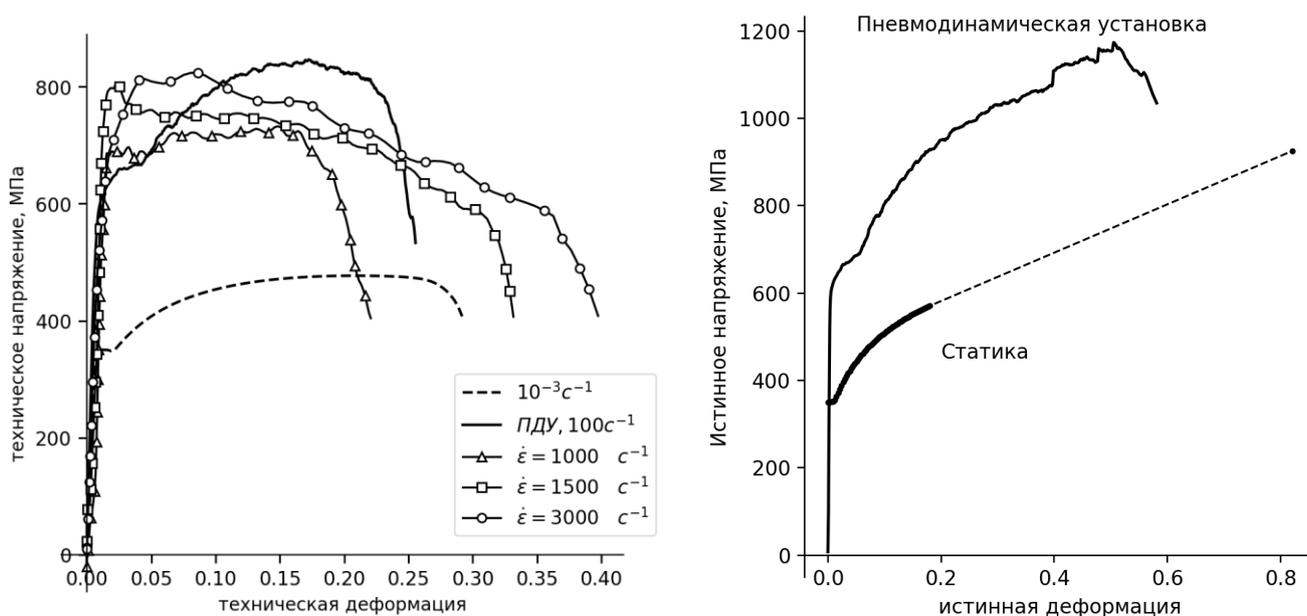


Рисунок 4 – Диаграммы деформирования при растяжении

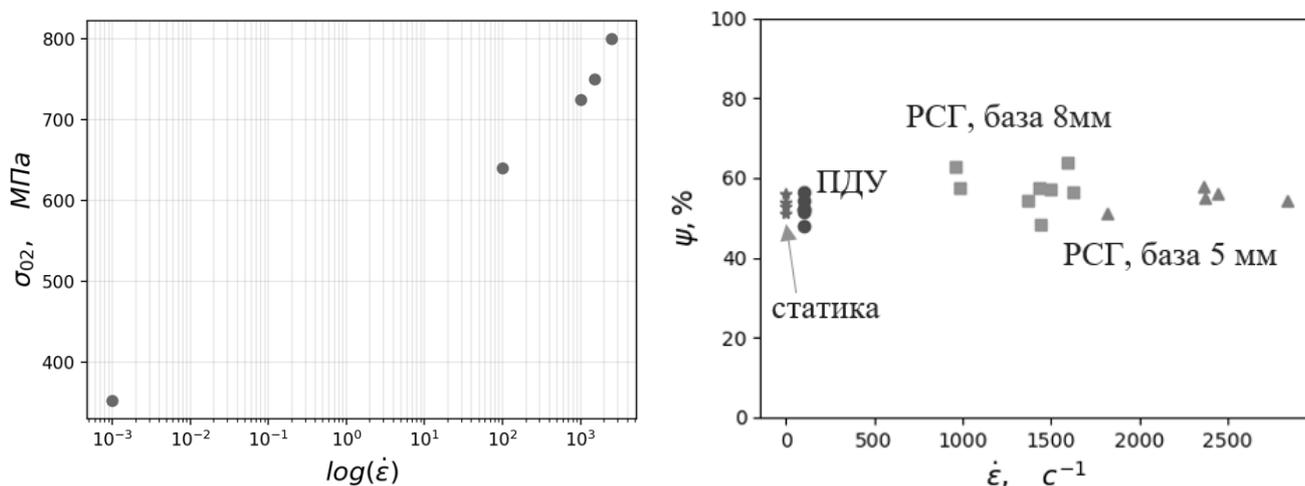


Рисунок 5 – Зависимость условного предела текучести (слева) и относительного сужения после разрыва (справа) от скорости деформации

В третьей главе описана модифицированная методика обработки экспериментальных данных по методу прямого удара. Приводится численный анализ и обоснование этой процедуры.

В методе прямого удара образец располагался на торце мерного стержня длиной 1.5 м и нагружался ударом ударника длиной 300 мм. Для расчета деформации образца и напряжения в нем использовался импульс упругой деформации, зарегистрированный в мерном стержне, и измеренная скорость ударника. Численный анализ эксперимента показал, что расчет движения контактной поверхности «образец-мерный стержень» по данным тензометрических измерений является точным на протяжении всего процесса нагружения образца. Однако, в силу того, что длина ударника как правило мала, по сравнению с длиной мерного стержня, определение временной зависимости скорости границы «ударник-образец» по импульсу в мерном стержне дает точный результат лишь на

