

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Пермский национальный исследовательский политехнический  
университет»

На правах рукописи

СТАРОВЕРОВ ОЛЕГ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ДЕФОРМИРОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ  
КОМПОЗИТОВ В УСЛОВИЯХ КОМПЛЕКСНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ  
ВОЗДЕЙСТВИЙ**

01.02.04 — Механика деформируемого твердого тела

Диссертация

на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор физико-математических наук,  
профессор Вильдеман Валерий Эрвинович

Пермь 2020

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Введение.....</b>  | <b>5</b>  |
| <b>1. ВОПРОСЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ<br/>ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ<br/>КОНСТРУКЦИОННЫХ КОМПОЗИТОВ В УСЛОВИЯХ<br/>КОМПЛЕКСНЫХ ИСПЫТАНИЙ.....</b> | <b>15</b> |
| 1.1. Исследования механических свойств полимерных композиционных материалов в условиях квазистатических, циклических и низкоскоростных динамических воздействий .....     | 15        |
| 1.2. Интерпретация опытных данных о закономерностях накопления повреждений композиционных материалов.....   | 19        |
| 1.3. Закономерности деформирования и механизмы разрушения полимерных композитов при комплексных воздействиях.....   | 21        |
| Выводы по главе.....  | 22        |
| <b>2. ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ<br/>ИССЛЕДОВАНИЙ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ<br/>МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ КОМПЛЕКСНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ<br/>ВОЗДЕЙСТВИЙ.....</b>    | <b>23</b> |
| 2.1. Испытательные системы для реализации квазистатических, динамических и циклических режимов нагружения.....  | 24        |
| 2.2. Совместное использование испытательного и диагностического оборудования при исследованиях механического поведения композитов.....                                    | 34        |
| 2.3. Методики испытаний образцов полимерных композитов при комплексных механических воздействиях.....   | 37        |
| Выводы по главе.....  | 46        |

|  |            |
|--|------------|
| <b>3. ПРОЦЕССЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ В УСЛОВИЯХ ЦИКЛИЧЕСКИХ И КВАЗИСТАТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ.....</b>  | <b>47</b>  |
| 3.1. Закономерности изменения прочностных и деформационных свойств стеклопластиков в процессе усталостного накопления повреждений.....                                 | 47         |
| 3.2. Усталостная чувствительность стеклопластиковых композитов с различными схемами укладки армирующих слоев и параметрами циклического воздействия.....               | 53         |
| 3.3. Диаграмма усталостной чувствительности стеклопластиковых композитов при повышенных температурах .....   | 60         |
| 3.4. Деформирование и разрушение углепластиковых трубчатых образцов при дополнительных циклических воздействиях на различных стадиях квазистатического нагружения..... | 62         |
| Выводы по главе.....   | 76         |
| <b>4. ЗА ЗАВИСИМОСТЬ ПРОЧНОСТНЫХ И УСТАЛОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ ОТ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ.....</b>  | <b>78</b>  |
| 4.1. Влияние предварительного ударного воздействия на статическую прочность и усталостную долговечность полимерных композитов .....                                    | 78         |
| 4.2. Живучесть крупноячеистых композитных образцов-панелей в опытах на сжатие после удара .....  | 86         |
| 4.3. Деформирование и разрушение композитных образцов-пластин с пространственными схемами армирования после предварительных ударных воздействий.....                   | 100        |
| Выводы по главе.....   | 114        |
| <b>Заключение.....</b>   | <b>116</b> |

|  |            |
|--|------------|
| <b>Список сокращений и условных обозначений.....</b> | <b>118</b> |
| <b>Список литературы.....</b>                        | <b>120</b> |
| <b>Приложение.....</b>                               | <b>139</b> |

## **Введение**

### **Актуальность и степень разработанности темы исследования**

Актуальность темы исследования обусловлена массовым внедрением в детали и узлы ответственных конструкций авиационного, космического и нефтехимического производства современных полимерных композиционных материалов с различной структурой и, в то же время, недостаточностью экспериментальных данных о закономерностях их механического поведения при сложных комплексных (комбинации статических, ударных и циклических нагрузок) механических воздействиях.

При постоянном повышении требований к прочности, ресурсу, надежности, живучести и безопасности конструкций из композиционных материалов остро возникает вопрос о создании и развитии моделей деформирования и разрушения композиционных конструкций в условиях сложных комплексных механических воздействий, приближенных к реальным условиям эксплуатации, а также создания баз данных для верификации моделей накопления повреждений и деформирования, что требует создания и отработки новых методик экспериментальных исследований и получения соответствующих опытных данных. Традиционные методики испытаний композиционных материалов не позволяют получать опытные данные о процессах накопления повреждений, деформирования и разрушения в условиях сложных комбинированных механических воздействий.

В связи с этим, развитие подходов экспериментальных исследований деформационных и прочностных свойств современных полимерных композиционных материалов в условиях комплексных механических воздействий с использованием современного электромеханического, сервогидравлического, электродинамического испытательного и диагностического оборудования инфракрасного термосканирования, анализа полей деформаций и дефектоскопии является востребованной научно-практической задачей.

**Целью диссертационной работы** является развитие научно-методических основ экспериментальных исследований и получение новых данных о

закономерностях механического поведения слоисто-волоконистых и пространственно-армированных полимерных композиционных материалов при комплексных статических, циклических и низкоскоростных ударных воздействиях в условиях нормальных и повышенных температур.

### **Основные задачи исследования**

1. Разработать новые экспериментальные методики изучения процессов деформирования и разрушения композиционных материалов при комплексных статических, циклических и ударных воздействиях на основе совместного использования современного испытательного и диагностического оборудования.

2. Получить новые опытные данные о закономерностях накопления повреждений и разрушения современных композиционных материалов при различных видах механических воздействий.

3. Провести оценку влияния дополнительных механических воздействий на поведение композиционных материалов в условиях комплексных нагрузок.

### **Научная новизна результатов работы** заключается в следующем:

1. Разработаны оригинальные методики испытаний современных полимерных слоисто-волоконистых и пространственно-армированных композиционных материалов в условиях комплексных статических, ударных и циклических механических воздействий с совместным использованием испытательных систем квазистатического, циклического и динамического силового нагружения и диагностических систем инфракрасного термосканирования, анализа полей перемещений и деформаций.

2. С целью повышения эффективности анализа процессов накопления усталостных повреждений и оценки остаточных прочностных и деформационных характеристик композитов при циклических воздействиях предложен новый вид интерпретации опытных данных в виде диаграмм усталостной чувствительности с указанием способов определения характерных точек и стадийных участков.

3. Получены новые экспериментальные данные, отражающие закономерности изменения прочностных и деформационных характеристик полимерных композиционных материалов с различной ориентацией укладки

армирующих слоев в процессе усталостного накопления повреждений при различных режимах нагружений.

4. Выявлены закономерности воздействия дополнительных вибраций на процессы деформирования и разрушения, а также реализацию деформационных ресурсов стеклопластиковых стержневых и углепластиковых трубчатых композитных элементов в процессах квазистатического растяжения.

5. Получены экспериментальные данные о влиянии предварительного поперечного трехточечного ударного изгиба и продольного ударного растяжения на остаточную жесткость и прочность, а также усталостную долговечность слоистых стеклопластиков.

6. Получены новые данные об остаточной несущей способности крупноячеистых стекло- и углепластиковых образцов-панелей, а также слоистых и пространственноармированных углепластиковых образцов-пластин в опытах на сжатие после удара.

**Достоверность результатов** подтверждается использованием аттестованного оборудования и поверенных средств измерений в условиях аккредитованной испытательной лаборатории (аттестат аккредитации испытательного центра № ИЛ-046 Федерального агентства воздушного транспорта (Росавиация)) и качественным соответствием полученных результатов данным других авторов для отдельных режимов нагружения и видов материалов.

**Методология и методы диссертационного исследования** направлены на проведение экспериментального исследования закономерностей механического поведения и разрушения конструкционных полимерных композиционных материалов, находящихся в условиях последовательных комплексных квазистатических, циклических и динамических воздействий.

Экспериментальные исследования по влиянию предварительного циклического воздействия проводились на двухосевой сервогидравлической испытательной системе Instron 8850 (максимальная осевая нагрузка  $\pm 100$  кН, максимальный крутящий момент  $\pm 1000$  Н·м) и универсальной двухосевой электродинамической испытательной системе Instron ElectroPuls E10000

(максимальная осевая нагрузка  $\pm 10$  кН, максимальный крутящий момент  $\pm 100$  Н·м). Испытательные системы позволяют реализовать квазистатические испытания и циклические испытания с частотой до 100 Гц (электродинамические – до 100 Гц, сервогидравлические – до 30 Гц). При этом могут быть реализованы независимые программы нагружения и деформирования по оси растяжения-сжатия и кручения. Эксперименты по выявлению особенностей деформирования и разрушения трубчатых образцов стекло- и углепластиковых композиционных материалов при дополнительных циклических воздействиях на различных стадиях квазистатического нагружения проведены с использованием универсальной двухосевой сервогидравлической испытательной системе Instron 8850 ( $\pm 100$  кН,  $\pm 1000$  Н·м, 30 Гц) с применением специализированных гидравлических захватов цангового типа. В части исследования влияния динамических перегрузок с различными уровнями воздействий на деформирование и разрушение полимерных композиционных материалов в процессе квазистатического нагружения использовался электродинамический стенд для низкоскоростного ударного нагружения CEAST 9350 с максимальной энергией удара 1800 Дж и электромеханическую испытательную систему Instron 5882 (1кН, 10кН, 100кН) с видеоэкстензометром AVE и температурной камерой.

Микроструктурные исследования и анализ картин изломов опытных образцов при комплексном циклическом, ударном и квазистатическом механическом воздействии выполнено с использованием стереомикроскопа Carl Zeiss SteREO Discovery V12. Для регистрации изменения температур с высокой точностью использовалась инфракрасная тепловизионная камера FLIR SC7600 с КРТ детектором разрешением 640x480. Тепловизионная система синхронизировалась с испытательной машиной и позволяла регистрировать эволюцию полей температур на поверхности испытываемых образцов и элементов конструкций в процессе нагружения. При испытании образцов с концентраторами регистрировались поля перемещений и деформаций с использованием бесконтактной видеосистемы регистрации полей перемещений и деформаций Correlated Solutions Vic3D.

**Теоретическая и практическая значимость работы** состоит в создании научно-методических основ для решения прикладных задач крупных предприятий, таких как ОАО «Авиадвигатель», ПАО «ОДК-Сатурн», ОА «УНИИКМ», ОАО "Пермский завод «Машиностроитель», ПАО «НПО Искра», и других, активно использующих в производстве изделий современные композиционные материалы. Материалы диссертационной работы используются в учебном процессе кафедры «Экспериментальная механика и конструкционное материаловедение» ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» по направлению магистерской подготовки 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов» по дисциплинам «Экспериментальная механика материалов» и «Экспериментальная механика композитов».

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

1. Совокупность методических рекомендаций по проведению экспериментальных исследований композиционных материалов в условиях комплексных механических воздействий, включая рекомендации по интерпретации получаемых опытных данных в виде диаграмм усталостной чувствительности.

2. Описание полученных новых экспериментальных данных и о механическом поведении полимерных композиционных материалов различной структуры при комплексных квазистатических, циклических и низкоскоростных динамических воздействиях в условиях комнатных и повышенных температур.

3. Выводы по анализу механического поведения современных конструкционных композиционных материалов в зависимости от их структур для слоисто-волоконистых, пространственно-армированных и крупноячеистых панелей и пластин.

4. Выводы об эффективности комплексного использования систем квазистатического, циклического и динамического нагружения, а также аппаратуры регистрации полей перемещений и деформаций, инфракрасного термосканирования и дефектоскопии для анализа процессов деформирования и разрушения конструкционных композитов.

### **Апробация работы**

Основные результаты исследований, представленные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались на Международной научно-технической молодежной конференции «Перспективные материалы конструкционного и медицинского назначения» (Томск, 2018), Всероссийской школе-конференции молодых ученых и студентов "Математическое моделирование в естественных науках" (Пермь, 2020, 2019, 2018, 2017, 2015, 2014, 2013), Всероссийской научно-технической конференции «Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации» (Пермь, 2019, 2017), Международной конференции «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» (Екатеринбург, 2020, 2018, 2016), Международной конференции “Advanced Problems in Mechanics” (Санкт-Петербург, 2017, 2016, 2014), Всероссийском научном форуме «Наука будущего - наука молодых» (Казань, 2016), Международной конференции International Conference on Experimental Mechanics, ICEM (Греция, 2016), Международной конференции по конструкционной прочности ICSI 2019 (Португалия, 2019), Международной конференции «Разрушение и конструкционная прочность», IGF 25 (Италия, 2019), Научно-технической конференции молодых специалистов, посвященной 60-летию ПАО НПО "ИСКРА" (Пермь, 2015), XI Всероссийском съезде по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Казань, 2015), XII Всероссийском съезде по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Уфа, 2019), Всероссийской научной конференции «Проблемы деформирования и разрушения материалов и конструкций» (Пермь, 2015), Всероссийской конференции «Зимняя школа по механике сплошных сред» (Пермь, 2019, 2017, 2015, 2013).

Диссертация обсуждалась на семинарах Центра экспериментальной механики ПНИПУ (рук. д. ф.-м. н., профессор В.Э. Вильдеман), совместном семинаре кафедр механики композиционных материалов и конструкций ПНИПУ (рук. д. т. н., профессор А.Н. Аношкин) и кафедры экспериментальной механики и конструкционного материаловедения (рук. д. ф.-м. н., профессор В.Э. Вильдеман), научном семинаре ПФИЦ УрО РАН (Института механики сплошных сред УрО

РАН) (рук. – академик РАН, д. т. н., профессор В.П. Матвеевко). Результаты работы использованы при выполнении грантов РФФИ № 18-01-00763 и № 16-41-590360, гранта по постановлению Правительства Российской Федерации № 220 от 9 апреля 2010 года (договор № 14В.25.310006 от 24 июня 2013 года), государственного задания Минобрнауки России (FSNM-2020-0027), государственного задания Минобрнауки России (9.7526.2017/9.10), гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-00069).

**Публикации.** Результаты исследований по теме диссертационной работы отражены в 13 публикациях [10,65-70,121,151,152,162-164], из них 5 статей [66,121,152,162,164] опубликованы в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК, включая 5 статей, опубликованных в изданиях, индексируемых в WoS и Scopus [66,121,152,162,164], 8 публикаций в прочих изданиях, включая РИНЦ [10,65,67-70,151,163].

#### **Личный вклад автора**

Во всех публикациях соискателем самостоятельно осуществлена экспериментальная часть, обработка результатов и написание текста. Постановка задач и анализ результатов экспериментальных исследований осуществлялись совместно с научным руководителем и соавторами.

#### **Структура и объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и приложения, содержит 97 рисунков, 3 таблицы. Объем диссертационной работы составляет 140 страницы. Библиографический список включает 168 наименований.

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы диссертационной работы, сформулированы цели и основные задачи исследования, научная новизна и практическая значимость работы, представлены положения, выносимые на защиту, изложены результаты апробации диссертации и краткое содержание глав работы.

В **первой главе** приведен литературный обзор по тематике исследования. Рассмотрены вопросы, связанные с методическими аспектами экспериментальных

исследований в области отдельных квазистатических, циклических, низкоскоростных динамических и комплексных механических испытаний полимерных композиционных материалов. Определены наиболее важные направления исследований и актуальные задачи экспериментальной механики, включающие в себя исследования закономерностей деформирования, разупрочнения и деградации остаточных свойств, механизмы разрушения полимерных слоисто-волоконистых композитов при квазистатическом, циклическом, динамическом нагружении в условиях воздействия нормальных и повышенных температур. Рассмотрены вопросы интерпретации опытных данных о закономерностях накопления повреждений композиционных материалов.

Во **второй главе** рассмотрены методические вопросы экспериментального исследования деформирования и разрушения полимерных композиционных материалов при воздействии комплексных механических нагрузок. Приведено описание испытательных систем, систем сбора и обработки данных, специализированного программного обеспечения, дополнительного диагностического оборудования. Отражены аспекты совместного использования испытательных и диагностических систем.

Проведен анализ отечественных и зарубежных стандартов в области испытаний полимерных композитов в условиях квазистатических, циклических и низкоскоростных динамических воздействий. Отмечено, что на данный момент регламент проведения испытаний при отдельных видах механического воздействия не содержит рекомендаций по проведению испытаний при комплексном нагружении.

Разработаны новые методики исследований механического поведения композиционных материалов в условиях предварительного циклического и последующего квазистатического воздействия; предварительного низкоскоростного продольного ударного и последующего квазистатического или циклического растяжения; предварительного поперечного удара по схеме трехточечного изгиба и последующего квазистатического или циклического растяжения; предварительного локального удара падающим грузом и

последующего сжатия; а также квазистатического растяжения с дополнительными вибрационными воздействиями. Даны рекомендации по дальнейшему использованию экспериментальных данных, полученных по разработанным методикам.

**В третьей главе** содержатся результаты исследований влияния предварительных циклических воздействий с различными параметрами на остаточные прочностные и жесткостные свойства образцов полимерных композиционных материалов с различными углами укладки армирующих слоев в условиях комнатных и повышенных температур. Изучено влияние продолжительности циклического воздействия на остаточные механические характеристики композитов, полученные новые экспериментальные данные представлены в виде диаграмм усталостной чувствительности. Проанализировано влияние различных параметров циклического воздействия на статические механические свойства композитов. Получены экспериментальные зависимости изменения усталостной чувствительности в условиях повышенных температур. Проведено исследование влияния дополнительных вибраций на механическое поведение стеклопластиковых стержневых и углепластиковых трубчатых композитных образцов в процессе квазистатического растяжения.

**В четвертой главе** представлены результаты исследований поведения образцов полимерных композиционных материалов в условиях комплексных предварительных ударных и последующих квазистатических и циклических воздействий. Получены экспериментальные зависимости, отражающие влияние предварительного ударного растяжения и удара по схеме трехточечного изгиба на остаточную прочность и жесткость, а также усталостную долговечность стеклопластиковых образцов. Выполнен комплекс испытаний с целью оценки остаточной несущей способности слоистых, крупноячеистых и пространственно-армированных композитных образцов-панелей и пластин на сжатие после локального поперечного удара. Изучены зависимости деформирования и разрушения композитных образцов-пластин с пространственными схемами армирования после предварительных ударных воздействий с различными

интенсивностями. Предложена методика оценки поврежденности композитных образцов-пластин, с использованием результатов неразрушающего контроля.

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Автор выражает благодарность научному руководителю доктору физико-математических наук, профессору Вильдеману Валерию Эрвиновичу за постоянное внимание к работе, а также члену-корреспонденту РАН Ломакину Евгению Викторовичу и кандидату физико-математических наук Третьякову Михаилу Павловичу за обсуждение работы и ценные замечания.

# **1. ВОПРОСЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ В УСЛОВИЯХ КОМПЛЕКСНЫХ ИСПЫТАНИЙ**

Глава посвящена литературному обзору научных работ отечественных и зарубежных авторов, направленных на исследования механического поведения полимерных композиционных материалов при комплексных статических, циклических и низкоскоростных ударных воздействиях. Рассмотрены вопросы, связанные с методическими аспектами экспериментальных исследований в области квазистатических, циклических и динамических комплексных испытаний полимерных слоисто-волоконистых композитов. Проведен анализ интерпретации экспериментальных данных о закономерностях накопления повреждений, деформирования и разрушения композиционных материалов. Определены наиболее важные направления исследований и актуальные задачи экспериментальной механики, включающие в себя исследования закономерностей деформирования, разупрочнения и изменения остаточных механических свойств, механизмы разрушения полимерных композитов различной структуры при квазистатическом, циклическом, динамическом нагружении в условиях сложных режимов нагружения.

## **1.1 Исследования механических свойств полимерных композиционных материалов в условиях квазистатических, циклических и низкоскоростных динамических воздействий**

В настоящее время проектировщики в качестве основных элементов конструкций все чаще применяют композиционные материалы, которые по сравнению с металлическими сплавами имеют меньший вес при относительно равных физико-механических свойствах. Наиболее распространенными являются композиты на основе полимерной матрицы. Главными ее преимуществами

являются низкая стоимость и высокие упругие свойства связующего. Долгое время полимерные композиционные материалы (ПКМ) использовались в качестве функциональных материалов, однако с повышением требований к живучести, безопасности и срока эксплуатации конструкций, а также с развитием технологии производства и проектирования материалов и изделий, полимерные композиты нашли широкое применение в авиационной, космической, нефте-химической, автомобильной, судостроительной и многих других видах промышленности в качестве конструкционных материалов [33, 35, 42, 77, 79].

