МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» (ННГУ)

На правах рукописи

And

БАСАЛИН АРТЁМ ВЛАДИМИРОВИЧ

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

01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук

Константинов Александр Юрьевич

Нижний Новгород – 2022

Оглавление

B	ведение	4
1	ОБЗОР МЕТОДОВ ДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ МАТЕРИАЛОВ	14
	1.1Схемы испытания материалов при скоростях деформации	порядка
	100–3000 c ⁻¹	14
	1.2Современные средства регистрации экспериментальной информации.	33
	1.3Схемы динамических испытаний композитов и данные по динам	ическим
	характеристикам композитов.	38
	1.4Выводы по разделу 1	45
2	ПНЕВМО-ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ	
	МАТЕРИАЛОВ ПРИ СКОРОСТИ ДЕФОРМАЦИИ ПОРЯДКА 10-100 С-1	46
	2.1Схема установки	46
	2.2 Методика получения и обработки информации в эксперименте	47
	2.3Численный анализ деформирования образца	57
	2.4Результаты испытаний листовой (3мм) стали 09Г2С в широком ди	иапазоне
	изменения скоростей деформаций	59
	2.5Выводы по разделу 2	68
3	РАЗВИТИЕ МЕТОДА ПРЯМОГО УДАРА	69
	3.1Описание метода	69
	3.2Численный анализ метода прямого удара	74
	3.3Модифицированная процедура обработки данных	
	3.4Выводы по разделу 3	
4	МОДИФИКАЦИИ МЕТОДА КОЛЬСКОГО ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ	
	ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПКМ	79
	4.1Определение прочности ПКМ при межслоевом отрыве	79
	4.2Определение прочности ПКМ при межслоевом сдвиге	82
	4.2.1 Динамический изгиб короткой балки	82
	4.2.2Динамическое сжатие образцов с надрезами	89
	4.2.3Динамическое выдавливание середины образца-параллелепипеда	92
	4.3Динамическое сжатие образцов из ПКМ	97
	4.4Трехточечный изгиб балки для верификации расчетных схем и	моделей
	материалов ПКМ	110

	4.5Выводы по главе 4	115
5	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	117
6	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	120

Введение

Актуальность работы

Ha современном этапе мирового развития одной ИЗ основных задач промышленности является создание в минимальные сроки конкурентоспособной и востребованной продукции нового поколения. Также не ослабевает интерес к проблемам обеспечения безопасности военных и промышленных объектов, атомных станций, а также крупных общественных зданий. Поэтому уже на стадии проектирования зачастую существенная роль отводится оценке уязвимости рассчитываемой конструкции к возникновению внештатных ситуаций, связанных с интенсивными динамическими нагрузками. Примерами таких динамических воздействий могут быть террористические акты, техногенные катастрофы, удар птицы о лопатки газотурбинных двигателей самолетов и многое другое. В автомобильной промышленности моделирование динамических процессов требуется для анализа краштестов. В металлообработке – при разработке технологических операций ковки, штамповки, прокатки. На современном этапе развития хорошо изученным и проработанным с методологической точки зрения является квазистатический диапазон скоростей деформаций (от 10⁻³ до 10⁻¹ с⁻¹) и динамический диапазон для скоростей деформации от 5·10² до 5·10³ с⁻¹. Диапазон скоростей деформаций от 10^0 с⁻¹до 10^2 с⁻¹ на сегодняшний день слабо исследован, однако, этот интервал скоростей деформаций критически важен для задач оценки прочности конструкций при падении и низкоскоростном ударе. Так в задаче расчетного обоснования функциональных характеристик транспортных упаковочных контейнеров для ядерного топлива высокие скорости деформации возникают лишь в зоне контакта на непродолжительное время, в то время как для оценки сохранения герметичности контейнера важны процессы, протекающие при скоростях деформации от 10⁰ с⁻¹до 10² с⁻¹. Подобная же ситуация имеет место при проектировании элементов авиационной техники, для задач разработки элементов пассивной безопасности автомобилей (краштесты), где режимы нагружения также лежат в диапазоне малых и средних скоростей деформации. Кроме того, динамическое деформирование конструкций, как правило, состоит из двух этапов. На первом этапе интенсивного динамического нагружения конструкция или её элемент деформируется локально с большой скоростью порядка $10^2 - 10^4$ с⁻¹. На втором этапе - периоде последействия - деформирование конструкция происходит уже в больших масштабах и намного медленнее под действием инерционных нагрузок при скоростях 10^0 с⁻¹- 10² с⁻¹. Второй этап в ряде случаев может определять разрушение конструкции,

поэтому важны, знания прочностных и деформационных характеристик, которые используются для оснащения математических моделей деформирования и критериев разрушения.

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. Если сравнить экспериментальный подход с математическим моделированием, то в последнем случае появляется возможность анализировать большее число вариантов компоновки и эксплуатационных условий. Численные методы и современные вычислительные мощности обеспечивают возможность с достаточной степенью точности решать сложные системы математических уравнений, описывающих процессы, протекающие в конструкции под действием тех или иных факторов, описывать поведение материалов сложными нелинейными математическими моделями, а также учитывать различные геометрические и физические особенности. Для оснащения определяющих соотношений и критериев разрушения необходимыми для расчета характеристиками и константами крайне необходима обширная база по динамическим свойствам материалов различной физической природы (грунты и горные породы, металлы и сплавы, полимеры и композиты и т.д.). Именно определяющие соотношения во многом задают качество цифрового двойника в плане его тождественности реальному объекту. Кроме того, процесс построения достоверного определяющего соотношения должен содержать этап верификации модели, который показывает насколько сформированное в процессе исследования модельное представление (как физическое, так и математическое) о поведении материала позволяет прогнозировать высокоскоростное деформирование хоть и упрощенных, но реальных элементов конструкций, в условиях близких к эксплуатационным нагрузкам.

Для определения динамических свойств материалов и среднем диапазоне скоростей деформации $(10^0...10^2 \text{ c}^{-1})$ на сегодняшний день нет общепринятых стандартных методик и массово производимых исследовательских установок, и оборудования. Особое значение имеет изучение влияния скорости деформации и истории ее изменения на физикомеханические свойства современных перспективных материалов (новые металлы и сплавы, полимеры, композиты, керамика и т.д.). В связи с этим разработка нового инструментария и методик проведения динамических испытаний, расширяющих диапазон исследуемых условий нагружения, общирные исследования динамического поведения и

создание банка данных динамических свойств конструкционных материалов имеет существенную важность и значимость.

Следует отметить, что традиционные конструкционные материалы такие как металлы и сплавы достаточно подробно исследованы. Многослойные композиционные материалы на основе стекло или углеволокна и пластического связующего (полимерные композиционные материалы или ПКМ) в настоящее время широко используются в ракетно-космической отрасли, авиастроении, судостроении, автомобилестроении, в строительстве для усиления железобетонных конструкций и т.д. Их применение обусловлено высокой прочностью при относительно малой плотности, термостойкостью и другими улучшенными механическими свойствами. Как правило реология КМ очень сложна. Подобные материалы представляют собой ортотропную среду с разными значениями жесткости и прочности при разных типах нагружения (растяжение, сжатие, сдвиг, сложное напряженное состояние). В статической области скоростей деформации свойства композитов достаточно хорошо изучены. Существует порядка 70 ГОСТ'ов на испытания композитов, из них около 30 относятся к методам определения механических характеристик. Однако, необходимость прогнозировать поведение конструкций из ПКМ в условиях возможных аварийных ситуации, сопровождающиеся ударными нагрузками, требует разработку экспериментальных методов для определения динамических характеристик ПКМ с учетом их особенностей. Известно, что стандартизированные методы динамических испытаний ПКМ, а также стандартное испытательное оборудование отсутствует. Доступные разрозненные экспериментальные данные о влиянии скорости деформации на прочностные свойства отдельных классов композитов для конкретных условий нагружения говорят о том, что прочность композита в направлении армировании слабо зависит от скорости деформации и существенно зависит от скорости деформации при режимах нагружения, в которых велика доля работы связующего. В связи с этим, разработка методов и схем определения широкого спектра деформационных и прочностных характеристик ПКМ в динамической области нагружения является весьма актуальной задачей.

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.Волошенко-Климовицким, Н.А.Златиным, А.А.Ильюшиным, В.С.Ленским, Р.А.Васиным 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.Наймарка, 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.

Основные принципы экспериментально-теоретического подхода к изучению динамической деформации и разрушения материалов были обозначены в работах А.А. Ильюшина и А.Г. Угодчикова, к сожалению, на тот момент времени уровень экспериментальных методик, вычислительного оборудования и методов численного моделирования не были достаточно высоко развиты для полноценного раскрытия их идей.

В настоящее время квазистатический диапазон скоростей деформации (от 0.003 до $10c^{-1}$) хорошо изучен и проработан с методической точки зрения. Также относительно хорошо изучен динамический диапазон для высоких скоростей деформации от $(2 \cdot 10^2 c^{-1} \text{до} 5 \cdot 10^3 c^{-1})$. Однако необходимо отметить что диапазон скоростей деформаций от (10 c^{-1} до $100 c^{-1}$) на сегодняшний день практически не исследован, поскольку отсутствуют необходимые испытательные установки и методики измерения усилий, смещений, деформаций.

Для эффективного проектирования перспективных конструкций ИЗ ПКМ, работающих в широком диапазоне скоростей деформаций, необходимы определяющие соотношения и критерии прочности, устанавливающие связь между условиями нагружения и предельными состояниями материалов. Сейчас мало разработанных схем испытаний композиционных материалов при высоких скоростях деформации, а стандартизированные методы испытаний практически отсутствуют. Решение этой научной проблемы требует модификаций традиционных методов динамических испытаний изотропных материалов, таких как, метод разрезного стержня Гопкинсона (метод Кольского). Сам диапазон скоростей деформаций, которые могут быть реализованы при использовании метода Кольского ограничен в силу одного из основных условий методики – упругого деформирования мерных стержней. Предлагаемые модификации метода Кольского, расширяющие его рабочий диапазон (например, метод прямого удара), требуют теоретического обоснования и разработки методов анализа экспериментальной информации для достоверного определения характеристик материалов.

/

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 с⁻¹ и от 5·10³ до 5·10⁴ с⁻¹, в том числе в разработке экспериментальных схем и средств определения характеристик прочности и деформативности новых 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 и получены диаграммы деформирования и 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 скоростей деформации.

Для достижения поставленных целей в работе были решены следующие основные задачи:

- Разработан и реализован уникальный экспериментальный комплекс, позволяющий исследовать механические свойства конструкционных материалов в скоростном диапазоне от 10⁰ с⁻¹до 10² с⁻¹.
- 2. Проведены эксперименты и впервые получены диаграммы деформирования некоторых материалов в широком диапазоне изменения скоростей деформаций.
- 3. Впервые предложена, численно проанализирована и обоснована модифицированная процедура обработки данных, полученных по методу прямого удара, позволившая расширить диапазон скоростей деформаций и пластических деформаций, в котором указанный метод дает достоверную информацию о свойствах материала.
- 4. На базе метода Кольского разработаны экспериментальные схемы и созданы соответствующие установки для определения жесткостных и прочностных характеристик ПКМ при сжатии, межслоевом отрыве и межслоевом сдвиге.

- 5. Предложена новая экспериментальная схема для определения характеристик прочности слоистого ПКМ при межслойном сдвиге методом выдавливания.
- Проведено сравнение трех экспериментальных схем для определения прочности ПКМ при межслойном сдвиге.
- Впервые получены экспериментальные данные о скоростных зависимостях характеристик прочности при межслоевом отрыве и межслоевом сдвиге слоистого ПКМ армированного углетканью.
- Проведены эксперименты на трехточечный изгиб балок из слоистого ПКМ с применением скоростной видео фиксации с целью регистрации информации о процессе деформирования образцов по методу DIC для использования в процедурах верификации.

Научная новизна

В ходе работы была создана новая оригинальная пневмодинамическая установка (ПДУ) для проведения высокоскоростных испытаний образцов в диапазоне скоростей деформации от 10 до 100 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 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 5·10³ до 5·10⁴ с⁻¹, учитывающая интерференцию упругих волн в ударнике, 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.

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. Полученные

экспериментальные данные имеют большое значение для аэрокосмической и атомной отраслей, и могут быть использованы при проектировании защитных контейнеров и современных автомобилей, а также во многих других сферах, где конструкции могут испытывать интенсивные динамические нагрузки, 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.

<u>Методология и методы исследования</u> 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⁻¹, 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 обработки информации, полученной в эксперименте по методу прямого удара для исследования скоростного диапазона от 5.10³ до 5.10⁴ 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⋅10³ 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 научном 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, проиндексированных в международных базах цитирования (Web of Science или Scopus), из них 2 опубликованы в журналах из перечня ВАК. Опубликовано 7 тезисов докладов на конференциях различного уровня. Получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад:

- Создание новой экспериментальной установки и методологии проведения динамических испытаний образцов при скоростях деформаций порядка 100 1/с [1]
- Проведение экспериментальных исследований поведения материалов при динамических нагрузках [1-13]
- Численный анализ экспериментальных схем динамических испытаний материалов
 [1-3], [1006,1007], [11-13]
- Разработка модифицированной методики обработки экспериментальной информации, получаемой по методу прямого удара [2, 3]

- Разработка новых экспериментальных схем динамических испытаний композиционных материалов [6, 12, 13]
- 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. Сергеичевым (Сколковский институт науки и технологий).

<u>Диссертационная работа выполнена при поддержке</u> 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 H-496-99_2021-2023);
- экспериментальное исследование поведения ПКМ в главе 4 выполнены при поддержке проекта РНФ № 21-19-00283.

<u>Структура и объем диссертации.</u> Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения и списка использованной литературы из 149 наименования, 135 страниц теста, 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.

1. Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы, степень ее разработанности, обозначены цели исследования, показана её научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы и степень достоверности результатов, отмечены публикации, и личный вклад соискателя.

В первой главе выполнен 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 пневмо-динамической установки созданной в НИИ механики ННГУ, изложена методика получения и обработки экспериментальных данных. Проведен численный анализ деформирования образца и приводятся результаты испытаний материала в среднем диапазоне скоростей деформации. Также представлено сравнение полученных данных с данными полученными в статике и в динамике.

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

В четвертой главе предложены экспериментальные схемы испытаний полимерных композиционных материалов (ПКМ) с использованием установки по методу Кольского. Получены экспериментальные данные о скоростных зависимостях характеристик прочности при межслоевом отрыве и межслоевом сдвиге слоистого ПКМ тканого армирования на базе углеволокна. Предложена и описана схема для получения экспериментальной информации для верификации расчетных схем и моделей поведения ПКМ на основе динамического изгиба габаритной балки.

В заключении сформулированы основные результаты проведенного исследования.

1 Обзор методов динамических испытаний материалов

1.1 Схемы испытания материалов при скоростях деформации порядка 100-3000 с⁻¹

Интерес к изучению процессов динамического деформирования и разрушения материалов обусловлен тем, что большое количество важных задач при оценке прочности новых конструкций требует точного определения прочностных и деформационных характеристик материалов в зависимости от скорости деформации.

Такие зависимости чрезвычайно важны для получения достоверных оценок напряженно-деформированного состояния и прочности конструкций, испытывающих динамические нагрузки в результате техногенных аварий, террористических актов, падений и т.д.

Также динамические задачи оценки прочности связаны с авиа- и железнодорожным транспортом, автомобильными перевозками контейнеров с отработавшим ядерным топливом, демонтажем ядерных зарядов во взрывозащищенные контейнеры, работами на АЭС (загрузка, транспортировка тепловыделяющих элементов, сборок, контейнеров, падение оборудования).

В аэрокосмической промышленности подобные задачи возникают вследствие обрыва лопатки вентилятора авиационного двигателя из-за усталости материала, попадания птиц, льдин, града, камней в двигатель и возможного столкновения космического мусора с орбитальными станциями. В автомобильной промышленности для анализа краш-тестов требуется динамическое моделирование. В металлообработке динамические задачи возникают при разработке технологических операций по ковке, штамповке, прокатке. Горная инженерия часто включает сценарии динамического нагружения, такие как выработка полезных ископаемых, гражданское строительство, взрывные работы, удар снаряда, сейсмические события и обрушение горной породы.

В настоящее время существует множество методов исследования динамических свойств материалов при скоростях деформации от 10² до 10⁴с⁻¹. Основными методами являются копровые испытания, кулачковый пластометр, методика Кольского и Тейлора.

Наиболее широкую популярность получил метод Кольского на основе разрезного стержня Гопкинсона (РСГ) [15] за счет своей простоты и точной теоретической обоснованности, достоверного определения деформации образца, а также исключение изгиба образца из-за его малой длинны по отношению к стержням. На сегодняшний день с использованием метода Кольского испытано множество конструкционных материалов различной физической природы [16-30]. Основной смысл методики заключён в том, что

из-за небольшой длины образца по сравнению с длиной нагружающего импульса в испытуемом образце создается одноосное напряженное состояние. Благодаря этому напряжения и деформации по всей его длине распределяются равномерно. В основу этой методики входит система из двух мерных стержней с высоким пределом текучести, между которыми располагается образец из исследуемого материала. Также предел текучести образца должен быть меньше предела текучести стержней. Картина распространения волн в системе РСГ представлена на лагранжевой *x-t* диаграмме (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 - *х*-*t* диаграмма

В нагружающем стержне с помощью ударника создается нагружающая волна сжатия $\varepsilon^{I}(t)$. Перемещаясь по стержню, волна через некоторое время $t_{1} = \frac{L_{1}}{C_{1}}$

 $(L_1 - длина нагружающего стержня) доходит до образца и распадается: часть волны отражается обратно волной растяжения <math>\varepsilon^R(t)$, а часть проходит через образец во второй стержень (опорный) волной $\varepsilon^I(t)$. Образец при этом получает большую упругопластическую деформацию.

В настоящее время используется множество модификаций метода РСГ на сжатие, растяжение, срез, крутильные испытания и т.д. Разные варианты модификаций метода представлены в таблице 1.1.



Таблица 1.1 - Модификации испытаний по методу Кольского

Описание различных вариантов РСГ можно найти в работах [31-44]. Впервые предложил использовать РСГ для проведения исследования на растяжение У. Линдхольм [45]. По его замыслу для испытаний использовался образец в форме колпачка (рисунок 1.2 а), а опорный стержень – в форме тонкостенной трубки.



Рисунок 1.2 - Основные схемы испытаний на сжатие и растяжение

Минусом такой схемы испытаний является присутствие сдвиговых компонент напряжений и деформаций в испытуемом образце, что сильно ухудшает чистоту определения диаграммы деформирования. Другой вариант испытаний на растяжение с использованием РСГ предложил Т. Николас. В этом варианте образец нагружается волной растяжения, которая генерируется после отражения волны сжатия от свободного торца опорного стержня. Для того что бы образец не испытывал деформацию при прохождении волны сжатия используют твердые сухарики - проставки (рисунок 1.26). Подобные схемы испытаний на растяжение реализованы в работе [46].

В работе [47] была предложена схема РСГ на кручение. Образец и стержень были изготовлены в виде тонкостенных трубок. Предварительно упруго закрученный нагружающий стержень освобождался посредством механического затвора. Величиной закрутки определялись амплитуда и длительность сдвиговой волны. Данный метод позволил проводить испытания при скоростях деформации до 30000 с⁻¹.

Тейлор и Уинни [48] предложили метод, позволяющий определять характеристики материалов при больших значениях скоростей деформаций (порядка 10³-10⁵ с⁻¹). Данный метод позволяет проводить оценку напряжения течения по остаточным деформациям в цилиндрическом образце после удара о жесткую преграду (рисунок 1.3).



Рисунок 1.3 - Образец после испытания

В основе метода лежит предположение об постоянстве распространения пластической волны в материале. Динамический предел текучести можно определить по формуле:

$$\sigma = \rho v_0^2 \frac{l_0 - H}{2(l_0 - l)} \frac{1}{\ln(l_0 / H)},$$

здесь ρ- плотность материала, ν₀ – начальная скорость образца, l₀ – длина образца до испытания, *l* – длина образца после испытания, *H* – длина недеформированной части образца после испытания.

Метод Тейлора и сейчас пользуется большой популярностью, поскольку он прост в исполнении и позволяет получить необходимые данные о поведении материала при больших скоростях деформации [49-53]. Традиционно метод Тейлора широко 17

используется в качестве верификационного эксперимента в процессе построения математических моделей поведения вязкопластических материалов. При этом верификацию модели, параметры которой определены на базе данных, полученных, например, с использованием метода Кольского, производят путем сравнения форм образца после или, если использовалась высокоскоростная кинорегистрация процесса соударения, в ходе соударения с преградой, полученных в натурном и виртуальном (численном) экспериментах. Подобная верификация помимо проверки адекватности математической модели позволяет обосновать её применимость в более широком диапазоне скоростей деформаций и достигаемых пластических деформаций.

В таблице 1.2 сведена информация о наиболее широко использующихся в настоящее время методиках испытаний и их рабочих диапазонах по скорости деформации.