временном промежутке, соответствующем двум пробегам упругой волны по ударнику (вертикальная черная линия в левой части рисунка б). Для расчета скорости границы «ударник-образец» предложено использовать модифицированный импульс, учитывающий интерференцию волн в ударнике, и рассчитываемый по формуле:

$$\varepsilon^{\text{mod}}(t) = \varepsilon_T(t) + \sum_{i=1}^N 2 \cdot \varepsilon_T \left( t + 2 \cdot i \cdot \frac{L_{\text{уд}}}{c} \right)$$

здесь  $L_{\text{уд}}$  – длина ударника,  $c$  – скорость звука в материале ударника,  $\varepsilon_T(t)$  – импульс деформации, зарегистрированный в мерном стержне.

Как видно из правой части рисунка б, использование предложенного алгоритма обработки экспериментальной информации позволило достоверно рассчитать историю скорости границы «ударник-образец» на протяжении всего процесса нагружения, а значит более точно определить деформацию образца.

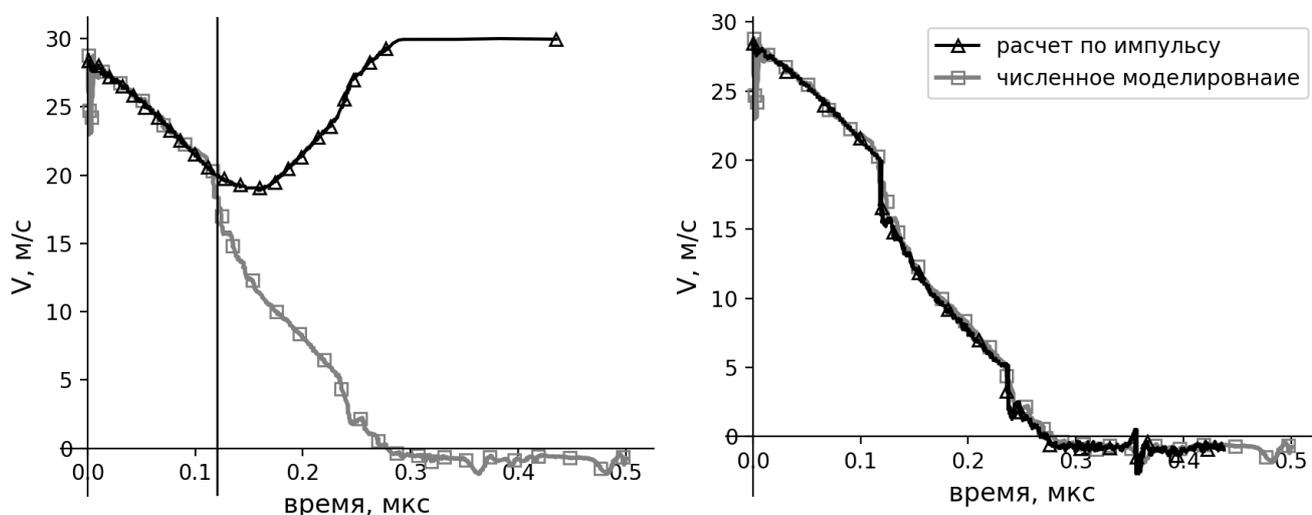


Рисунок б – Расчет скорости движения контакта «ударника-образец». Слева – традиционная процедура обработки, справа – предложенная модификация