В процессе эксплуатации композиционные конструкции могут подвергаться воздействию ударных, циклических, вибрационных и других видов термомеханических нагрузок. Данные о стойкости материала к повреждениям, допустимые повреждения и особенности деформирования и разрушения композиционных материалов в условиях комплексных механических воздействий важно учитывать при проектировании конструкций и выборе материала.

Чувствительность к повреждениям, вызванным сосредоточенными поперечными силами, является одной из главных проблем проектирования конструкций из композиционных материалов. Особую значимость имеют вопросы, связанные с механизмом разрушения изделий. Ряд авторов, таких как Зильбершмидт В. В., Нихамкин М.Ш., Сапожников С.Б., Coles L.A. [12, 28, 30, 39, 52, 53, 61, 62, 95] и другие проводят исследования в области ударных воздействий с различной скоростью нагружения. Однако вопросы, затрагивающие разрушение конструкций из композиционных материалов при возникновении динамических нагрузок во время эксплуатации и исследования оказываемых влияний на остаточные прочностные и динамические характеристики, встречаются крайне редко в работах российских и зарубежных авторов [99, 115, 126, 148].

Существующие методы прогнозирования упругих и прочностных характеристик полимерных композиционных материалов по свойствам компонентов пока не дают надежных результатов из-за трудности учета большого числа существенных факторов. Экспериментальные работы, направленные на мониторинг процессов деформирования и разрушения с использованием

современного испытательного оборудования, позволяют получать новые экспериментальные данные, необходимые для верификации моделей поведения композитов при низкоскоростных ударных воздействиях [101, 105, 123, 125, 140, 145].

Число работ, посвященных изучению процессов деформирования и разрушения композитов при квазистатических воздействиях в условиях повышенных температур, загрязняющих и агрессивных сред велико. Большинство таких работ ориентировано на создание моделей и экспериментальных баз данных, позволяющих достоверно описывать поведение материала в условиях приближенных к эксплуатационным. Особенности и методики проведения испытаний композитов и методики планирования эксперимента рассмотрены авторами: Адамов А.А., Вильдеман В.Э., В.П. Качанов, Работнов Ю.Н., Ломов С.В., Полилов А.Н., Протасов В.Д., Соколкин Ю.В., Тамуж Л.М., Тарнопольский Ю.М., Ташкинов А.А. [1, 5, 7, 13, 36, 50, 55, 56, 58, 59, 122] и другими.

Циклическое нагружение композитных конструкций приводит к постепенной деградации их свойств. В работах [111, 158] отмечается стадийность этих процессов. Снижение свойств связано с накоплением повреждений: расслоением матрицы и разрывами волокон в композитах. Оценка поврежденности материала по снижению деформационных характеристик предложена в работах Качанова Л.М. и Работнова Ю.Н. [36, 58]. Авторы в своих работах [54, 130, 156] предлагают оценивать поврежденность материала экспериментально по снижению прочности, жесткости композитных элементов при циклическом нагружении. Ряд зарубежных авторов на основании экспериментальных данных проводят построение и верификацию моделей накопления повреждений и разрушения при циклическом нагружении волоконно-армированных пластиков [9, 133, 155, 165]. Целесообразно использование определяющих соотношений с функциями поврежденности, зависящими от истории нагружения, приведенные в работах авторов Вильдемана В.Э., Соколкина Ю.В., Ташкинова А.А., [9, 93, 132]. Ряд авторов Carraro P.A., Degrieck J., Kassapoglou C., Nijssen R.P.L., Post N.L., Qian C., Quaresimin M., Van Paeregem W., Westphal T. свои работы [93, 132, 135, 157, 159]

посвятили моделированию постепенного разупрочнения образцов волокнистого композиционного материала в условиях циклического нагружения методами конечно-элементного анализа для оценки применимости данных методов к оценке остаточной прочности реальных конструкций.

Активно исследуются вопросы усталости композиционных материалов при двухосном нагружении трубчатых образцов в условиях совместного растяжения с кручением. Таким исследованиям посвящены работы авторов Beaumont P.W.R., Carraro P.A., Ogasawara T., Quaresimin M., Anastasios P. Vassilopoulos [82, 134, 136, 149]. В литературе отмечается наличие проблемы в части закрепления образцов в захватах испытательной системы. Также одной из существующих методических особенностей является тензометрия и регистрации полей перемещений и деформаций из-за цилиндрической формы образцов. В условиях сложного напряженного состояния и наличия концентраторов напряжений перспективным методом исследователи выделяют метод корреляции цифровых изображений [63, 74]. В совокупности решение этих методических проблем является актуальной проблемой механики.

В работах отечественных авторов Вильдемана В.Э., Матвиенко Ю.Г., Наймарка О.Б., Плехова О.А. [47, 48, 131], а также зарубежных Haggi M., Heidary H., Maleki A., Yousefi J. [103, 104, 124, 167] отмечается перспективность совместного использования систем инфракрасного термосканирования с другими системами измерения, в частности с видеосистемами бесконтактного измерения и анализа полей перемещений и деформаций, а так же систем регистрации сигналов акустической эмиссии, для изучения механического поведения композитов при различных видах квазистатического, ударного и циклического нагружения, что дает возможность отслеживания процессов диссипации энергии при зарождении и развитии трещин, и прогнозирования остаточных прочностных и деформационных характеристик при комплексных испытаниях.

## 1.2 Интерпретация опытных данных о закономерностях накопления повреждений композиционных материалов

При проектировании изделий из композиционных материалов немаловажным является обработка результатов испытаний. Полученные опытные данные в исходном виде не могут быть использованы для создания и развития методов численного моделирования. Введение новых пороговых и предельных значений, точек, участков зависимостей позволяет более подробно описывать процессы накопления повреждений и разрушения материалов.

Чаще анализ результатов испытаний при квазистатическом растяжении проводится с использованием построения диаграммы деформирования, на которой для композиционных материалов определяются пределы прочности, пропорциональности, модуль жесткости. Важным аспектом исследований является интерпретация линейного участка деформирования, на котором определяется модуль Юнга, особенно это касается разномодульных материалов, таких как зернистые и волокнистые композиты. Этой проблеме посвящены работы Амбарцумяна С.А., Ломакина Е.В., Работнова Ю.Н. и многих других [2, 3, 44, 45, 122]. Немаловажным является анализ процесса деформирования, а именно анализ ниспадающего участка диаграммы, так называемого участка закритического или равновесного деформирования. Результаты изучения кинетики разрушения материалов, построения полных диаграмм деформирования, условий перехода от равновесного к динамическому деформированию нашли отражение в работах Вильдемана В.Э., Зайцева А.В., Соколкина Ю.В., Лебедева А.А., Миронова В.И., Стружанова В.В., Ташкинова А.А., Чаусова Н.Г. [7, 9, 31, 32, 40, 41, 71, 72].

Экспериментальные данные усталостных испытаний (преимущественно циклическое растяжение – сжатие) принято представлять в виде S-N кривых, аппроксимируя точки на диаграмме с помощью степенной функции, в полу- или двойных логарифмических координатах. В результате определяется предел выносливости. Переход к логарифмическим координатам удобен для анализа долговечности материала. Проблемам обеспечения безопасности эксплуатации

конструкционных материалов и конструкций при циклических воздействиях посвящены работы Бабушкина А.В., Махутова Н.А., Райхера В.Л., Стрижиуса В.Е. и других исследователей [4, 38, 49, 60, 70].

Обработка результатов по удару проводится с построением баллистических кривых, на которых определяется баллистический предел материала, такой вариант анализа результатов удобен при оценке пробиваемости защитных покрытий, например, кевларовых пластин бронежилета. В работе Сапожникова С.Б. [30] баллистические кривые стеклопластиковых образцов построены с использованием эмпирической зависимости Ламберта [117].

В опытах на стойкость композитов к повреждениям ударом падающим грузом экспериментальные зависимости приводятся в виде диаграмм нагружения «нагрузка-время», на которых определяются максимальное значение нагрузки при контакте ударника и образца для косвенной оценки сопротивляемости образца ударным воздействиям. Для оценки живучести материала необходимо проводить серию испытаний на сжатие после удара с различными параметрами ударного воздействия [65]. В таком случае, после построения кривой, можно выявить пороговое значение энергии удара, при которой удары ниже этого значения не будут приводить к значительным снижениям остаточной несущей способности. В опытах на удар по схеме трехточечного изгиба определяется значение ударной вязкости, которое является интегральной характеристикой материала, так как зависит от многих параметров, включая геометрию образца, ударника, температуры и т.д. Ударная вязкость, как и остаточная несущая способность, служат для косвенной оценки материала, например, когда необходимо выбрать материал для производства изделия, которое в процессе эксплуатации должно воспринимать удары без снижения несущей способности.

### **1.3 Закономерности деформирования и механизмы разрушения полимерных композитов при комплексных воздействиях**

Тенденции развития технологий производства композиционных материалов позволяют внедрять композиты в ответственные детали и узлы конструкций космической, авиационной, строительной промышленности. При постоянном повышении ресурса надежности и безопасности конструкций из композиционных материалов остро возникает вопрос о создании и развитии моделей поведения и разрушения композиционных конструкций в условиях сложных комплексных циклических, ударных и квазистатических воздействиях.

Обзор современной научной литературы показывает, что число работ, направленных на создание моделей, которые достаточно хорошо описывают как вид воздействия (параметры нагружения), так и структуру материалов (схемы укладки армирующих слоев) крайне мало. Каждая такая модель накопления повреждений может быть использована только как частный случай [80, 97, 106, 109, 113, 114, 138, 141, 142, 147]. Однако в некоторых работах встречается описание моделей поведения композитов в условиях различных механических воздействий [91, 94, 98, 102, 154, 160, 164]. В этих исследованиях авторы зачастую используют принцип линейного суммирования повреждений, без учета истории нагружения. Часть работ направлена на описание различных эффектов, возникающих в процессе деформирования и разрушения композитов в условиях комплексных воздействий [81, 110, 112, 127]. Данные исследования основываются на методиках совместного использования испытательного и диагностического оборудования, такого как инфракрасного термосканирования, регистрации полей перемещений и деформаций и регистрации сигналов акустической эмиссии [108, 137].

В связи с этим, развитие подходов экспериментальных исследований деформационных и прочностных свойств современных полимерных композиционных материалов в условиях комплексных механических воздействий с использованием современного электромеханического, сервогидравлического, электродинамического испытательного и диагностического оборудования

инфракрасного термосканирования, анализа полей деформаций и дефектоскопии является востребованной научно-практической задачей.

### **Выводы по главе**

Анализ научной литературы позволяет сделать вывод, что к актуальным задачам механики деформируемого твердого тела можно отнести следующие.

1. Изучение процессов накопления повреждений, деформирования и разрушения полимерных композиционных материалов в условиях комплексных механических воздействий при нормальных, повышенных и пониженных температурах.
2. Получение новых экспериментальных данных о поведении композитов при различных комбинациях квазистатического, циклического и низкоскоростного ударного воздействия.
3. Изучение вопросов интерпретации экспериментальных данных при последовательных комплексных механических нагрузках.

Основные результаты, содержащиеся в главе, отражены в публикациях автора [65, 120, 151, 161, 163].

## **2. ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ КОМПЛЕКСНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

В главе рассмотрены методические вопросы экспериментального исследования деформирования и разрушения полимерных композиционных материалов при воздействии комплексных механических нагрузок. Приведено описание испытательных систем, систем сбора и обработки данных, дополнительного диагностического оборудования. Отражены аспекты совместного использования испытательных и диагностических систем. Проведен анализ отечественных и зарубежных стандартов в области испытаний полимерных композитов в условиях квазистатических, циклических и низкоскоростных динамических воздействий. Отмечено, что регламент стандартов не содержит методических рекомендаций испытаний в условиях сложного нагружения. Разработаны новые методики исследований механического поведения композиционных материалов в условиях предварительного циклического и последующего квазистатического воздействия; предварительного низкоскоростного продольного ударного и последующего квазистатического или циклического растяжения; предварительного поперечного удара по схеме трехточечного изгиба и последующего квазистатического или циклического растяжения; предварительного локального удара падающим грузом и последующего сжатия; а также квазистатического растяжения с дополнительными вибрационными воздействиями. Даны рекомендации по дальнейшему использованию экспериментальных данных, полученных по разработанным методикам.

## 2.1 Испытательные системы для реализации квазистатических, динамических и циклических режимов нагружения

Усовершенствование методик исследований неотъемлемо связано с развитием испытательного оборудования, использование которого, в совокупности со специализированным программным обеспечением, дает возможность реализовывать сложные режимы механических воздействий. Далее приведены электромеханические, сервогидравлические системы для проведения испытаний при квазистатических, циклических и динамических режимах термомеханического нагружения.

Квазистатические испытания проведены на электромеханической испытательной системе Instron 5882 (рис. 2.1), предназначенной для реализации испытаний на растяжение, сжатие, изгиб, сдвиг с усилием до 100 кН и скоростью перемещения траверсы от 0,001 до 500 мм/мин. В состав испытательной системы входит климатическая камера, которая позволяет проводить испытания в температурном диапазоне от  $-100^{\circ}\text{C}$  до  $+350^{\circ}\text{C}$ .

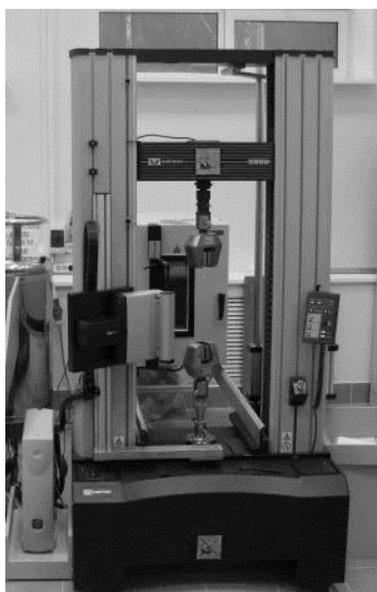


Рисунок 2.1 – Фотография электромеханической испытательной системы Instron 5882

Измерение деформаций образца в процессе квазистатического растяжения производилось с использованием видеоэкстензометра AVE Instron, который

позволяет проводить испытания без контакта с объектом исследования. Метод определения основан на позиционировании и отслеживании смещения во время нагружения меток образца, нанесенных на рабочую поверхность, с помощью видеокамеры высокого разрешения. В процессе испытания видеофиксация поверхности образца происходит непрерывно. Бесконтактный видеоэкстензометр соответствует классу точности 0,5, абсолютная погрешность измерений  $\pm 2$  мкм.

Для измерения продольных деформаций непосредственно на образце, например в испытаниях при повышенных температурах, использовался навесной экстензометр Instron 2620-601 (рис. 2.2), с измерительной базой 12,5 – 50 мм, погрешностью 0,15% от полной шкалы и регистрацией деформаций в диапазоне  $\pm 40\%$  на базе 12,5 мм,  $\pm 20\%$  – 25 мм,  $\pm 10\%$  – 50 мм.



Рисунок 2.2 – Фотография навесного датчика деформаций в процессе квазистатического растяжения стеклопластикового образца

Настройка параметров испытаний, геометрии и размеров образцов, методов первичной обработки данных проводилась с использованием специализированного программного обеспечения Bluehill (рис. 2.3).

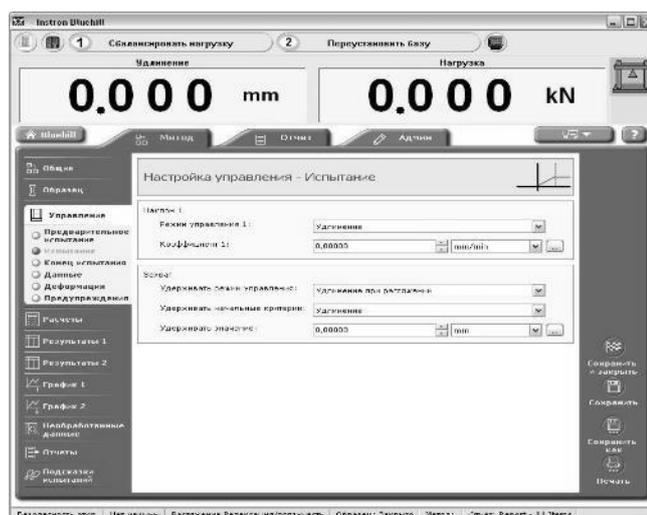


Рисунок 2.3 – Диалоговое окно создания метода испытания в программном обеспечении Bluehill

Циклическое нагружение реализовано на сервоэлектрической испытательной системе Instron E10000. (рис. 2.4)

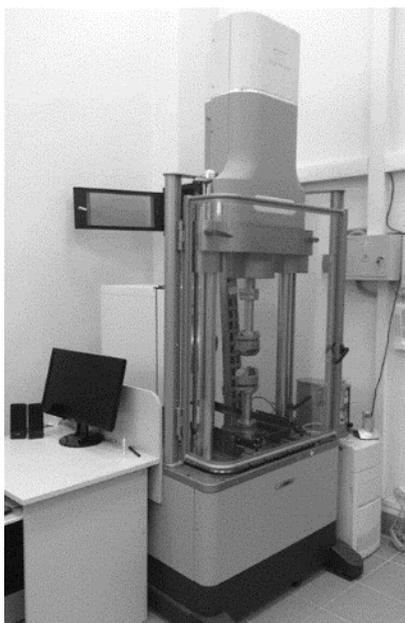


Рисунок 2.4 – Фотография сервоэлектрической испытательной системы Instron E10000

Данная испытательная система предназначена для проведения статических испытаний на растяжение, сжатие, изгиб, кручение; динамических усталостных испытаний с частотой до 100 Гц; двухосевых (растяжение-сжатие, кручение) статических и динамических испытаний при нагрузках до 10 кН/100 Нм.

Для создания электромагнитной силы, обеспечивающей нагружение и перемещения образца в исполнительном механизме, используются мощные магниты, что позволяет осуществлять как управление нагрузкой, так и цифровое управление положением. Система «ElectroPuls E10000» позволяет проводить испытания разнообразных образцов с различными жесткостями.

Основные технические характеристики электродинамической системы «ElectroPuls E10000» представлены в таблице 2.1.

Система «ElectroPuls E10000» укомплектована датчиком нагрузки «DynaCell  $\pm 10\text{kN}/\pm 100\text{Nm}$ ». Датчик нагрузки имеет встроенный акселерометр для компенсации инерционных сил от движущихся масс. Характеристики датчика нагрузки представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.1 – Основные технические характеристики «ElectroPuls E10000»

| Наименование                       | Величина    | Размерность |
|------------------------------------|-------------|-------------|
| Рабочее пространство               | от 0 до 887 | мм          |
| Ход поршня                         | $\pm 30$    | мм          |
| Максимальная статическая нагрузка  | 7000        | Н           |
| Максимальная динамическая нагрузка | 10000       | Н           |
| Скручивающий момент                | $\pm 100$   | Нм          |
| Угол поворота                      | $\pm 135$   | °           |
| Минимальная скорость испытаний     | 0,01        | мм/мин      |
| Максимальная скорость испытаний    | 1,5         | м/с         |
| Максимальная частота испытаний     | 100         | Гц          |

Таблица 2.2 – Основные технические характеристики датчика нагрузки «Dynacell  $\pm 10\text{kN}/\pm 100\text{Nm}$ »

| Характеристика   | Значение                             |
|--|--------------------------------------|
| Несущая способность по нагрузке/крутящему моменту        | $\pm 10\text{ кН}/\pm 100\text{ Нм}$ |
| Точность измерения нагрузки в диапазоне от 40 Н до 10 кН | 0,5 % от измеряемой величины         |
| Статический диапазон                                     | $\pm 12\text{ кН}$                   |
| Динамический диапазон                                    | $\pm 10\text{ кН}$                   |

Датчики, подключенные к системе «ElectroPuls E10000» предусматривают до 4 каналов управления: 1 Position – Положение (LVDT); 2 Load – Нагрузка (датчик силы); 3 Digital Position – Положение (цифровой) (линейный исполнительный механизм) или Digital Rotation (скручивающий исполнительный механизм); 4 – Конфигурируется по необходимости (обычно для экстензометра).

Система «ElectroPuls E10000» состоит из следующих основных компонентов: силовая рама E10000 с исполнительным механизмом и модуль основания; встроенный цифровой датчик для точного позиционирования поршня; двухосевой датчик силы; контроллер; программное обеспечение «Console», «WaveMatrix» и «Bluehill».

В рамках работы на испытательной системе «ElectroPuls E10000» при циклическом нагружении использовались:

1) пневматические захваты клинового типа (рисунок 2.5) обеспечивающие передачу усилий к образцу до  $\pm 10\text{ кН}/\pm 100\text{ Н}\cdot\text{м}$ , которые пригодны для испытаний на растяжение, сжатие, кручение с диапазоном рабочих температур от  $+10^\circ\text{C}$  до  $+50^\circ\text{C}$ .



Рисунок 2.5 – Пневматические захваты клинового типа.