Скорость деформации, 1/с	Экспериментальные методики
<0.1	Традиционные испытательные установки
0.1-100	Специальные сервогидравлические машины
0.1-500	Кулачковый пластометр и копровые установки
200-10 ⁴	Метод Кольского
$10^3 - 10^5$	Метод Тейлора

Таблица 1.2 – Диапазон скоростей деформаций для различных методик испытаний [54]

Следует отметить, что общепринятой практикой является интерполяция скоростных зависимостей характеристик материалов на базе доступной экспериментальной информации. Причем наиболее распространенным является подход, при котором характеристика считается линейно зависящей от логарифма скорости деформации.

Существует ряд работ, посвященных исследованию поведения конструкционных материалов в диапазоне средних скоростей деформаций. В [55] была представлена ортогональная резка металла как новый метод определения характеристик бессвинцовых припоев. Эксперименты проводились с использованием клиновидного инструмента, который прорезал заготовку на фиксированной глубине, сохраняя при этом постоянную скорость резания. Эти эксперименты проводились при комнатной температуре на массивных образцах Sn1.0Ag0.5Cu со скоростью деформации от 0,32 до 48 с⁻¹. Диапазон скоростей деформации ограничен только ползуном с шарико-винтовой передачей, позволяющим при необходимости получать более высокие скорости деформации. Деформации и скорости деформации регистрировались с помощью метода измерения

скорости изображения частиц (PIV) с использованием последовательных изображений, полученных с высокоскоростной камеры непосредственно перед режущим инструментом. Показано, что ортогональная резка металла является потенциально привлекательным методом определения характеристик припоя при более высоких скоростях деформации. В [56] проанализировано влияние скорости деформации на механические свойства при растяжении промышленного алюминиевого сплава AA7081. Испытания проводились на трех различных установках для квазистатических, средних и высоких скоростей деформации. Испытания средней скорости деформации проводились на гидропневматической машине (HPM) (рисунок 1.4) [57].

НРМ имеет цилиндрический резервуар, который разделен на две камеры герметичным поршнем. В начале испытания одна камера, которая находится ближе к образцу, заполняется газом (обычно воздухом) под высоким давлением (например, 150 бар), а другая - водой. В обеих камерах устанавливается одинаковое давление, так что силы, действующие на две поверхности поршня, находятся в равновесии. Конец вала поршня соединен с одним концом образца, а другой конец образца соединен с упругой штангой, жестко закрепленной на машине. Этот упругий стержень оснащен тензодатчиком, функция которого заключается в измерении нагрузки, которой подвергается образец во время испытания. Способ проведения теста подробно описан в [58, 59]. Скорость деформации, полученная с помощью этой установки, составляла около 30 с⁻¹.



Рисунок 1.4 - Гидропневматическая машина (НРМ)

Для исследования прочностных и деформационных характеристик песчаника, подверженного низко-среднескоростным ударным нагрузкам, были получены полные зависимости напряжения от деформации при одноосном сжатии при скоростях деформации 10⁻²~ 55 с⁻¹ с использованием сервогидравлического устройства для испытания материалов MTS647.250 и испытания на удар падающим грузом (рисунок 1.5) в [60]. Квазистатическое испытание на одноосное сжатие проводилось с помощью сервогидравлического устройства для испытания материалов MTS647.250. Максимальная осевая сила нагрузки составляет 2500 кH, а погрешность измерения деформации и нагрузки менее 1%.



Рисунок1.5 - Сервогидравлическое устройство для испытания материалов MTS647.250 Устройство для удара падающим грузом INSTRON (CEAST 9350) использовалось для испытания на динамическое сжатие (рисунок 1.6).



Рисунок 1.6 -. Устройство для удара падающим грузом INSTRON

Начальная высота молота может быть установлена от 0,3 м до 1,1 м для достижения диапазона скорости удара от 0,77 м/с до 4,7 м/с. При испытании на ударную нагрузку использовались два разных молота весом 16,175 кг и 21,175 кг. Скорость удара варьировалась от 2,5 м/с до 4 м/с с шагом 0.5 м/с. В центре образца в осевом и окружном направлениях наклеивались тензодатчики. На рисунке 1.7 представлены полные зависимости между напряжением и деформацией образцов песчаника, полученные в испытаниях на квазистатическое сжатие при скорости деформации 10^{-2} с⁻¹ и 10^{-1} с⁻¹.



Рисунок 1.7 - Кривая зависимости напряжения от деформации образца

Динамические диаграммы деформирования образцов при сжатии определялись путем комбинирования временной зависимости напряжения, полученной датчиком силы на молоте, и кривой зависимости деформации от времени, полученной прибором для измерения динамической деформации На рисунке 1.8 представлены результаты в виде инженерных кривых деформирования, при трех выбранных скоростях деформации.



Рисунок 1.8 - Кривые зависимости напряжения от деформации, полученные при различных скоростях деформации (сжатие).

На рисунке 1.9. показана зависимость прочности при сжатии песчаника и скорости деформации в диапазоне 10^{-2} ~55 с⁻¹. Видно, что прочность на сжатие постепенно увеличивается с увеличением скорости деформации, что указывает на то, что прочность при сжатии имеет очевидную зависимость от скорости деформации.



Рисунок 1.9 - Чувствительность к скорости деформации.

Грот и др. [61], Чжан и Чжао [62], а также Ма и др. [63, 64] выполнили низкоскоростные и высокоскоростные ударные испытания горных пород в диапазонах скоростей деформации $10^{-5} \sim 10^{-2}$ с⁻¹ и $10^1 \sim 10^2$ с⁻¹ с помощью гидравлической испытательной машины и установки РСГ со стержнями большего диаметра. Испытанные образцы ведут себя хрупко, поскольку напряжение увеличивается приблизительно

линейно до пика при небольшой деформации, а затем постепенно приближается к относительно высокому пороговому значению. Результаты исследований показали, что средняя остаточная прочность сухой и насыщенной коралловой породы составляет 2,77 МПа и 3,52 МПа, что составляет около 28% и 39% от соответствующей квазистатической прочности на сжатие (9,91 МПа и 7,11 МПа). Так же известно, что остаточная прочность коралловой породы после пика может достигать 61% от ее максимальной прочности, что сильно отличается от обычных плотных хрупких пород, таких как гранит и базальт, которые дают низкую остаточную прочность при небольшой предельной деформации.

Одной из сложностей испытаний при умеренных скоростях деформации, является малая длительность импульса нагрузки. Таким образом, за ограниченное время нагружения с низкой скоростью не удается добиться значительных деформаций образца. Частично эта проблема решается в схемах с предварительно напряженным нагружающим упругим стержнем. Продолжительность нагрузки в ЭТОМ случае оказывается значительной. В [65] на такой установке были исследованы эффекты скорости деформации, температура и влияние масштабного фактора для трех сталей, использующихся в ядерной промышленности. Исследованы следующие материалы: ферритная сталь 20MnMoNi55 (крышка корпуса), аустенитная сталь X6CrNiNb1810 (верхняя внутренняя структура) и ферритная сталь 26NiCr Mo146 (болтовые соединения). Испытания на растяжение при нескольких скоростях деформации были выполнены с помощью различных машин: винтового тензометра Хаунсфилда старого типа, небольших Гопкинсона гидропневматических устройств, стержней И сервогидравлических машин. Однако следует подчеркнуть, что ко всем тестам применялись идентичные процедуры анализа данных. Гладкие цилиндрические образцы на растяжение трех размеров (Ø3, Ø9 и Ø30 мм) были испытаны при скоростях деформации от 0,001/с до 300/с, при комнатной и повышенных температурах (400°С – 600°С) (рисунок 1.10).



Рисунок 1.10 - Образцы на растяжение трех размеров

На рисунке 1.11 показаны типичные динамические кривые напряжение-деформация трех образцов при комнатной температуре.



Рисунок 1.11 - Кривые напряжение-деформация при комнатной температуре образцов из аустенитной стали X6CrNiNb1810 диаметром 3, 9, 30 мм.

Одноосные испытания при высокой скорости деформации проводились на модификации разрезного стержня Гопкинсона [66]. Он состоит из двух стержней, нагружающего и опорного, соответственно, между которыми помещен образец. Упругая энергия накапливается в предварительно напряженном стержне, который является продолжением нагружающего стержня. При высвобождении этой энергии (разрывая блокирующую хрупкую промежуточную деталь) генерируется волна напряжения с малым временем нарастания, которая передается вдоль первого стержня, нагружая образец до разрушения. Эта волна растяжения удовлетворяет требованиям для того, чтобы быть одноосной упругой волной напряжения, поскольку длина волны велика по сравнению с длиной образца, а амплитуда импульса не превышает предел текучести стержня. полученные "напряжение-деформация", Диаграммы с помощью различных экспериментальных установок, были скорректированы путем введения правильного Юнга. Эта поправка необходима, поскольку экспериментальный модуль модуля упругости, определенный в результате динамических испытаний на мерных стержнях, неточен. В [67] исследование поведения сталей Armox 500T и Armox 600T проводилось в диапазоне скоростей деформации 100–1000 с⁻¹. Использовалась одностержневая испытательная установка Гопкинсона для растяжения. Растягивающая нагрузка создавалась маятником.

Заботкин и др. [68] использовали конструкцию для испытания на удар падающим грузом и исследовали поведение нержавеющей стали 316L, титанового сплава и сплава С22 при средних скоростях деформации.

В [69] было проведено исследование влияния средних скоростей деформации на механические свойства холоднотянутой низкоуглеродистой стали и нержавеющей стали 304L. Испытания проводились с использованием испытательной машины Instron при квазистатической скорости деформации, а для проведения испытаний со средней скоростью деформации использовался испытательный стенд на осевой удар падающим грузом (рисунок 1.12), разработанный в Университете Вуллонгонга.



Рисунок 1.12 - 1) Датчик удара- рама, 2) две направляющие, 3) тензодатчик, 4) гайка, 5) стальная опорная плита, 6) держатель тензодатчика, 7) цилиндрический образец, 8) четыре опорных стойки, 9) синтетический каучук.

Историю осевой нагрузки измеряли с помощью прецизионного датчика нагрузки An Interface 1210 с максимальной нагрузкой 50 кH, соединённого с образцом, а историю деформации - с помощью тензодатчика, прикрепленного к каждому образцу. Масса груза составляла 590 кг. Максимальная высота падения достигала 3 м для получения желаемой энергии и скорости удара. Во время испытания груз сбрасывался с заданной высоты и ударяется о стальную раму. Затем стальная рама ускоряется вниз, вытягивая образец до его разрушения. Очевидно, что изменение высоты падения означает, что время, необходимое для разрушения образца, меняется, а это означает, что можно получить разные скорости деформации. При высоте молота около 100 мм была получена скорость

деформации порядка 80 с⁻¹. Максимальная достигнутая при использовании такой схемы скорость деформации составила ~500 с⁻¹.

В работе [70] исследовался динамический отклик аустенитных нержавеющих сталей AISI304L, AISI 321 и AISI 316L, использующихся при создании ядерных реакторов.

Для выполнения программы динамических испытаний перечисленных сталей, были разработаны две основные схемы:

- гидропневматическая машина, работающая на растяжение, для скоростей деформации от 1 до 100 с⁻¹,

- стержень Гопкинсона, соответствующим образом модифицированный для генерации импульсов большой длительности, для прямых испытаний на растяжение со скоростями деформации от 100 до 1000 с⁻¹.

На рисунке 1.13 приведены кривые деформирования сталей AISI304L, AISI 321 и AISI 316L в состоянии поставки при комнатной температуре.



Рисунок 1.13 - Кривые напряжение-деформация аустенитных нержавеющих сталей при комнатной температуре: (a) AISI304L, (б) AISI 321 и (в) AISI 316L.

Кривые напряжение – деформация при каждой скорости деформации показывают деформационное упрочнение. Можно также наблюдать явную зависимость свойств от скорости деформации.

В [71] высокоскоростные испытания на растяжение были выполнены на испытательной системе Zwick / Roell HTM5020 (Ульм, Германия) с максимальной скоростью 20 м/с, а также максимальной нагрузкой 50 кН (рисунок 1.14). Исследованы механические свойства и предельные характеристики разрушения термопластичных композитов, армированных стекловолокном. Испытания на динамическое растяжение проводились при скоростях деформации 1, 10, 100, 200 и 400 с⁻¹.



Рисунок 1.14 - Испытательная система Zwick / Roell HTM5020

Кривые растяжения при скоростях деформации 1 с⁻¹ и 10 с⁻¹ (средние скорости деформации) представляет собой возрастающую прямую до пикового напряжения, за которым следует резкое разрушение, и эта тенденция была аналогична таковой для непрерывного горячеформованного композита GFRT (при скоростях деформации 0,001...50 с⁻¹ кривые показали более линейный процесс до максимального напряжения после которого происходит разрушение). Кривые напряжение-деформация при скоростях деформации 100, 200 и 400 с⁻¹ показали совершенно иной качественный вид по сравнению с кривыми, полученными при более низкой скорости деформации. Динамические кривые имели значительные колебания до достижения максимальных напряжений, за которыми следовало резкое разрушение. Появление колебаний на кривых может быть связано с расслоение накоплением повреждений. Межфазное было основным режимом микроповреждений до разрушения образца. Изменение вида кривой напряжениедеформация было в основном вызвано чувствительным к скорости деформации поведением связки «матрица-включение» при разрушении (рисунок 1.15).



Рисунок 1.15 - Диаграмма растяжения образцов при разных скоростях деформаций

Для получения полей деформации была использована система DIC. DIC - это оптический метод отслеживания изменений в серии изображений с деформированной конфигурацией образца. Он использовался для измерения перемещений и деформаций на поверхности деформируемого материала бесконтактным способом [72].

Были построены кривые зависимостей деформации от времени для некоторых точек, распределенных на поверхности образца. Точка P0 находилась рядом с трещиной. P1, P2, P3 и P4 были четырьмя контрольными точками, распределенными на оси растяжения образца от верхнего до нижнего края. Расстояния между двумя соседними опорными точками при статической и динамической скорости деформации составляли 16 мм и 4 мм соответственно. Поля технических деформаций и кривые, отражающие изменение во временны технической деформации в контрольных точках, показаны на рисунке 1.16.



Рисунок 1.16 - Контуры инженерной деформации и инженерные кривые деформациявремя для прогрессирующего разрушения. Процесс растяжения образцов при различных скоростях деформации: (a) - 1 c⁻¹, (б) - 10 c⁻¹, (в)100 c⁻¹, (г) 200 c⁻¹.

Деформация в основном сосредоточена около трещины или места возможного разрушения, положение которой влияет на распределение полей по образцу. Величина деформации в точке Р0 была больше, чем средняя деформация в образце, причем разница между ними постоянно увеличивалась из-за локализации деформации при растяжении.

Было показано, что метод DIC является эффективным методом регистрации деформации композитов [73-77]. Постобработка всех результатов измерений проводилась с помощью профессионального программного обеспечения DIC (VIC 2D 6, Correlated Solutions Inc., Ирмо, Южная Каролина, США).

В [78] было рассмотрено влияние скорости деформации на механические свойства кости человека. Из исследований известно, что показатели физиологического напряжения для человека при ходьбе и беге находятся в диапазоне 0,005–0,08 с⁻¹. При максимальных нагрузках, например, в случае автомобильных аварий скорость деформации в большой бедренной кости человека возрастает до 25 с⁻¹. Было изготовлено 50 образцов, из которых 25 были использованы для испытаний на растяжения, а остальные 25 для испытаний на сжатие. Все испытания проводились с использованием сервогидравлической машины для испытания материалов Dartec® series HC25 Zwick Roell Group Ltd., Херефорд, Великобритания (рисунок 1.17) с датчиком нагрузки 5 кН Sensotec®, Honeywell, Колумбус, Огайо.



Рисунок 1.17 - Испытательная установка Dartec® series HC25 Zwick Roell Group Ltd.

Образцы испытывали при пяти скоростях изменения длины: 1 мм с⁻¹, 10 мм с⁻¹, 50 мм с⁻¹, 100 мм с⁻¹ и 200 мм с⁻¹ соответствующих скоростям деформации в диапазоне 0,08–17 с⁻¹ при растяжении и 0,14–29 с⁻¹ при сжатии. Для обеспечения достижения заданных

скоростных режимов испытаний в захватах был предусмотрен свободный ход, чтобы нагружающее устройство могло разогнаться до необходимой скорости перед приложением нагрузки к образцу.

Результаты испытаний на растяжение представлены на рисунке 1.18, можно заметить, что для скорости деформации выше 1 с⁻¹ значения напряжений и деформаций снижаются. На рисунке 1.18(а) видно, что предел текучести имеет выраженную отрицательную чувствительность к скорости деформации. Полученные зависимости хорошо аппроксимируются линейной моделью с коэффициентом корреляции $R^2 = 0,684$. Из рисунка 1.18(б) видно, что деформация, при которой достигается напряжение текучести, также имеет отрицательную чувствительность к скорость к скорость с коэффициентом скорости деформации, близкую к линейной, в то время как деформация разрушения связана со скоростью деформации экспоненциальной зависимостью.



Рисунок 1.18 - Влияние скорости деформации на свойства при растяжении.

Результаты испытаний на сжатие показаны на рисунке 1.19, предел текучести при сжатии и деформация уменьшаются с увеличением скорости деформации, как и при испытаниях на растяжение. Наблюдается отрицательная линейная корреляция между значениями предела текучести и скоростью деформации. В отличие от испытаний на растяжение, напряжение и деформация при сжатии после предела текучести не являются

монотонными функциями скорости деформации. Сначала указанные величины показывают рост при увеличении скорости деформации, а затем, после некоторого максимума, следует уменьшение с ростом скорости деформации.



Рисунок 1.19 - Влияние скорости деформации на свойства предельного напряжения при сжатии

Было замечено, что конечные свойства человеческой кости незначительно повышаются при скоростях деформации до 30 с⁻¹ при сжатии и снижаются при скоростях деформации выше 1 с⁻¹ при растяжении. Модуль Юнга показал положительную чувствительность к росту скорости деформации в обоих режимах. Как при растяжении, так и при сжатии закон изменения предела текучести лучше всего соответствовал отрицательной линейной зависимости от скорости деформации. В то же время предельная деформация при растяжении описывалась убывающей экспоненциальной зависимостью от скорости деформации. Из этого следует вывод, что скорость деформации по-разному влияет на процесс, приводящий к разрушению, и закритическое поведение исследованного материала.

1.2 Современные средства регистрации экспериментальной информации

Хорошие качественные и количественные данные о физико-механических свойствах и явлениях, связанных с поведением материалов при интенсивных воздействиях получить чрезвычайно трудно. Это связанно с тем, что процессы обычно длятся, самое большее, несколько миллисекунд. Помимо всего прочего ситуация еще осложняется тем, что во многих случаях скорость нарастания нагрузки очень велика. Также имеет место изменение геометрии образца за короткий промежуток времени. Для преодоления трудностей, обусловленных упомянутыми факторами, были созданы специализированные техника и оборудование.

Опытные данные при изучении динамического нагружения важны по нескольким причинам. Во-первых, существует необходимость в установлении критериев разрушения и получении их количественных оценок. Во-вторых, должны быть установлены условия разрушения. В-третьих, существует интерес к изучению зависимостей механических свойств от скоростей нагружения и от напряжённого состояния испытуемого образца.

В настоящем разделе приводится описание измерительных устройств и методик, которые наиболее часто используются в схемах динамических испытаний образцов для получения информации об исследуемом процессе.

Электрические датчики деформации

Известно, что упругие деформации малой амплитуды измеряют датчиками, в которых механическое движение трансформируется в электрический импульс. Используются четыре основных типа датчиков деформации: датчики, использующие изменение сопротивления в результате механической работы [79], использующие изменение ёмкости, изменение индуктивности и пьезоэлектрические датчики. Электрический тензодатчик сопротивления используется наиболее широко (рисунок 1.20).



Рисунок 1.20 - Электрический тензодатчик сопротивления

Деформация тензодатчика вызывает изменение его сопротивления, которое при соответствующей схеме питания выдает электрический сигнал, который регистрируется экспериментальными приборами.

На ряду с тензодатчиками сопротивления часто используют пьезоэлектрические датчики силы (рисунок 1.21). В качестве кристаллов для пьезоэлектрических датчиков чаще всего используют турмалин, кварц, соль Рошеля и дигидрогенфосфат аммония.



Рисунок 1.21 - Пьезоэлектрический датчик силы

Использование пьезоэлектрических кристаллов обусловлено тем, что при механической деформации кристалла на его поверхности образуется электрический заряд. Этот заряд пропорционален деформации.

Анализ геометрии образцов после неупругой деформации

Динамические нагрузки зачастую вызывают в испытуемых образцах пластическую деформацию или разрушение. По остаточным деформациям можно проводить оценку напряжения течения. Изменения во внешней форме образца можно наблюдать множеством различных способов. Более предпочтительно произвести разрез деформированного образца и изучить геометрию его поперечного сечения. Бывают случаи, когда, для измерения деформаций используют систему сеток, нанесённую на образец. Например, для измерения величины деформации внешней поверхности толстостенных цилиндров в следствии внутренней взрывной нагрузки была использована прямоугольная сетка в виде тонких царапин на наружной поверхности образца [80].