В качестве иллюстрации использования метода прямого удара и модифицированной процедуры обработки экспериментальных данных получены диаграммы деформирования при ударном сжатии высокочистой меди (С101) и алюминиевого сплава Д16Т при скорости деформации порядка  $10^4 \text{ с}^{-1}$  (рисунок 7)

**В четвертой главе** приводится описание предложенных экспериментальных схем испытаний полимерных композиционных материалов (ПКМ) на базе метода Кольского и результаты их апробации. Получены экспериментальные данные о скоростных зависимостях характеристик прочности при межслоевом отрыве и межслоевом сдвиге слоистого ПКМ тканого армирования на базе углеродного волокна, а также прочности ПКМ с однонаправленным армированием при сжатии в направлении волокна. Предложена и описана схема для получения экспериментальной информации для верификации расчетных схем и моделей поведения ПКМ на основе динамического изгиба габаритной балки.

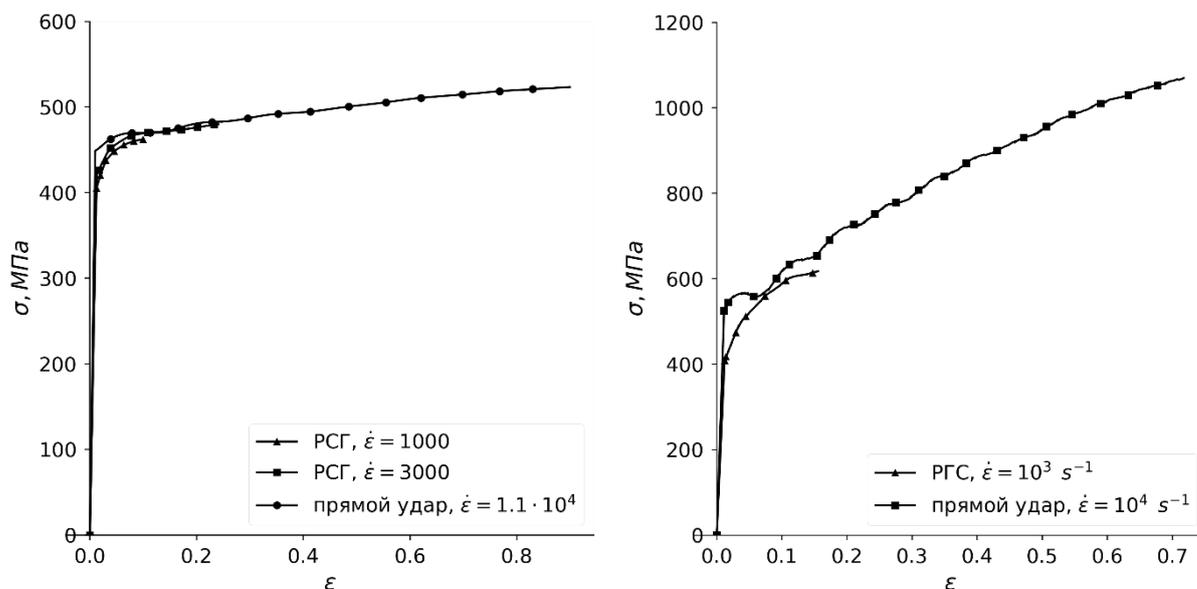


Рисунок 7 – Результаты испытания меди С101 (слева) и алюминиевого сплава Д16Т (справа)

Для определения предела прочности ПКМ в направлении, перпендикулярном плоскости армирования (прочность при межслойном отрыве), используется образец специальной формы, который прикрепляется к мерным стержням с помощью оснастки (рисунок 8). Система нагружается растягивающим импульсом.