Захваты снабжены комплектами сменных губок, пригодных для испытаний как плоских образцов с толщиной от 1мм до 12,7 мм и шириной 25 мм, так и цилиндрических с диаметром от 3 мм до 18 мм.

2) высокотемпературные механические захваты клинового типа обеспечивают передачу усилий к образцу до  $\pm 10$  кН/ $\pm 100$  Н·м, пригодные для испытаний на растяжение, сжатие, кручение с диапазоном рабочих температур от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+200^{\circ}\text{C}$ .

Программное обеспечение системы «ElectroPuls E10000» состоит из следующих основных приложений:

1) «Console» – позволяет конфигурировать систему (устанавливать ограничения, выполнять калибровку, настройку и т.д.), отслеживать состояние системы (оперативные экраны, режим управления и т.д.), и проводить несложные испытания (генераторы циклических и линейно-изменяющихся сигналов). На рисунке 2.6 представлен интерфейс программы «Console».

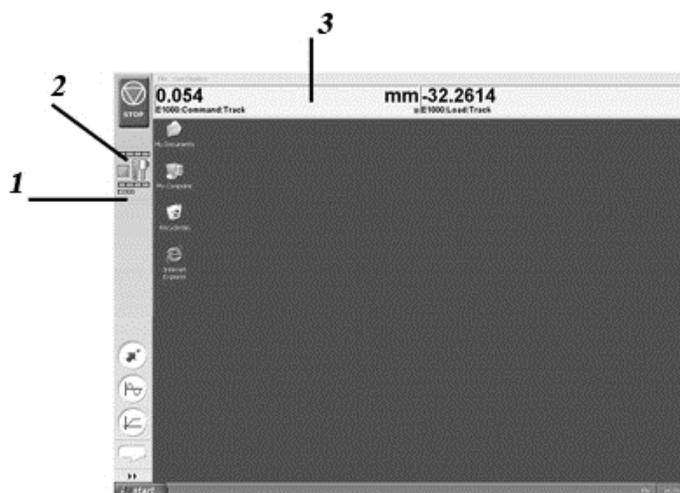


Рисунок 2.6 – Вид экрана «Console» при запуске: 1 – панель инструментов Console; 2 – кнопка Device; 3 – оперативные экраны

2) «WaveMatrix» – интерактивная среда упрощающая процесс подготовки и проведения большинства видов динамических испытаний и обладающая широкими возможностями пользовательской настройки, включая регистрацию данных, формирование форм сигналов и пошаговое программирование. WaveMatrix позволяет решать две основные задачи: создание методики испытания, определяющей, всю информацию, необходимую для проведения испытания; проведение испытания на основании методики.



Рисунок 2.7 – Вид экрана «WaveMatrix»

Низкоскоростные ударные воздействия, такие как ударное растяжение, удар по схеме трехточечного изгиба, локальный поперечный удар падающим грузом, реализовывались с использованием электромеханического копра Instron CEAST 9350 башенного типа (рис. 2.8). Данная установка позволяла проводить испытания в широком диапазоне энергий воздействия. Рабочие характеристики испытательной системы приведены в таблице 2.3.



Рисунок 2.8 – Фотография измерительного стенда-копра Instron CEAST 9350

Таблица 2.3 – Основные технические характеристики Instron CEAST

|                                   |  |
|-----------------------------------|--|
| Диапазон высоты сброса груза [мм] | 30 ... 29300<br>(эквивалентная высота) |
| Диапазон масс [кг]                | 2...70                                 |
| Диапазон скорости [м/с]           | 0.77 ... 4.64 (24 м/с с ускорителями)  |
| Диапазон энергии [Дж]             | 0.6...1800                             |
| Температура испытания [°C]        | - 70 ... 150                           |

Для непосредственного контакта с образцом использовался инструментированный боек со сменными наконечниками различной формы (рис. 2.9).

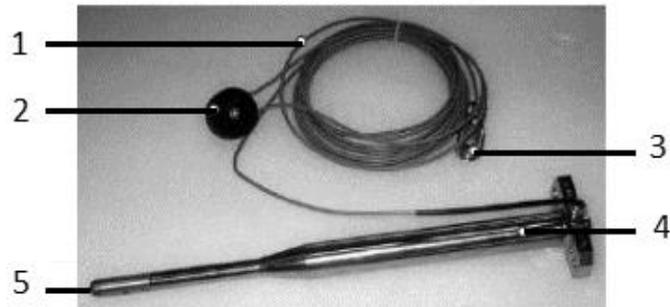


Рисунок 2.9 – Фотография бойка: 1 – сигнальный кабель; 2 – обойма кабеля; 3 – разъем; 4 – корпус бойка; 5 – наконечник.

Процесс регистрации и сбора данных в процессе ударного воздействия происходит с использованием бойка, содержащего тензодатчик, и системы DAS 16000. Параметры системы регистрации и сбора данных программируются через специализированное программное обеспечение Visual Impact (рис. 2.10).

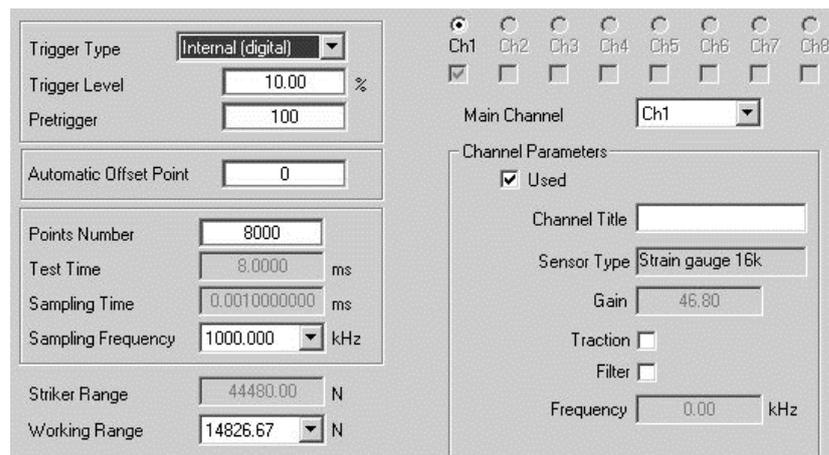


Рисунок 2.10 – Окно управления системы регистрации и сбора данных DAS 16000 в ПО Visual Impact

Программное обеспечение Visual Impact позволяет создавать метод испытания, в котором задаются такие параметры как значения скорости, энергии и высоты удара (рис. 2.11).

Test Type:

- Charpy
- Izod
- Tensile
- Pipes
- Biaxial
- CAI-Rebound
- Component

Standard:

Standard

- ASTM E23
- CUSTOMIZED STANDARD

| Serial Number        | Striker Code | I/NI | Nominal Mass [kg] | Nominal Length [m] | S |
|----------------------|--------------|------|-------------------|--------------------|---|
| 40kN Charpy ASTM E23 | 7529.507     | I    | 0.778             | 0.3650             | 4 |

Impact Energy:  J

Impact Velocity:  m/s

Impact Height:  mm

Impact Point Offset:  mm

Extension Length:  mm

Extension Mass:  kg

Carriage Mass:  kg

Applied Mass:  kg

Total Mass:  kg

Рисунок 2.11– Окно настройки метода испытаний образца в программном обеспечении Visual Impact

Обработка результатов испытаний с помощью встроенных модулей Visual Impact позволяет строить зависимости силы, перемещения, скорости и затраченной энергии от времени. Возможно построение диаграмм нагружения образца в реальном времени и экспортирование данных [76].

Таким образом, представленные испытательные системы, задействованные в исследовании, их диапазоны температурно-силового нагружения, скоростей деформирования, а также датчики и сопутствующее программное обеспечение позволяют реализовывать сложные режимы механического воздействия.

## 2.2 Совместное использование испытательного и диагностического оборудования при исследованиях механического поведения композитов

Современные экспериментальные исследования не могут основываться на результатах механических испытаний без использования диагностических систем, применение которых позволяют получать больше информации о процессах накопления повреждений и кинетике разрушения материалов. В данной работе рассмотрены системы регистрации полей перемещений и деформаций, сигналов акустической эмиссии и инфракрасного термосканирования.

Системы, основанные на регистрации полей перемещений и деформаций, позволяют оценивать напряженно-деформированное состояние при сложных механических воздействиях. В работе использовалась видеосистема Vic-3D (рис. 2.12). Принцип работы программного обеспечения видеосистемы Vic-3D основан на методе корреляции цифровых изображений (DIC) [11, 43, 46, 64, 75]. Для регистрации перемещений и дальнейшей обработки, с целью получения полей деформаций, поверхность образца покрывалась равномерной белой краской с нанесением черных точек путем распыления.

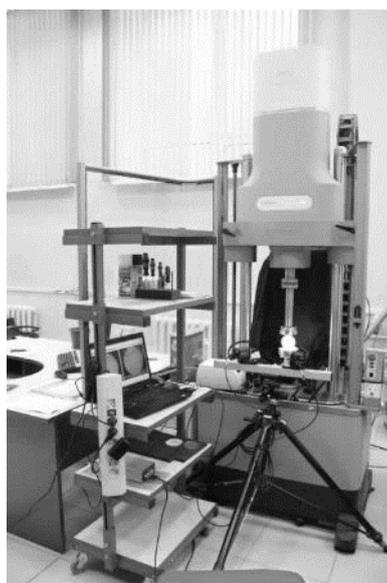


Рисунок 2.12 – Фотография системы регистрации полей перемещений и деформаций Vic-3D

С помощью систем регистрации сигналов акустической эмиссии, таких как Amsy 6 (рис. 2.13), можно классифицировать получаемые сигналы, связанные с механизмами разрушения компонентов композита, таких как растрескивание матрицы, локальный разрыв волокон, межслоевое расслоение [34, 144, 167]. Устройство системы позволяет регистрировать сигналы с помощью 8 параллельных синхронизированных измерительных каналов. Программное обеспечение Vallen Systeme позволяет проводить обработку регистрируемых данных и позволяет проводить мониторинг процессов накопления повреждений, деформирования и разрушения композитов на основе различных энергетических параметров акустической эмиссии.

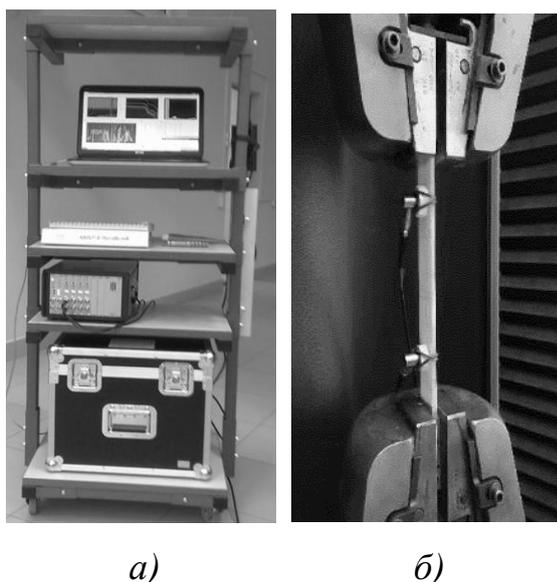


Рисунок 2.13 – Фотография системы регистрации сигналов акустической эмиссии Amsy 6 (а) при испытаниях композиционных образцов (б)

Инфракрасная тепловизионная система Flir SC7700 (рис. 2.14) позволяет регистрировать температурные поля на поверхности образцов. Для полимерных композиционных материалов крайне необходимо отслеживать температуру образцов в процессе циклического нагружения, так как внутренний саморазогрев (self-heating) образцов значительно сказывается на значении усталостной

долговечности [112, 162]. Дополнительно данная система используется при пассивном термосканировании, суть которого заключается в принудительном нагреве с помощью подведенного источника тепла и сканировании образца с выявлением зон с дефектами в виде непроклея, расслоения и т.п.



Рисунок 2.14 – Фотография инфракрасной тепловизионной системы Flir SC7700M

Совместное использование диагностических и испытательных систем необходимо при комплексном подходе исследований механического поведения материалов в условиях сложных режимах нагружения, что требует синхронизации процесса сбора экспериментальных данных [6, 75]. Сигналы по встроенному датчику испытательной системы выводятся к высокоскоростному 16-битному АЦП-блоку, который подключен к контроллеру машины. Как показано на схематическом расположении испытательного и диагностического оборудования (рис. 2.15) к блоку синхронизации подключаются видеосистема полей перемещений и деформаций Vic-3D, а также инфракрасная система Flir SC7700. Система Amsy 6 подсоединена напрямую к контроллеру испытательной системы.

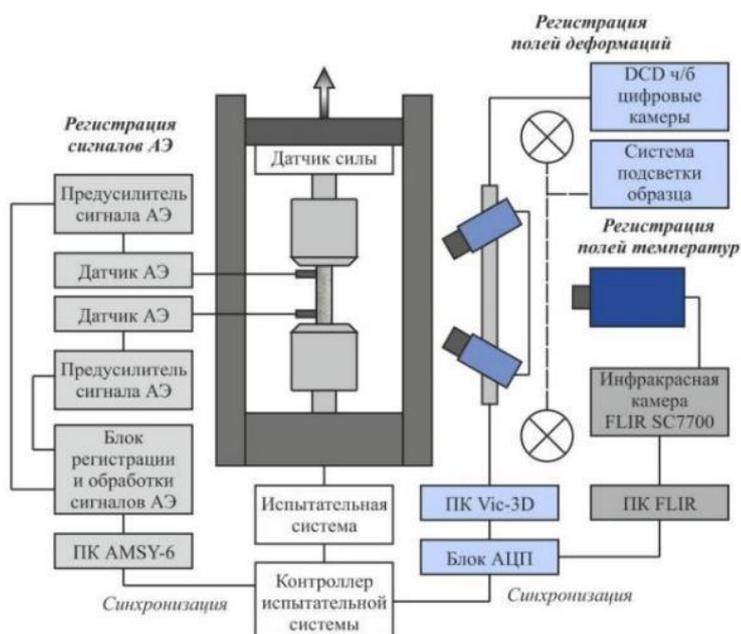


Рисунок 2.15 – Схематическое расположение испытательного и диагностического оборудования

В совокупности использование описанного выше диагностического и испытательного оборудования позволяет получать более детальную информацию о процессах, протекающих во время деформирования и разрушения композитов в условиях комплексных механических воздействий [78].

### 2.3 Методики испытаний образцов полимерных композитов при комплексных механических воздействиях

Существующие отечественные и международные стандарты (ГОСТ, ОСТ, ASTM, ISO, EN, DIN...) описывают методики определения основных характеристик материалов при отдельных видах воздействия, таких как одноосное растяжение/сжатие (ГОСТ 25.601-80, ГОСТ 11262-80, ASTM D3039/3039M) [14, 16, 84], трехточечный изгиб (ГОСТ 25.604-82, ГОСТ 4648-71, ASTM D7264/D7264M-07, ASTM D790) [17, 21, 89, 90], межслоевой сдвиг (ОСТ 92-1472-78, ASTM D2344/D2344M-00E01) [23, 83], циклическое растяжение (ГОСТ Р 57143-2016, ASTM D3479/D3479M) [22, 85] и т.д. В основном в стандартах изложены область

применения, аппаратура, геометрия образцов, специализированные оснастки, методика проведения и обработки результатов испытаний. Полученные значения предела прочности, модуля упругости, коэффициента Пуассона, относительного удлинения, разрушающего напряжения, прочности при межслойном сдвиге, предела усталости и усталостной долговечности могут быть использованы для задания материальных констант при решении краевых задач механики деформируемого твердого тела. Редко встречаются научно обоснованные методики испытаний и стандарты, которые включают в себя комплексные виды воздействия (ГОСТ 33496-2015, ГОСТ 33495-2015, ASTM D7136, ASTM D7137) [18, 19, 87, 88]. В частности, эти стандарты позволяют получать косвенные характеристики материала (максимальное значение нагрузки при ударе, поглощенная энергия удара, остаточная несущая способность), которые позволяют проводить количественную оценку значений параметров устойчивости к повреждению для композитных материалов с различными компонентами, но не входящие ни в какие определяющие соотношения. К таким стандартам можно отнести ГОСТ 19109-84, ГОСТ 4647-80, ISO 179, ASTM D6110 [15, 24, 25, 86], в которых определяются значение ударной вязкости и склонности материала к хрупкому/вязкому разрушению.

Вышеописанные стандарты и методики не позволяют получать экспериментальные данные (характеристики), описывающие поведение композиционных материалов в условиях комплексных механических воздействий. Для решения описанных проблем разработаны и апробированы методики экспериментального исследования поведения образцов полимерных композиционных материалов в условиях комплексных механических воздействий при совместном использовании испытательного и диагностического оборудования.

Многие конструкции из композитных материалов в процессе эксплуатации подвергаются циклическим нагрузкам, таким как проезд автомобилей по мосту, порывы ветра, удары колесных пар железнодорожного состава по стыкам рельс. В процессе нагружения происходит накопление повреждений с последующим усталостным разрушением. Для проектирования и эксплуатации композитных

изделий необходимы данные об изменении прочностных и деформационных свойств в процессе циклического воздействия. С этой целью разработана методика исследования предварительного циклического воздействия и последующего квазистатического растяжения, которая схематично представлена на рисунке 2.16.

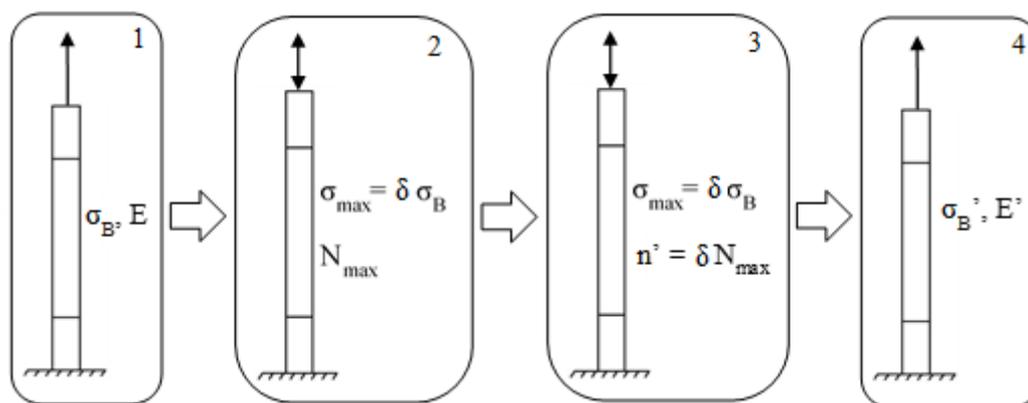


Рисунок 2.16 – Схематическое представление методики исследования при циклическом и квазистатическом растяжении

Методика испытаний включает в себя следующие этапы:

- 1) установочные квазистатические испытания с определением предела прочности  $\sigma_B$  и упругого модуля  $E$  материала;
- 2) циклические испытания при различных параметрах нагружения  $\sigma_{max} = \delta \cdot \sigma_B$ , где  $\delta \in [0;1]$  с определением значения усталостной долговечности  $N_{max}$ ;
- 3) предварительное воздействие с различной наработкой циклов  $n' = \delta \cdot N_{max}$ , где  $\delta \in [0;1]$ ;
- 4) последовательное квазистатическое нагружение с определением значений остаточных механических характеристик материала  $\sigma_B', E'$ .

Форма и размеры образцов должны соответствовать рекомендациям стандартов ГОСТ 25.601-80 и ASTM D3039 [16, 84].

Разработанная методика позволяет исследовать изменение остаточных прочностных и жесткостных свойств материалов в процессе усталостного накопления повреждений с различными параметрами воздействия и температурными режимами.

Выход из строя одного из элементов нагруженной конструкции может привести к перегрузке оставшихся элементов и разрушению всей конструкции. Изучение процессов влияния динамических перегрузок является приоритетной задачей с точки зрения безопасности и живучести. В работах Н.Г. Чаусова и соавторов рассмотрены процессы реорганизации структуры пластических металлических материалов в результате резкого изменения скорости деформирования образца, что приводило к увеличению пластичности материала [31]. Исходя из этого интересным представляется изучение влияния предварительного ударного воздействия на поведение композиционных материалов. Исследование поведения композиционных материалов в условиях предварительного ударного и последующего квазистатического растяжения можно реализовать по схеме, представленной на рисунке 2.17.