Для определения характеристик материалов при больших значениях скоростей деформаций часто используют метод Тейлора, который, основа на анализе остаточных деформаций в цилиндрическом образце после удара о жесткую преграду.

Точность использования этого метода определяется точностью съема остаточной формы образца. Для этого существуют различные методы, например, такие как: использование электронного микроскопа (рисунок 1.22а), обработка цифрового изображения либо использование 3D сканера (рисунок 1.22b). Метод трехмерного

сканирования более предпочтителен так как он точнее, проще в использовании и позволяет получить полную форму деформирования образца с учетом всех неоднородностей, возможной не симметрии и не идеальностей реальных объектов.



(б)

Рисунок 1.22 – Инструменты для определения остаточного профиля образца

Методы корреляции цифровых изображений (Digital Image Correlation - DIC), впервые разработанные в начале 1980-х годов, оказали положительное влияние на развитие экспериментальной механики твердых тел и до сих пор интенсивно используются [81-83]. Идея этого метода заключается в измерении полей перемещений поверхностей нагруженных образцов и конструкций по изображениям, полученным на разных стадиях нагружения. В более общем плане полномасштабные измерения дают возможность преодолеть разрыв между экспериментами и моделированием, что позволяет проводить прямое сравнение перемещений и деформаций [84, 85]. В последние годы исследователи добились значительных успехов в разработке новых экспериментальных методов цифровой корреляции изображений и постобработки, такой как обработка изображений и усовершенствование вычислительных алгоритмов.

DIC — это бесконтактный оптический метод, который захватывает цифровые изображения поверхности объекта, а затем выполняет анализ изображения для измерения деформаций. Этого можно достичь путем создания различных визуальных маркеров на поверхности образца, таких как точки, сетки и линии. Для работы этого метода требуется эталонное изображение (перед нагрузкой), за которым следует серия снимков, сделанных во время деформации. Блабер и др. [86] создали новый пакет программного обеспечения DIC с открытым исходным кодом Ncorr. Ncorr — это подмножество с открытым исходным кодом, основанное на программном обеспечении 2D DIC, которое включает алгоритмы DIC, описанные в литературе, с возможностью постобработки. Изображения деформированной конфигурации имеют другой рисунок точек по сравнению с исходным недеформированным эталонным изображением образца. Смещение точек образца может быть вычислено путем выполнения корреляции пикселей эталонного изображения и любого деформированного изображения. Затем можно получить распределение деформации, рассчитывая производные от полей перемещений. Для применения этого метода необходимо подготовить исследуемый объект с нанесением на его поверхность случайного точечного спекл-рисунка [87]. Эталонное изображение сегментируется на более мелкие зоны, называемые подмножествами. Сиддики и др. в [88] рассчитали продольную и боковую деформации при одноосном испытании. Деформации, рассчитанные с использованием метода DIC, затем сравнивали с информацией, полученной с применением тензодатчиков и экстензометра для проверки точности измерения деформации. Измеренные методом DIC значения коэффициента Пуассона, полученные для алюминиевых и стальных образцов, весьма близки к значениям, измеренным с помощью тензодатчиков и описанным в литературе. Кроме того, также сообщалось, что коэффициент Пуассона композитных образцов, в которых применялся метод DIC, зафиксировал показания, аналогичные показаниям тензодатчика. При расчете деформации поверхности с использованием метода двухмерной цифровой корреляции изображений (DIC) особое внимание следует уделять расположению испытуемого образца, интенсивности и источникам света, а также объективу камеры и ее возможностям (разрешению, частоте кадров). Образец со случайным спекл-рисунком, нанесенным на поверхность, должен быть расположен перпендикулярно камере, чтобы избежать любых отклонений от плоскости. После приложения нагрузки делается серия изображений до и после нагрузки и сохраняется в компьютере для последующей обработки изображений
для получения полей смещения с использованием алгоритма DIC, как показано на рисунке 1.23. Точности измерения смещений и деформаций с использованием метода корреляции цифровых изображений существенно зависит от разрешения изображений [89], которое определяется характеристиками камеры.



Рисунок1.23 – Расчет векторов смещения с использованием корреляции цифровых изображений: а) эталонное изображение; б) деформированное подмножество/изображение; в) Поле смещения

Для достижения эффективной корреляции спекл-структура должна быть высококонтрастной и неповторяющейся. Слишком крупный рисунок приводит к уменьшению разрешающей способности расчетной сетки, на которой определяются поля смещений. Использование слишком мелкого рисунка может привести к невозможности точно идентифицировать шаблон вследствие недостаточного разрешения камеры [90]. На точность измерения в DIC также могут влиять размер подмножества и используемые в расчете функция формы. Большой размер подмножеств также может привести к большей ошибке в аппроксимации основных деформаций, а также вызвать проблемы с сопоставлением формы спекл-рисунка до и после деформации. Однако, когда подмножество слишком мало, оно дает недостаточно информации для корреляции [91].

В [92] описаны исследования, которые проводились на универсальной испытательной машине, нагрузка прикладывалась в режиме управления перемещением до разрыва образца при растяжении. Программы CivEng Vision и Ncorr использовались для обработки цифровых изображений, сделанных с интервалом 5 секунд, с целью вычисления перемещений. Техника DIC использовалась для извлечения информации о характере повреждения, а именно, количества трещин, их местоположения и ширины, а также фиксации изменений BO время испытания. Совместное использование тензорезисторов и методов DIC позволяет улучшить идентификацию механических свойств.

37

Контуры деформации, полученные при моделировании, сравниваются с контурами деформации, полученными из выходных данных постобработки DIC. Данные, полученные с помощью DIC в эксперименте на изгиб, сравниваются с результатами численного моделирования. Отмечается, что поля поперечной деформация Exx, вычисленные методом DIC, являются хорошим инструментом для прогнозирования места возникновения разрушения. Кроме того, проводилось сравнение полученных экспериментально и рассчитанных полей продольных деформаций Eyy в эксперименте на растяжение. Сравнение экспериментальных (вычисленных с помощью DIC) и численных значений деформации показано на рисунке 1.24. Авторы делают вывод о том, что совпадение данных численного моделирования с экспериментом имеет приемлемую точность.



Рисунок 1.24 – Отклонение продольной деформации, Еуу, рассчитанное при растягивающей нагрузке для углепластика

1.3 Схемы динамических испытаний композитов и данные по динамическим характеристикам композитов.

Анализ эффективности применения ПКМ для создания элементов конструкций, способных поглощать энергию динамических воздействий, является актуальной задачей. В настоящее время наибольшее развитие получили методики динамических испытаний ПКМ на базе классической схемы разрезного стержня Гопкинсона-Кольского [5, 6, 93]. В последнее десятилетие эта схема нагружения широко применяется для исследования полимеров и конструкционных ПКМ с различными схемами армирования. Так, например, выполнены исследования влияния скорости деформации на динамическое поведение тканых ПКМ при растяжении [94, 95] и сжатии [96, 97]. Скоростные зависимости кривых деформирования однонаправленных углепластиков при растяжении и сжатии в направлении поперечном направлению волокон и сдвиге в плоскости слоя получены при скоростях деформации ~1000 1/с [98, 99]. Авторами [100] получены диаграммы деформирования при нагружении однонаправленного углепластика в направлении перпендикулярном направлению волокон в диапазоне скоростей деформации 10-2000 1/с использованием метода копровых испытаний и метода РСГ. В работе [101] выполнены экспериментальные исследования динамического поведения и демпфирующих свойств при сжатии термопластичного наполненного углеродными наночастицами полимера с использованием классической схемы метода РСГ при скоростях деформации 2000-7000 1/с. Аналогичная схема нагружения использована в работе [102] для получения динамических диаграмм деформирования при сжатии термопластичного углепластика AS4/PEEK. Исследования сдвиговой прочности и энергоемкости ПКМ с трехмерной схемой плетения волокон проведены авторами [103, 104] при скоростях деформации 1000-3000 1/с. Скоростные зависимости параметров кривых деформирования при сжатии образцов термопласта, армированного арамидными волокнами, получены в диапазоне 400-1200 1/с в работе [105] с использованием традиционной схемы РСГ в направлении перпендикулярном плоскости волокон.

Несмотря на развитие исследований высокоскоростной деформации ПКМ с использованием метода РСГ, вопросом, требующим пристального внимания, остается проблема обеспечения однородного напряженно-деформированного состояния образца в процессе волнового нагружения. Если для металлических материалов предложено теоретическое обоснование квазистатичности процесса динамического деформирования образца при соблюдении определенных требований к соотношению длины образца и длительности нагружающего импульса [106-108], то для испытаний образцов ПКМ такое обоснование в общем случае отсутствует. Так, для решения задачи скорейшего достижения однородности напряженно-деформированного состояния образцов ПКМ и, следовательно, получения достоверной динамической диаграммы деформирования материала, в работе [109] предложена схема нагружения кольцевого образца импульса сжатия к объему воды, ограниченного в радиальном направлении этим образцом, а в осевом направлении торцами стержней-волноводов (рисунок 1.25)

39



Рисунок 1.25 – (а) Виды поперечного сечения двух вариантов аппарата; (б) поперечные сечения трех типов резиновых втулок, использованных в испытаниях; (в) эскиз компоновки, использованной при динамических испытаниях (без масштаба).

Другая схема нагружения, обеспечивающая получение диаграмм деформирования ПКМ при растяжении и сжатии при скоростях деформации ~2000 1/с, предложена авторами [110], которые использовали метод виртуальных полей [111] для определения динамической деформации однонаправленных образцов углепластика при нагружении в направлении поперек волокон. При этом растяжение образца осуществлялось при отражении проходящей волны сжатия от свободной поверхности образца, что не позволяет считать такой эксперимент обеспечивающим однородность напряженнодеформированного состояния в течении всего процесса нагружения (рисунок 1.26).



Рисунок 1.26 – Изображение образца из ПКМ перед испытанием.

Применяя метод РСГ и его модификации, в общем случае, практически невозможно обеспечить в процессе волнового нагружения образца ПКМ скорость деформации ниже 200 1/с [93]. Поэтому для проведения испытаний ПКМ в "среднем" диапазоне скоростей деформации, т.е. 0.1-200 1/с, применяют копровые системы или испытательные машины с севрогидравлическим приводом. Так, например, экспериментальный анализ влияния скорости деформации на упругие и прочностные свойства при растяжении термопластичных углепластиков, перспективных для изготовления энергопоглощающих автомобильных систем, выполнен в работе [112], где для вариации скорости деформации в диапазоне 0.001-20 1/с применялась севрогидравлическая испытательная машина. В этом исследовании были разработаны два вида композитов с использованием переработанных углеродных волокон и проведены высокоскоростные испытания на растяжение при различных скоростях деформации с использованием сервогидравлической испытательной машины (Schenck), которая может развивать скорость траверсы в диапазоне от 10^{-3} м/с до 20 м/с (рисунок 1.27).



Рисунок 1.27 – Схема скоростных испытаний на растяжение с использованием сервогидравлического устройства

Приложенная сила измерялась пьезоэлектрическим датчиком силы с рабочим диапазоном ±50 кН. Скользящий стержень имеет свободный ход 135 мм до его контакта с захватом гидроцилиндра, чтобы достичь номинальной скорости траверсы до начала нагрузки. После контакта образец подвергается растяжению с постоянной скоростью смещения.

Для того чтобы частично ослабить возмущение, вызванное механическими волнами, вызванными динамическим ударом, были оптимизированы материал и геометрия демпфирующего соединения, расположенного между скользящей балкой и гидравлическим домкратом. Для измерения локальной деформации образца применяется бесконтактный метод с использованием высокоскоростной камеры (FASTCAM-APX RS). Регистрация процесса деформирования образца производится со скоростью 250 000 кадров в секунду для записи изображений во время высокоскоростного испытания на растяжение. На рисунке 1.28 показано полученное при численном моделировании распределение продольного растягивающего напряжения для оптимизированного образца, подвергнутого воздействию заданной скорости 4 м/с, что соответствует теоретическому значению скорости деформации $\epsilon = 400$ с- 1.



Рисунок 1.28 – Распределение напряжения продольного растяжения (σ11), рассчитанное для оптимизированного гантелеобразного образца, подвергнутого испытанию на растяжение V = 4 м/с, время нарастания = 2 · 10 ⁻⁴ c⁻¹

На рисунке 1.29 представлены кривые деформирования связующего и композита, полученного на его основе, в диапазоне скоростей деформации от 7.10⁻³ до 100 с⁻¹ при комнатной температуре 20 °C.



Рисунок 1.29 – Экспериментальные кривые растяжения при высокой скорости деформации.

Полученные кривые растяжения ясно показывают, что поведение материалов в значительной степени подвержено влиянию скорости деформации: общий уровень напряжения увеличивается с увеличением скорости деформации. Однако существенного изменения наклонов начальных линейных участков кривых напряжение-деформация для исследованных материалов не наблюдается. На основе этого авторы утверждают, что модуль упругости остается нечувствительным к скорости деформации.

Авторами работы [113] с использованием вертикального копра выполнены испытания образцов термореактивных угле-, стекло-, и комбинированных углестеклопластиков на растяжение при скоростях деформации до 550 1/с. Аспекты синхронизации временных зависимостей нагрузки и деформации, регистрируемых при проведении испытаний термореактивных ПКМ на динамическое растяжение при "средних" скоростях деформации, подробно обсуждаются в работе [114], где на основании результатов расчетно-экспериментального анализа показано, что задержка в одну миллисекунду приводит к ошибке в расчете величины модуля упругости более 1%.

Для достижения скоростей деформации порядка 10000 1/с и выше требуются методы ударно-волнового и взрывного нагружения образцов ПКМ, обзор которых представлен, например, в работе [115]. Однако, в таких экспериментах, как правило, получают только зависимость прочности или предельной деформации материала от параметров нагружения. Для получения динамической диаграммы деформирования напряжениедеформация образцов ПКМ может применяться схема ударно-волнового нагружения, реализуемая при электрическом взрыве проводника [116, 117].

В подавляющем большинстве рассмотренных выше работ экспериментальный анализ влияния скорости деформации выполнен в достаточно узком диапазоне ее изменения. В каждом случае испытания конкретного ПКМ проводятся при одном, в лучшем случае двух видах напряженно-деформированного состояния (например, только сжатие и сдвиг). При этом, как правило, выбирается направление приложения динамической нагрузки либо вдоль, либо перпендикулярно плоскости расположения армирующих волокон. Поэтому реализуемые комбинации напряженно-деформированных состояний и ориентаций образцов в общем случае не позволяют получить зависимости характеристик материала от скорости деформации и параметров анизотропии, необходимые для определения параметров модели материала, применимой для инженерного анализа процессов динамического деформирования и разрушения конструкций из ПКМ.

44

1.4 Выводы по разделу 1

- Для обоснованного и надежного проектирования динамически нагруженных конструкций необходимо знание механических свойств конструкционных материалов при высоких скоростях деформации. На сегодняшний день существует большое количество схем для высокоскоростного нагружения материалов различной физической природы. Основными методами являются копровые испытания, кулачковый пластометр, методика Кольского и Тейлора. Чрезвычайную популярность получила методика Кольского с использованием разрезного стержня Гопкинсона (РСГ), ввиду своей простоты и хорошей теоретической обоснованности. В настоящее время используется множество модификаций метода РСГ на сжатие, растяжение, срез, крутильные испытания и т.д.
- 2. Экспериментальные исследования деформирования И разрушения конструкционных материалов при больших скоростях деформаций невозможно представить без надежных И современных средств регистрации экспериментальной информации. Наиболее часто в схемах динамических испытаний используются тензометрические датчики и оценка деформаций по остаточной форме образца. Развитие цифровых технологий и аппаратной части экспериментального оборудования значительно улучшило качество получаемой экспериментальной информации. Например, использование метода корреляции цифровых изображений в сочетании с высокоскоростной видеорегистрацией позволяет определять поля перемещений и деформаций в образце в ходе нагружения с высокой точностью.
- 3. Диапазон скоростей деформаций от 10⁰ с⁻¹до 10² с⁻¹ на сегодняшний день исследован недостаточно, несмотря на то, что этот интервал является значимым во многих областей промышленности, например, таких как автомобилестроение, атомная энергетика, медицина и т.д. Это связано с рядом методических трудностей и отсутствием испытательного оборудования, которое позволяет надежно определять характеристики материалов в этом диапазоне скоростей деформаций.

45

2 Пневмо-динамическая установка для испытаний материалов при скорости деформации порядка 10-100 с⁻¹

В настоящее время в нашей стране практически отсутствуют нагружающие системы и методы измерений деформаций, смещений, усилий для исследований в среднескоростном диапазоне деформаций. В связи с этим возникла необходимость разработки и реализации экспериментальной схемы и методики, позволяющей достигать заданные скорости [1]. Следует отметить, что в последние годы за рубежом появились установки для проведения исследований в этой области, однако, стоимость их достигает 80 млн рублей.

В настоящей главе приводится описание созданной в процессе диссертационного исследования уникальной пневмо-динамической установки для испытаний материалов при скорости деформации порядка 10⁰ - 10² с⁻¹. Описана схема установки, методика проведения эксперимента и получения информации, используемой для определения механических характеристик материалов и их зависимостей от скорости деформации.

2.1 Схема установки

Общая схема экспериментальной установки представлена на рисунке 2.1. Цифрами обозначены: 1 - компрессор, 2 – камера высокого давления, 3 - манометр, 4 - шаровые краны, 5 - соединительные шланги, 6 - электромагнитные клапаны, 7 - пневмоцилиндр, 8 - нижняя подвижная штанга, 9 - образец, 10 - захваты, 11 - поршень.





Рисунок 2.1 – Схема экспериментальной установки

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 образец. некоторым усилием растягивает Максимальное усилие, создаваемое пневмоцилиндром, равняется 31кН. Величина приложенной силы контролируется давлением в камерах цилиндра. Размеры образца показаны на рисунке 2.2. Верхняя лопастная часть образца (правая часть на рисунке) длиннее нижней для установки на ней тензодатчиков.



Рисунок 2.2 – Размеры образца

2.2 Методика получения и обработки информации в эксперименте

В лаборатории НИИ механики ННГУ имеется лицензированная система бесконтактного измерения полей деформаций VIC-2D фирмы «Correlated Solutions», включающая высокоскоростную камеру Phantom VEO 710 L с большим разрешением для видеорегистрации процесса деформирования образца при динамических испытаниях (сжатием, растяжением, сдвигом, трех- или четырехточечным изгибом), мощный светодиодный осветитель, компьютер с установленным специализированным программным обеспечением DIC (digital image correlation или метод корреляции цифровых изображений) и ряд дополнительных устройств и приспособлений: штатив для камеры, подставки под осветители, устройство для нанесения спеклов на образцы. Подготовительный этап состоит в предварительном нанесении на поверхность исследуемого образца контрастного мелкодисперсного напыления, представляющего совокупность хаотично расположенных черных точек на белой матовой основе, т.н. спеклструктура (рисунок 2.3а). Рассматриваемый объект освещается светодиодной системой монохромного равномерного освещения, благодаря чему внешние края и центральная часть поверхности контроля освещается с равной интенсивностью, что существенно повышает качество результатов измерений. Далее камерой регистрируется изображения исследуемой поверхности объекта, соответствующие различным фазам процесса деформирования объекта. Изменения положения точек неоднородной структуры поверхности обрабатываются специальными высокоточными корреляционными алгоритмами.

Расположение точек для дальнейшего анализа процессов деформирования образцов показано правее (Рисунок 2.3 б).



(a)

(б)

Рисунок 2.3 – К применению метода DIC

Деформация образца определялась двумя способами:

1. Средняя деформация рабочей части определялась по перемещениям реперных точек P₀ и P₁ по формуле:

$$\varepsilon_{\rm средн} = ln \left(\frac{L_{P1-P0}}{L^0_{P1-P0}} \right)$$

где L_{P1-P0} – расстояние между точками P1 и P0 в текущий момент времени,

 L^{0}_{P1-P0} - расстояние между точками Р1 и Р0 в момент времени 0.

2. Локальная деформация определялась осреднением эффективных деформаций Мизеса, рассчитанных методом DIC по малой области R0 в зоне локализации деформации.

Скорости деформации определялись дифференцированием временных зависимостей деформаций.

Варьирование скорости нагружения осуществлялось изменением давления в рабочей камере установки. Проведены испытания с давлениями 2, 4 и 6 атм в камере высокого давления. Результаты анализа процессов динамического деформирования образцов показаны на рисунке. На рисунке2.4 а приводятся временные зависимости локальных деформаций, на рисунке2.4 б – скоростей деформаций.