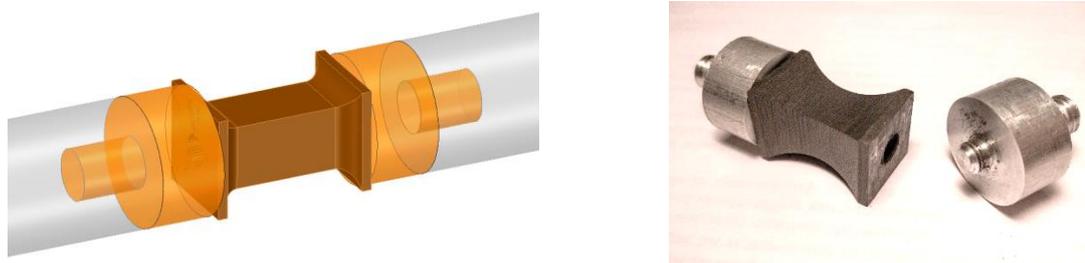


Рисунок 8 – Схема для определения прочности при межслойном отрыве

Для определения предельного напряжения, при котором происходит разрушение образца по типу межслоевого отрыва, используются следующее соотношение:

$$\sigma_3^+ = \max \left( \frac{E_T \cdot S_T \cdot \varepsilon^T(t)}{a^2} \right)$$

здесь  $\varepsilon^T$  – прошедший импульс деформации, зарегистрированный в опорном стержне,  $E_T, S_T$  – модуль Юнга и площадь поперечного сечения опорного мерного стержня,  $a$  – сторона поперечного сечения образца.

Для определения динамических характеристик прочности ПКМ при межслоевом сдвиге предложены и апробированы три экспериментальные схемы: динамический трехточечный изгиб короткой балки, динамическое сжатие/растяжение образцов-пластин с надрезами и динамическое выдавливание средней части образцов в виде параллелепипедов (рисунок 9 слева направо).

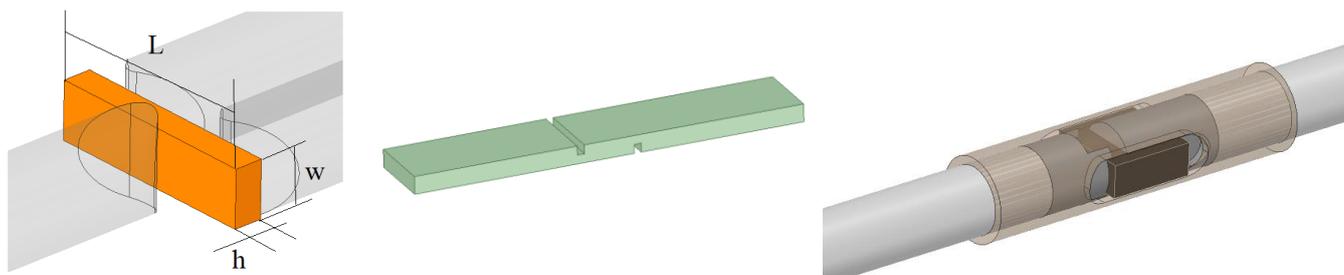


Рисунок 9 – Схемы испытаний для определения характеристик прочности при межслоевом сдвиге

На рисунке 10 приводится сравнение величин прочности ПКМ при межслойном сдвиге для слоистого ПКМ на основе углеткани, полученных разными методами. Можно отметить, что данные полученные методом выдавливания (треугольники) хорошо согласуются с данными определенными при динамическом сжатии образцов с надрезами (квадраты). Характеристика прочности, определенная методом изгиба короткой балки (круглые маркеры), оказалась заметно выше.