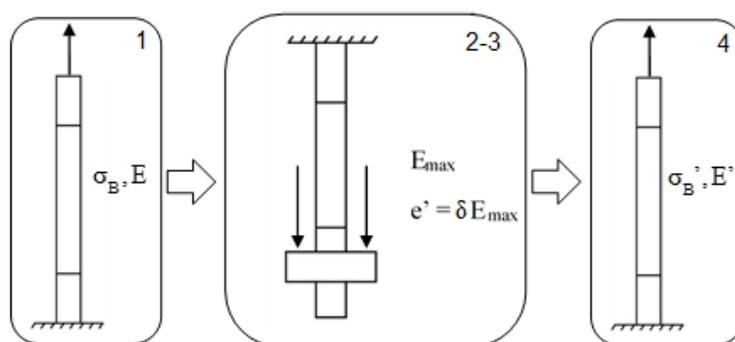


Рисунок 2.17 – Схематическое представление испытаний на предварительное ударное и квазистатическое растяжение

Порядок проведения испытаний:

- 1) квазистатическое растяжение композиционных образцов с определением номинальных значений модуля упругости  $E$  и предела прочности  $\sigma_B$  композита;
- 2) ударное растяжение с определением энергии разрушения  $E_{max}$ ;
- 3) предварительное растяжение с различными параметрами потенциальной энергии удара без разрушения образцов  $e' = \delta \cdot E_{max}$ , где  $\delta \in [0;1]$ ;

- 4) испытания на растяжение с определением остаточных прочностных  $\sigma_B'$  и жесткостных  $E'$  свойств материала.

Методика позволяет экспериментально исследовать влияние предварительного ударного растяжения с различной интенсивностью на остаточные механические характеристики композитов.

Аналогичным образом можно использовать данную методику для исследований влияния ударного воздействия на усталостную долговечность образцов ПКМ. Схема испытаний представлена на рисунке 2.18.

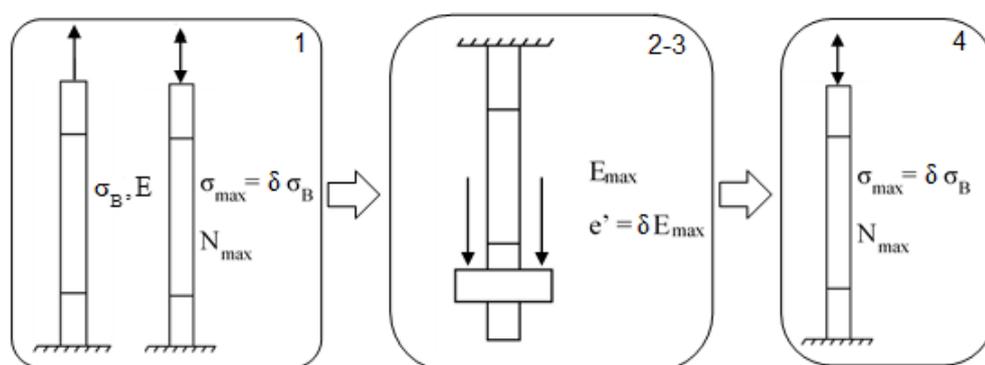


Рисунок 2.18 – Схематическое представление методики исследования влияния предварительного ударного растяжения на усталостную долговечность КОМПОЗИТОВ

Методика включает в себя следующие этапы:

- 1) проведение квазистатических испытаний на растяжения с целью определения параметров усталостных испытаний  $\sigma_B$ , усталостные испытания с определением значения усталостной долговечности  $N_{max}$ ;
- 2) ударное растяжение с определением энергии разрушения  $E_{max}$ ;
- 3) предварительное ударное растяжение с различными параметрами без разрушения образцов  $e' = \delta \cdot E_{max}$ , где  $\delta \in [0;1]$ ;
- 4) последовательные усталостные испытания с оценкой влияния предварительного ударного растяжения  $N'_{max}$ .

Форма и размеры образцов для испытаний, которые используются при изучении влияния предварительного ударного растяжения на остаточные

квазистатические и усталостные характеристики композитов, выбирались в соответствии с рекомендациями стандартов ГОСТ 34250-2017, ISO 8256 [20, 26].

Поперечные ударные воздействия, относительно плоскости армирования слоистого композита, способствуют возникновению расслоений в структуре материала, что в свою очередь сказывается на остаточных механических характеристиках и сокращает срок службы изделия. Удары, после которых невозможно оценить степень поврежденности при визуальном осмотре, несут особую опасность, так как вызывают трещины и сколы на поверхности, которые могут нарушать герметичность конструкции. К числу таких ударов можно отнести крупный град, камни и мусор на взлетной полосе, поднимаемые ветром, или падающий инструмент, используемый при монтаже обшивки.

В работе рассмотрен вариант ударного воздействия по всей ширине образца. Такой вид испытаний необходим для исследований, направленных на изучение процессов деформирования и разрушения в условиях предварительного удара по схеме трехточечного удара и последующего квазистатического растяжения. Схема испытаний приведена на рисунке 2.19.

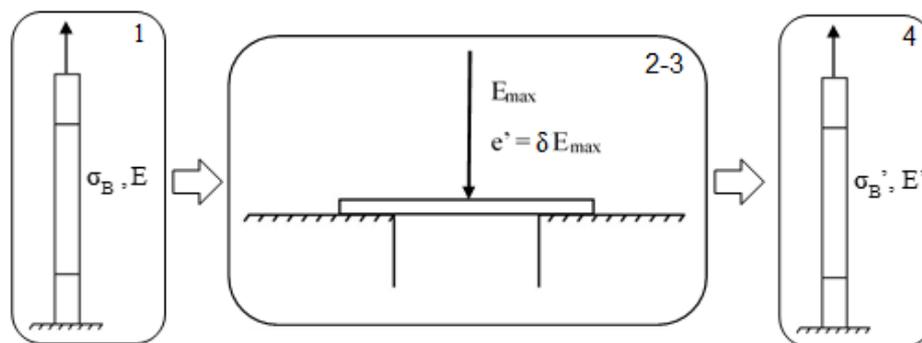


Рисунок 2.19 – Схематическое представление испытаний на предварительный ударный изгиб и квазистатическое растяжение

Этапы проведения испытаний:

- 1) квазистатическое растяжение композиционных образцов с определением номинальных значений жесткостных ( $E$ ) и прочностных ( $\sigma_B$ ) характеристик,

усталостные испытания с определением значения усталостной долговечности  $N_{max}$ ;

- 2) ударный изгиб с определением энергии разрушения  $E_{max}$ ;
- 3) предварительное ударное воздействие с различными параметрами без разрушения образцов  $e' = \delta \cdot E_{max}$ , где  $\delta \in [0;1]$ ;
- 4) испытания на растяжение с определением остаточных прочностных  $\sigma_B'$  и жесткостных  $E'$  свойств.

Аналогичным образом можно использовать данную методику для исследования влияния предварительного ударного воздействия на усталостную долговечность полимерных композитов. Схематично методика приведена на рисунке 2.20.

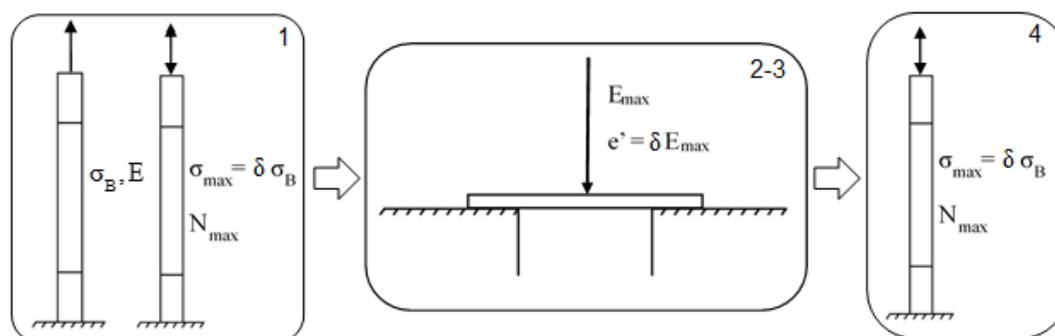


Рисунок 2.20 – Схематическое представление испытаний на предварительный ударный изгиб и последующее циклическое растяжение

Последовательность проведения испытаний:

- 1) проведение квазистатических испытаний на растяжения с целью определения параметров усталостных испытаний  $\sigma_B$ , усталостные испытания с определением значения усталостной долговечности  $N_{max}$ ;
- 2) ударный изгиб с определением энергии разрушения  $E_{max}$ ;
- 3) предварительное ударное воздействие с различными параметрами без разрушения образцов  $e' = \delta \cdot E_{max}$ , где  $\delta \in [0;1]$ ;
- 4) последовательные усталостные испытания с оценкой влияния предварительного ударного растяжения  $N'_{max}$ .

При такой методике испытаний можно использовать плоские прямоугольные образцы, изготовленные в соответствии с рекомендациями стандартов ГОСТ 25.601-80, ГОСТ 4648-71 или ASTM D3039, ASTM D 7264, ASTM D790 [16, 21, 84, 89, 90].

Данные, полученные по разработанным методикам, могут быть использованы для оценки влияния предварительного изгиба на остаточные прочностные и усталостные характеристики композита.

Локальное ударное внеплоскостное воздействие с последующим квазистатическим сжатием композиционных образцов-пластин приведено на рисунке 2.21.

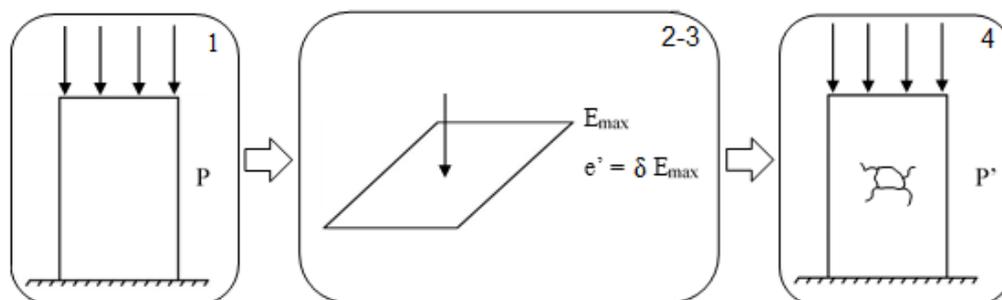


Рисунок 2.21 – Схематическое представление испытаний на удар и сжатие после удара

Методика испытаний также состоит из 4 этапов:

- 1) квазистатическое сжатие образцов для оценки несущей способности образцов  $P_{max}$ ;
- 2) нанесение повреждений при локальном ударном, поперечным плоскости образца, воздействии с определением энергии пробивания образца насквозь  $E_{max}$ ;
- 3) ударное воздействия различной интенсивности  $e' = \delta \cdot E_{max}$ , где  $\delta \in [0;1]$ ;
- 4) квазистатическое сжатие поврежденных образцов с оценкой снижения остаточной прочности  $P'$ .

Для испытаний можно использовать прямоугольные образцы-пластины, регламентированные стандартами ГОСТ 33496-2015, ГОСТ 33495-2015, ASTM D7136, ASTM D7137 [18, 19, 87, 88].

Результаты данных испытаний могут быть использованы для оценки остаточной несущей способности композитных образцов, которые в процессе своей эксплуатации подвергаются низкоскоростным ударным воздействиям.

В процессе эксплуатации изделия (конструкции) из композиционных материалов, помимо непредвиденных циклических, низкоскоростных ударных продольных и поперечных нагрузок, подвергаются вибрационным воздействиям.

Известно, что дополнительные вибрационные воздействия оказывают влияние на деформирование и разрушение цилиндрических образцов конструкционных сталей при растяжении и способствуют стабилизации процесса закритического деформирования [8]. Исходя из этого, можно предположить, что дополнительные вибрационные воздействия помимо изменения остаточных механических характеристик могут также влиять на процессы накопления повреждений и разрушения композитов. Методика экспериментального исследования процессов деформирования и разрушения слоисто-волоконистых стержневых и трубчатых композиционных образцов при дополнительных крутильных циклических воздействиях на различных стадиях квазистатического растяжения схематично представлена на рисунке 2.22.

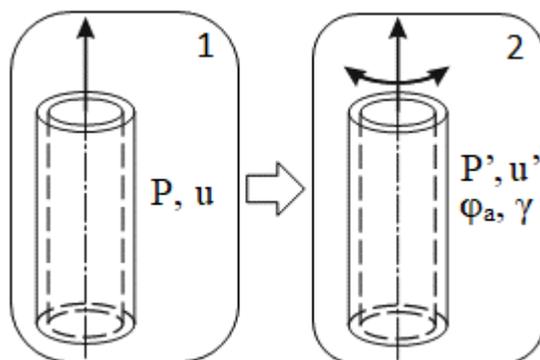


Рисунок 2.22 – Схематическое представление испытаний на растяжение с дополнительными крутильными вибрационными воздействиями

Методика включает в себя следующие испытания:

- 1) проведение испытаний на одноосное растяжение с определением значения максимальных растягивающих усилий при разрушении  $P$ ;
- 2) испытания на растяжение с дополнительными крутильными вибрационными воздействиями с малой амплитудой и высокой частотой.

Приведенные методики испытаний композиционных материалов могут быть использованы для получения новых экспериментальных данных и зависимостей о механическом поведении при комплексных последовательных квазистатических, циклических и низкоскоростных ударных воздействиях в широком диапазоне температур.

### **Выводы по главе**

1. Проведен анализ существующих современных стандартов и методик в области квазистатических, циклических и низкоскоростных динамических испытаний полимерных композиционных материалов при совместном использовании современного испытательного и диагностического оборудования.
2. Проанализированы особенности и разработаны оригинальные методики испытаний композитных образцов при последовательных циклических, ударных и квазистатических воздействиях в условиях нормальных и повышенных температур.
3. Даны рекомендации по дальнейшему использованию экспериментальных данных, полученных по разработанным методикам.

Основные результаты, содержащиеся в главе, отражены в публикациях автора [10, 64, 66, 68, 69, 150, 162].

### **3. ПРОЦЕССЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ В УСЛОВИЯХ ЦИКЛИЧЕСКИХ И КВАЗИСТАТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

Глава посвящена результатам исследований влияния предварительных циклических воздействий с различными параметрами на остаточные прочностные и жесткостные свойства образцов ПКМ с различными углами укладки армирующих слоев в условиях комнатных и повышенных температур. Изучено влияние продолжительности циклического воздействия на остаточные механические характеристики композитов, полученные новые экспериментальные данные представлены в виде диаграмм усталостной чувствительности. Проанализировано влияние различных параметров циклического воздействия на статические механические свойства композитов. Получены экспериментальные зависимости изменения усталостной чувствительности стеклопластиковых образцов в условиях повышенных температур. Проведено исследование влияния дополнительных вибрационных воздействий на процессы накопления повреждений и разрушения стержневых стеклопластиковых и углепластиковых трубчатых образцов с концентраторами в процессе квазистатического растяжения.

#### **3.1 Закономерности изменения прочностных и деформационных свойств стеклопластиков в процессе усталостного накопления повреждений**

Экспериментальное исследование зависимости изменения остаточных свойств в процессе усталостного накопления повреждений было выполнено при испытании слоисто-волоконистых ПКМ. Образцы были изготовлены на основе препрега ВПС-48 и связующего ВСЭ 1212 со схемой армирования  $[0^\circ/90^\circ]_8$ , размерами рабочей зоны  $140 \times 10$  мм. Программа испытаний включала в себя испытания 23 образцов, разделенных на пять групп. Каждая группа образцов отличалась степенью предварительного циклического нагружения, лежащей в диапазоне  $N$  от 0 до  $1,75 \cdot 10^5$  циклов нагружения, и еще одна группа испытывалась

до разрушения на усталостную долговечность при тех же параметрах цикла. Предварительное циклическое нагружение осуществлялось на испытательной системе Instron ElectroPuls E10000. Образцы испытывались на одном уровне амплитуды напряжения с максимальным значением напряжений  $\sigma_{\max} = 0,5 \cdot \sigma_B$ , здесь  $\sigma_B$  - предел прочности материала, коэффициентом асимметрии  $R=0,1$  и частотой  $\nu = 20$  Гц.

Разогрев материала при циклическом нагружении может приводить к процессам изменения свойств связующего. В процессе циклических испытаний при помощи инфракрасной тепловизионной системы FLIR SC 7700M контролировалось изменение температуры на рабочей поверхности образцов.

Механические свойства композита определялись при квазистатических испытаниях на одноосное растяжение. Испытания проводились на электромеханической системе Instron 5882 с постоянной скоростью перемещения траверсы 2 мм/мин.

В результате проведенного исследования были получены экспериментальные данные, представленные в виде диаграмм деформирования (рис. 3.1).

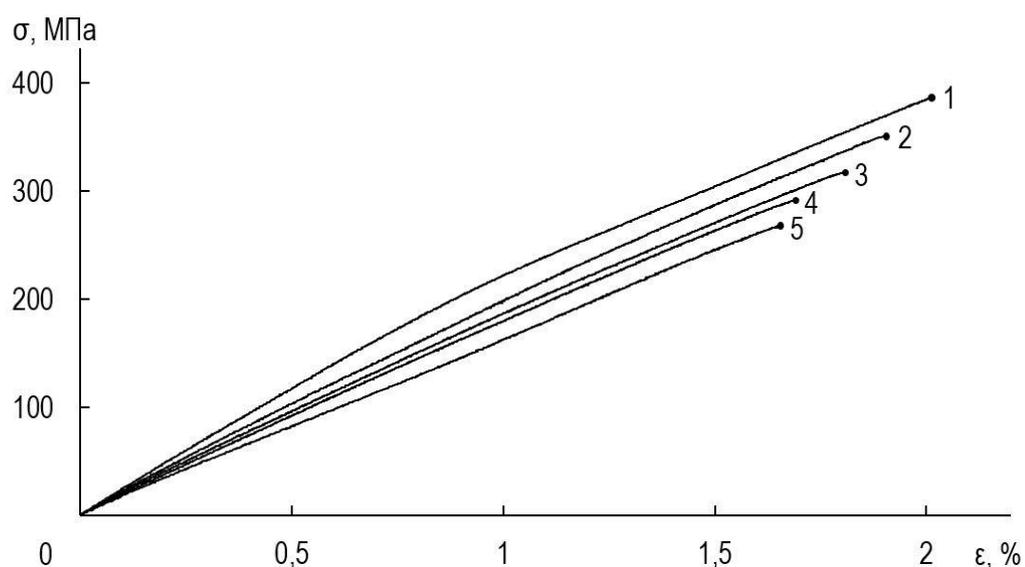


Рисунок 3.1 – Диаграммы деформирования стеклопластиковых образцов (1 - без предварительного циклического воздействия; 2 -  $25 \cdot 10^3$  циклов; 3 -  $75 \cdot 10^3$  циклов; 4 -  $125 \cdot 10^3$  циклов; 5 -  $175 \cdot 10^3$  циклов)

Для случая различной продолжительности предварительного циклирования естественно, что предел прочности снижается по мере увеличения продолжительности предварительного усталостного воздействия.

Диаграмма зависимости остаточного предела прочности стеклопластиковых образцов от предварительного циклического нагружения представлена на рисунке 3.2. Точка, соответствующая значению  $\sigma_B = 0$ , соответствует усталостному разрушению образцов при тех же параметрах цикла, что и при предварительном циклическом нагружении.

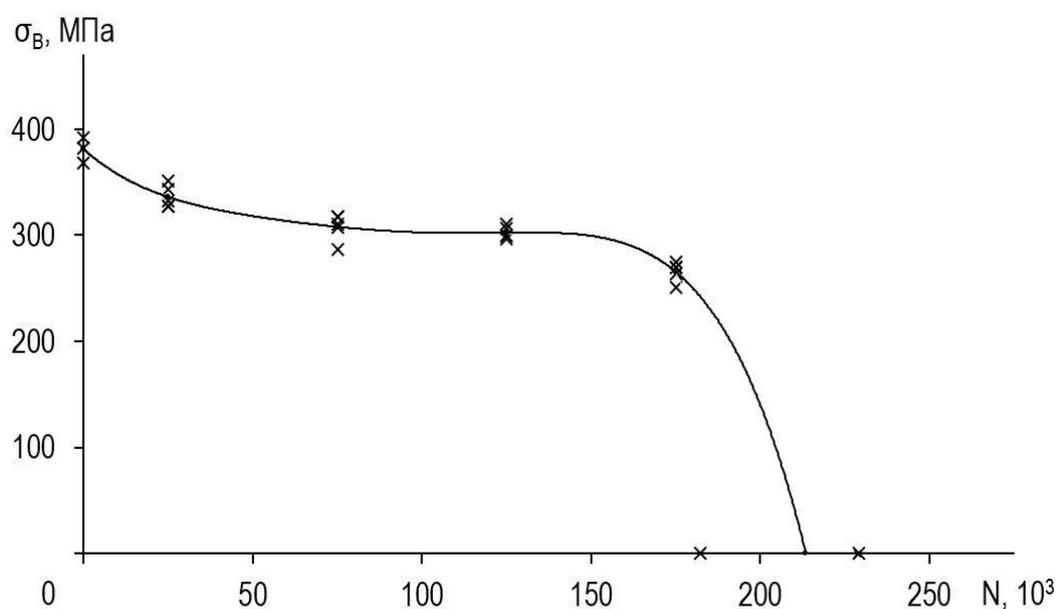


Рисунок 3.2 – Диаграмма зависимости остаточного предела прочности от предварительного циклического нагружения

Стоит обратить внимание на важную особенность механического поведения материала, на участке от 0 до  $50 \cdot 10^3$  циклов в процессе увеличения числа циклов предварительного усталостного воздействия снижение предела прочности образцов материала составило около 20%. На следующем интервале от  $50 \cdot 10^3$  до  $150 \cdot 10^3$  циклов снижения предела прочности практически не происходит. В последнем диапазоне от  $150 \cdot 10^3$  до  $210 \cdot 10^3$  циклов наблюдается резкое снижение предела прочности исследуемого материала.