Рисунок 2.4 – Анализ режимов нагружения

На рисунках 2.5 и 2.6 приводятся результаты сравнения временных зависимостей средних и локальных деформаций (а) и скоростей деформаций (б) для двух режимов нагружения. Видно, что до определенного момента (момента локализации 15 мс) средние и локальные значения хорошо согласуются. До этого момента времени значения напряжений и деформаций распределены равномерно по длине образца. Далее происходит образование шейке в образце.



Рисунок 2.5 – Сравнение средних и локальных величин деформации и скорости деформации. Давление 4 атм



Рисунок 2.6 - Сравнение средних и локальных величин. Давление 6 атм

Рисунок 2.7 иллюстрирует поля деформаций (деформации по вертикальной оси) в разные моменты времени. Видна локализация деформации (2мс) в средней части образца. В правой части рисунка 2.8 показаны графики, характеризующие распределение осевой деформации образца в разные моменты времени. Линия, на которой строились эти распределения, иллюстрируется в левой части рисунка 2.8. По горизонтальной оси отложены координаты точек на линии, по вертикальной – значения деформации. Можно наблюдать процесс локализации деформации.



Рисунок 2.7 – Поля деформаций в образце в разные моменты времени





Для регистрации усилий, действующих на образец в процессе нагружения, на лопаточной части образца наклеивались тензодатчики. В экспериментальной схеме используется потенциометрическая схема подключения тензодатчиков. Калибровка измерительного канала осуществляется электрическим методом. Осциллограф позволяет записывать электрические напряжения в цепи питания датчиков. Деформация

тензодатчика с изменением его сопротивления связана основной тензометрической зависимостью:

$$\mathbf{k} \cdot \boldsymbol{\varepsilon} = \frac{\Delta \mathbf{R}}{\mathbf{R}}$$

здесь *k* – коэффициент тензочувствительности датчика,

є - деформация датчика,

 ΔR –изменение сопротивления датчика при его деформировании,

R – начальное сопротивление датчика.

Для определения коэффициента пересчета напряжения, снимаемого с тензодатчиков, в их деформацию используется процедура тарировки. При этом в цепь питания последовательно с датчиками с помощью реле периодически включается известное сопротивление R^{тарир}. Тем самым моделируется изменение сопротивления тензодатчиков на величину R^{тарир}. С помощью осциллографа регистрируются соответствующие изменения электрического напряжения в цепи питания датчиков (рисунок 2.9).



Рисунок 2.9 – Процедура электрической калибровки напряжения

Поскольку скачок пропорционален изменению сопротивления цепи, можно составить следующую пропорцию:

$$\frac{\Delta \boldsymbol{U}^{\mathrm{Tapup}}}{\boldsymbol{R}^{\mathrm{Tapup}}} = \frac{\Delta \boldsymbol{U}}{\Delta \boldsymbol{R}}$$

где ΔU^{mapup} – скачок напряжения во время тарировки,

 R^{mapup} – тарировочное сопротивление,

∆U – скачок напряжения при деформировании тензодатчиков,

 ΔR – изменение сопротивления тензодатчиков при их деформировании.

Из приведенных выше формул следует:

$$\varepsilon = \frac{R^{\mathrm{тарир}}}{k \cdot \Delta U^{\mathrm{тарир}} \cdot R} \cdot \Delta U$$

Таким образом, коэффициент пересчета (тарировочный коэффициент) равен:

$$K = \frac{R^{\mathrm{тарир}}}{k \cdot \Delta U^{\mathrm{тарир}} \cdot R}$$

Сигнал, зарегистрированный с помощью тензодатчиков, наклеенных на лопаточной части образца, показан на рисунке 2.10.



Рисунок 2.10 – Сигнал с тензодатчиков

Сила, которая действует на образец в ходе нагружения, рассчитывается следующим образом:

$$\mathbf{F}(t) = \varepsilon_e(t) \cdot E \cdot w_a \cdot h_a$$

где $\varepsilon_e(t)$ – упругая деформация некоторого сечения лопаточной части образца, E – модуль Юнга материала образца, $A_g = w_g \cdot h_g$ - площадь сечения образца в лопаточной части, в месте расположения тензодатчиков, w_g и h_g – ширина и толщина лопаточной части образца соответственно.

Техническое напряжение определяется путем деления величины силы на начальную площадь сечения образца:

$$\sigma_{\text{TEXH}}(t) = \frac{F(t)}{w_0 \cdot h_0}$$

Исключая из зависимостей $\varepsilon(t)$ и $\sigma(t)$ время как параметр получаем кривую деформирования $\sigma(\varepsilon)$ при известном законе изменения скорости деформации $\dot{\varepsilon}(\varepsilon)$ в процессе нагружения образца.

Для определения истинного напряжения в каждый момент времени с использованием данных высокоскоростной регистрации действующая на образец сила делится на текущую площадь минимального сечения образца. Определение ширины образца по результатам видеорегистрации осуществляется автоматически с использованием инструментов машинного зрения. Процесс отслеживания положения опорных точек демонстрируется на рисунке 2.11.



Рисунок 2.11 – Измерение ширины рабочей части образца в процессе деформирования

Рисунок 2.12 иллюстрирует временную зависимость ширины рабочей части образца.



Рисунок 2.12 – Временная зависимость ширины рабочей части образца

Предполагается, что утоньшение образца в направлении, нормальном к плоскости пластины, пропорционально изменению ширины рабочей части. Тогда истинное напряжение в каждый момент времени можно посчитать по формуле:

$$\sigma_{\text{\tiny HCT}}(t) = \frac{F(t)}{w(t) \cdot h(t)} = \frac{F(t)}{w(t) \cdot w(t) \cdot \frac{h_0}{w_0}} = \frac{F(t)}{w^2(t) \cdot \frac{h_0}{w_0}}$$

где w(t) – ширина рабочей части образца в момент времени t, h(t) – толщина рабочей части образца в момент времени t, w_0 и h_0 – начальные значения ширины и толщины рабочей части образца.

На рисунке 2.13 приводится сравнение временных зависимостей технической и истинной деформации в образце, а рисунок 2.14 иллюстрирует сравнение технической и истинной диаграмм деформирования.



Рисунок 2.13 – Сравнение временных зависимостей технического и истинного значений напряжений в образце



Рисунок 2.14 – Сравнение технической и истинной диаграмм деформирования

Выполненные отладочные испытания позволяют сделать вывод о том, что метод DIC дает исчерпывающую информацию о процессе динамического деформирования образца. Разрешение высокоскоростной камеры как по пространству, так и по времени достаточно для определения искомых характеристик процесса.

2.3 Численный анализ деформирования образца

Для оценки напряженно деформированного состояния рабочей части образца, а также для анализа возможности измерения действующей на образец силы по регистрации деформации в лопаточной части образца выполнено численное моделирование процесса деформирования образца. высокоскоростного Моделирование проводилось с использованием программного кода LS-DYNA. Задача решалась с использованием явной схемы интегрирования уравнений по времени. Геометрическая постановка задачи приводится на рисунке 2.15. Образец представляет собой пластину толщиной 0.65 мм. Образец имеет рабочую часть и расширенные лопаточные части для закрепления образца в испытательной установке. Одна из лопаточных частей имеет большую длину для установки тензодатчиков, с помощью которых определяется сила, действующая на образец в процессе нагружения. Длина рабочей части равна 10 мм, ширина – 5 мм. Длина меньшей лопатки 20 мм, большей - 40 мм. Ширина лопаточной части составляет 20 мм. Часть лопатки длиной 15 мм используется для закрепления образца в испытательной установке. Один конец образца закрепляется и остается неподвижен, на другом задается постоянная скорость движения 1 м/с, обеспечивающая среднюю скорость деформации образца порядка 100 с⁻¹. В силу наличия симметрии рассматривалась половина модели. На рисунке 2.16 показана конечно-элементная модель образца.



Рисунок 2.15 – Геометрия задачи и граничные условия



Рисунок 2.16 – Конечно-элементная модель

Рисунок 2.17 иллюстрирует поля пластических деформаций в образце на момент, когда величина деформации в рабочей части достигает ~10%. Видно, что пластическая деформация сосредоточена и достаточно равномерно распределена в рабочей зоне.



>0.09 0.08 0.07 0.06 0.05 0.05 0.04 0.03 0.02 0.01 <0.00

Рисунок 2.17 – Поля пластических деформаций в образце

Рисунок 2.18 иллюстрирует поля осевых напряжений в образце (напряжения в направлении оси Х). На рисунке 2.18 а) представлен весь диапазон значений, на рисунке 2.18 b) диапазон напряжений от 30 до 200 МПа, для наглядного визуального представления напряжений в области лопаток. Это позволяет оценить равномерность указанных полей в области расположения тензодатчиков. Кроме того, строились распределения напряжений по ширине лопатки в сечениях на разных расстояниях от начала лопаток (рисунок 2.19). Распределения напряжений по ширине образца на расстояниях 5, 10, 15 и 20 мм показаны на рисунке 2.20 Можно отметить, то на расстоянии 20 мм от начала лопатки осевые напряжения распределены достаточно равномерно.



Рисунок 2.18 – Осевое напряжение в образце, МПа



Рисунок 2.19 – Определение поперечных сечений



Рисунок 2.20 – Распределение напряжений в разных секциях

На основании выполненного численного анализа можно сделать два вывода:

1. Лопаточная часть образца деформируется в упругой области.

2. Осевые напряжения на расстоянии 20 мм распределены по ширине лопатки равномерно.

С учетом этого было выбрано положение установки тензодатчиков 10 мм (рисунок 2.21) для определения силы, действующей на образец в процессе нагружения.



Рисунок 2.21 – Положение тензодатчиков

2.4 Результаты испытаний листовой (3мм) стали 09Г2С в широком диапазоне изменения скоростей деформаций

Сталь 09Г2С относится к классу конструкционных низколегированных сталей. Данный материал используется для изготовления различных деталей и элементов сварных металлоконструкций, работающих при температуре от -70 до 425 °C под давлением. Высокая прочность материала и хорошие показатели деформационных свойств в широком диапазоне температур, способность к изменению свойств сплава после проведения термической обработки, богатый выбор различных сортаментов, разнообразие толщин привели к широкому использованию этого сплава во многих сферах производства и машиностроения. Из стали 09Г2С изготавливаются строительные конструкции, трубы для транспортировки различных жидкостей (воды, нефти и др.) и газов, резервуары различного назначения, паровые котлы, нефтепромысловое оборудование и различные детали машин, в т. ч. сельскохозяйственного направления. Интерес представляют скоростные зависимости механических характеристик этого сплава для прогнозирования поведения конструкций из этого материала при ударных нагрузках. В настоящем разделе впервые приводятся результаты исследования деформирования и разрушения образцов из сплава 09Г2С в широком диапазоне изменения скоростей деформирования.

Образцы для испытаний изготавливались из листа толщиной 3 мм. Статические испытания при растяжении проводились на испытательном комплексе Z100 ZWICK-ROEL. Высокоскоростные испытания (со скоростями деформации свыше 500 1/с) при сжатии и растяжении проводились на установке, реализующей метод Кольского. Испытания проводились на высокопрочных стальных мерных стержнях диаметром 20 мм. Испытания при растяжении с промежуточными скоростями деформации (порядка 100 1/с) были реализованы на созданной в процессе диссертационного исследования пневмодинамической экспериментальной установке.

Для статических испытаний использовались образцы с шириной рабочей части 20 мм, толщиной 3 мм и длиной рабочей части 120 мм. Испытания проводились до разрушения образца. Вид образца после испытания показан на рисунке 2.22



Рисунок 2.22 – Вид образца из стали 09Г2С после испытаний

Результаты статических испытаний образцов стали 09Г2С приводятся в таблицах. В таблице приводятся результаты индивидуальных экспериментов, в таблице – результаты статистической обработки серии экспериментов. Используются следующие обозначения:

Е-модуль упругости (модуль Юнга);

R_{ен}– верхний предел текучести;

- R_{eL} нижний предел текучести;
- $R_{p0.2}$ предел текучести $\sigma_{0.2}$;
- R_m временное сопротивление σ_B ;
- δ относительное удлинение после разрыва;
- коэффициент Пуассона;
- L_c расчетная длина по траверсе;

L₀ SW – расчетная длина стандартного датчика перемещения

- d0-начальный диаметр;
- S₀ начальная площадь поперечного сечения;
- х среднее значение;
- s стандартное отклонение;
- μ коэффициент вариации.

Обозначение образца	R _{eH}	R _{eL}	R _{p0.2}	R _m	δ	ψ	a ₀	b ₀	L _c	L ₀ SW	\mathbf{S}_0
	MPa	MPa	MPa	MPa	%	%	mm	mm	mm	mm	mm^2
09Г2С 1	354	348	350	477	28,4	56	2,99	19,99	120,00	80	59,77
09Г2С 2	355	348	350	478	28,1	54	2,99	19,99	120,00	80	59,77
09Г2С 3	373	363	369	496	27,8	51	2,99	19,99	120,00	80	59,77
09Г2С 4	348	340	345	470	30,6	53	2,99	19,99	120,00	80	59,77

Таблица 2.1 – Результаты статических испытаний образцов из стали 09Г2С

Таблица 2.2 – Статистические параметры по результатам статических испытаний образцов из стали 09Г2С

Серия	Е	R _{eH}	R _{eL}	R _{p0.2}	R _m	δ	ν	Ψ	a ₀	b ₀	L _c	L ₀ SW	S ₀
n = 4	GPa	MPa	MPa	MPa	MPa	%		%	mm	mm	mm	mm	mm^2
х	199	357	350	353	480	28,7	0,3	53	2,99	19,99	120,00	72,5	59,77
S	-	10,5	9,86	10,6	11,2	1,3	-	2	0,000	0,000	0,00	15	0,00
μ	-	2,94	2,82	3,01	2,33	4,49	-	4,50	0,00	0,00	0,00	20,69	0,00

Рисунок 2.23 иллюстрирует технические кривые деформирования, определенные в ходе статических испытаний образцов из стали 09Г2С.





Для построения истинной кривой деформирования, участок диаграммы, расположенный правее точки локализации деформации (точка максимального напряжения на технической диаграмме деформирования) отбрасывался. Для точки, отвечающей моменту разрушения образца, пластическая деформация и среднее напряжение определялись следующим образом:

$$\varepsilon_f = ln \left(\frac{1}{1-\psi}\right)$$
$$\sigma_f = \frac{\sigma_y}{1-\psi}$$

здесь ψ - относительное сужение после разрыва, σ_y – условное (техническое) напряжение, при котором произошел разрыв.

Истинные кривые деформирования стали 09Г2С показаны на рисунке 2.24. Пунктиром показан участок линейного приближения диаграммы, соединяющий точку начала локализации деформации и точку разрыва образца.



Рисунок 2.24 – Истинные диаграммы деформирования стали 09Г2С

Динамические испытания на сжатие проводились с использованием классического варианта метода Кольского. Испытания проводились на высокопрочных стальных мерных стержнях диаметром 20 мм. Нагружение проводилось стальным ударником длиной 300 мм и диаметром 20 мм. Ударным нагрузкам подвергались образцы в форме таблеток длиной 3 мм и диаметром 10 мм. Были получены диаграммы деформирования в диапазоне скоростей деформаций от 500 до 3000 с⁻¹.

Сводный график, иллюстрирующий влияние скорости деформации на диаграммы деформирования, полученные в динамическом диапазоне скоростей нагружения, представлен на рисунке 2.25. Каждая кривая – средняя диаграмма по указанным ранее группам диаграмм. В левой части рисунка показаны технические диаграммы деформирования, в правой – пластические участки кривых в истинных величинах. Можно отметить, что скорость деформации приводит к увеличению радиуса поверхности текучести.

63



Рисунок 2.25 – Влияние скорости деформации на диаграммы деформирования стали 09Г2С (лист 3 мм)

Испытания на высокоскоростное растяжение проводились с помощью модификации метода Кольского на прямое растяжение. Использовалось два типа образцов: с длиной рабочей части 8 мм и с длиной рабочей части 5 мм. Шарина рабочей части в обоих случаях составляла 5 мм, а толщина – 2 мм.

Сводный график, иллюстрирующий влияние скорости деформации на диаграммы деформирования образцов из стали 09Г2С, полученные при динамическом растяжении, представлен на рисунке 2.26 В силу ряда методических сложностей истинные диаграммы деформирования по результатам динамического эксперимента с использованием метода Кольского не строились.



Рисунок 2.26 – Влияние скорости деформации на диаграммы деформирования стали 09Г2С при растяжении. Технические кривые

Сравнение диаграмм деформирования, полученных при высокоскоростном сжатии и растяжении в истинных величинах дано на рисунке 2.27. Можно отметить, что в отличие от предыдущих испытанных материалов для стали 09Г2С диаграммы, полученные при растяжении и сжатии, оказались очень близки.



Рисунок 2.27 – Сравнение диаграмм, полученных для стали 09Г2С при сжатии (сплошные линии) и растяжении (пунктир)

Для определения диаграмм деформирования при растяжении со скоростью деформации порядка 100 1/с использовалась описанная ранее пневмодинамическая установка. Испытывались образцы-пластины с длиной рабочей части 10 мм, шириной рабочей части 5.4 мм и толщиной 0.7 мм. Результаты испытаний показаны на рисунке 2.28. Пунктирной линией показаны истории изменения скорости деформации образцов в процессе нагружения (правая вертикальная ось). Видно, что реализовывается близкая к постоянному значению скорость деформации. На рисунке 2.29 продемонстрированы диаграммы деформирования стали 09Г2С (лист 3мм) в исследованном диапазоне скоростей деформаций.



Рисунок 2.28 – Динамические диаграммы деформирования, полученные на пневмодинамической установке



Рисунок 2.29 – Диаграммы деформирования стали 09Г2С в исследованном диапазоне скоростей деформаций



Рисунок 2.30 – Зависимость начального предела текучести при растяжении от скорости деформации

Зависимость начального предела текучести при растяжении от скорости деформации показана на рисунке 2.30. Скоростные зависимости предельных характеристик разрушения стали 09Г2С показаны на рисунке 2.31 Синие звездочки представляют данные статических испытаний, красные круглые маркеры — данные полученные на пневмодинамической установке, оранжевые квадраты — результаты испытаний образцов с базой 8 мм на РСГ, зеленые треугольники - результаты испытаний образцов с базой 5 мм на РСГ. Видно, что величина предельного удлинения после разрыва (левая часть рисунка) сильно зависит от базы образца. Предельное сужение, характеризующее пластическую деформацию разрушения в условиях выраженной локализации деформации, практически не зависит от скорости деформации.



Рисунок 2.31 – Скоростная завсимимость относительного удлинения (слева) и относительного сужения (справа) после разрыва для стали 09Г2С

Разброс предельных значений δ существенно выше для предельного значения сужения Ψ. В этой связи Ψ чаще всего используется в критериях разрушения деформационного типа.

2.5 Выводы по разделу 2

- Разработана и создана экспериментальная установка, позволяющая исследовать процессы деформирования и разрушения образцов-пластин при умеренных скоростях деформаций (порядка 100 1/с). В качестве нагружающего устройства используется пневмоцилиндр. Регистрация процессов осуществляется методами тензометрии и корреляции цифровых изображений.
- Приводятся результаты испытаний образцов из стали 09Г2С в широком диапазоне изменения скоростей деформаций.
- 3. Выполнено численное моделирование процесса высокоскоростного деформирования образца для оценки напряженно-деформированного состояния его рабочей части, а также для обоснованного выбора расположения тензодатчиков для достоверного измерения силы, действующей на образец в процессе нагружения.
- Реализована методика определения истинной диаграммы деформирования материала при растяжении по данным испытаний на пневмодинамической установке.

3 Развитие метода прямого удара

3.1 Описание метода

Важнейшей частью расчетных комплексов конструкций и их элементов являются математические модели, описывающие поведение материалов, из которых изготавливается проектируемое изделие [118, 119]. Именно определяющие соотношения во многом задают качество цифрового двойника в плане его тождественности реальному объекту. Для построения достоверного цифрового двойника изделия необходимо не только с достаточной детализацией описать его геометрические особенности, но и учесть все значимые физические и математические эффекты, которые характеризуют поведение материалов, из которого скомпонован объект, в условиях его эксплуатации.

Так для задач оценки прочности динамически нагруженных конструкций важным является учет влияния скорости деформации на прочностные и деформационные характеристики материалов [120]. Экспериментальные схемы для исследования подобного влияния в основном построены на базе техники мерных стержней. К таким методам относится, например, хорошо известный метод Кольского [54, 121-128]. Численный анализ классического метода Кольского проводится в работах [129-132]. Методические ограничения указанной экспериментальной схемы привели к необходимости разработки альтернативных вариантов для расширения диапазона исследования по реализуемым скоростям деформации [2, 133]. Анализу и развитию одной из таких схем посвящена настоящая работа.