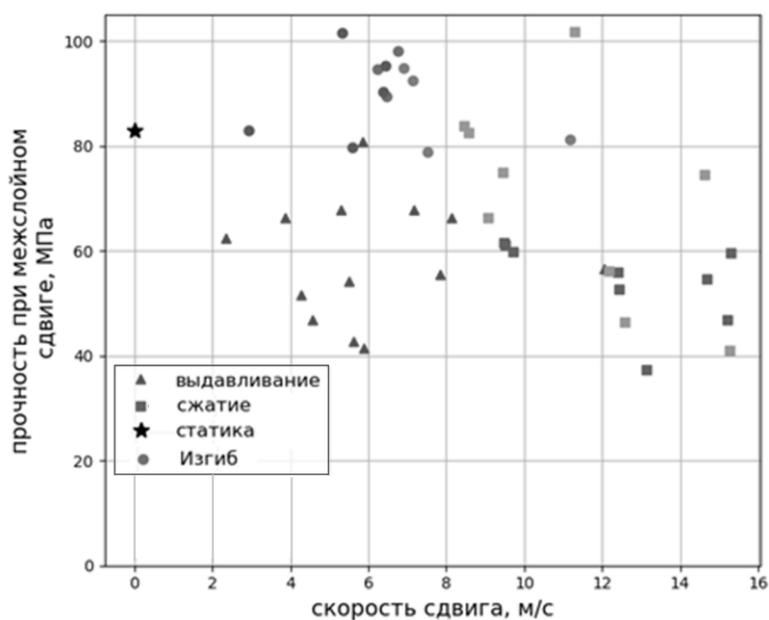


Рисунок 10 – Сравнение данных, полученных разными методами

Результаты сравнительного анализа указанных схем показали, что наиболее предпочтительной является последняя схема (выдавливание средней части параллелепипеда), так как в отличие от изгиба балки она позволяет варьировать и контролировать условия нагружения, а в отличие от испытания надрезанных образцов – является симметричной, что исключает появление в образце изгибающих моментов.

Для определения предельных характеристик разрушения при сжатии образцов из ПКМ, имеющих однонаправленное армирование, отработывалось несколько схем установки образца в системе разрезного стержня Гопкинсона. В первом варианте образец располагался между стержнями без дополнительных приспособлений. Это наиболее простая схема,

однако при этом мода разрушения волокна при сжатии в направлении нагружения не является единственной, реализующейся в данном типе испытания. На контактах «образец-мерный стержень» у образца есть возможность расширяться в направлениях, перпендикулярных направлению нагружения и, таким образом, образец может разрушаться путем расслоения (рисунок 11).

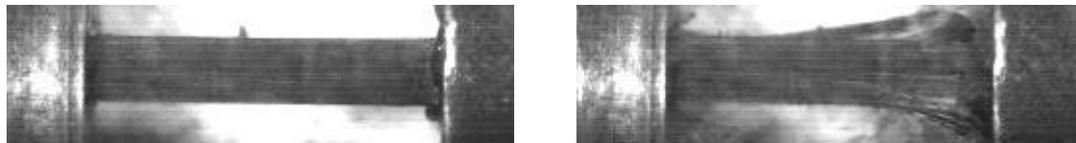


Рисунок 11 – Разрушение образца однонаправленного ПКМ расслоением

Поскольку прочность однонаправленного композита в плоскости перпендикулярной армирующему волокну определяется прочностью связующего, которая значительно ниже прочности армирующего волокна, данная мода разрушения срабатывает раньше и регистрируемое в такой схеме максимальное усилие отвечает суперпозиции различных мод разрушения. Для выделения типа разрушения «потеря несущей способности волокна» при сжатии в направлении армирования предложена и реализована схема крепления образца в мерных стержнях, ограничивающая свободное расширение торцов образца на контактах с мерными стержнями (рисунок 12).

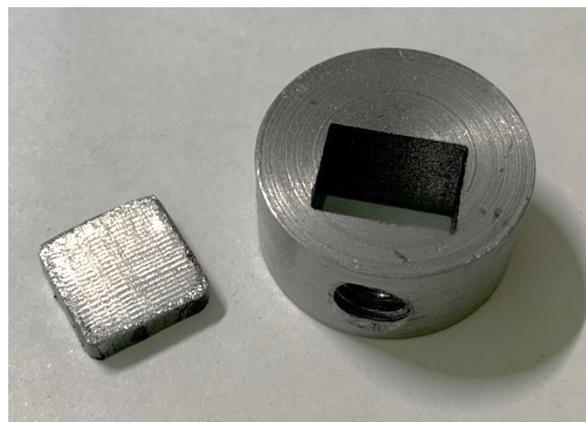
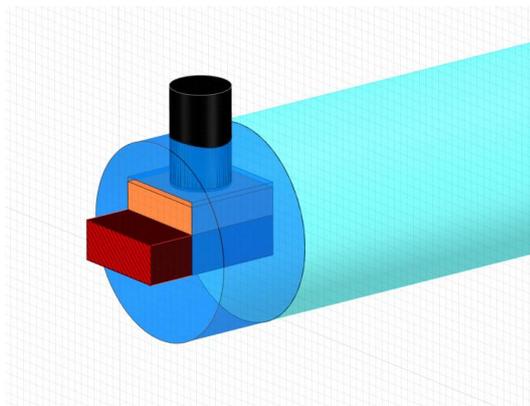