Процессы накопления повреждений, такие как разрыв армирующих волокон, растрескивание матрицы, расслоение, сопровождаются резким повышением

температуры образца. Эпюры температур в рабочей зоне образцов (рис. 3.3), построенные по полученным в ходе испытаний данным, указывают на то, что процессы накопления повреждений на участке от 0 до  $150 \cdot 10^3$  циклов происходили равномерно по всей рабочей зоне образцов (эпюры №2,3). В диапазоне 150 -  $200 \cdot 10^3$  циклов наблюдается увеличение температуры в области разрушения образца (эпюра №4), что подтверждается результатами эксперимента, Зона локализации повреждений образуется после  $N = 125 \cdot 10^3$  циклов.

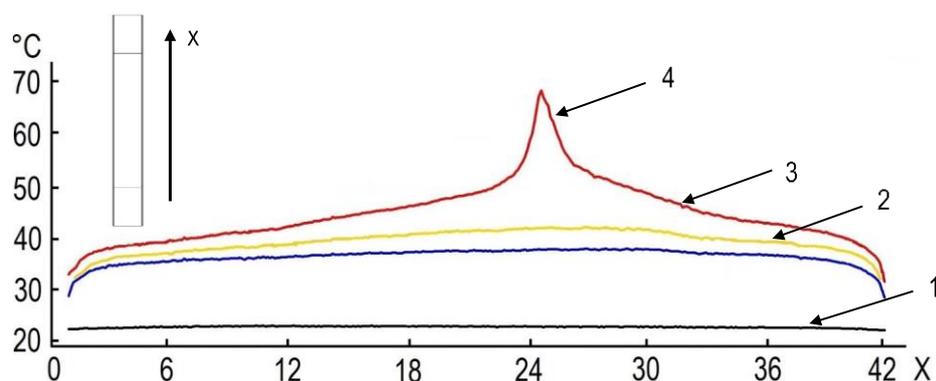


Рисунок 3.3 – Эпюры температур в продольном направлении рабочей области образцов (1 - в начальный момент испытаний, 2 -  $25 \cdot 10^3$  циклов, 3 -  $175 \cdot 10^3$  циклов, 4 - в момент разрушения)

Оценка влияния предварительных циклических воздействий на остаточные прочностные свойства стеклопластиковых образцов проведена с использованием относительного изменения модуля упругости  $\omega_E = 1 - E_n/E$ , где  $E_n$  - модуль упругости после предварительного циклирования,  $E$  - модуль упругости без предварительного циклирования.

Аналогичным образом изменение предела прочности можно описать с помощью следующего выражения  $\omega_B = 1 - \sigma_{Bn}/\sigma_B$ . Зависимости введенных изменений остаточной жесткости и прочности представлены на рисунке 3.4.

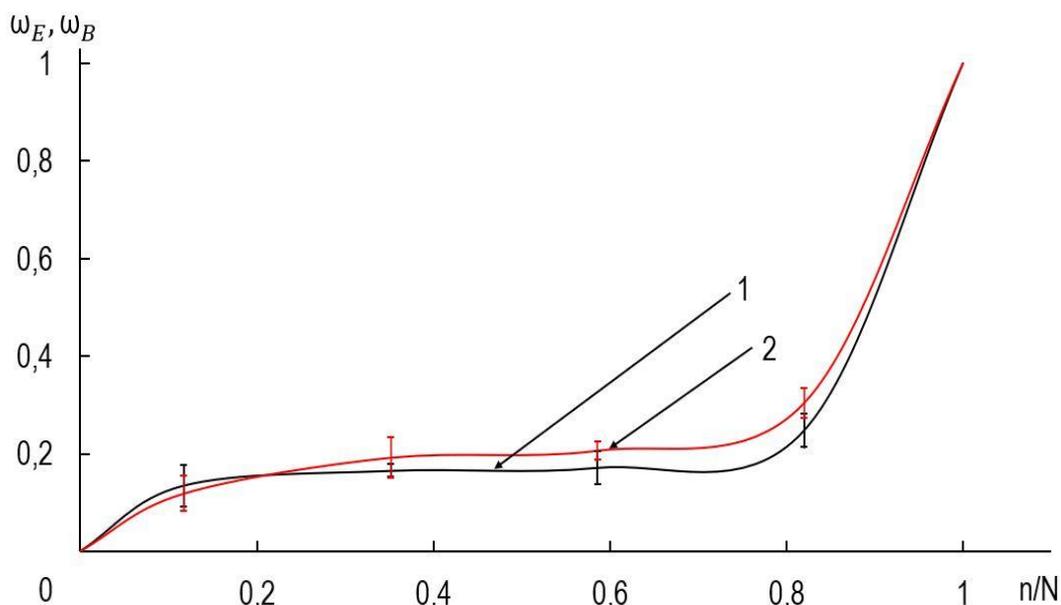


Рисунок 3.4 – Диаграммы относительного изменения модуля упругости  $\omega_E$ (1) и снижения остаточного предела прочности  $\omega_B$  (2)

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что характер изменения жесткостных свойств, описанные с помощью относительного изменения модуля упругости  $\omega_E$ , и прочностных, описанные с помощью  $\omega_B$ , схож в процессе усталостного накопления повреждений.

Для описания изменения прочностных свойств слоисто-волоконистых композитов при циклическом воздействии с различной продолжительностью предлагается ввести диаграмму усталостной чувствительности в относительных координатах  $K_{Bn}'$ ;  $n'$  (рис. 3.6). Переход к относительным координатам необходим для универсальности диаграммы усталостной чувствительности.

$K_{Bn}' = \sigma_{Bn} / \sigma_B$  - коэффициент сохранения статической прочности в условиях циклического нагружения, где  $\sigma_{Bn}$  - предел прочности после циклического воздействия,  $\sigma_B$  - предел прочности без циклического воздействия.

$n' = n / N$  - относительное число циклов предварительного циклического воздействия, где  $n$  - число циклов предварительного циклического воздействия,  $N$  - предельное число циклов до разрушения, при заданных параметрах.

Диаграмма усталостной чувствительности схематично разбивается на 3 характерные зоны: I - стадия начальной усталостной чувствительности; II - стадия

стабилизации усталостной чувствительности; III - стадия обострения усталостной чувствительности.

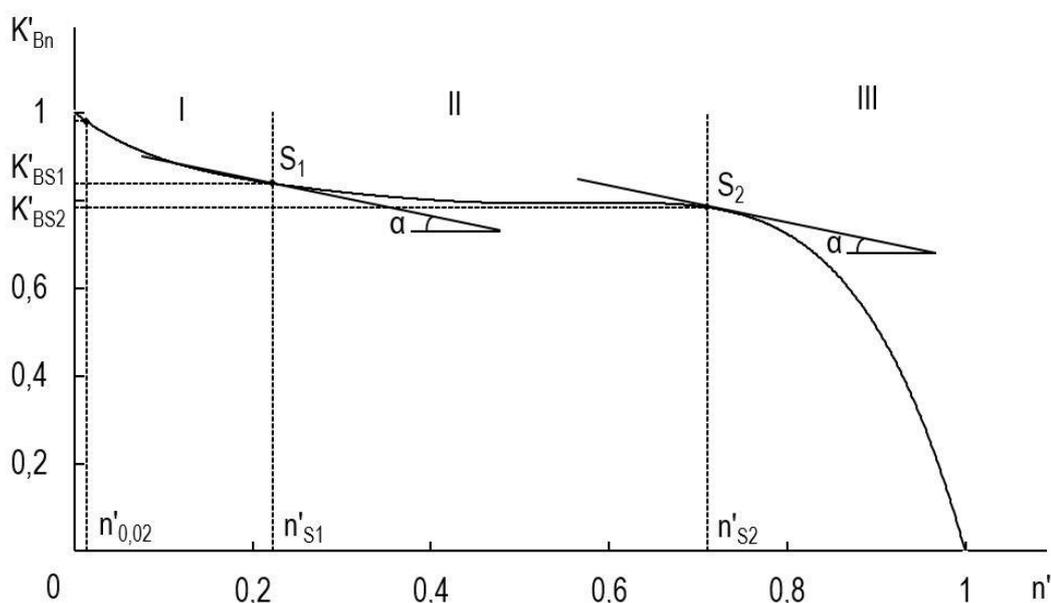


Рисунок 3.6 – Диаграмма усталостной чувствительности стеклопластиковых образцов

При усталостном нагружении на стадии первых циклов происходят процессы разрушения самых непрочных связей, охарактеризовать поведение образцов на данной стадии можно с помощью порога усталостной чувствительности  $n'_{0,02}$  - это пороговое значение относительно числа циклов, при котором изменение прочности не будет превышать условно выбранного значения 2%.

Точки  $S_1$  и  $S_2$  - точки начала и завершения участка стабилизации усталостной чувствительности. Для выбора положения точек  $S_1$  и  $S_2$  вводится значение  $\delta$ , это величина тангенса угла наклона касательной  $\alpha$  в точках на кривой усталостной чувствительности.

$$\delta = \operatorname{tg} \alpha = - \frac{N}{\sigma_B} \frac{d\sigma_{Bn}}{dn'} \quad (3.1)$$

Значение  $\delta$  может быть выбрано отдельно для каждого материала. В рассматриваемом случае выбрано  $\delta = 0,3$ , что соответствует изменению значения  $K'_{Bn}$  в пределах 5%.

$K_{BS1}'$ ,  $K_{BS2}'$  - начальное и конечное значения коэффициента сохранения статической прочности на стадии стабилизации усталостной чувствительности.

Для данного материала значения коэффициентов составляло  $K_{BS1}' = 0,83$  ( $\sigma_{BS1} = 319,8$  МПа),  $K_{BS2}' = 0,78$  ( $\sigma_{BS2} = 297,0$  МПа). Порог усталостной чувствительности  $n'_{0,02} = 2\ 744$  циклов.

Протяженность стадии стабилизации усталостной чувствительности (II - стадия) составляла 49% от предельного числа циклов для исследуемых стеклопластиковых образцов.

Диаграмма усталостной чувствительности может быть использована для анализа остаточных прочностных ресурсов конструкций из композиционных материалов. Например, при циклическом воздействии продолжительностью 3000 циклов на конструкцию из слоисто-волоконистых композитов данной рецептуры усталостное разрушение не происходит, но статический предел прочности снижается значительно - на 20%. Таким образом, при проектировании конструкций использование диаграммы усталостной чувствительности для прогнозирования статической прочности является целесообразным.

### **3.2 Усталостная чувствительность стеклопластиковых композитов с различными схемами укладки армирующих слоев и параметрами циклического воздействия**

Исследование усталостной чувствительности образцов слоисто-волоконистых ПКМ проведено для образцов с углами укладки армирующих слоев  $[0/90]_n$ ,  $[0/30/0/60]_n$ ,  $[\pm 45]_n$ . Все образцы имели одинаковую рецептуру и режимы формования. Методика исследования была аналогичной как в предыдущем пункте 3.1. Стоит отметить существенную разницу процессов деформирования и разрушения для образцов с укладкой  $[\pm 45]_n$  по сравнению с другими  $[0/90]_n$ ,  $[0/30/0/60]_n$  схемами армирования. При такой схеме укладки усталостное разрушение происходило за 1000 - 1500 циклов при параметрах циклического

нагружения  $\sigma_{\max} = 0,5 \cdot \sigma_B$ , поэтому значение напряжений в цикле было выбрано на линейном участке диаграммы деформирования и составляло  $\sigma_{\max} = 0,35 \cdot \sigma_B$  (рис. 3.7).

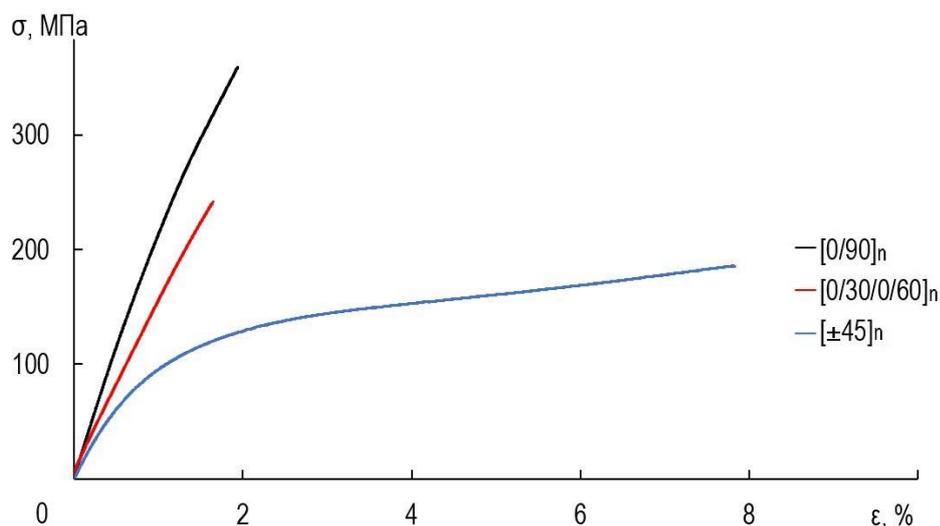


Рисунок 3.7 – Характерные диаграммы деформирования стеклопластиковых образцов с различными углами укладки армирующих слоев

В результате испытаний на предварительное циклическое и последующее квазистатическое растяжение были получены диаграммы зависимости остаточной прочности от наработки (рис. 3.8).

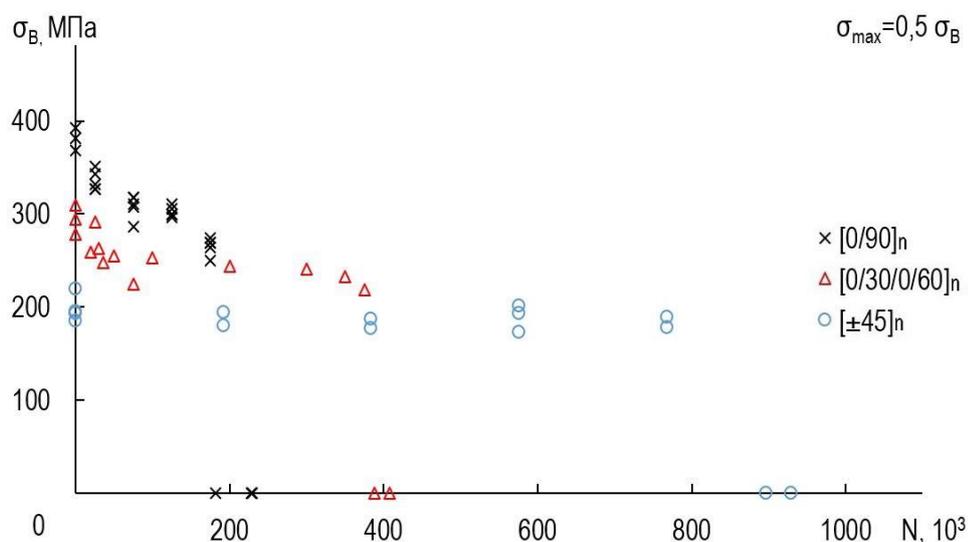


Рисунок 3.8 – Зависимость остаточного предела прочности стеклопластиковых образцов с различными углами укладки армирующих слоев от величины предварительного циклического нагружения

Для удобства анализа процессов изменения остаточной прочности после предварительного циклического воздействия экспериментальные данные представлены в виде диаграмм усталостной чувствительности (рис. 3.9) [162]. Значения  $K_{Bn}' = 1$  при  $n'=0$  получены из экспериментов на квазистатическое растяжение,  $K_{Bn}' = 0$ ;  $n'=1$  - усталостное разрушение. Промежуточные точки получены при испытаниях на растяжения после предварительного циклирования различной продолжительности.

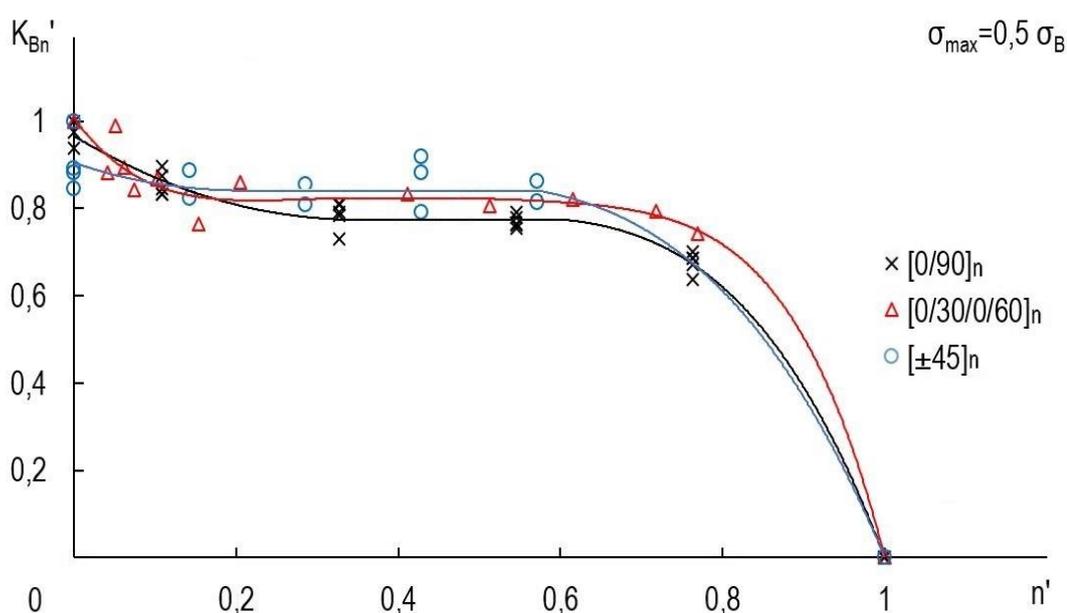


Рисунок 3.9 – Диаграммы усталостной чувствительности стеклопластиковых образцов с различными углами укладки армирующих слоев

Для образцов с углами укладки  $[0/90]_n$  и  $[0/30/0/60]_n$  на диаграмме усталостной чувствительности можно выделить три зоны: начальной, стабилизации и обострения усталостной чувствительности. Изменение остаточных прочностных характеристик для образцов с укладкой армирующих слоев  $[\pm 45]_n$  происходило в две стадии, без участка начальной усталостной чувствительности. Стоит отметить, что участок начальной чувствительности для образцов  $[0/90]_n$

находился в диапазоне от 0 до  $0,3 \cdot n'$ , стабилизации от  $0,3 \cdot n'$  до  $0,6 \cdot n'$ , обострения от 0,6 до  $1 \cdot n'$ ; для образцов  $[0/30/0/60]$  участок начальной чувствительности от 0 до  $0,2 \cdot n'$ , стабилизации от  $0,2 \cdot n'$  до  $0,7 \cdot n'$ , обострения от  $0,7 \cdot n'$  до  $1 \cdot n'$ .

На рисунке 3.10 представлены фотографии образцов после усталостного разрушения. У образцов с укладкой  $[\pm 45]_n$  в процессе циклического нагружения наблюдалось постепенное вытягивание и разрушение в направлении укладки армирующих волокон по типу в соответствии с классификацией стандартов ГОСТ Р 56785 – УРС, ASTM D3039 – AGM. Образцы с углами укладки  $[0/90]_n$  и  $[0/30/0/60]_n$  разрушение происходило по схеме нормального отрыва в соответствии с классификацией стандартов ГОСТ Р 56785 – ГРВ, ASTM D3039 – LGT.

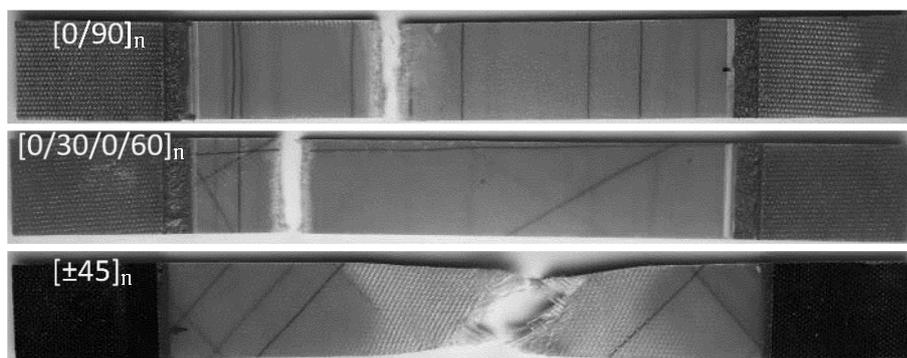


Рисунок 3.10 – Фотографии разрушенных стеклопластиковых образцов с различными схемами укладки армирующих слоев

Таким образом, при анализе диаграммы усталостной чувствительности выявлено, что трех стадийный характер изменения остаточных прочностных и деформационных свойств стеклопластиков характерен для образцов, у которых в структуре присутствуют направления армирования, совпадающие с приложением нагрузки.