Метод прямого удара

Диапазон скоростей деформаций, которые реализуются при использовании метода Кольского ограничен в силу одного из основных условий методики – упругого деформирования мерных стержней. В указанной методике нагружение образца происходит через нагружающий мерный стержень. Максимальная скорость ударника, при которой в нагружающем мерном стержне формируется упругий импульс нагрузки определяется условием:

$$V_{\max} = \frac{2 \cdot c \cdot \sigma_T}{E}$$

здесь *с* – стержневая скорость звука в материале, Е – модуль Юнга, $\sigma_T \sigma_T$ – предел текучести. Предполагается, что ударник и мерный стержень выполнены из одного и того же материала и имеют одинаковые диаметры.

Поэтому максимальная скорость деформации в эксперименте ограничена величиной:

$$\dot{\varepsilon}_{\max} = \frac{V_{\max}}{L_0}$$

где *L*₀ – длина образца.

На практике максимальная скорость ударника, пригодная для проведения испытаний, оказывается существенно меньше V_{max} , поскольку большие амплитуды нагрузки в мерном стержне приводят к обрыву цепи тензорезисторов, устанавливаемых на поверхности нагружающего стержня. При этом не происходит регистрации сигнала и отсутствует возможность определить диаграмму деформирования. Амплитуда волны в опорном мерном стержне ограничена пределом текучести материала, поэтому выбором размера образца можно существенно снизить нагрузку на опорный мерный стержень и обеспечить надежную регистрацию сигнала.

На этой идее основана схема прямого удара, при которой образец устанавливается на торце мерного стержня и нагружается ударником напрямую, без промежуточного мерного стержня. Подобная схема, названная методом прямого удара, была предложена в работе Хаузера [32] для определения динамических свойств материалов при скоростях 10^3-10^4 с⁻¹ и выше. Значительное развитие этот метод получил в работах Клепачко [134]. С тех пор метод прямого удара успешно используется исследователями для изучения поведения различных материалов при высоких скоростях деформации [135-137].

Существует несколько вариантов метода прямого удара. Две наиболее популярные схемы [134] представлены на рисунке 3.1. В первой используется массивный ударник, обладающий запасом кинетической энергии, превышающей во много раз работу упругопластического деформирования образца (рисунок 3.1а). В этом случае скорость ударника считается постоянной или медленно меняющейся на протяжении всего процесса деформирования образца, а процесс нагружения образца имеет инерционный характер. Во второй схеме используется ударник значительно меньшей массы и того же диаметра, что и мерный стержень (рисунок 3.1б). Процесс нагружения при этом имеет волновой характер.



Рисунок 3.1 – Схемы двух вариантов метода прямого удара

В обоих вариантах метода прямого удара испытуемый образец (1) длиной L₀ располагается на торце длинного и тонкого мерного стержня (2) с высоким пределом

текучести и по нему наносится удар бойком (4) со скоростью V_0 от нескольких метров в секунду до нескольких десятков метров в секунду. В ходе испытания с использованием тензодатчиков (3) регистрируется импульс деформации в некотором сечении мерного стержня, который позволяет определить напряжение в образце. Важным параметром, использующимся при построении кривой деформирования по данным указанного эксперимента, является скорость ударника, которая так же должна регистрироваться в каждом испытании.

Следует иметь в виду, что в первом варианте (рисунок 3.1а) при испытаниях высокопрочных материалов метод прямого удара дает значительные погрешности при определении деформаций образца в силу нарушения предположения о постоянстве скорости ударника в процессе нагружения, особенно, на начальном участке диаграммы (до 5-7%). Для того чтобы избежать этого недостатка, Я.Клепачко предложил методику регистрации перемещений границы ударник-образец с использованием оптического датчика. В последние годы разработаны экспериментальные схемы, позволяющие регистрировать изменение скорости ударника в процессе эксперимента, что существенно улучшает информативность метода и повышает его точность [134].

Скорость границы контакта образца и опорного стержня определяется, как и в случае использования метода разрезного стержня Гопкинсона (РСГ), по импульсу упругой деформации $\varepsilon_T(t)$ в мерном стержне:

$$V_1(t) = c \cdot \varepsilon_T(t) \tag{1}$$

здесь *с* – скорость звука в мерном стержне.

В первом варианте методики (рисунок 1a) скорость движения границы «ударникобразец» остается постоянной и равной скорости ударника *V*₀.

Тогда, скорость изменения длины образца можно определить по формуле:

$$V_s(t) = V_0 - c \cdot \varepsilon_T(t) \tag{2}$$

Если L₀ – начальная длина образца, то средняя скорость деформации образца определяется как:

$$\dot{\varepsilon}_n(t) = \frac{1}{L_0} [V_0 - V_1(t)] \tag{3}$$

Средняя техническая деформация образца после интегрирования выражения определяется как:

$$\varepsilon_n(t) = \frac{1}{L_0} (V_0 t - c_0 \int_0^t \varepsilon_T(\vartheta) d\theta)$$
(4)

Среднее техническое напряжение в образце рассчитывается по формуле:

$$\sigma(t) = E \cdot \left(\frac{D_b}{D_s}\right)^2 \cdot \mathcal{E}_T(t)$$
(5)

здесь E – модуль Юнга мерного стержня, D_b и D_s – диаметры мерного стержня и образца соответственно.

В лаборатории динамических испытаний материалов НИИМ ННГУ для определения кривых деформирования при скоростях деформации свыше 10³ с⁻¹ выбрана вторая схема (рисунок 3.1b). Это обусловлено возможностью использования оборудования стандартной схемы испытаний по методу Кольского, поскольку при этом можно применять те же самые нагружающие устройства. Условия эксперимента подбираются так, чтобы образец деформировался упругопластически, а ударник и мерный стержень - упруго.

При ударе в ударнике распространяется точно такая же волна, что и в мерном стержне. Это позволяет определить среднюю скорость изменения длины образца с использованием зарегистрированного в мерном стержне импульса деформации $\mathcal{E}_T(t)$ по следующей формуле [134]:

$$V_s(t) = V_0 - 2 \cdot c \cdot \varepsilon_T(t) \tag{6}$$

здесь V_s – скорость изменения длины образца.

Таким образом, средняя скорость деформации в образце равна:

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{V_s}{L_0} \tag{7}$$

Тогда средняя техническая деформация в образце определяется следующим образом:

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{L_0} \left(V_0 \cdot t - 2 \cdot c \cdot \int_0^t \varepsilon_T(\tau) d\tau \right)$$
(8)

Инерционные поправки и коррекция на трение

Поскольку метод прямого удара предназначен для исследования характеристик материалов при повышенных скоростях деформации (свыше 10³ с⁻¹), то при обработке результатов испытаний необходимо учитывать инерционные напряжения в образце. Кроме того, наличие трения на границах «ударник-образец-мерный стержень» также приводит к появлению радиальных компонент напряжения.

Анализ эффектов трения, радиальной и осевой инерции в цилиндрическом образце подробно изучены в работе Я. Малиновского и Я. Клепачко [138]. Авторами показано, что радиальное напряжение σ_r непостоянно вдоль радиуса образца и имеет максимальное значение при R = 0, т.е. на оси образца. В работе [32] предложено использовать для оценки радиальных напряжений их максимальное значение, т.е.
$$\sigma_{r\max}(t) = \frac{\rho \cdot R(t)^2}{4 \cdot L(t)(1 - \varepsilon_n(t))^2} \left[\frac{3V_x^2}{2L(t)(1 - \varepsilon_n(t))} + \frac{dV_x}{dt} \right]$$
(9)

где V_x – скорость изменения длины образца, ρ - плотность материала образца, R(t) и L(t) – текущие радиус и длина образца соответственно.

Существуют и другие соотношения для оценки σ_r , которые дают близкие результаты. В работе [138], например, приводится следующее выражение для оценки радиальной составляющей напряжения:

$$\sigma_r(t) = \frac{3}{8} \rho \left(R_0 V / L_0 \right)^2 \left(1 - \varepsilon_n(t) \right)^{-3}$$
(10)

На рисунке 3.2 показаны кривые деформирования меди С101, полученные методом прямого удара при скорости деформации порядка 10⁴ с⁻¹. При расчете оранжевой кривой учитывалась радиальная инерция. Видно, что в указанных условиях поправка на инерцию вносит существенный вклад. Разница эффективных напряжений при максимальной достигнутой деформации составляет порядка 10 %.



Рисунок 3.2 – Кривые деформирования меди С101, построенные без учета и с учетом радиальной инерции

Напряжение, вызванное осевой инерцией, в соответствии с [133], определяется соотношением:

$$\sigma_{axial} = \frac{\rho D_s^2}{12} \left(S^2 - \frac{3}{16} \right) \left(\dot{\varepsilon}^2 + \ddot{\varepsilon} \right) + \frac{3\rho D_s^2}{64} \ddot{\varepsilon}$$
(11)

здесь $S = \frac{L}{D_s}$, $\dot{\varepsilon}$ и $\ddot{\varepsilon}$ - скорость деформации образца (осевая) и её производная по

времени.

Как показал расчет [139], инерционная составляющая осевого напряжения до скоростей $\sim 5 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ не превышает $\sim 1 \%$ и ей можно пренебречь, а при скоростях деформации выше $5 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ инерционные составляющие напряжений должны учитываться в соответствии с формулой (11).

Трение на границах «ударник-образец-мерный стержень» приводит к появлению в образце радиального напряжения σ_{fr} , которое можно оценить следующей простой зависимостью:

$$\sigma_{fr}(t) = \frac{\mu\sigma(t)}{3S(t)}, \quad r \ge S(t) = \frac{L(t)}{D(t)}$$
(12)

где *L* и *D* текущие длина и диаметр образца, σ – осевое напряжение в образце, μ - коэффициент трения.

Оценка достоверности формулы (12) с использованием численного анализа проводится в работе [132].

3.2 Численный анализ метода прямого удара

Численная оценка однородности и одномерности напряженно-деформированного состояния образца в методе прямого удара при наличии сил трения проводилась в работе [140]. В настоящей работе проводились численные эксперименты с целью оценки точности и определения границ применимости формул для расчета деформаций и напряжений в образце с использованием зависимостей (5)-(8). На рисунке 3.3 показан фрагмент модели. Задача решалась в осесимметричной постановке с использованием САЕ пакета Abaqus Student Edition. Поведение материалов мерного стержня и ударника линейной описывалось упругой моделью следующими параметрами: co плотность=7800 кг/м³, модуль Юнга=200 ГПа, коэффициент Пуассона=0.28, стержневая скорость звука = 5065 м/с. Длина ударника 300 мм, длина мерного стержня 1.5 м, диаметры ударника и мерного стержня 20 мм. Поведение материала образца описывалось упругопластической билинейной моделью со следующими параметрами: плотность 2600 кг/м³, модуль Юнга 70 ГПа, коэффициент Пуассона 0.33, предел текучести 260 МПа, модуль упрочнения 1000 МПа. Высота образца - 5 мм, диаметр - 10 мм. Начальная скорость ударника составляла V₀=30 м/с. На рисунке 2 используются следующие обозначения: V₁ – массовая скорость движения правого торца ударника (левого торца образца), V_2 – массовая скорость левого торца мерного стержня (правого торца образца).



Рисунок 3.3 – Фрагмент модели

В процессе расчета определялся импульс осевой деформации в мерном стержне (аналогично натурному испытанию), а та же силы на контакте «образец-мерный стержень», скорости смещения интерфейсов взаимодействия «ударник-образец» и «образец-мерный стержень», закон изменения длины образца, деформации в образце. Сравнение сил, определенных в виртуальном эксперименте напрямую регистрацией контактного усилия (торец) и рассчитанной по импульсу в мерном стержне (мерный стержень) приводится на рисунке 3.4. Видно, что кривые практически совпадают. Отличие наблюдается в наклоне переднего фронта временной зависимости: начальный участок на кривой, определенной по импульсу деформации в мерном стержне более пологий. Кроме того, на силе, рассчитанной по импульсу деформации в мерном стержне присутствуют колебания. Оба эффекта связаны с дисперсией волны в упругом стержне конечного диаметра. Подробное описание данного эффекта с соответствующим анализом приводится в [141, 142].



Рисунок 3.4 – Сравнение сил

На рисунке 3.5 приводится сравнение скоростей на границах образца, полученных прямой регистрацией в процессе расчета (численное моделирование) и определенные по формуле (1) на основании импульса, зарегистрированного в мерном стержне 75

(теоретический расчет). Слева сравниваются истории для левого торца образца (контакт с ударником), справа – для правого торца (контакт со стержнем). Видно, что закон движения правого торца восстанавливается достаточно точно на протяжении всего нагружения образца. В то же время, формула (1) дает относительно точную оценку скорости контакта «ударник-образец» лишь на временном интервале, соответствующем двум пробегам волны по ударнику (четная вертикальная линия на рисунке). После этого на движение торца ударника оказывает влияние волна, вернувшаяся после отражения от его свободного торца.



Рисунок 3.5 – Сравнение скоростей на границах образца (прямой расчет и теоретическая оценка по деформации в мерном стержне)

3.3 Модифицированная процедура обработки данных

Для расширения области, в которой метод позволяет получить корректный результат, а значит для расчета кривой деформирования в большем диапазоне деформаций, разработана модифицированная процедура обработки экспериментальной информации. Она заключается в том, что для определения скорости интерфейса «ударникобразец» используется модифицированный импульс, который получается добавлением к исходному сигналу импульсов, отразившихся от свободного торца ударника, т.е.

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

здесь L_{yg} – длина ударника, c – скорость звука в материале ударника.

Описанная процедура иллюстрируется на рисунке 3.6. К исходному сигналу 1 добавляется удвоенный импульс, смещенный на два пробега волны в ударнике 2 и удвоенный импульс, смещенный на четыре пробега волны в ударнике 3. В итоге получается импульс 4.



Рисунок 3.6 – Расчет модифицированного сигнала

Скорость V₁ рассчитывается по формуле:

 $V_1(t) = c \cdot \varepsilon^{\text{mod}}(t)$

Сравнение скоростей на границе «образец-ударник», полученных напрямую из численного моделирования и с использованием модифицированной процедуры приводится на рисунке 3.7. Видно, что применение разработанной схемы позволяет точно рассчитать скорость границы «ударник-образец» на всем интервале активного нагружения образца.



Рисунок 3.7 - Скорости на границе «образец-ударник»

Теперь формула для определения скорости изменения длины образцы выглядит следующим образом:

 $V_s(t) = V_0 - c \cdot \varepsilon_T(t) - c \cdot \varepsilon^{\text{mod}}(t)$

Скорости деформаций, деформации и напряжения в образце определяются по формулам (5), (7) и (8).

С использованием метода прямого удара были получены кривые деформирования меди C101 и алюминиевого сплава Д16Т при скорости деформации порядка 10⁴ с⁻¹. Диаграммы приводятся на рисунке 3.8. Полученная информация в сочетании с кривыми, определенными с использованием традиционного метода Кольского, дает представление о

влиянии скорости деформации на напряжение течения исследуемых материалов в диапазоне скоростей деформаций от 1000 до 10000 с⁻¹.



Рисунок 3.8 – Результаты испытания меди С101 (слева) и алюминиевого сплава Д16Т (справа)

Предложенная модификация процедуры обработки экспериментальных данных, расширяет границы получения достоверных результатов. С применением описанной методики получены диаграммы деформирования меди С101 и алюминиевого сплава Д16Т при скорости деформации порядка 10⁴ с⁻¹.

3.4 Выводы по разделу 3

- Выполнен численный анализ экспериментальной схемы, реализующей метод прямого удара для динамических испытаний материалов, выявивший ограничения метода.
- Предложена и обоснована модификация процедуры обработки экспериментальных данных, полученных по методу прямого удара, которая расширяет границы получения достоверных оценок механических характеристик по данным эксперимента.
- 3. С применением метода прямого удара и предложенной модифицированной процедуры обработки экспериментальной информации получены диаграммы деформирования меди С101 и алюминиевого сплава Д16Т при скорости деформации порядка 10⁴ с⁻¹.
- 4. Проведено сравнение диаграмм деформирования этих сплавов методом Кольского и методом прямого удара. Показано, что метод прямого удара позволяет получать более высокие скорости деформации, чем метод Кольского и получать диаграммы деформирования при больших степенях деформации.

4 Модификации метода Кольского для определения динамических характеристик ПКМ

В настоящее время композиционные материалы на основе полимерного связующего становятся все больше востребованы в различных отраслях машиностроения. Из композиционных материалов на основе стекло- или углеволокна и полимерной матрицы изготавливают детали авиационных двигателей нового поколения и даже силовые и несущие элементы конструкции корпуса самолета. Это приводит к необходимости разработки методик получения достоверных оценок характеристик жесткости и прочности подобных материалов в широком диапазоне режимов нагружения, в том числе и в области действия кратковременных интенсивных импульсных нагрузок. Зависимость характеристик ПКМ от скорости деформации изучена недостаточно, поэтому разработка экспериментальных схем нагружения и исследование поведения ПКМ при динамических нагрузках является актуальной задачей [143-148]. В настоящей главе приводится описание разработанных и апробированных в ходе диссертационного исследования схем определения некоторых характеристик ПКМ при ударных нагрузках, основанных на модификациях метода Кольского.

4.1 Определение прочности ПКМ при межслоевом отрыве

В настоящем разделе приводится описание экспериментальной схемы для определения предела прочности ПКМ в направлении, перпендикулярном плоскости армирования. Образец из ПКМ специальной формы прикрепляется к мерным стержням с помощью оснастки (рисунок 4.1). Система нагружается растягивающим импульсом.



Рисунок 4.1 – Схема испытаний для определения прочности на разрыв ПКМ в 3 направлении

Для того, чтобы закрепить образец 3 (рисунок 4.2) в мерных стержнях 1 используются специальные переходники 2. Центрирование образца производится путем

проточки в образцах отверстий, в которые вводятся направляющие переходников (рисунок 4.3). Образец соединяется с переходниками посредством клеевого соединения. Сборка «образец-переходники» вкручивается в мерные стержни. Такая схема крепления позволяет готовить к испытаниям сразу несколько образцов, в то время как в случае приклеивания образца непосредственно к мерным стержням процесс испытаний заметно замедляется.



Рисунок 4.2 – Методика крепления образца к мерным стержням



Рисунок 4.3 – Фотография образца на растяжение с переходниками

Для определения предельного напряжения, при котором происходит разрушение образца по типу межслоевого отрыва (перпендикулярно плоскости армирования σ₃), используются следующее соотношение:

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

здесь ε^{T} – прошедший импульс деформации, зарегистрированный в опорном стержне, E_{T}, S_{T} – модуль Юнга и площадь поперечного сечения опорного мерного стержня, *a* – сторона сечения образца (рисунок 4.4).



Рисунок 4.4 – Геометрические параметры образца

На рисунке 4.5 показаны характерные временные зависимости растягивающего напряжения в сечении образца (синяя линия) и скорости растяжения (красный пунктир). Предельная величина напряжения определялась как максимам величины σ₃₊(t). При этом определялась скорость растяжения в момент разрушения образца. Образец после испытания показан на рисунке 4.6.



Рисунок 4.5 – Обработка эксперимента



Рисунок 4.6 – Образец после испытания

Данные, полученные в процессе испытаний слоистого ПКМ на основе углеткани, показаны на рисунке 4.7. можно отметить, что величина ₅₃₊ уменьшается с ростом скорости нагружения.



Рисунок 4.7 – Результаты определения предельного напряжения в направлении 3

4.2 Определение прочности ПКМ при межслоевом сдвиге

4.2.1 Динамический изгиб короткой балки

Для определения динамических характеристик прочности ПКМ при межслоевом сдвиге предложено и апробировано три экспериментальные схемы: динамический трехточечный изгиб короткой балки, динамическое сжатие образцов-пластин с надрезами и динамическое выдавливание средней части образцов в виде параллелепипедов. Далее указанные схемы описываются более подробно.

Для определения характеристик прочности при межслоевом сдвиге ПКМ при динамическом нагружении по аналогии с ГОСТом на статические испытания композитов ГОСТ-32659-2014 (ISO 14130:1997) проводились эксперименты на трехточечный изгиб короткой балки. Общая схема испытаний иллюстрируется на рисунке 4.8



Рисунок 4.8 – Схема динамического трехточечного изгиба короткой балки В экспериментах использовались мерные стержни диаметром 20 мм. Радиусы скруглений стержней и расстояние между опорными стержнями (рисунок 4.9) выбирались согласно ГОСТ-32659-2014 (ISO 14130:1997).



Рисунок 4.9 – Геометрические характеристики испытательной установки

Геометрические характеристики образцов-балок показаны на рисунке 4.10.



Рисунок 4.10 – Геометрические характеристики образца

Образец нагружается сжимающим импульсом через нагружающий мерный стержень.

Одним из принципиальных допущений и условий применимости метода Кольского для определения характеристик материалов образцов является условие динамического равновесия образца в процессе нагружения. Это означает, что в каждый момент времени сила, действующая на образец со стороны нагружающего мерного стержня должна быть равна сумме сил, действующих на образец со стороны опорного стержня: $F(t) = F_1(t) + F_2(t)$ (рисунок 4.11).