Рисунок 12 – Оснастка для испытания образца в условиях сжатия в направлении армирования

Зависимости предельного напряжения от скорости деформации (слева) и скорости роста напряжений (справа) для однонаправленного ПКМ на основе углеволокна приводятся на рисунке 13. Круглыми маркерами показаны результаты динамических испытаний, треугольниками – статические данные<sup>2</sup>. Можно отметить существенное влияние скорости нагружения на величину напряжения разрушения.

---

<sup>2</sup> Образцы и статические характеристики предоставлены Сколковским институтом науки и технологий

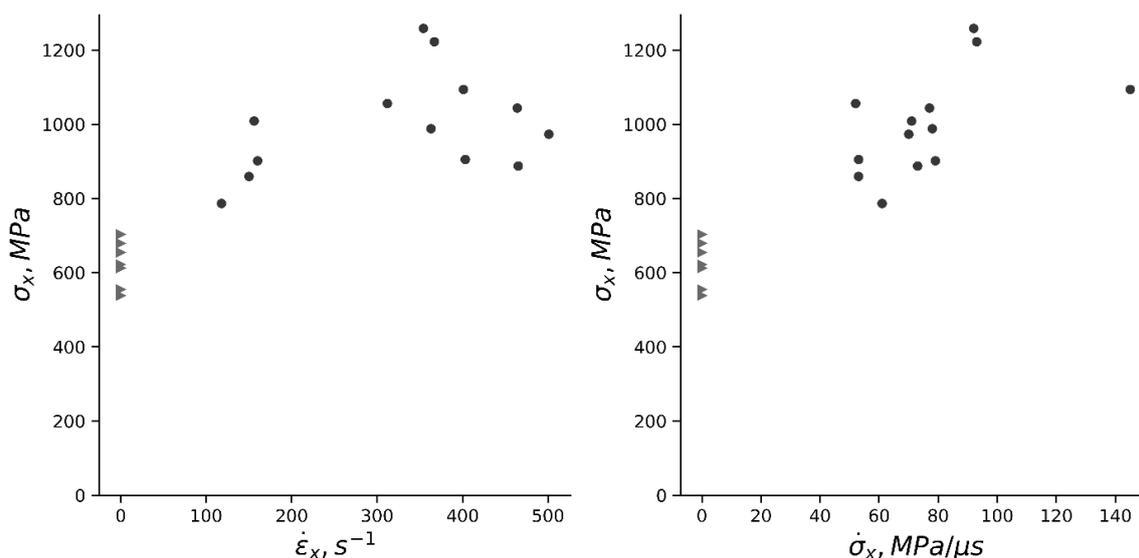


Рисунок 13 – Скоростные зависимости предельного напряжения. Направление  $0^0$

По итогам проведенного теоретически-экспериментального исследования сделаны следующие **выводы и заключения**:

1. Дан анализ работ отечественных и зарубежных авторов, который показал нехватку методик исследования и экспериментальных данных в определенных интервалах скоростей деформаций, а именно в диапазонах от 10 до  $100 \text{ c}^{-1}$  и от  $5 \cdot 10^3$  до  $5 \cdot 10^4 \text{ c}^{-1}$ . В то же время данные о прочностных и деформационных характеристиках материалов в указанных условиях являются востребованными.
2. Показано, что одним из наиболее информативных современных инструментов регистрации процессов деформирования образцов является высокоскоростная видеосъемка с последующим применением метода корреляции цифровых изображений. Применение этого инструмента в составе экспериментальных комплексов существенно повышает точность измерения геометрических параметров деформирования образца.
3. Разработана и создана пневмодинамическая экспериментальная установка, которая позволяет проводить испытания конструкционных материалов в условиях ударного растяжения со скоростью деформации от 10 до  $100 \text{ c}^{-1}$ .
4. Численно обоснована методика достоверного определения силы, действующей на образец в ходе испытания на ПДУ, по данным тензометрических измерений.
5. Разработан алгоритм и программа обработки данных, получаемых с помощью ПДУ, для получения диаграмм деформирования материала (условных и истинных) с определением скорости деформации.
6. Проведены статические и динамические (на ПДУ и по методу Кольского) испытания образцов из стали 09Г2С в широком диапазоне изменения скоростей деформации при сжатии и растяжении.