Исследование закономерностей изменения остаточной жесткости и прочности полимерных композитов при усталостном накоплении повреждений с различными параметрами предварительного циклического воздействия в диапазоне от  $0,4 \cdot \sigma_{\max}$  до  $0,6 \cdot \sigma_{\max}$  выполнено для образцов с углами армирования  $[0/90]_n$ . Методика исследования была аналогичной методике, описанной ранее.

В результате получены опытные данные, отражающие изменение остаточной прочности стеклопластиковых образцов, установленных из испытаний на квазистатическое растяжение с различными параметрами предварительного циклического воздействия (рис. 3.11). На диаграмме зависимости остаточной прочности стеклопластиковых образцов от циклического воздействия с различными параметрами видно, что при увеличении продолжительности предварительного циклического воздействия снижается остаточная прочность, а повышение значения амплитуды напряжений в цикле способствовало снижению усталостной долговечности образцов.

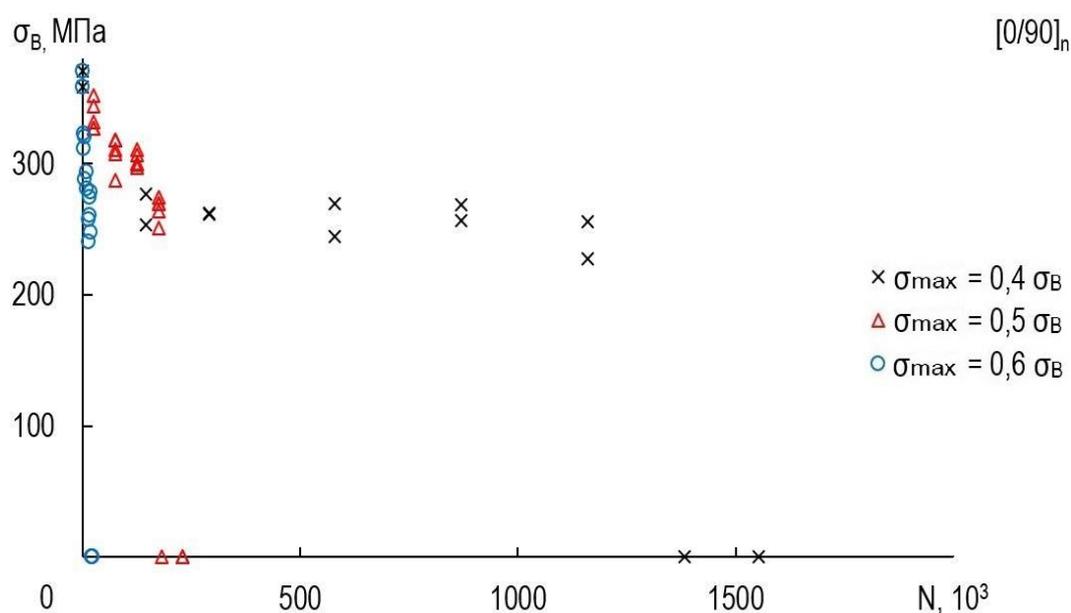


Рисунок 3.11 – Диаграмма зависимости остаточной прочности стеклопластиковых образцов от циклического воздействия с различными параметрами

Экспериментальные данные приведены в виде диаграмм усталостной чувствительности в результате обработки в соответствии с разработанной методикой (рис. 3.12).

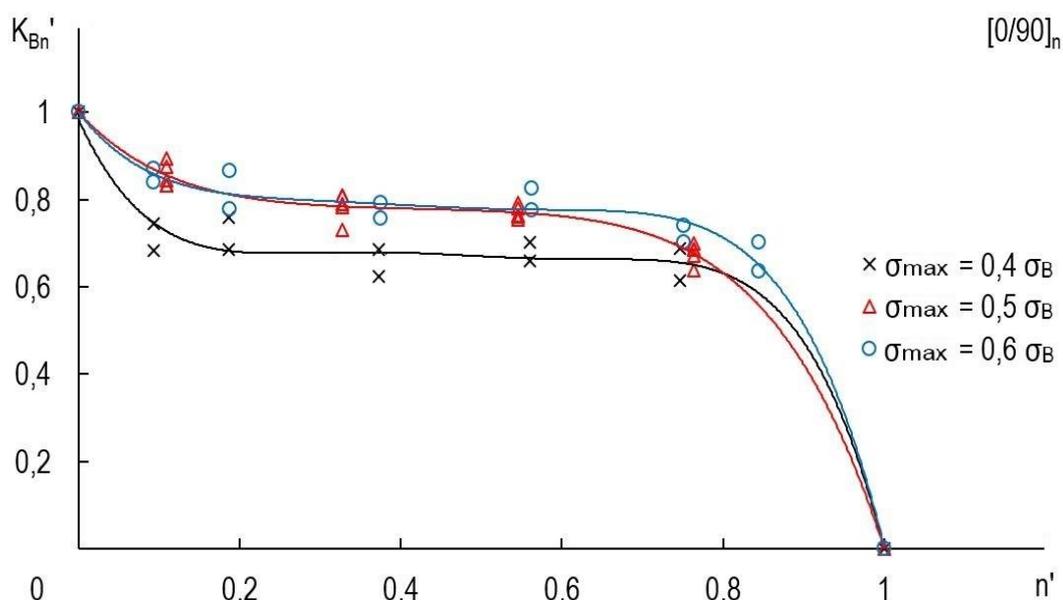


Рисунок 3.12 – Диаграмма усталостной чувствительности стеклопластиковых образцов с различными параметрами предварительного циклического воздействия

Анализ построенных диаграмм усталостной чувствительности (рис. 3.12) позволяет сделать вывод, что циклическое воздействие с параметрами  $\sigma_{\max} = 0,4 \cdot \sigma_B$  уже в диапазоне предварительных воздействий от 0 до  $0,2 \cdot n'$  привело к снижению остаточного предела прочности при растяжении на 30 %, в то время, как для образцов, испытанных при  $\sigma_{\max} = 0,5 \cdot \sigma_B$  и  $\sigma_{\max} = 0,6 \cdot \sigma_B$ , менее чем на 20%. Для исследуемых стеклопластиковых образцов при изменении параметров воздействия сохраняется стадийность изменения остаточной прочности, характеризующаяся наличием участков начальной, стабилизации и обострения усталостной чувствительности. Стоит отметить, что для образцов, испытанных при значении максимального напряжения в цикле  $\sigma_{\max} = 0,5 \cdot \sigma_B$  и  $\sigma_{\max} = 0,6 \cdot \sigma_B$ , переход между участками начальной усталостной чувствительности и стабилизации происходил примерно при одном значении  $n' = 0,3$ . Значения коэффициента сохранения статической прочности были близкими до  $n' = 0,5$ , где для кривой  $\sigma_{\max} = 0,5 \cdot \sigma_B$  происходило резкое снижение  $K_{Bn}'$ , характерное для стадии обострения усталостной чувствительности. Протяженность участка стабилизации при циклировании  $\sigma_{\max} = 0,5 \cdot \sigma_B$  составляла 25% от относительного числа циклов предварительного циклирования и лежала в диапазоне от  $0,3 \cdot n'$  до  $0,55 \cdot n'$ . При

воздействии  $\sigma_{\max} = 0,4 \cdot \sigma_B$  снижение остаточной прочности на участке начальной усталостной чувствительности составляло 15%, однако при таких параметрах предварительного циклического воздействия участок стабилизации был самый протяженный от 0,2 до  $0,8 \cdot n'$ .

По аналогии с методикой построения диаграммы усталостной чувствительности, для оценки изменения остаточных статических жесткостных свойств, построена диаграмма изменения остаточной жесткости стеклопластиковых образцов в относительных координатах  $K'_{En}; n'$ . Значения остаточного статического модуля упругости определялись на линейном участке диаграммы деформирования.

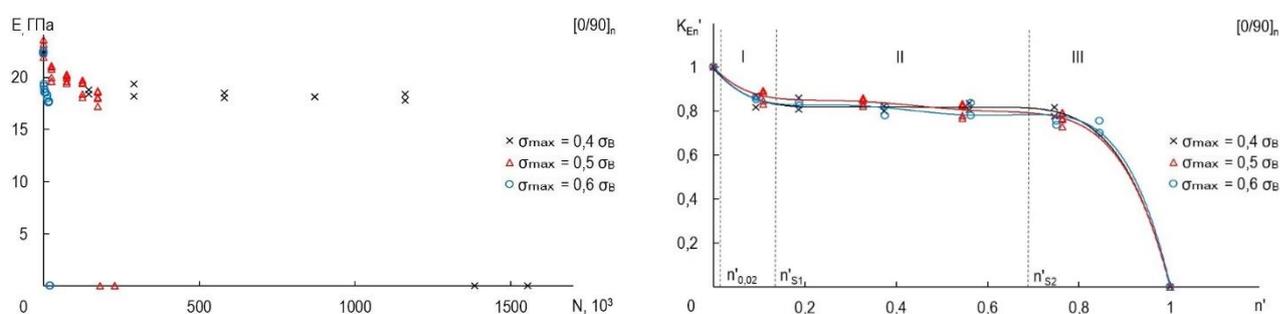


Рисунок 3.13 – Диаграммы зависимости остаточной жесткости стеклопластиковых образцов от предварительного циклического воздействия с различными параметрами в абсолютных (а) и относительных (б) значениях

При анализе диаграммы изменения жесткости стеклопластиковых образцов отмечается, что вариации параметров предварительного циклического воздействия не сказались на виде кривых, описывающих изменение остаточной жесткости в процессе усталостного накопления повреждений. Для исследуемого материала в диапазоне циклического воздействия от  $0,4 \cdot \sigma_{\max}$  до  $0,6 \cdot \sigma_{\max}$  порог усталостной чувствительности –  $n'_{0,02}$ , начало –  $n'_{s1}$  и конец –  $n'_{s2}$  участка стабилизации, а также участок обострения усталостной чувствительности имеют близкие значения.

### 3.3 Диаграмма усталостной чувствительности стеклопластиковых композитов при повышенных температурах

Актуальным направлением исследований экспериментальной механики композитов является изучение и анализ влияния повышенных и пониженных (эксплуатационных) температур на механические свойства и механизмы разрушения композиционных материалов и установления температурных зависимостей упругих и прочностных характеристик композитов, применяемых в ответственных конструкциях [116, 118, 119]. Повышенные температуры могут значительно оказывать влияние на процессы деформирования и разрушения, усталостной долговечности и живучести полимерных композитов.

Методика исследования и материалы были аналогичными, описанным в пункте 3.1, отличие заключалось в температуре окружающей среды.

Группы образцов испытывались при температурах 22 °С, 120 °С, данные температурные режимы выбраны из ТУ на материалы.

Режим термостатирования включал в себя линейный нагрев образцов до выбранной температуры со скоростью 10 °С/мин и выдержку в течении 2 часов для всей группы образцов и 0,5 часа после каждой последующей установки образца.

Зависимости изменения остаточных прочностных свойств от предварительных циклических воздействий и повышенной температуры представлены на рисунке 3.14, в виде диаграммы усталостной чувствительности.

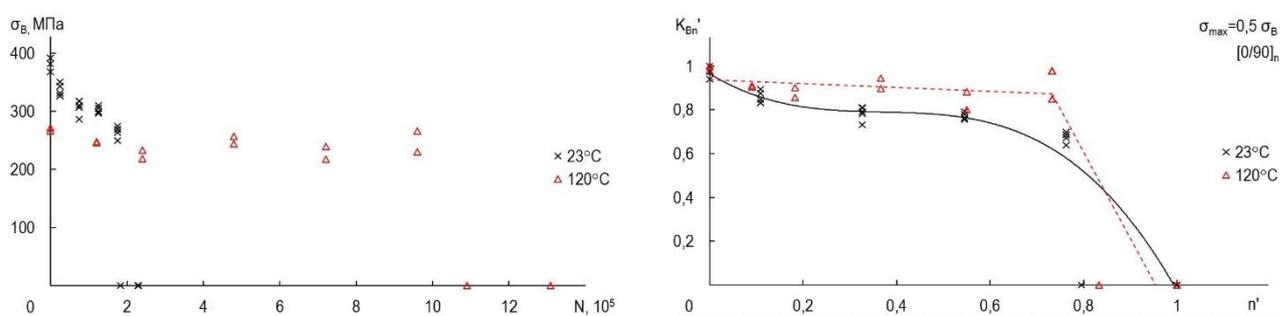


Рисунок 3.14 – Диаграммы зависимости остаточного предела прочности от предварительного циклического воздействия (а) и усталостной чувствительности (б) при комнатных и повышенных температурах

Анализ результатов испытаний при повышенных температурах показал, что по сравнению с образцами, испытанными при комнатной температуре, снижение значения остаточного предела прочности происходило в две стадии, без участка начальной усталостной чувствительности. На участке усталостной чувствительности от  $0,1 \cdot n'$  до  $0,8 \cdot n'$  изменение значения коэффициента сохранения статической прочности в условиях циклического нагружения ( $K_{Bn}'$ ) не превышало 5%, что соответствует стадии стабилизации. Для образцов, испытанных при комнатной температуре, значение  $K_{Bn}'$  на участке стабилизации было ниже на 15% по сравнению с образцами, испытанными при повышенной температуре. На участке обострения от  $0,8 \cdot n'$  до  $1 \cdot n'$  происходило резкое снижение остаточной прочности с последующим усталостным разрушением образцов.

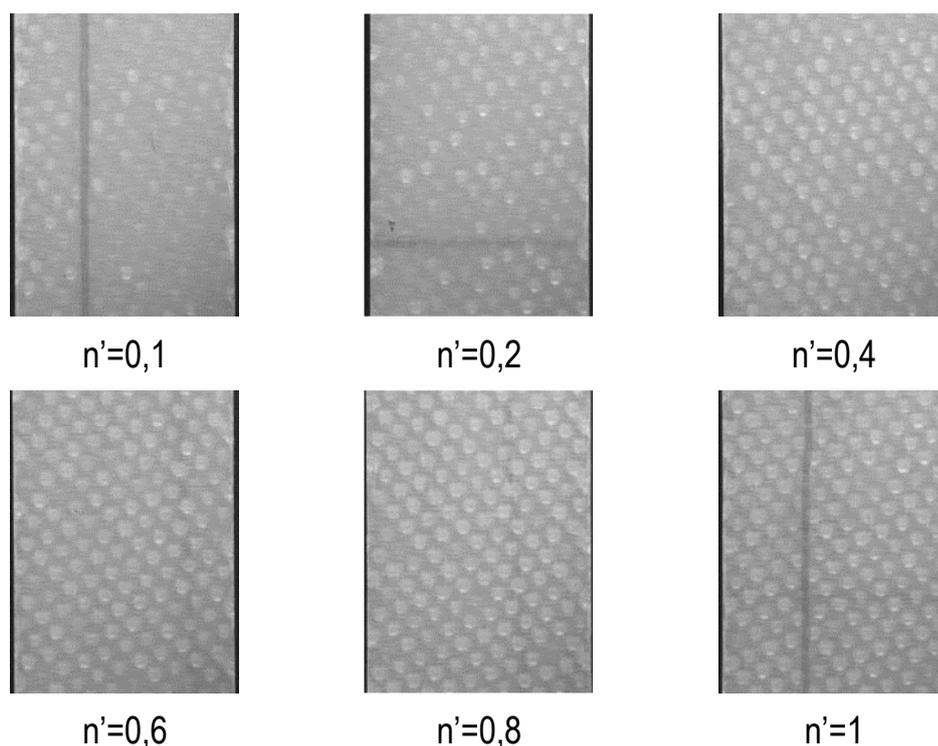


Рисунок 3.15 – Фотографии поверхности рабочей зоны стеклопластиковых образцов

На рисунке 3.15 представлены фотографии поверхности рабочей зоны образцов после предварительного циклического нагружения с различной

наработкой циклов. На поверхности образцов видны локальные зоны расслоения (белые пятна), образовавшиеся в процессе усталостного накопления повреждений.

### **3.4 Деформирование и разрушение углепластиковых трубчатых образцов при дополнительных циклических воздействиях на различных стадиях квазистатического нагружения**

С целью исследования влияния возможных эффектов дополнительных вибрационных воздействий на процессы деформирования и разрушения полимерных композиционных материалов проведены серии экспериментов стеклопластиковых однонаправленных стержневых образцов диаметром 8 мм (ГОСТ 31938-12) в соответствии с разработанными методиками.

Под вибрационными воздействиями подразумевается циклическое нагружение с малой амплитудой угла закручивания  $\varphi_a$  и большой частотой  $\nu$ .

Для реализации такого сложного нагружения необходимо учитывать жесткость нагружающей испытательной системы [51]. Универсальная двухосевая испытательная система Instron 8802 обладает наибольшей жесткостью и позволяет реализовывать сложные режимы нагружения.

В процессе проведения экспериментальных исследований были решены методические аспекты проведения испытаний композиционных стержневых образцов. Методические особенности, связанные с закреплением образцов в испытательной системе, были решены путем изготовления специальных медных полу гильз (рис. 3.16), степень обжатия втулок с образцом составляло 150 бар.

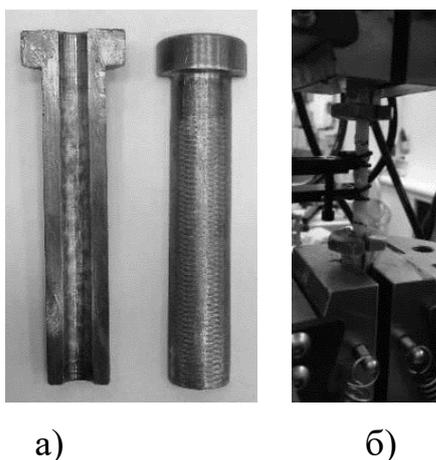


Рисунок 3.16 – Приспособления (а) для закрепления образцов-стержней в захватах испытательной системы (б)

В специализированном ПО WaveMatrix задавались параметры испытаний такие как: скорость перемещения траверсы 0,19 мм/мин, частота дополнительных крутильных колебаний  $\nu = 20$  Гц, и амплитудой угла закручивания  $\varphi_a = 1^\circ$ .

В результате экспериментальных исследований, помимо снижения значения максимальной нагрузки, были выявлены характерные зависимости влияния дополнительных вибрационных воздействий на поведение образцов и реализацию деформационных ресурсов образцов (рис. 3.17).

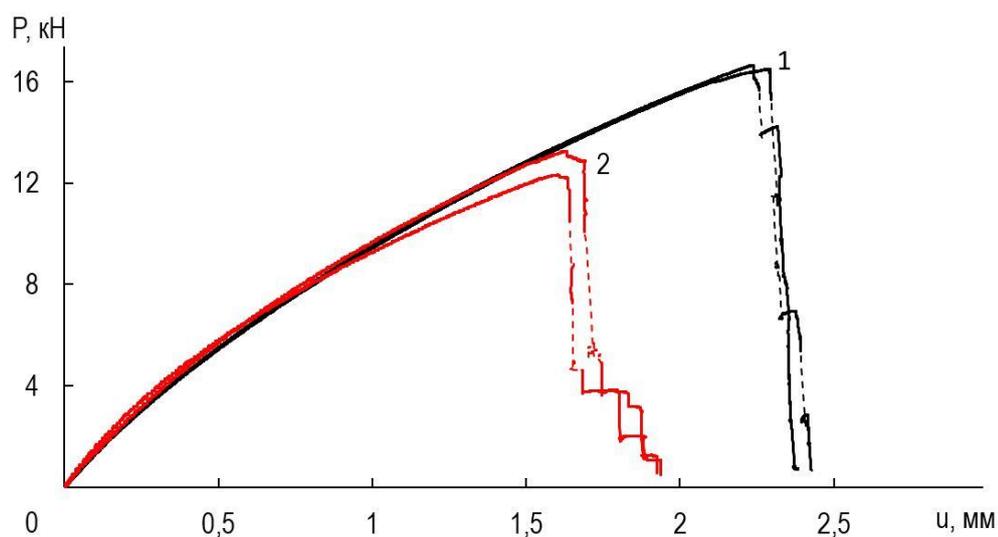


Рисунок 3.17 – Диаграммы нагружения образцов-стержней (1 – без дополнительных вибрации, 2 – с дополнительными вибрационными воздействиями) штриховой линией обозначены зоны динамического разрушения

Из диаграммы видно, что благодаря дополнительным вибрационным воздействиям снижается максимальная нагрузка  $P_{\max}$  и кривая, описывающая процесс разрушения образца, становится протяжённой (рис. 3.17). Срывы на стадии разрушения (переход к динамической стадии разрушения) происходили позже. Характер разрушения образцов-стержней имел ступенчатый вид. В дальнейшем однонаправленные стеклопластиковые стержневые образцы вклеивались в латунные гильзы (рис. 3.18).