Рисунок 4.11 – Силы, действующие на балку в процессе испытания

Для оценки условий динамического равновесия образца-балки в используемой конфигурации испытательной установки проведено численное моделирование. Результаты приводятся на рисунках 4.12 и 4.13. На рисунке 4.12 изображен процесс изгиба. Рисунок 4.13 иллюстрирует историю изменения сил, действующих на образец со

стороны мерных стержней. Цифрами обозначены: 1 - сила с контакта «нагружающий стержень-образец», <math>2 - удвоенная сила с контакта «образец опорный стержень», <math>3 - удвоенная сила, рассчитанная по данным датчика деформации на опорном стержне. Можно сделать следующие выводы: во-первых, сила, действующая на образец со стороны нагружающего стержня в каждый момент времени очень близка по величине силе, действующая на образец со стороны опорных мерных стержней. Разница по времени между началом действия первой силы (<math>F) и появлением силы на опорных стержнях (F_1 и F_2) составляет порядка 10 мкс, время же действия импульса составляет порядка 550 мкс, таким образом можно считать, что в процессе деформирования в образце имеет место условие динамического равновесия. Информация с датчика деформации, расположенного на опорном стержне, позволяет достаточно точно определить силу F_1 (F_2).



Рисунок 4.12 – Процесс динамического изгиба короткой балки



Рисунок 4.13 – Силы, действующие на образец: 1 – сила с контакта «нагружающий стержень-образец», 2 – удвоенная сила с контакта «образец опорный стержень», 3 – удвоенная сила, рассчитанная по данным датчика деформации на опорном стержне

Для обработки экспериментальной информации, полученной при изгибе композитной балки, используются следующие соотношения:

Скорость прогиба балки равна:

$$V_b(t) = c_I \cdot (\varepsilon^I + \varepsilon^R) - \mathbf{0} \cdot \mathbf{5} \cdot c_T \left(\varepsilon_1^T + \varepsilon_2^T\right)$$

Прогиб балки:

$$U_b(t) = \int_0^t V_b(\tau) d\tau$$

Действующая на образец сила:

$$F(t) = F_1(t) + F_2(t) = E_T \cdot S_T \cdot \left(\varepsilon_1^T + \varepsilon_2^T\right)$$

здесь ε^{I} , ε^{R} – падающий и отраженный импульсы деформации, зарегистрированные в нагружающем стержне, ε_{1}^{T} , ε_{2}^{T} – прошедшие импульсы деформации, зарегистрированные в первом и втором опорных стержнях соответственно, c_{I} – стержневая скорость звука материала нагружающего стержня, , c_{T} – стержневая скорость звука материала опорного стержней, E_{T} , S_{T} – модуль Юнга и площадь поперечного сечения опорных мерных стержней.

Кажущаяся межслойное сдвиговое напряжение рассчитывается согласно ГОСТ-32659-2014 по формуле:

$$\tau(t) = \frac{3}{4} \cdot \frac{F(t)}{h \cdot w}$$

Значение кажущейся межслойной прочности при сдвиге τ^* определяется как максимум $\tau(t)$ в экспериментах, где в результате нагружения в образце образовалось одинарное или множественное расслоение (рисунок 4.14).



Рисунок 4.14 – «Зачетные» виды разрушения образца (из ГОСТ-32659-2014)

Апробация схемы проводилась на балках из слоистого ПКМ на основе углеткани. Фотографии образцов после испытания показаны на рисунке 4.15. В зависимости от амплитуды нагружающей волны (скорости ударника) наблюдаются разные режимы разрушения образца. На левой части фотографии на торце образца возникает одиночная трещина, на правой – наблюдается интенсивное множественное расслоение в зоне нагружения.



Рисунок 4.15 – Типы разрушения образца

Следует отметить, что за счет вязкоупругих свойств материала образца после эксперимента разрушения визуально практически не наблюдаются. Характерные импульсы деформации, регистрируемые в эксперименте, приводятся на рисунке 4.16. Можно отметить, что импульсы, зарегистрированные на опорных стержнях, достаточно хорошо согласуются, что свидетельствует о правильной юстировке экспериментальной установки и точной установке испытуемого образца.



Рисунок 4.16 – Характерные импульсы деформации, регистрируемые в эксперименте на трехточечный изгиб короткой балки

Рисунок 4.17иллюстрирует сравнение сил, действующих на образец со стороны нагружающего (F) и опорных (F_1+F_2) стержней. Можно отметить довольно хорошее соответствие этих сил, что свидетельствует о выполнении условий динамического равновесия образца-балки в процессе изгиба.



Рисунок 4.17 – Сравнение сил, действующих на образец со стороны мерных стержней

По результатам эксперимента с использованием формул, приведенных в соответствующем разделе, расчитывались следующие параметры: скорость прогиба балки, сила *F*, действующая на образец в процессе испытания и величина сдвигового напряжения *τ*. На рисунке 4.18 показаны истории изменения скорости прогиба балки (синяя линия, левая вертикальная ось) и действующей на нее силы *F* (красная линия, правая вертикальная ось). Для каждого эксперимента определялось максимальное значение силы и соответствующее значение скорости прогиба. По максимальной силе *F* с использованием соответствующей формулы рассчитывалось значение кажущейся прочности ПКМ при межслойном сдвиге.



Рисунок 4.18 – Обработка эксперимента на изгиб короткой балки

Графически результаты экспериментов представлены на рисунке 4.19. Цвет точек характеризует режимы разрушения образца: 1 соответствует появлению на торце образца одиночной трещины, 2 – появление множественного расслоения в зоне нагружения, 3 – интенсивное множественное расслоение в зоне нагружения. Можно сделать вывод о том, что динамическая прочность оказывается на 15% выше статической величины.



Рисунок 4.19 – Результаты определения прочности при межслойном сдвиге методом изгиба короткой балки

4.2.2 Динамическое сжатие образцов с надрезами

Для определения межслойной прочности при сдвиге испытывались образцы, конфигурация которых показана на рисунке 4.20.



Рисунок 4.20 – Конфигурация образца на определение межслойной прочности при

сдвиге

Для обработки экспериментальной информации используются следующие соотношения:

Скорость сдвига равна:

$$V_{sh}(t) = c_I \cdot (\varepsilon^I + \varepsilon^R) - c_T \cdot \varepsilon^T$$

Сдвиговое напряжение:

$$\tau(t) = \frac{E_T \cdot S_T \cdot \varepsilon^T}{L \cdot w}$$

здесь ε^{I} , ε^{R} – падающий и отраженный импульсы деформации, зарегистрированные в нагружающем стержне, ε^{T} – прошедший импульс деформации, зарегистрированный в опорном стержне, c_{I} , c_{T} – стержневые скорости звука материала нагружающего и опорного стержней соответственно, E_{T} , S_{T} – модуль Юнга и площадь поперечного сечения опорного мерного стержня, L и w – длина и ширина рабочей зоны образца (рисунок 4.21).



Рисунок 4.21 – Геометрические характеристики образца на определение межслойной прочности при сдвиге

Крепление образца в испытательной установке и способ нагружения образца динамической нагрузкой аналогичен, описанному в пункте 4.3 (динамическое сжатие образцов из ПКМ) способу крепления и нагружения образцов-пластин.

Апробация схемы проводилась на балках из слоистого ПКМ на основе углеткани. Характерные импульсы деформации, регистрируемые в эксперименте, приводятся на рисунке 4.22



Рисунок 4.22 – Характерные импульсы деформации, регистрируемые в эксперименте на сжатие образцов с надрезами

Рисунок 4.23 иллюстрирует сравнение сил, действующих на образец со стороны нагружающего (F_1) и опорного (F_2) стержней, рассчитанных по формулам Кольского. Наличие сложной оснастки для крепления образца к мерным стержням (вилки+стягивающие обоймы) вносит искажения в волновую картину. Массивные элементы приводят к дополнительным отражениям волн. На отраженном импульсе в начале появляется провал и, соответственно на силе, которая определяется разницей падающего и отраженного импульсов, появляется выброс, который не отражает силу,

действующую на образец, а представляет из себя суперпозицию сил, действующих на образец и инертную массивную оснастку. Однако, в течении нагружения образца (если судить по силе в опорном стержне), условие динамического равновесия имеет место.



Рисунок 4.23 – Сравнение сил, действующих на образец со стороны мерных

стержней

По результатам эксперимента с использованием формул, приведенных в соответствующем разделе, рассчитывались следующие параметры: скорость сдвига, сила *F*, действующая на образец в процессе испытания и величина сдвигового напряжения *τ*. На рисунке 4.24 показаны истории изменения скорости сдвига (синяя линия, левая вертикальная ось) и действующей на образец силы *F* (красная линия, правая вертикальная ось). Сила имеет несколько пиков. Первый соответствует разрушению образца по плоскости среза. Во время второго пика происходит смыкание частей образца при выборе зазора, образуемого пропилом. Для каждого эксперимента определялось максимальное значение силы в первом пике и соответствующее значение скорости сдвига. По максимальной силе *F* с использованием соответствующей формулы рассчитывалось значение прочности ПКМ при межслойном сдвиге.



Рисунок 4.24 – Обработка эксперимента на сжатие образцов с надрезами

Графически результаты испытаний представлены на рисунке 4.25. Точки сгруппированы по толщине образца. Синие маркеры соответствуют данным, полученным на образцах толщиной 2 мм, оранжевые – на образцах толщиной 6.5 мм. Динамическая прочность по данным указанного метода испытаний оказалась ниже статической.



Рисунок 4.25 – Результаты определения прочности при межслойном сдвиге методом сжатия образцов с надрезами

4.2.3 Динамическое выдавливание середины образца-параллелепипеда

Для определения межслойной прочности при сдвиге ПКМ использовалась схема на выдавливание середины образца-параллелепипеда (двухплоскостной сдвиг). Нагружение в системе РСГ проводилось сжимающей нагрузкой. Общий вид экспериментальной схемы показан на рисунке 4.26.



Рисунок 4.26 – Общий вид экспериментальной схемы

Оснастка для нагружения образца 5 (рисунок 4.27) в системе РСГ (мерные стержни 1 и 2) включает в себя детали 3 и 4, а также направляющую 6 для центрирования деталей.



Рисунок 4.27 – Оснастка для установки образца в экспериментальную установку Расположение образца в оснастке (сечение) представлено на рисунке 4.28



Рисунок 4.28 – Расположение образца в оснастке (сечение): сверху – вид сбоку,

снизу – вид сверху

При нагружении образца в описанной оснастке в нем происходит сдвиг по плоскостям, выделенным красным цветом на рисунке 4.29



Рисунок 4.29 – Плоскости сдвига

Для обработки экспериментальной информации используются следующие соотношения:

Скорость сдвига:

$$V_{sh}(t) = c_I \cdot (\varepsilon^I + \varepsilon^R) - c_T \cdot \varepsilon^T$$

Сдвиговое напряжение:

$$\tau(t) = \frac{E_T \cdot S_T \cdot \varepsilon^T}{2 \cdot a \cdot h}$$

здесь ε^{I} , ε^{R} – падающий и отраженный импульсы деформации, зарегистрированные в нагружающем стержне, ε^{T} – прошедший импульс деформации, зарегистрированный в опорном стержне, c_{I} , c_{T} – стержневые скорости звука материала нагружающего и опорного стержней соответственно, E_{T} , S_{T} – модуль Юнга и площадь поперечного сечения опорного мерного стержня, a и h – длина и ширина зоны сдвига (рисунок 4.30).



Рисунок 4.30 – Геометрические характеристики образца

Апробация схемы проводилась на балках из слоистого ПКМ на основе углеткани. Характерные импульсы деформации, регистрируемые в эксперименте, приводятся на рисунке 4.31.



Рисунок 4.31 – Характерные импульсы деформации, регистрируемые в эксперименте на выдавливание

Рисунок 4.32 иллюстрирует сравнение сил, действующих на образец со стороны нагружающего (F_1) и опорного (F_2) стержней, рассчитанных по формулам Кольского. Видно, что наличие переходников, используемых для реализации выдавливания, вносит искажения в волновую картину, вследствие чего условия динамического равновесия не выполняются.



Рисунок 4.32 – Сравнение сил, действующих на образец со стороны мерных стержней

По результатам эксперимента рассчитывались следующие параметры: скорость сдвига, сила *F*, действующая на образец в процессе испытания и величина сдвигового

напряжения τ . Сила определяется по импульсу в опорном мерном стержне. На рисунке 4.33 показаны истории изменения скорости сдвига (синяя линия, левая вертикальная ось) и действующей на образец силы F (красная линия, правая вертикальная ось). Для каждого эксперимента определялось максимальное значение силы и соответствующее значение скорости сдвига. По максимальной силе F с использованием соответствующей формулы рассчитывалось значение прочности ПКМ при межслойном сдвиге. Результаты обработки всех экспериментов проиллюстрированы на рисунке 4.34. Звездочка отвечает статическому значению сдвиговой прочности при межслойном сдвиге. Полученные в динамическом диапазоне значения межслоевой сдвиговой прочности в среднем оказались на 25 % ниже статической характеристики.



Рисунок 4.33 – Обработка эксперимента на выдавливание



Рисунок 4.34 – Результаты определения прочности при межслойном сдвиге методом выдавливания

На рисунке 4.35 приводится сравнение величин прочности ПКМ при межслойном сдвиге, полученных разными методами. Можно отметить, что данные полученные методом выдавливания (красные треугольники) хорошо согласуются с данными определенными при динамическом сжатии образцов с надрезами (оранжевые и синие квадраты). Характеристика прочности, определенная методом изгиба короткой балки, оказалась заметно выше.



Рисунок 4.35 – Сравнение данных, полученных разными методами

4.3 Динамическое сжатие образцов из ПКМ

Для определения предельных характеристик разрушения при сжатии образцов из ПКМ, имеющего однонаправленное армирование, отрабатывалось несколько схем установки образца в системе разрезного стержня Гопкинсона. Следует отметить высокую прочность образцов из однонаправленного ПКМ. В связи с этим возникают сложности в закреплении образца.

В первом варианте образец устанавливался между стержнями без дополнительных приспособлений (рисунок 4.36). Это наиболее простая схема, однако при этом мода разрушения образца в направлении нагружения не является изолированной. На контактах «образец-мерный стержень» у образца есть возможность расширяться в направлениях, перпендикулярных направлению нагружения и, таким образом, образец может разрушаться путем расслоения. Поскольку прочность однонаправленного композита в

плоскости перпендикулярной армирующему волокну определяется прочностью связующего, данная мода разрушения срабатывает раньше и регистрируемое в такой схеме максимальное усилие отвечает суперпозиции различных мод разрушения.





Рисунок 4.36 – Вариант испытания 1

Для изоляции разрушения по типу разрушения волокна при нагружении в направлении армирования следует использовать схемы крепления образца в мерных стержнях, ограничивающих свободное расширение торцов образца на контактах с мерными стержнями.

Один из вариантов такого крепления изображен на рисунки 4.37 и 4.38. Показана половина оснастки (часть, которая крепится к опорному мерному стержню). Образец устанавливается внутри ограничивающего кольца. Часть образца сжимается прижимными пластинами с использованием винтов. Прижимные пластины с образцом располагаются в углублении, выфрезерованном в переходнике, который крепится к мерному стержню при помощи резьбы (рисунок4.39).



Рисунок 4.37 – Оснастка для крепления образца. Вариант испытания 2



Рисунок 4.38 – Детали оснастки



Рисунок 4.39 – Реализация варианта оснастки

К минусам такой схемы можно отнести наличие дополнительной массы в виде кольца и резьбовое соединение переходника с мерными стержнями, что вносит искажение в волновую картину и сказывается на точности определения напряжений и деформаций образца по сигналам с мерных стержней.

Рисунок 4.40 и рисунок 4.41 иллюстрирует облегченную версию оснастки, описанной выше. Зона захвата уменьшена и отсутствует резьбовое крепление образца к мерным стержням.



Рисунок 4.40 – Оснастка для крепления образца. Вариант испытания 3



Рисунок 4.41 – Реализация варианта оснастки

В следующей варианте получилось избавиться от ограничивающего кольца. При этом диаметр оснастки соответствует диаметру мерных стержней (рисунок 4.42), отсутствует резьбовое соединение с мерным стержнем. Последний вариант оснастки показал неплохие результаты в плане реализуемой в эксперименте моды разрушения образца, поэтому был выбран в качестве основного рабочего варианта. Рисунок 4.42 и рисунок 4.43 иллюстрирует образец в финальном варианте оснастки, установленный между мерными стержнями. Размещение образца с оснасткой в системе РСГ показанно на рисунке 4.44



Рисунок 4.42 – Оснастка для крепления образца. Вариант испытания 4



Рисунок 4.43 – Реализация варианта оснастки



Рисунок 4.44 – Размещение образца с оснасткой в системе РСГ

Для оценки влияния метода крепления образцов в экспериментальной установке на процесс деформирования и разрушения образцов проведена серия отладочных испытаний. Ударному нагружению подвергались образцы однонаправленного ПКМ. Испытания проводились с формирователем импульса [149]. Характерная осциллограмма, зарегистрированная в процессе испытания образца, показана на рисунке 4.45. Буквами обозначены импульсы, которые в соответствии с методикой Кольского используются для расчета деформаций и напряжений в образце: ε^{I} – соответствует падающему импульсу деформации, ε^{R} – отраженному импульсу деформации, ε^{T} – прошедшему импульсу деформации.



Рисунок 4.45 – Характерная осциллограмма в испытаниях образцов из ПКМ

Без дополнительной оснастки испытывались образцы в виде пластин длиной 15 мм, шириной 10 мм и толщиной порядка 4 мм. Образцы устанавливались между сталными мерными стержнями диаметром 20 мм. Нагружение проводилось стальным ударником диаметром 20 мм и длиной 150 мм со скоростью порядка 30 м/с. Процесс деформирования и разрушения образцов показан на рисунках 4.46-4.48. Съемка проводилась с боковой части образца. Нагружающий стержень на кадрах расположен справа. Временное расстояние между кадрами составляет порядка 100 мкс. Можно отметить, что при данном виде установки образца в систему РСГ разрушение начинается у контактов "образецмерный стержень". Причем инициализация разрушения может происходить у нагружаюемого торца (рисунок 4.46), опорного торца (рисунок 4.47) или симметрично (рисунок 4.48). Область начала разрушения, повидимому, связана с наличием дефектом и качеством (плоскостностью) торца, которое определяет поверхность контакта образца с мерным стержнем. Если имеет место неплоскостность контакта образца со стержнем, то там где он более выражен имеет место разрушениеза счет концентрации усилий.



Рисунок 4.46 – Испытание 36(0)



Рисунок 4.47 – Испытание 38(0)



Рисунок 4.48 – Испытание 37(0)

Скорость деформации при испытаниях по указанной схеме в момент достижения предельного напряженния составила порядка 550 МПа (см. рисунок 4.49).



Рисунок 4.49 – Истории изменения напряжения (сплошная линия) и скорости деформации (пунктирная линия)

На рисунке 4.50 показана группа диаграмм, полученных при испытаниях по первой схеме – установка образца между стержнями без оснастки. Величина предельных напряжений составила от 550 до 700 МПа.



Рисунок 4.50 – Группа диаграмм. Испытания без оснастки

Как отмечалось ранее форма разрушения образцов при испытаниях без оснастки содержит в себе моды разрушения волокна и расслоения КМ. Для того, чтобы максимально изолировать моду разрушения волокна, протестирована еще одна схема испытания – сжатие пластин, концы которых располагаются в ограничивающей обойме для исключения их раздачи в плоскости, перпендикулярной волокну. Схема испытаний описана в предыдущем разделе на рисунке 4.44. Дополнительно у образца методом протачивания формировалась рабочая область. Чертеж образца показан на рисунке 4.51.



Рисунок 4.51 – Чертеж образца

На кинограмме рисунка 4.52 показан процесс деформирования и разрушения образца в оснастке. Нагружающий стержень расположен справа. Регистрация проводилась в направлении нормальном к плоскости образца. Можно отметить, что разрушение начинается в зоне перехода лопаточной (расширенной) части образца в рабочую часть. Полученные временные зависимости напряжений показаны на рисунке 4.53



Рисунок 4.52 – Процесс деформирования и разрешения образца в оснастке



Рисунок 4.53 – Временные зависимости напряжений при нагружении образца в оснастке

На рисунке 4.54 приводится сравнение временных зависимостей напряжений в образце для двух схем крепления. Треугольными маркерами обозначены испытания, в которых оснастка не использовалась, квадратными – испытания с оснасткой. Можно отметить, что предельные разрушающие напряжения в опытах с оснасткой оказались

примерно на 30% больше, чем в опытах без оснастки, что согласуется с высказанными ранее соображениями о смешанной моде разрушения в образцах без ограничителей перпендикулярных перемещений на торцах.