7. Построены скоростные зависимости прочностных и деформационных характеристик стали 09Г2С. Показано, что напряжение течения исследованного материала подвержено влиянию скорости деформации. В то же время, величина относительного сужения после разрыва, характеризующая предельную пластическую деформацию разрушения, оказалась нечувствительна к скорости деформации. Условный предел текучести при растяжении стали 09Г2С меняется от 350 МПа до ~800 МПа при изменении скорости деформации от  $10^{-3}$  до  $3 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ . Среднее значение предельного сужения составляет 55 %.
8. Выполнен численный анализ экспериментальной схемы, реализующей метод прямого удара для динамических испытаний материалов при скоростях деформаций от  $5 \cdot 10^3$  до  $5 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ , выявивший область применения метода и позволивший сформулировать модифицированную процедуру обработки экспериментальных данных, повышающую точность определения кривой деформирования.
9. Получены диаграммы деформирования меди С101 и алюминиевого сплава Д16Т при скорости деформации порядка  $10^4 \text{ с}^{-1}$  с применением метода прямого удара и предложенной модифицированной процедуры обработки экспериментальной информации.
10. Предложен и реализован на базе техники мерных стержней ряд экспериментальных методов для определения динамических характеристик прочности слоистых полимерных композиционных материалов при межслойном растяжении и сдвиге, а также при сжатии.
11. Экспериментально получены и проанализированы скоростные зависимости некоторых характеристик прочности (прочность при межслойном сдвиге, прочность при межслойном отрыве) слоистого полимерного композиционного материала, армированного углетканью. Указанные данные могут быть использованы в задачах получения численных оценок прочности элементов конструкций, выполненных из подобных материалов.
12. Проанализированы различные варианты экспериментальных схем получения оценок динамической прочности ПКМ однонаправленного армирования при нагружении в направлении волокна. Показано, что для получения достоверных оценок прочности в направлении армирования следует конструктивно исключить моду разрушения образца, связанную с расслоением в направлениях, перпендикулярных направлению армирования. В противном случае оценка прочности оказывается заниженной.
13. Построены скоростные зависимости прочности ПКМ, армированного углеволокном, при сжатии в направлении армирования. Прочность ПКМ при росте скорости деформации от  $10^{-3} \text{ с}^{-1}$  до  $500 \text{ с}^{-1}$  увеличивается от 600 МПа до ~1100 МПа.

14. Предложена и описана процедура получения экспериментальной информации о динамическом изгибе габаритной балки, которая может быть использована для калибровки и верификации расчетных схем, расчетных моделей, а также моделей поведения слоистых композиционных материалов.

## **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Статьи в журналах, входящих в Перечень ВАК Минобрнауки РФ, и в базы**