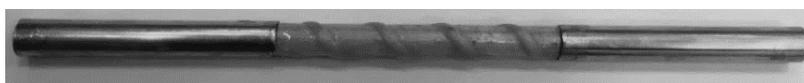


Рисунок 3.18 – Образец стеклопластиковой композиционной арматуры, вклеенный в латунные гильзы

Дополнительно было проведено исследование влияния вибрационных воздействий с различными параметрами на процессы деформирования и разрушения стеклопластиковых стержней. Результаты приведены в виде диаграмм нагружения (рис. 3.19). Для наглядности кривые смещены относительно друг друга по оси абсцисс ( $u$ , мм).

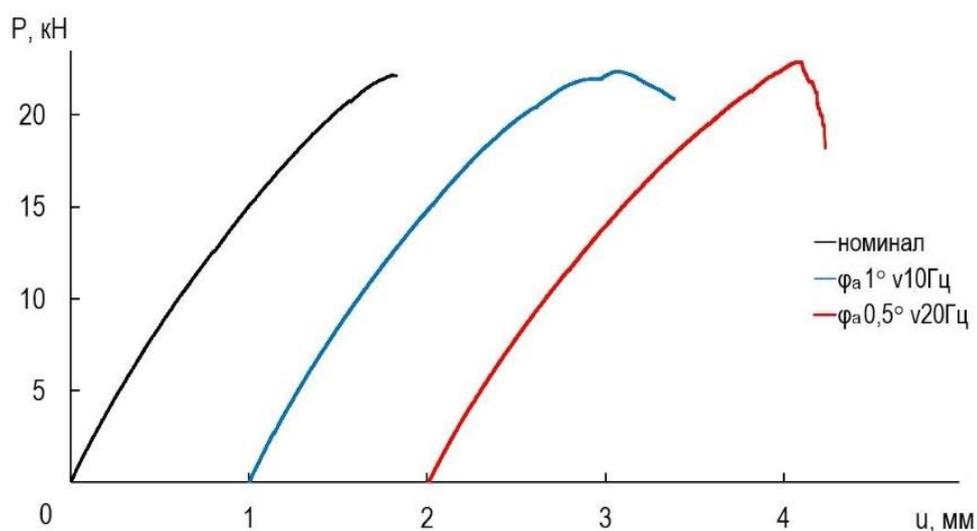


Рисунок 3.19 – Характерные диаграммы нагружения однонаправленных композиционных образцов-стержней

В результате можно сделать вывод, что параметры дополнительных крутильных колебаний могут оказывать влияние на поведение материала в процессе разрушения и на реализацию деформационных ресурсов стеклопластиковых стержневых образцов. На рисунке 3.19 видно, как изменение параметров крутильных колебаний сказывается на наклоне ниспадающей кривой при разрушении. Стоит отметить, что увеличение амплитуды колебаний привело к снижению числа срывов на кривой нагружения образца.

Для исследования влияния дополнительных вибрационных воздействий на процессы деформирования и разрушения композиционных элементов конструкций, таких как тонкостенные трубки, отработана методика проведения испытаний при совместном использовании двухосной нагружающей системы Instron 8850 и системы регистрации полей перемещений и деформаций Vic-3D Correlated Solutions (рис. 3.20).



Рисунок 3.20 – Фотография испытательной системы Instron 8852 и видеосистемы Vic 3D при испытаниях на растяжение с кручением трубчатых образцов

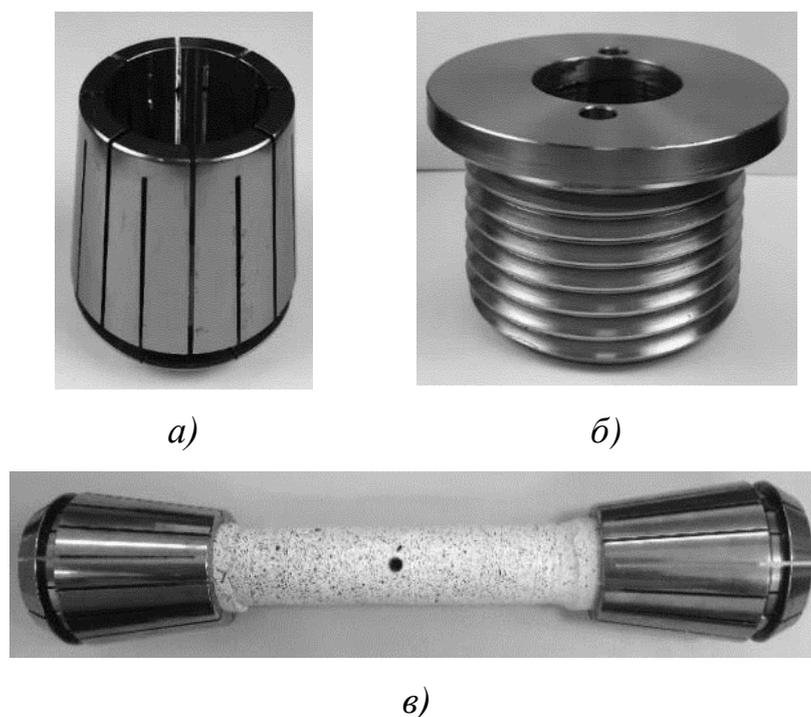


Рисунок 3.21 – Разрезная цанга с номинальным рабочим диаметром 28-30 мм (а), прижимная гайка для фиксации цанги (б), трубчатый образец с установленными цангами (в)

В рамках исследования решены методические аспекты испытаний трубчатых образцов при испытаниях на растяжение с кручением в условиях плоского напряженного состояния, в частности, решены вопросы подготовки захватных частей образцов и закрепления в захватах испытательной системы. Отработка методики испытаний проводилась на трубчатых углепластиковых образцах с внешним диаметром 26 мм и толщиной стенки 2 мм с концентратором в виде отверстия диаметром 5 мм, изготовленные на основе углеродного ровинга T700SC-12000-50C и связующего Этал-Инжект SL/M.

Закрепление образцов осуществлялось с использованием захватов цангового типа с применением цанг с диапазоном рабочего диаметра 28-30 мм. На рисунке 3.21 – а приведена цанга, прижимная гайка (рис. 3.21, б) для фиксации цанги в корпусе захвата и образец с установленными цангами (рис. 3.21, в). Для предотвращения разрушения образца при обжатии были реализованы различные способы подготовки захватных частей образцов и внутреннего заполнения на

глубину хватных частей. Используемый тип хватов и способ установки обеспечивает равномерное обжатие основного материала композитного образца при нагружении. В зависимости от типа образца и прикладываемых нагрузок давление в контуре хватов может варьироваться в диапазоне от 40 бар до 200 бар.

Одним из основных методических вопросов при испытаниях образцов композиционных материалов, и в особенности трубчатых образцов в условиях совместного растяжения с кручением, является способ закрепления образцов в хватах испытательной машины, позволяющий реализовать нагрузки, необходимые для деформирования и разрушения образца в рабочей части, и не приводящий к разрушению образца в хватных частях. В работе реализовано три различных варианта подготовки хватных частей трубчатых образцов с использованием клеевого состава, выкладки стеклотканью и алюминиевых гильз, которые требуются для получения требуемого диаметра хватных частей образцов, соответствующего диаметру цанги, и равномерного распределения нагрузок при обжатии и испытании.

Использование клеевого состава с последующим обтачиванием до нужного диаметра является технологически простым способом подготовки хватных частей образцов (рис. 3.22). Для этого использовался состав ВПЗ (внутренний полимерный наполнитель), состоящий из смолы ЭД-20 с наполнением полыми стеклянными микросферами. В этом случае во внутреннюю полость образца с натягом вставлялись сплошные металлические стержни на глубину, соответствующую длине цанги.

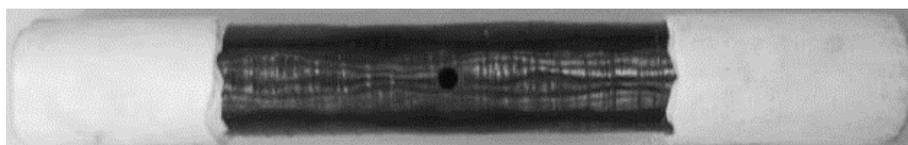


Рисунок 3.22 – Трубчатый композиционный образец с клеевыми накладками

Однако такой тип подготовки образца не позволил провести испытание на пропорциональное растяжение с кручением, так как происходило проскальзывание образца в продольном направлении, сопровождающееся падением осевой

нагрузки. Значения растягивающей нагрузки, при которой образец начинал выскальзывать, отличались при разном давлении в захватах не более чем на 10 %, среднее значение нагрузки составляло 30 кН (рис. 3.23), и дальнейшего увеличения нагрузки не происходило, при этом величина приложенного крутящего момента продолжала увеличиваться.

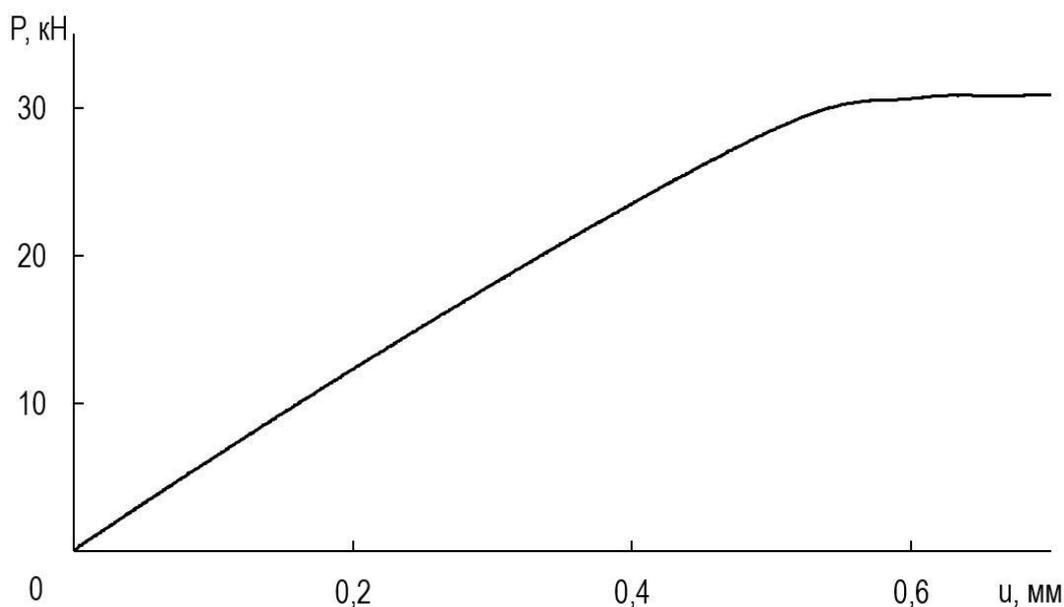


Рисунок 3.23 – Диаграмма нагружения трубчатого образца с клеевыми накладками

В то же время, использование клеевых накладок позволяет проводить испытание трубчатых образцов на кручение вплоть до полного разрушения. На рисунке 3.24 представлена диаграмма нагружения образца при кручении с постоянной скоростью увеличения угла закручивания по встроенному датчику испытательной машины  $\varphi = 5$  град/мин.

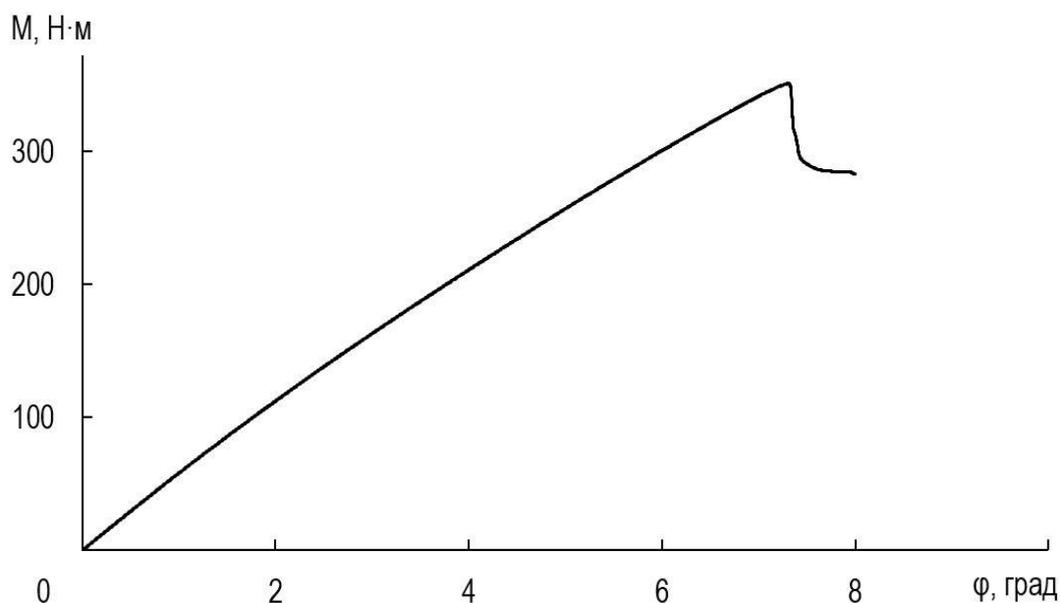


Рисунок 3.24 – Диаграмма зависимости приложенного момента от угла закручивания трубчатого образца в испытании на кручение

Вторым вариантом подготовки образцов выбран метод выкладки стеклопластиком на основе препрега ВПС-48 и связующего ВСЭ 1212 (рис. 3.25). После выкладки образец отверждался в течение суток. Внутренняя полость образца в зоне захватов заполнялась клеевым составом ВПЗ. Данный способ подготовки образца позволил добиться увеличения максимальной достигаемой осевой нагрузки в среднем до 44 кН, после чего также происходило проскальзывание образца.

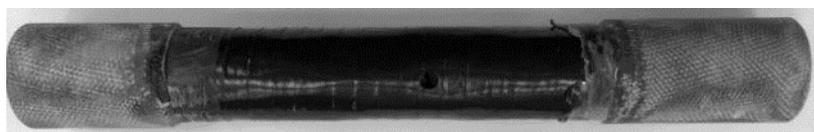


Рисунок 3.25 – Образец с накладками из стеклопластика на основе препрега ВПС-48 и связующего ВСЭ 1212

Следующим способом подготовки образцов являлось использование тонкостенных металлических гильз, изготовленных из алюминиевой трубы АД-31 с наружным диаметром 30 мм и толщиной стенки 2 мм, в которые клеивался

образец (рис. 3.26), для чего использовался клей К-9 на основе эпоксидного связующего. Образец запрессовывался в гильзы с клеевым составом и отверждался в течение суток при температуре 80°C. Во внутреннюю полость образца с натягом вставлялись сплошные металлические стержни на глубину, соответствующую длине цанги.

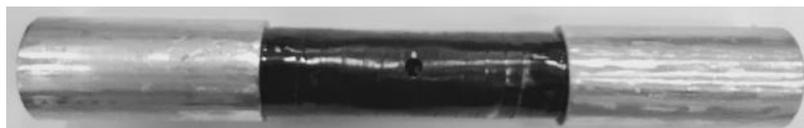


Рисунок 3.26 – Трубчатый композиционный образец с алюминиевыми гильзами

Указанный способ подготовки путем вклеивания образца в алюминиевые гильзы позволил провести испытание на пропорциональное растяжение с кручением до полного разрушения трубчатого углепластикового образца. На рисунке 3.27 приведена зависимость изменения осевой нагрузки от перемещения, на рисунке 3.28 - изменение крутящего момента от угла закручивания, по встроенным датчикам испытательной машины. Образец разрушился при значениях растягивающих усилий  $P = 102$  кН и величине крутящего момента  $M = 422$  Н·м.

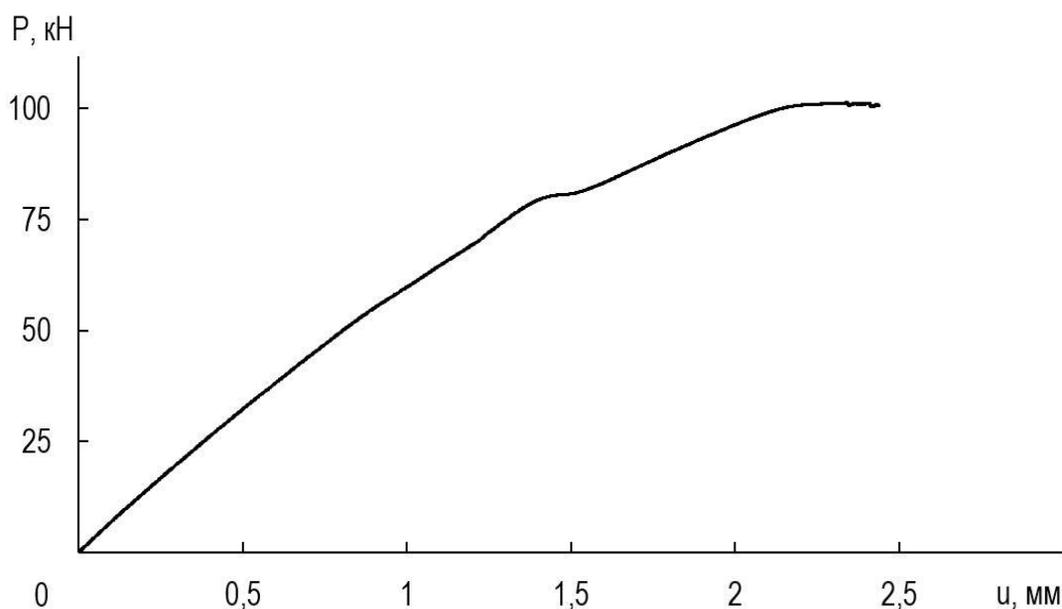


Рисунок 3.27 – Зависимость изменения осевой нагрузки от перемещений при пропорциональном растяжении с кручением трубчатого образца

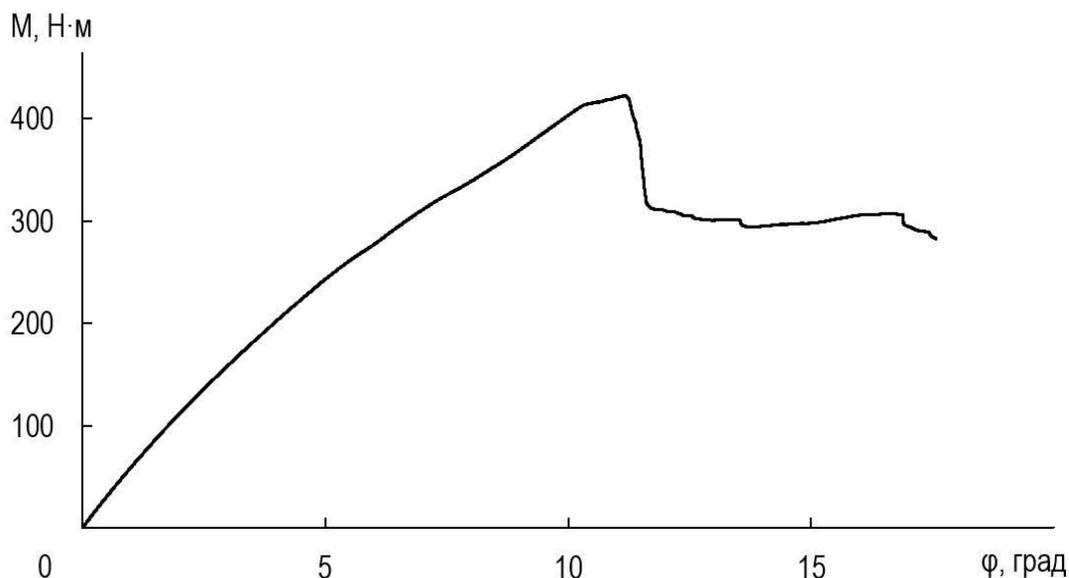


Рисунок 3.28 – Зависимость изменения крутящего момента от угла закручивания при пропорциональном растяжении с кручением трубчатого образца

С целью изучения закономерностей деформирования, анализа процессов инициирования и распространения дефектных структур, формирования условий разрушения трубчатых образцов композитного материала в условиях сложного напряженного состояния использована бесконтактная трехмерная цифровая оптическая система Vic-3D. Использование оптической видеосистемы дает возможность регистрации полей перемещений и деформаций на поверхности трубчатого образца в области концентратора и позволяет проводить анализ эволюции развития трещин в процессе испытаний при совместном растяжении с кручением.