Рисунок 4.54 – Сравнение результатов испытаний по двум схемам

На рисунке 4.55 приводятся синхронизированные импульсы деформации. Слева показаны данные эксперимента с образцом без оснастки, справа – данные эксперимента с образцом в оснастке. Цветными сплошными линиями показаны падающий, отраженный и прошедший импульсы деформации, черный пунктир отвечает разности падающего и отраженного импульсов. Эта разница определяет силу, действующую на образец со стороны нагружающего стержня. Совпадение черной пунктирной линии с прошедшим импульсом деформации, который используется для расчета силы, действующей на образец со стороны опорного стержня, говорит о выполнении условий динамического равновесия образца в процессе нагружения. Выполнение условий динамического равновесия образца крайне важно при проведении ударных испытаний, поскольку лишь в случае выполнения этого условия можно достоверно определить напряжения, возникающие в образце при нагружении. Из рисунка Ошибка! Источник ссылки не найден. видно, что в отсутствии оснастки условие динамического равновесия выполняется достаточно точно на всем интервале нагружения (левая часть рисунка). Наличие оснастки вносит определенное рассогласование сил, особенно заметное на ветви

107

возрастания нагрузки, когда выбираются зазоры и пр. Однако в области достижения предельных напряжений в образце устанавливается равновесие, а значит данный тип испытаний можно использовать для достоверного определения предельного напряжения при сжатии в образце из ПКМ.



Рисунок 4.55 – К оценке условий динамического равновесия. Слева – образец без оснастки, справа – образец с оснасткой

Таким образом, для определения предельных напряжений сжатия в образцах из ПКМ рекомендуется использование схемы, в которой образец в оснастке, изолирующей требуемую моду разрушения, устанавливается между мерными стержнями. Для оценки скорости деформации образца и определения деформации следует использовать тензорезисторы, наклеенные в рабочей части.

Зависимости предельного напряжения от скорости деформации (слева) и скорости роста напряжений (справа) показаны на рисунке 4.56. Красными круглыми маркерами показаны данные динамических испытаний, синие треугольники отвечают результатам статических экспериментов. Можно отметить заметное влияние скорости нагружения на величину предельного напряжения.

108


Рисунок 4.56 – Скоростные зависимости предельного напряжения. Направление 0⁰

По аналогии с ГОСТ 32658-2014 «Определение механических характеристик при сдвиге в плоскости армирования методом испытания на растяжение под углом 45 град» с применением описанной выше схемы можно проводить испытания на высокоскоростное сжатие образцов из слоистого ПКМ. При этом угол укладки слоев должен составлять 45⁰ с направлением приложения нагрузки.

На основании импульсов деформации, зарегистрированных в эксперименте, рассчитывается напряжения при сдвиге в плоскости армирования по следующей формуле:

$$\tau_{12}(t) = \frac{F(t)}{2wh} = \frac{E_T \cdot S_T \cdot \varepsilon^T(t)}{2wh}$$

здесь ε^{T} – прошедший импульс деформации, зарегистрированный в опорном стержне, E_{T}, S_{T} – модуль Юнга и площадь поперечного сечения опорного мерного стержня, *w* и *h* – размеры сечения образца.

Предел прочности при сдвиге в плоскости армирования определяется как максимум величины $\tau_{12}(t)$.

4.4 Трехточечный изгиб балки для верификации расчетных схем и моделей материалов ПКМ

Для определения прочности материала при изгибе в статике используют схему на трехточечный изгиб длинной балки. Хотя данная методика не подходит для определения механических характеристик ПКМ при ударном нагружении, что связано с неустановившимися волновыми процессами в самой балке, указанная методика может быть использована для получения экспериментальной информации для верификации расчетных схем и моделей поведения ПКМ.

Для обработки экспериментальной информации, полученной при изгибе композитной балки, используются следующие соотношения:

Скорость прогиба балки равна:

$$V_b(t) = c_I \cdot (\varepsilon^I + \varepsilon^R) - \mathbf{0} \cdot \mathbf{5} \cdot c_T (\varepsilon_1^T + \varepsilon_2^T)$$

Прогиб балки:

$$U_b(t) = \int_0^t V_b(\tau) d\tau$$

Сила, действующая на образец со стороны нагружающего стержня:

$$F(t) = E_I \cdot S_I \cdot \left(\varepsilon^I - \varepsilon^R\right)$$

Сила, действующая на образец со стороны опорных стержней:

$$F_1(t) = E_T \cdot S_T \cdot \varepsilon_1^T$$
$$F_2(t) = E_T \cdot S_T \cdot \varepsilon_2^T$$

здесь ε^{I} , ε^{R} – падающий и отраженный импульсы деформации, зарегистрированные в нагружающем стержне, ε_{1}^{T} , ε_{2}^{T} – прошедшие импульсы деформации, зарегистрированные в первом и втором опорных стержнях, соответственно, c_{I} – стержневая скорость звука материала нагружающего стержня, c_{T} – стержневая скорость звука материала опорного стержней, E_{I} , S_{I} – модуль Юнга и площадь поперечного сечения нагружающего мерного стержня, E_{T} , S_{T} – модуль Юнга и площадь поперечного сечения опорных мерных стержней.

Дополнительно применяется видеокамера с использованием цифровой высокоскоростной видео регистрации для получения данных о характере разрушения, а также полях перемещений и деформаций при использовании метода DIC.

На рисунках 4.57 и 4.58 показаны результаты высокоскоростной съемки динамического изгиба балки из углепластика с тканым армированием. Видеорегистрация проводилась со скоростью 57000 кадров в секунду. Показаны кадры, соответствующие моментам времени 0, 265, 350, 440, 1050 и 1755 мкс. В первом случае (рисунок 4.57) нагружение проводилось перпендикулярно плоскости армирования (на кадрах мы видим срезы слоев ткани), во-втором (рисунок 4.58) – вектор нагружающей силы лежит в плоскости армирования (видим армирующие слои). В экспериментах использованы балки сечением 15х15 мм и длиной 130 мм. Нагружение проводилось стальным ударником длиной 450 мм, летящим со скоростью порядка 15 м/с.



Рисунок 4.57 – Видеорегистрация изгиба композитной балки. Армирование перпендикулярно видимой плоскости



Рисунок 4.58 – Видеорегистрация изгиба композитной балки. Армирование параллельно видимой плоскости

По результатам видеофиксации можно наблюдать характерные особенности разрушения образцов: в первом случае наблюдается расслоение на противоположной нагружению стороне изгибаемой балки. Во втором случае виден излом армирующих слоев.

В качестве исходной информации для проведения верификации по данным этого эксперимента могут выступать условия нагружения, а именно форма импульса нагрузки, сформировавшегося в нагружающем мерном стержне в результате удара по нему бойка. Для верификации можно использовать временные зависимости сил, действующих на опоры и рассчитанных по сигналам с мерных стержней, а также данные о распределении полей перемещений (рисунки 4.60 и 4.61) и деформаций (рисунок 4.62), определенных методом DIC.

Характерные сигналы с мерных стержней, полученные в эксперименте на трехточечный изгиб балки, показаны на рисунке 4.59. Результаты обработки данных видеорегистрации по методу DIC показаны на рисунках 4.60-4.62.



Рисунок 4.59 – Характерные сигналы с мерных стержней в эксперименте на трехточечный изгиб балки



Рисунок 4.60 – Определение временных зависимостей смещений по данным DIC



Рисунок 4.61 – Изогнутые линии балки на разные моменты времени по данным DIC



Рисунок 4.62 – Поля деформаций сдвига в балке по данным DIC

4.5 Выводы по главе 4

- Предложены экспериментальные схемы и созданы соответствующие установки для определения жесткостных и прочностных характеристик ПКМ при сжатии, межслоевом отрыве и межслоевом сдвиге.
- Получены экспериментальные данные о скоростных зависимостях характеристик прочности при межслоевом отрыве и межслоевом сдвиге слоистого ПКМ тканого армирования на базе углеволокна, которые показали, что:
 - наблюдается уменьшение сдвиговой прочности материала при межслойном сдвиге с ростом скорости сдвига. Среднее значение динамической прочности при межслойном сдвиге составляет 60.6 МПа.

- b. С ростом скорости растяжения прочность материала в направлении, нормальном к плоскости армирования, значительно снижается. При увеличении скорости растяжения от 2 до 10 м/с величина σ₃₊ уменьшается в пять раз.
- Показано, что при определении прочности на сжатии армированного композита в направлении армирования следует исключать моду разрушения, связанную с межслойным разрушением с использованием специальной оснастки.
- 4. Для точного определения модулей упругости ПКМ деформацию образца следует измерять тензодатчиком, установленным на поверхности образца.
- 5. Проведено сравнение трех экспериментальных схем для определения прочности ПКМ при межслойном сдвиге, а именно: трехточечный изгиб короткой балки, сжатие образца с надрезами и выдавливание середины образца в виде параллелепипеда. Наиболее предпочтительной является последняя схема, так как в отличие от изгиба балки она позволяет варьировать и контролировать условия нагружения, а в отличие от испытания надрезанных образцов симметрична, что исключает появление в образце изгибающих моментов.
- Предложена и описана схема для получения экспериментальной информации для верификации расчетных схем и моделей поведения ПКМ на основе динамического изгиба габаритной балки.

5 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам проведенного исследования можно сделать следующие выводы и заключения:

- 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 с⁻¹ и от 5.10³ до 5.10⁴ с⁻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.
- Разработана и создана пневмодинамическая экспериментальная установка, которая позволяет проводить испытания конструкционных материалов в условиях ударного растяжения со скоростью деформации от 10 до 100 с⁻¹.
- 4. 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 расчета диаграмм деформирования материала (условных и истинных) с определением скорости деформации.
- 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 $3 \cdot 10^3$ 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 5·10³ до 5·10⁴ 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 10⁴ 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 с⁻¹ до 500 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.

Перспективы дальнейшего развития темы могут быть связаны с разработкой системы базовых экспериментов для получения полного набора данных для оснащения математических моделей динамического поведения материалов параметрами с учетом особенностей ПКМ: ортотропии свойств и зависимости прочностных и деформационных характеристик от вида напряженного состояния (растяжение, сжатие, сдвиг).

6 Список использованной литературы

- 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, crp. 63–76.
- 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
- 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
- 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
- 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. (Scopus)
- 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.
- 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), MATEC Web of Conferences 226(5):03023, 2018, p. 2174-2180
- 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).

- 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
- 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.
- 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 Москов-ский авиационный институт (национальный исследовательский университет). Москва, 18-22 марта 2019 (РИНЦ)

121

- 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
- 15. Кольский Г. Исследование механических свойств материалов при больших скоростях негружения // Механика.-вып.1У.-М.:ИЛ,1950.- стр. 108-119.
- Pushkov V.A., Mikhailov A.L., Tsibikov, A.N., Naidanova T.G., Bakanova A.V. Studying the Characteristics of Explosives under Dynamic Load Using the Split Hopkinson Pressure Bar. Technique 2021 Combustion, Explosion and Shock Waves 57(1), c. 112-121
- Евстифеев А.Д., Волков Г.А. Вариационный подход к определению динамической прочности материала., Журнал технической физики. Том: 92Номер: 2, Страницы: 274-278. (2022)
- 18. Гаркушин Г.В., Савиных А.С., Сазоренов C.B., Атрошенко C.A. Динамическая прочность аустенитной стали 08X16H20M2T В субмикросекундном диапазоне длительностей ударно-волновой нагрузки. // Известия высших учебных заведений. Физика. Том: 64 Номер: 10 (767) (2021) Страницы: 131-135
- Pushkov V., Yurlov A., Leonov V., Tsibikov, A., Naydanova, T. Dynamic tension of aluminum alloy AMg-6 in a facility of Split Hopkinson Bar 2018 EPJ Web of Conferences 183,02036.
- Атрошенко С.А., Чеврычкина А.А., Евстифеев А.Д., Волков Г.А., Разрушение абс-пластика в стеклообразном состоянии при динамическом нагружении. // Физика твердого тела., Том: 61 № 11 (2019) Страницы: 2103-2109
- Кривошеев С.И., Магазинов С.Г., Остропико Е.С. Деформирование сплава ТІNІ импульсом магнитного давления //Актуальные проблемы прочности. Материалы международной научной кон
- Остропико Е.С., Кривошеев С.И., Магазинов С.Г. Аналитическая оценка магнитно-импульсного деформирования сплава ТІNI Письма о материалах. 2021. Т. 11. № 1 (41). С. 55-60.
- 23. Pushkov, V.A., Yurlov, A.V., Tsibikov, A.N., Naidanova, T.G. Localized shear

and compression-test diagrams of uranium alloy with niobium and molybdenum at dynamic loading., 2018 Plutonium Futures - The Science 2018 c. 37-38

- Канель Г.И., Гаркушин Г.В., Савиных А.С., Разоренов С.В., Атрошенко С.А. Исследование скоростных зависимостей напряжения пластического течения и разрушения стали 09Г2СА-А при нормальной и повышенной температурах. // Журнал технической физики. // Том: 91 № 11 (2021) Страницы: 1698-1706
- 25. Селютина Н.С., Бородин И.Н. Физическая интерпретация временных эффектов пластичности в металлах при интенсивных динамических воздействиях. // Физико-химические аспекты предельных состояний и структурных превращений в сплошных средах, материалах и технических системах. Санкт-Петербург, 2017 Издательство "Политехника" (Санкт-Петербург), Страницы: 180-186.
- 26. Пушков В.А. Изучение динамических диаграмм растяжения конструкционных материалов по методу составного стержня Гопкинсона. В сборнике: Актуальные вопросы и перспективы развития науки, техники и технологии. материалы Международной научно-практической конференции. ЧУДПО «Научно-исследовательский и образовательный центр». Казань, 2020. С. 43-53.
- 27. Krivosheev, SI; Magazinov, SG and Alekseev, DI., The Peculiarities of the Application of Magnetic-Pulse Method for Forming Controlled Pressure Pulses to Test Metal Samples. Apr 2018 | IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE 46 (4), pp.1054-1057
- 28. Krivosheev S.I., Magazinov S.G., Adamyan Y.E., Alekseev D.I., Manzuk M.V. Uniaxial High Strain Rate Tension with The Use of Magnetic Pulse Method. Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIConRus 2020. 2020. C. 1082-1086.
- Пушков В.А., Михайлов А.Л., Цибиков А.Н., Окинчиц А.А., Юрлов А.В., Васильев А.М., Найданова Т.Г., Баканова А.В. Изучение характеристик взрывчатых веществ при динамическом нагружении с использованием метода составного стержня Гопкинсона. Физика горения и взрыва. 2021. Т. 57. № 1. С. 120-129.

- Krivosheev S., Magazinov S., Alekseev D. High-Speed Deformation of Copper Samples with The Use of Magnetic Pulse Method. MATEC Web of Conferences.
 Cep. "NCTAM 2017 - 13th National Congress on Theoretical and Applied Mechanics" 2018. C. 05006.
- 31. Campbell J.D., Dowling A.R. The behaviour of materials subjected to dynamic incremental shear loading // J.Mech.Phys. Solids. 1970. Vol.18. P.43-63.
- 32. Dharan C.K.H., Hauser F.E. Determination of stress-strain characteristics at very high strain rates // Exp.Mech. 1970. Vol.10. P.370- 376.
- 33. Doerner, M.F., Nix, W.D., 1986. A method for interpreting the data from depthsensing indentation instruments. // J. Mater. Res. 1, p.601–609.
- Nicholas T. Tensile testing of materials at high rates of strain // Exp.Mech. 1981.
 Vol.21, N 5. P.177-195.
- 35. Большаков А.П., Новиков С.А., Синицын В.А. Исследование динамических диаграмм одноосного растяжения и сжатия меди и сплава АМг6 // Пробл. прочности. - 1979. - № 10. – С.87-88.
- 36. Брагов, А.М. Новые возможности метода Кольского для исследования динамических свойств мягких грунтов / А.М.Брагов, В.П.Гандурин, Г.М.Грушевский, А.К.Ломунов // Прикладная механика и техническая физика, 1995, т.36, №3, с.179-186.
- 37. Даффи Дж., Кэмпбелл Дж., Хоули Р. О применении крутильного разрезного стержня Гопкинсона к исследованию влияния скорости нагружения на поведение алюминиевого сплава 1100-0. // Прикл. механика. - Сер. Е. - М.: Мир, 1971. - № 1. - С. 81-90.
- 38. Клепачко Я. Обсуждение нового экспериментального метода определения начала роста трещин при больших скоростях нагружения с помощью волн напряжения // Теор. основы инж. расчетов, 1982. - Т. 104. № 1. - С. 33-40.
- Льюис Дж., Гольдсмит В. Двухосный стержень Гопкинсона для одновременного кручения и сжатия // Приборы для научн. исследований, 1973. № 7. С. 22-26.
- Музыченко В.П., Кащенко С.И., Гуськов В.А. Применение метода составного стержня Гопкинсона при исследовании динамических свойств материалов (обзор) // Зав. лабор. 1986. № 1. С. 58-66.

- 41. Николас Т. Поведение материалов при высоких скоростях деформации // Динамика удара /Под ред. Зукаса Дж. и др. (Пер. с англ.). - М.: Мир, 1985. -С. 198-256.
- Lindholm U.S., Yeakley L.M. High strain-rate testing: tension and compression // Exp.Mech. 1968. Vol.8, N 1. P.1-9.
- Staab G.H., Gilat A. A direct-tension split-Hopkinson bar for high strain-rate testing // Exp. Mech., Vol. 31, 1999, pp.232-235. 15. Harding J., Wood E.O., Campbell J.D. Tensile testing of materials in impact rates of strain // J. Mech. Eng. Sci., Vol.2, 1960, p.88-96.
- 44. Taylor G.I., Quinney A. The latent energy remaining in a metal after cold working// Proc. Roy. Soc., 143 pp. 307-326, 1934.
- Buchar J., Forejt M., Jopek M. and Krivanek I. Evaluation of constitutive relations for high strain rate behaviour using the Taylor test // J. Phys. IV France 10, 2000, p.75-80.
- 46. Couque H. On the use of the symmetric Taylor test to evaluate dynamic ductile compression fracture properties of metals // Structures under Shock and Impact V, ed. N. Jones, D.G. Talaslidis, C.A. Brebbia and G.D. Manolis, publ. Southampton, Computational Mechanics Publications, 1998, p.579-589.
- 47. Holmquist T.J. and Johnson G.R. Determination of constants and comparison of results for various constitutive models // J. Phys. IV, 1991, p.853-860.
- 48. Johnson G.R. and Holmquist T.J. Evaluation of cylinder-impact test data for constitutive model constants. // J. Appl. Phys. 64, pp.1988, pp.3901-3910.
- 49. Jones S.E., J.A. Drinkard, W.K.Rule and L.L.Wilson An elementary theory for the Taylor impact test // Int. J. Impact Engng., Vol. 21. No 1-2, 1998, pp. 1-13.
- Partom Y. Modeling Taylor's anvil test for hardening and rate sensitive materials // Proc. 13th Int. Symp. Ballistics: Vol. 3, A. Persson, K. Andersson and E.B. Bjorck Eds. (American Defense Preparedness Association, Arlington,VA,1992) pp. 291-297.
- 51. Walley S.M., Church P.D., Townsley R. and Field J.E. Validation of a pathdependent constitutive model for FCC and BCC metals using 'symmetric' Taylor impact // J. Phys. IV France 10, 2000, p.69-74.
- 52. Woodward R.L., Lambert J.P. A discussion of the calculation of forces in the one-

dimensional finite difference model of Hashmi and Thompson // Int. J. Mech. Sci. 23, 1981, p.497-501.

- 53. Zerilli F.J., Armstrong R.W. Dislocation mechanics based constitutive relations for materials dynamics modelling: slip and deformation twinning in iron // Shock waves in condensed matter – 1987, ed. S.C. Schmidt and N.C. Holmes, publ. Amsterdam, Elsevier, 1988, p. 273.
- Gama B.A., Lopatnikov S.L., Gillespie J.W.Jr. Hopkinson bar experimental technique: A critical review // Applied Mechanics Reviews, January 2004 DOI: 10.1115/1.1704626
- 55. Singh, Y, Udupa, A, Chandrasekar, S, & Subbarayan, G. "Medium to High Strain-Rate Characterization of Lead Free Solder Alloys Through Metal Cutting Experiments." Proceedings of the ASME 2019 International Technical Conference and Exhibition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Microsystems. ASME 2019 International Technical Conference and Exhibition on Packaging and Integration of Electronic and Exhibition on Packaging and Integration of Electronic Microsystems. Anaheim, California, USA. October 7–9, 2019.
- 56. Ezio Cadoni, Matteo Dotta, Daniele Forni, Hanspeter Kaufmann. Effects of strain rate on mechanical properties in tension of a commercial aluminium alloy used in armour applications// December 2016, Procedia Structural Integrity 2:986-993 DOI: 10.1016/j.prostr.2016.06.126.
- 57. Cadoni, E., Dotta, M., Forni, D., Bianchi, S., Kaufmann, H., 2012a. Strain rate effects on mechanical properties in tension of aluminium alloys used in armour applications. EPJ Web of Conferences 26, 05004.
- Cadoni, E., Dotta, M., Forni, D., Spaetig, P., 2011a. Strain-rate behavior in tension of the tempered martensitic reduced activation steel Eurofer97. Journal of Nuclear Materials 414, 360 – 366. Cadoni, E., Dotta, M., Forni, D., Tesio, N., 2011b. Dynamic behaviour of reinforcing steel bars in tension. Applied Mechanics and Materials 82, 86–91.
- Asprone, D., Cadoni, E., Prota, A., Manfredi, G., 2009. Strain-rate sensitivity of a pultruded e-glass/polyester composite. ASCE - Journal of Composites for Construction 13, 558–564.
- 60. Shi, Yanchao, Shi, Jie, Luo, Zongmu, Liu, Huachao, Wang, Dan, Shen, Haipeng.