#### **Web of Science и Scopus:**

1. Константинов А.Ю., Крушка Л., **Басалин А.В.** Развитие метода прямого удара для определения диаграмм деформирования упругопластических материалов при больших деформациях // Проблемы прочности и пластичности. Том 82 № 2 (2020). С. 135-146 (Scopus, ВАК, РИНЦ)
2. Konstantinov A.Y., Igumnov L.A., Belov A.A. Bragov A.M., Eremeyev V.A., **Basalin A.V.** The Direct Impact Method for Studying Dynamic Behavior of Viscoplastic Materials // Journal of Applied and Computational Mechanics. (Web of Science, Scopus)
3. Bragov A.M. Konstantinov A.Y., **Basalin A.V.** Pneumo-dynamic Experimental Setup for Studying the Behaviour of Structural Materials at Strain Rates of the Order of 100 1/s Advanced Structured Materials, 2022, 155, стр. 63–76. (Web of Science, РИНЦ)
4. Bragov A.M., Konstantinov A.Y., Lomunov A.K., Zhidkov A.V., **Basalin A.V.** High Strain Rate Tension Experiments Features for Visco-Plastic Materials // Dynamics, Strength of Materials and Durability in Multiscale Mechanics. Advanced Structured Materials, vol 137. (2021) 191-222 Springer, Cham (Scopus, РИНЦ)
5. Bragov A.M., Konstantinov A.Y., Lomunov A.K., **Basalin A.V.** Solving the problems of strength and destruction of materials and structural elements using a complex experimental-theoretical approach // PNRPU Mechanics Bulletin, 2020, no. 3, pp. 5-11. (Решение задач прочности и разрушения материалов и элементов конструкций с использованием комплексного экспериментально-теоретического подхода // Вестник механики ПНИПУ, 2020, № 3, стр. 5-11) (Scopus, РИНЦ)
6. **Басалин А.В.** Сравнительный анализ схем определения динамической прочности слоистых композитов при межслойном сдвиге // Проблемы прочности и пластичности, т. 84, № 1, 2022 г. с. 105-119 DOI: 10.32326/1814-9146-2021-84-1-105-119 (Scopus, ВАК).

#### **Материалы докладов на научных конференциях и другие научные публикации:**

7. Konstantinov A.Yu., **Basalin A.V.**, Gonov M.E., Filippov A.R. Numerical analysis of influence of length of the working part of specimen on dynamic diagrams of constructional materials obtained by the Kolsky method // XIV International Scientific-Technical Conference “Dynamic of Technical Systems” (DTS-2018), МАТЕС Web of Conferences 226(5):03023, 2018, p. 2174-2180 (Scopus, РИНЦ)
8. Брагов А. М., Константинов А. Ю., Ломунов А. К., **Басалин А.В** Комбинированный способ динамических испытаний конструкционных материалов // Упругость и неупругость. Материалы Международного научного симпозиума по проблемам

- механики деформируемых тел, посвященного 110-летию со дня рождения А. А. Ильюшин. Москва, 2021, стр. 445-458 (РИНЦ).
9. **Basalin A.V.**, Konstantinov A.Yu., Verification of the model of dynamic deformation of aluminum alloy AK4-1 using Taylor test // International Conference on Nonlinear Solid Mechanics ICoNSoM2019 June 16-19, 2019, Palazzo Argiletum, Roma, Italy, ABSTRACT BOOK.
  10. **Басалин А.В.**, Константинов А.Ю. Использование метода Тейлора в процессе исследования высокоскоростного деформирования сталей и сплавов // В книге: Материалы XXVI международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им.А.Г.Горшкова. т.1, с.38-40 Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). Москва, 16-20 марта 2020 (РИНЦ)
  11. **Басалин А.В.**, Константинов А.А., Филиппов А.Р. Методические аспекты исследования динамических характеристик прочности слоистых ПКМ// В книге: Материалы XXVI международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им.А.Г.Горшкова. т.1, с.40-42 Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). Москва, 16-20 марта 2020 (РИНЦ)
  12. **Басалин А.В.**, Брагов А. М., Константинов А. Ю., Ломунов А. К. Определение динамического предела прочности слоистого композитного материала при межслойном сдвиге методом изгиба короткой балки// Труды XX Международной конференции Современные проблемы механики сплошной среды. В 2-х томах. Отв. редактор А.О. Ватульян. 2020. С. 11-15. (РИНЦ)
  13. **Басалин А.В.**, Константинов А.Ю. Верификация модели динамического деформирования алюминиевого сплава АК4-1 с использованием теста Тейлора // В книге: Материалы XXV международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им.А.Г.Горшкова. т.1, с.40-42 Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). Москва, 18-22 марта 2019 (РИНЦ)
  14. **Басалин А.В** Константинов А.Ю. Гонов М.Е. Южина Т.Н. «Построение диаграмм деформирования материалов по данным экспериментов на разрезном стержне Гопкинсона» Свидетельство о государственной регистрации № 2020666341 от 08.12.2020 (РИНЦ)

Подписано в печать 28.04.2022 г. Формат 60'84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1. Заказ № 708. Тираж 100 экз.

Отпечатано с готового оригинал-макета в отделе дизайна и цифровой печати

РИУ ННГУ им. Н.И.Лобачевского

603000, г. Нижний Новгород, ул. Б. Покровская, 37