Experimental Investigation on Strength and Deformation Characteristics of Red Sandstone at Strain Rates of 10^{-2} ~55 s^-1// Advances in Civil Engineering, Volume 2020, Article ID 8882976, DOI: 10.1155/2020/8882976.

- D. L. Grote, S. W. Park, and M. Zhou, "Dynamic behavior of concrete at high strain rates and pressures: I. experimental characterization,"// International Journal of Impact Engineering, vol. 25, no. 9, pp. 869–886, 2001.
- Q. B. Zhang and J. Zhao, "Quasi-static and dynamic fracture behaviour of rock materials: phenomena and mechanisms," International Journal of Fracture, vol. 189, no. 1, pp. 1–32, 2014.
- L. Ma, Z. Li, J. Liu, L. Duan, and J. Wu, "Mechanical properties of coral concrete subjected to uniaxial dynamic compression," Construction and Building Materials, vol. 199, pp. 244–255, 2019.
- L. Ma, J. Wu, M. Wang, L. Dong, and H. Wei, "Dynamic compressive properties of dry and saturated coral rocks at high strain rates," Engineering Geology, vol. 272, p. 105615, 2020.
- Solomos G., Albertini C., Labibes K., Pizzinato V., Viaccoz B. Strain Rate Effects of Nuclear Steels in Room and Higher Temperatures// Transactions, SMiRT 16, Washington DC, 2001, Paper #1356.
- 66. Albertini, C. and Montagnani, M., "Dynamic material properties of several steels for fast breeder reactor safety analysis", EUR 5787 EN, Ispra,1977.
- Martin Nilson. Constitutive Model for Armox 500T and Armox 600T at Low and Medium Strain rates// Swedish defence research agency, Technical report, 2003, ISSN 1650-1942.
- Zabotkin K., O'Toole B. & Trabia M. 2003 Identification of the dynamic tensile properties of metals under moderate strain rates. 16th ASCE Engineering Mechanics Conference.
- S.Y.Kong, & Remennikov, Alex & Uy, Brian. (2010). The Effect of medium strain rates on the mechanical properties of high performance steels// Conference: 21st Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials Melbourne, Victoria, Australia.
- 70. Carlo Albertini; Ezio Cadoni; George Solomos. Advances in the Hopkinson bar testing of irradiated/non-irradiated nuclear materials and large specimens:

Philosophical Transactions of The Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences 372(2015):20130197

- Junjia Cui, Shaoluo Wang, Shuhao Wang, Guangyao Li, Peilin Wang, Chengsong Liang. The Effects of Strain Rates on Mechanical Properties and Failure Behavior of Long Glass Fiber Reinforced Thermoplastic Composites// Polymers (Basel). 2019 Dec 5;11(12):2019. doi: 10.3390/polym11122019.
- 72. Mehdikhani, M.; Aravand, M.; Sabuncuoglu, B.; Callens, M.G.; Lomov, S.V.; Gorbatikh, L. Full-field strain measurements at the micro-scale in fiber-reinforced composites using digital image correlation. Compos. Struct. 2016, 140, 192–201.
- Jones, I.; Iadicola, M.E. A Good Practices Guide for Digital Image Correlation. Int. Digit. Image Correl. Soc. 2018.
- 74. Li, L.; Sun, L.; Dai, Z.; Xiong, Z.; Huang, B.; Zhang, Y. Experimental investigation on mechanical properties and failure mechanisms of polymer composite-metal hybrid materials processed by direct injection-molding adhesion method. J. Mater. Process. Technol. 2019, 263, 385–395.
- 75. Codolini, A.; Li, Q.M.;Wilkinson, A. Mechanical characterization of thin injection-moulded polypropylene specimens under large in-plane shear deformations. Polym. Test. 2018, 69, 485–489.
- 76. Röhrig, C.; Scheer, T.; Diebels, S. Mechanical characterization of a short fiberreinforced polymer at roomtemperature: Experimental setups evaluated by an optical measurement system. Contin. Mech. Thermodyn. 2017, 29, 1093–1111.
- 77. McCormick, N.; Lord, J. Digital Image Correlation. Mater. Today 2010, 13, 52– 54.
- Ulrich Hansen; Peter Zioupos; Rebecca Simpson; John Currey; David Hynd. The Effect of Strain Rate on the Mechanical Properties of Human Cortical Bone. March 2008 Journal of Biomechanical Engineering 130(1):011011. DOI: 10.1115/1.2838032.
- 79. Dohernwend C. O., Mehaffey W.R., Electrical-Resistance Gages and Circuit Theorry, Hendbook of Experimental Stress Analysis (M. Hetenyi, editor), New York, 1950, Ch. 5,p. 160
- Pearson J., Rinehart J. S., Deformation and Fracturing of Thick-Walled Steel Cylinders Under Explosive Attack, J. of Appl. Phys., 23, 434 (1952).

- R. Harilal, C. P. Vyasarayani, and M. Ramji, "A linear least squares approach for evaluation of crack tip stress field parameters using DIC," Opt. Lasers Eng., vol. 75, pp. 95–102, 2015.
- Stepan V. Lomov, Philippe Boisse, Emmanuel de Luycker, Fabrice Morestin, Kristof Vanclooster, "Full-field strain measurements in textile deformability studies", Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Elsevier, vol 39, no 8, pp.1232-1244, 2008
- C.-C. Ho, Y.-J. Chang, J.-C. Hsu, C.-L. Kuo, S.-K. Kuo, and G.-H. Lee, "Residual Strain Measurement Using Wire EDM and DIC in Aluminum," Inventions, vol. 1, no. 1, pp 1-12, 2016.
- R. Harilal and M. Ramji, "Adaptation of Open Source 2D DIC Software Ncorr for Solid Mechanics Applications," 9th Int. Symp. Adv. Sci. Technol. Exp. Mech., 2014.
- J. Blaber, B. S. Adair, and A. Antoniou, "A methodology for high resolution digital image correlation in high temperature experiments," Rev. Sci. Instrum., vol. 86, no. 3,2015.
- 86. J. Blaber, B. Adair, and A. Antoniou, "Ncorr: Open-Source 2D Digital Image Correlation Matlab Software," Exp. Mech., vol. 55, no. 6, pp. 1105–1122, 2015.
- P. L. Reu, W. Sweatt, T. Miller, and D. Fleming, "Camera System Resolution and its Influence on Digital Image Correlation," Exp. Mech., vol. 55, no. 1, pp. 9–25, 2015.
- M. Z. Siddiqui, F. Tariq, and N. Naz, "Application of a Two Step Digital Image Correlation Algorithm in Determining Poisson's Ratio of Metals and Composites," 62nd Int. Astronaut. Congr., vol. 62. 2011.
- C.-S. T. Sze-Wei Khoo, Saravanan Karuppanan, "A review of surface deformation and strain measurement using two-dimensional digital image correlation", Metrol. Meas. Syst., vol. 23, no. 4, pp. 537–547, 2016.
- B. Pan, H. Xie, Z. Wang, K. Qian, and Z. Wang, "Study on subset size selection in digital image correlation for speckle patterns," Opt. Express, vol. 16, no. 10, pp 7037–7048, 2008.
- 91. M. Tekieli, S. De Santis, G. de Felice, A. Kwiecień, and F. Roscini, "Application of Digital Image Correlation to composite reinforcements testing," Compos.

Struct., vol 160, pp 670-688, 2017.

- 92. Ahmad Fuad Ab Ghani, Ridhwan Jumaidin, Mohamed Saiful Firdaus Hussin1, Sivakumar Dharmalingam, Fudhail Abdul Munir, Rahifa Ranom and Jamaluddin Mahmud. Digital Image Correlation (DIC) and Finite Element Modelling(FEM) Assessment on Hybrid Composite Carbon Glass Fibre under Tensile and Flexural Loading. International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering · July 2020 Vol:20 No:03.
- C. R. Siviour, J.L. Jordan High Strain Rate Mechanics of Polymers: A Review, J. Dynamic behavior mater. (2016) 2:15–32
- 94. A. Elmahdy, P. Verleysen Tensile behavior of woven basalt fiber reinforced composites at high strain rates, Polymer Testing 76 (2019) 207–221.
- 95. A. Elmahdy, P. Verleysen Mechanical behavior of basalt and glass textile composites at high strain rates: A comparison, Polymer Testing 81 (2020) 106224.
- 96. T. Liu, B. Sun and B. Gu Size effects on compressive behaviors of threedimensional braided composites under high strain rates Journal of Composite Materials, 2018 0(0) 1–14.
- 97. A.K. Bandaru, H. Chouhan, N.B. Wael High strain rate compression testing of intra-ply and inter-ply hybrid thermoplastic composites reinforced with Kevlar/basalt fibers Polymer Testing 84 (2020) 106407
- G. Melin, L.,E. Asp, Effects of strain rate on transverse tension properties of a carbon/epoxy composite: studied by moiré photography, Compos. Appl. Sci. Manuf. 30 (3) (1999) 305–316.
- 99. H. Koerber, J. Xavier, P.P. Camanho, High strain rate characterisation of unidirectional carbon-epoxy IM7-8552 in transverse compression and in-plane shear using digital image correlation, Mech. Mater. 42 (11) (2010) 1004–1019.
- A. Cherniaev, Y. Zenga, D. Cronina, J. Montesanoa Quasi-static and dynamic characterization of unidirectional non-crimp carbon fiber fabric composites processed by HP-RTM Polymer Testing 76 (2019) 365–375.
- 101. Akl W, Baz AM. Dynamic behavior and damping characteristics of carbon black polymer composites at high strain rates. Adv Polym. Technol. 2018;00:1–12.
- 102. H. Zou, W.Yin, C. Cai, B. Wang, A. Liu, Z. Yang, Y. Li and X. He The out-ofplane compression behavior of cross-ply AS4/PEEK thermoplastic composite

laminates at high strain rates, Materials 2018, 11, 2312.

- 103. Y. Li, X.Gan, B.Gu and B.Sun Dynamic responses and damage evolutions of fourstep three-dimensional braided composites subjected to high strain rate punch shear loading, Journal of Composite Materials, 2015 0(0) 1–16.
- 104. Y. Li, B. Gu and B. Sun Energy absorption of three-dimensional braided composites under impact punch shear loading, Textile Research Journal 2016 0(00) 1–16.
- X. Qian, H. Wang, D. Zhang, G.Wen High strain rate out-of-plane compression properties of aramid fabric reinforced polyamide composite, Polymer Testing 53 (2016) 314-322.
- 106. A.M. Bragov A.K. Lomunov Methodological aspects of studying dynamic material properties using the Kolsky method International Journal of Impact Engineering Volume 16, Issue 2, April 1995, pages 321-330.
- 107. H. Zhao, G. Gary A new method for the separation of waves. Application to the SHPB technique for an unlimited duration of measurement Journal of the Mechanics and Physics of Solids Volume 45, Issue 7, July 1997, pages 1185-1202.
- George T Gray III Classic split Hopkinson pressure bar testing, ASM handbook Mechanical Testing and Evaluation, 2000, 8, pages 462-476.
- 109. J. Zhou, A. Pellegrino, U. Heisserer, P. W. Duke, P. T. Curtis, J. Morton, N. Petrinic and V. L. Tagarielli A new technique for tensile testing of engineering materials and composites at high strain rates, 2019 Proc. R. Soc. A 475: 20190310.
- L. Fletcher, J. Van-Blitterswyk, F. Pierron A Novel Image-Based Inertial Impact Test (IBII) for the Transverse Properties of Composites at High Strain Rates, Journal of Dynamic Behavior of Materials (2019) 5:65–92.
- 111. Pierron Fabrice, Grédiac Michel (2012) The virtual fields method: extracting constitutive mechanical parameters from full-field deformation measurements. Springer, New York.
- 112. H. Meftah, S. Tamboura, J. Fitoussi, H. BenDaly, A. Tcharkhtchi Characterization of a New Fully Recycled Carbon Fiber Reinforced Composite Subjected to High Strain Rate Tension // Appl. Compos. Mater (2018) 25:507–526.
- 113. K. Naresh, K. Shankar, R. Velmurugan, N.K. Gupta Statistical analysis of the tensile strength of GFRP, CFRP and hybrid composites, Thin-Walled Structures

126 (2018) 150-161

- 114. S.W.F. Spronka, E. Verboven, F.A. Gilabert, R.D.B. Sevenois, D. Garoz, M. Kersemans, W. Van Paepegem Stress-strain synchronization for high strain rate tests on brittle composites, Polymer Testing 67 (2018) 477–486.
- 115. Федоренко А.Г., Сырунин М.А., Иванов А.Г. Критерии выбора композитных материалов для оболочечных конструкций, локализующих взрыв (обзор), Физика горения и взрыва, Т.41, №5, 2005, стр. 3-13.
- 116. S. Atroshenko, Y. Sud'enkov, I. Smirnov, S.Wen Zhuc, N. Morozov Investigation of the elastoplastic and strength properties of the magnesium alloy AZ31B under quasi-static and dynamic loading // Procedia Structural Integrity, 2017, 6, 259-264.
- Sud'enkov, Y.V., Sarnatskii, V.M. & Smirnov, I.V. Orientation magnetic phase transition induced by shock loading of the Fe–Cr–Co alloy. Phys. Solid State 59, 287–291 (2017).
- 118. Vilenskiy O.Yu., Konstantinov A.Yu., Lapshin D.A., Malygin M.G., Pristrom S.A. Computational Analysis of Roller Supports Strength under Roof Slab Block Drop on the BN-600 Reactor// Problems of Strength and Plasticity. 2016. V. 78. №4. pp. 359-367. (In Russian)
- Bragov A.M., Konstantinov A.Yu., Lapshin D.A., Novosel'tseva N.A., Tatarskiy A.M., A System Approach for Strength Problem Solution of the BN-800 Reactor Plant Elevator for an Emergency Case of Carriage Running-off// Problems of Strength and Plasticity, V 80 № 1 (2018), https://doi.org/10.32326/1814-9146-2018-80-1-72-82 (In Russian)
- 120. Salvado F.C., Teixeira-Dias F., Walley S.M., Lea L.J., Cardoso J.B. A review on the strain rate dependency of the dynamic viscoplastic response of FCC metals // Progress in Materials Science 88 (2017) 186–231.
- 121. Kolsky H. (1949), An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading // Proc. Phys. Soc. London, Sect. B 62, 676–700.
- 122. Davies R.M. (1948), A critical study of the Hopkinson pressure bar, Philos. Trans.R. Soc. London, Ser. A 240~821, 375–457.
- ASM Int (2000), ASM Handbook Vol 8, Mechanical Testing and Evaluation, ASM Int, Materials Park OH, 462–476.
- 124. Bragov A.M., Lomunov A.K. Features of the construction of strain diagrams by

the Kolsky method// Applied Problems of Strength and Plasticity Vol.28, 1984. pp.125-137. (In Russian)

- 125. Lomunov A.K. Methodology for studying the processes of viscoplastic deformation and material properties based on the split Hopkinson bar, PhD thesis, 1987. (In Russian)
- 126. Eskandari H., Nemes J.A. Dynamic Testing of Composite Laminates with a Tensile Split Hopkinson Bar // Journal of Composite Materials, Feb 1, 2000
- 127. Caverzan A., Cadoni E., di Prisco M. Tensile behaviour of high performance fibrereinforced cementitious composites at high strain rates // International Journal of Impact Engineering 2012;45(0):28-38.
- 128. Jiang B., Zhang R. Tensile properties in the through-thickness direction for a carbon fiber woven reinforced composite at impact loading rate// J. Phys. IVFrance 134 (2006) 1071–1075.
- 129. J.-H. Zhang, B. Shang. Numerical study of the data processing methods in SHPB experiments// Chinese Journal of High Pressure Physics, Vol.30, No.3, 2016, doi:10.11858/gywlxb.2016.03.006
- 130. Donghai Wang, Hong Zhang, Yuwen Zhang. Numerical Simulation of SHPB Experimental Process Based on ANSYS Software// International Journal of Mechanics Research, 2019, 8(1), 39-46, https://doi.org/10.12677/ijm.2019.81005
- Radim Dvořák, Petr Koudelka, Tomáš Fíla. Numerical Modelling of Wave Shapes During SHPB Measurement// Acta Polytechnica CTU Proceedings 25:25–31, 2019, http://dx.doi.org/10.14311/APP.2019.25.0025
- Kariem M.A., Beynon J.H., Ruan D. Misalignment effect in the split Hopkinson pressure bar technique // International Journal of Impact Engineering 47 (2012) 60-70.
- 133. 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)
- 134. Klepaczko J. Advanced experimental techniques in material testing. "New Experimental Methods in Material Dynamics and Impact", Trends in Mechanics of Materials, eds. W.K. Nowacki, J.R. Klepachko, Warsaw, 2001, p.1-58.

- 135. T. Cowie, C. W. A. Gurnham, Chris H. Braithwaite, Lewis Lea. Impact performance of aluminium foams in a direct impact Hopkinson bar// AIP Conference Proceedings 1979(1):110003, 2018, DOI: 10.1063/1.5044922
- 136. Xiaoli Guo, C. Sow, Chady Khalil, Chady Khalil, Thomas Heuzé, Guillaume Racineux. Material Constitutive Behavior Identification at High Strain Rates Using a Direct-Impact Hopkinson Device// 7th International Conference on High Speed Forming, April 27th-28th 2016, Dortmund, Germany, DOI: 10.17877/DE290R-16985
- 137. Hervé Couque. The use of the direct impact Hopkinson pressure bar technique to describe thermally activated and viscous regimes of metallic materials// Philosophical Transactions of The Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences 372(2023), 2014, DOI: 10.1098/rsta.2013.0218
- Klepaczko, J., Malinowski, Z., Dynamic frictional effects as measured from the split Hopkinson pressure bar, Proc. IUTAM Symp, Springer Verlag, 1977, pp,403-416.
- 139. Bertholf, L.D., Karnes, C.H., Two-dimensional analysis of the split Hopkinsonpressure bar system, J.Mech. Phys. Solids, 1(23), 1–19, 1975.
- 140. Konstantinov A.Yu. Experimental and calculated study of the behavior of structural materials under the action of dynamic loads. PhD thesis, 2007. (In Russian)
- Gong J.C., Malvern L.E., Jenkins D.A. (1990), Dispersion investigation in the split Hopkinson pressure bar // ASME J. Eng. Mater. Technol. 112, 309–314.
- 142. Bragov, A.M., Lomunov, A.K., Lamzin, D.A. et al. Dispersion correction in split-Hopkinson pressure bar: theoretical and experimental analysis. Continuum Mech. Thermodyn. (2019). https://doi.org/10.1007/s00161-019-00776-0
- 143. HuaianZhanga, YimingYaob, DejuZhu, BarzinMobasher, LiangHuang. Tensile mechanical properties of basalt fiber reinforced polymer composite under varying strain rates and temperatures. Polymer Testing Volume 51, May 2016, Pages 29-39
- 144. Engin Erbayrak, Beril Eker Gumus, Ercument Ugur Yuncuoglu & Yusuf Kahraman. Investigations of Strain Rate Effects on the Mechanical Properties of Hybrid Composite Laminate Under Varying Temperatures. Arabian Journal for

Science and Engineering volume 45, pages9709–9724 (2020).

- 145. C.Elanchezhian, B. VijayaRamnath, J.Hemalatha. Mechanical Behaviour of Glass and Carbon Fibre Reinforced Composites at Varying Strain Rates and Temperatures. Procedia Materials Science Volume 6, 2014, Pages 1405-1418.
- 146. A.Tasdemirci, I.W.Hall. Numerical and experimental studies of damage generation in a polymer composite material at high strain rates. Polymer Testing Volume 25, Issue 6, September 2006, Pages 797-806
- 147. J.Fitoussi., F.Meraghni., Z.JendliaG.Hug., D.Baptiste., Experimental methodology for high strain-rates tensile behaviour analysis of polymer matrix composites. Composites Science and Technology Volume 65, Issue 14, November 2005, Pages 2174-2188
- 148. M.Tarfaoui., S.Choukri., A.Neme. Effect of fibre orientation on mechanical properties of the laminated polymer composites subjected to out-of-plane high strain rate compressive loadings. Composites Science and Technology Volume 68, Issue 2, February 2008, Pages 477-485.
- 149. Брагов А.М., Ломунов А.К. Особенности построения диаграмм деформирования методом Кольского // Прикладные проблемы прочности и пластичности: Всесоюз. межвуз. сб. / Горьк. ун-т, Горький. -1984. -Вып.28., C.125-137.