На поверхность образцов предварительно наносилось мелкодисперсное контрастное покрытие (совокупность черно-белых точек) с помощью матовой акриловой краски. Постобработка осуществлялась с применением критерия нормированной суммы квадратов разностей (NSSD - normalized sum of squared difference). В процессе корреляционной обработки устанавливались следующие параметры: размер подмножества (subset) -  $29 \times 29$  пикселей, значение шага (step) - 5 пикселей.

На рисунке 3.29 (а) приведена диаграмма «нагрузка-время» для трубчатого образца с концентратором, полученная в испытании с использованием приклеенных алюминиевых гильз. Для точек 1-6 (рис. 3.29, а) представлены фотографии поверхности, которые иллюстрируют процесс деформирования и разрушения трубчатого образца в испытании. Наблюдается растрескивание материала в области концентратора, с увеличением угла закручивания наблюдается смятие поверхности и потеря устойчивости образца ( $P = 100$  кН,  $M = 415$  Н·м) с последующим макроразрушением. На рисунке 3.30 (а) приведена фотография разрушенного образца.

Совместное испытание с использованием видеосистемы дает возможность проведения анализа неоднородных полей перемещений на поверхности трубчатого образца. Поля перемещений представлены в цилиндрической системе координат (рис. 3.30, б). Переход от декартовой системы координат выполнен в программном обеспечении видеосистемы с использованием закона преобразования координат. В качестве примера на рисунке 3.31 приведены поля перемещений  $dR$ ,  $d\theta$  и  $dz$  при нагрузке  $P=102$  кН.

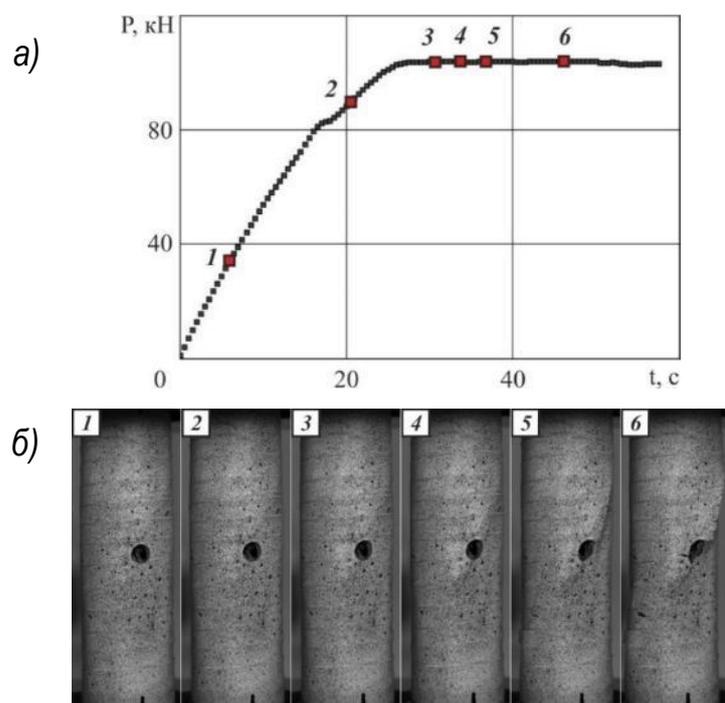


Рисунок 3.29 – Временная зависимость осевой нагрузки (а) и соответствующие фотографии поверхности трубчатого образца с концентратором (б)

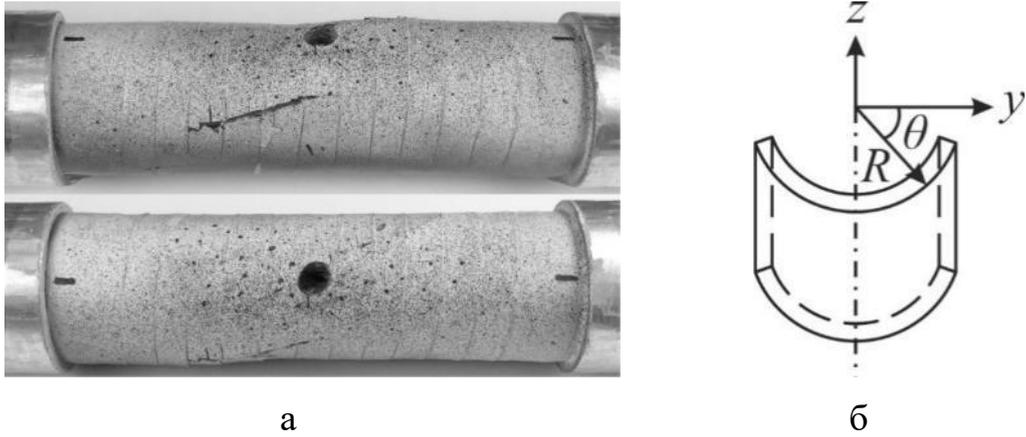


Рисунок 3.30 – Фотография разрушенного образца (а) и цилиндрическая система координат, используемая для построения полей перемещений (б)

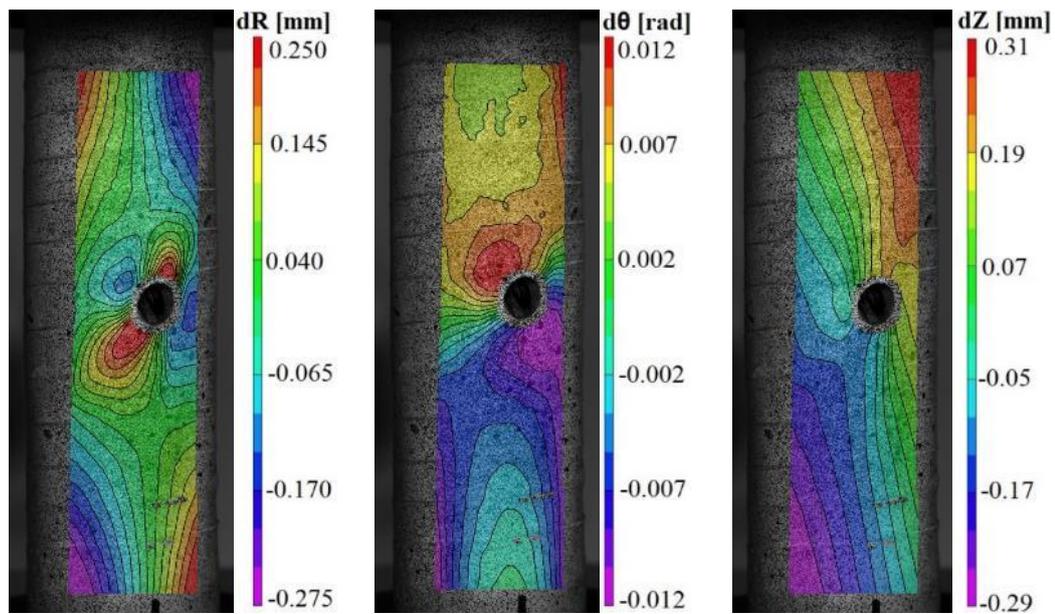


Рисунок 3.31 – Поля перемещений в цилиндрической системе координат на поверхности композитного трубчатого образца с концентратором

Приведенные поля перемещений в цилиндрической системе координат демонстрируют максимальные перемещения в области концентратора, где в результате формируется трещина, которая, в свою очередь, приводит к полному разрушению образца. Симметричность перемещений сохраняется вплоть до разрушения.

По разработанной методике проведен комплекс испытаний с целью исследования влияния дополнительных крутильных вибрационных воздействий с различными параметрами на процессы деформирования и разрушения трубчатых композиционных материалов.

Исследование включало в себя эксперименты на квазистатическое растяжение (рис. 3.32, 3.33) и растяжение с вибрационными крутильными воздействиями.

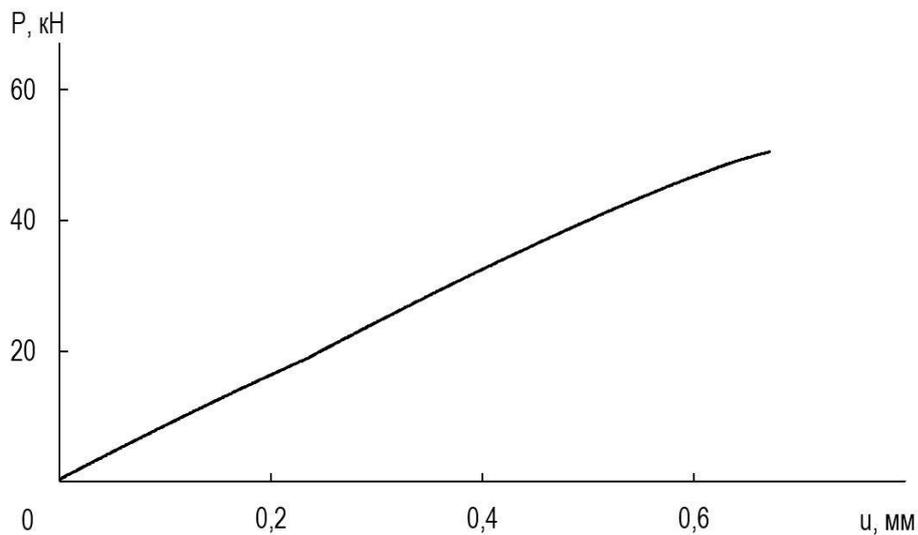


Рисунок 3.32 – Диаграмма нагружения углепластиковых трубчатых образцов при квазистатическом растяжении

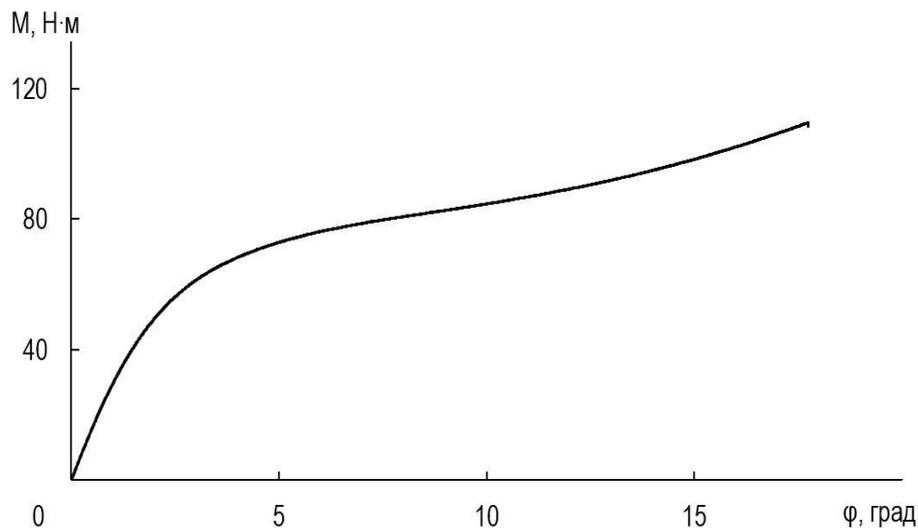


Рисунок 3.33 – Диаграмма нагружения углепластиковых трубчатых образцов при квазистатическом кручении

Исходя из результатов квазистатических испытаний были выбраны следующие параметры вибрационного крутильного воздействия:  $\varphi_a = 1^\circ$ ,  $\nu = 20$  Гц;  $\varphi_a = 0,5^\circ$ ,  $\nu = 25$  Гц;  $\varphi_a = 0,25^\circ$ ,  $\nu = 30$  Гц.

В результате наложения дополнительных воздействий на диаграммах нагружения при растяжении появились участки стадийного разрушения (рис. 3.34).

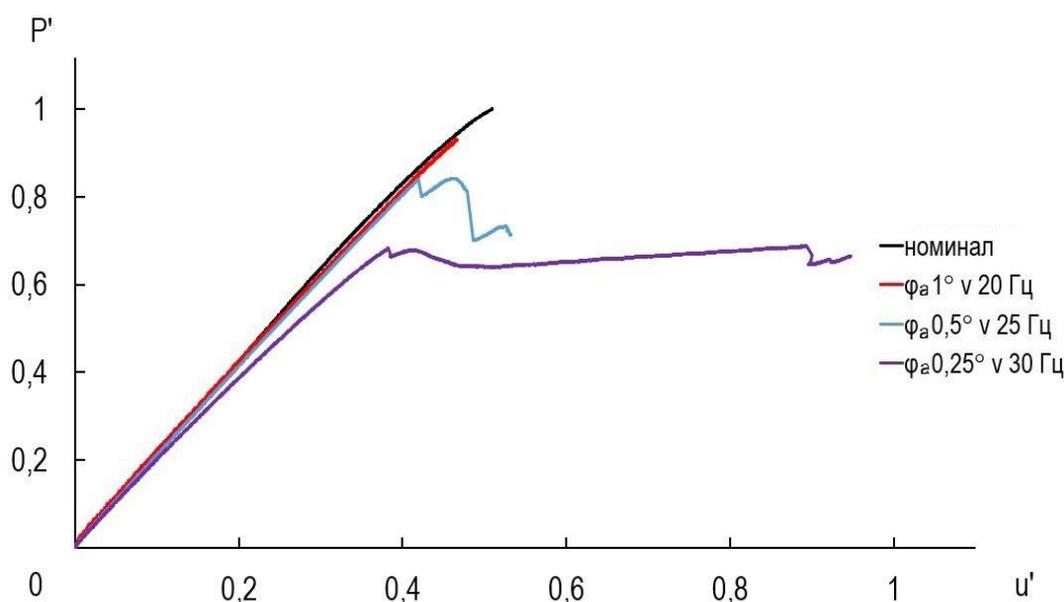


Рисунок 3.34 – Диаграммы нагружения углепластиковых трубчатых образцов при воздействии дополнительных крутильных вибраций

Полученные опытные данные показывают, что дополнительные вибрационные воздействия снижают значение максимальной нагрузки  $P_{\max}$  при разрушении образцов, однако, как и со стержневыми образцами, дополнительные вибрационные воздействия способствовали реализации деформационных ресурсов углепластиковых тонкостенных трубчатых образцов.

## Выводы по главе

1. Проведено экспериментальное исследование зависимости изменения остаточных свойств в процессе усталостного накопления повреждений слоисто-волоконистых композиционных материалов. При анализе полученных опытных данных выявлен стадийный характер изменения остаточных прочностных и жесткостных характеристик исследуемого материала. Предложен новый способ интерпретации экспериментальных данных в виде диаграммы усталостной чувствительности. Отмечено, что введенные характеристики и характерные точки на диаграмме могут быть использованы для прочностных расчетов при оценке живучести конструкций. Дополнительно проанализированы температурные поля в рабочей зоне образцов в продольном направлении и выявлены характерные особенности локализации температур в зоне макроразрушения.

2. Получены опытные данные зависимости усталостной чувствительности при различных схемах укладки армирующих слоев стеклопластиков. Отмечено, что для образцов с укладкой армирующих слоев  $[\pm 45]_n$  происходило в две стадии, без участка начальной усталостной чувствительности, в отличие от образцов со схемами укладки  $[0/90]_n$  и  $[0/30/0/60]_n$ .

3. Проанализировано влияние различных параметров циклического воздействия на статические механические свойства композитов. В рамках исследования выявлено, что для исследуемых стеклопластиковых образцов при изменении параметров нагружения сохраняется стадийность изменения остаточной прочности.

4. Получены экспериментальные зависимости изменения усталостной чувствительности в условиях повышенных температур. Анализ результатов испытаний при повышенных температурах показал, что по сравнению с образцами, испытанными при комнатной температуре, снижение значения

остаточного предела прочности происходило в две стадии, без участка начальной усталостной чувствительности.

5. Отработана методика исследования процессов накопления повреждений и разрушения композиционных трубчатых образцов при совместном растяжении с кручением при комплексном использовании двухосевой сервогидравлической испытательной машины и видеосистемы анализа полей перемещений и деформаций. Проведено исследование влияния дополнительных вибрационных крутильных колебаний на деформирование и разрушение стеклопластиковых стержней и углепластиковых трубчатых композитных образцов. Выявлено, что дополнительные вибрационные воздействия способствуют реализации деформационных ресурсов образцов.

Основные результаты, содержащиеся в главе, отражены в публикациях автора [10, 66-69, 120, 150, 151, 161, 162, 163].

#### **4. ЗАВИСИМОСТЬ ПРОЧНОСТНЫХ И УСТАЛОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ ОТ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

Глава отражает результаты исследований поведения образцов ПКМ в условиях комплексных предварительных ударных и последующих квазистатических и циклических воздействий. Получены экспериментальные зависимости, отражающие влияние предварительного ударного растяжения на остаточные прочностные и усталостные характеристики образцов ПКМ. Проанализированы опытные данные поведения слоисто-волоконистых композитов в условиях предварительного удара по схеме трехточечного изгиба и последующего квазистатического и циклического растяжения. Выполнен комплекс испытаний с целью исследования живучести слоистых и крупноячеистых композитных образцов-панелей в опытах на сжатие после удара. Изучены зависимости деформирования и разрушения композитных образцов-пластин с пространственными схемами армирования после предварительных ударных воздействий с различными интенсивностями. Предложена методика оценки поврежденности композитных образцов-пластин, на основе результатов неразрушающего контроля с использованием метода шерографии. Получены данные о влиянии предварительного локального удара на процессы деформирования и разрушения пространственно-армированных углепластиковых композитов.

##### **4.1 Влияние предварительного ударного воздействия на статическую прочность и усталостную долговечность полимерных композитов**

Ударные воздействия негативно сказываются на характеристиках композиционных материалов и конструкций из них. Приложенные в продольном направлении, относительно ориентации армирующих волокон, динамические нагрузки, такие как ударное растяжение, могут приводить к локальным

разрушениям волокон, что в свою очередь приводит к снижению предела прочности материала и несущей способности конструкции. С целью исследования влияния предварительного ударного воздействия в направлении укладки армирующих слоев стеклопластиковых образцов проведена серия экспериментов с различными уровнями потенциальной энергии нагружения. Образцы были изготовлены на основе препрега ВПС-48 и связующего ВСЭ 1212 со схемой армирования  $[0^\circ/90^\circ]_8$ . Ударное растяжение вдоль направления армирования образцов реализовывалось на испытательном электромеханическом вертикальном копре Instron CEAST 9350. Полученные экспериментальные данные представлены на рисунке 4.1.

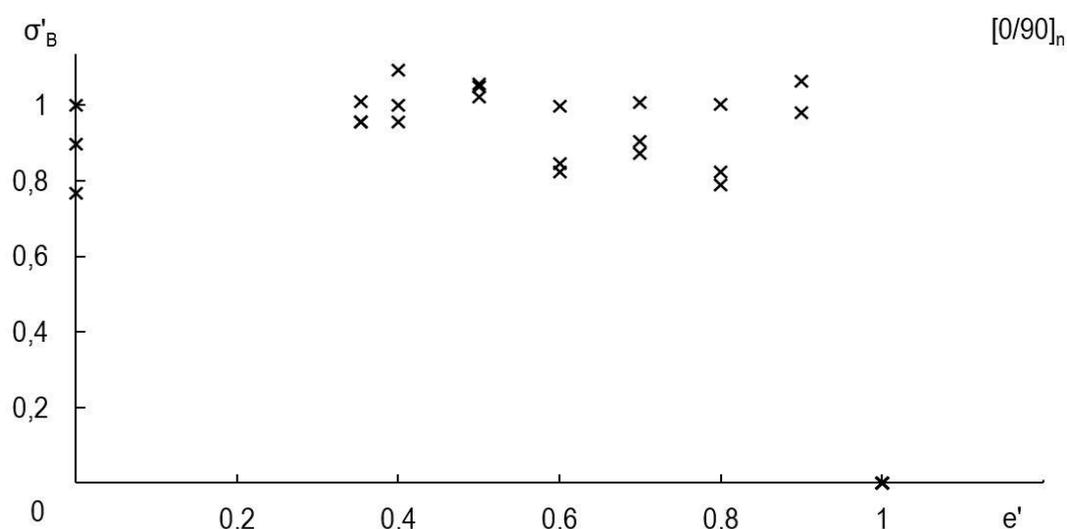


Рисунок 4.1 – Зависимость остаточного предела прочности от потенциальной энергии ударного растяжения стеклопластиковых образцов

Анализ полученных опытных данных позволяет сделать вывод, что предварительное ударное растяжение в направлении, совпадающим с направлением укладки армирующих волокон, не оказывает влияния на остаточные прочностные характеристики исследуемого стеклопластикового композита. Дополнительно проанализировано влияние предварительного низкоскоростного ударного растяжения на усталостную долговечность стеклопластиковых образцов.

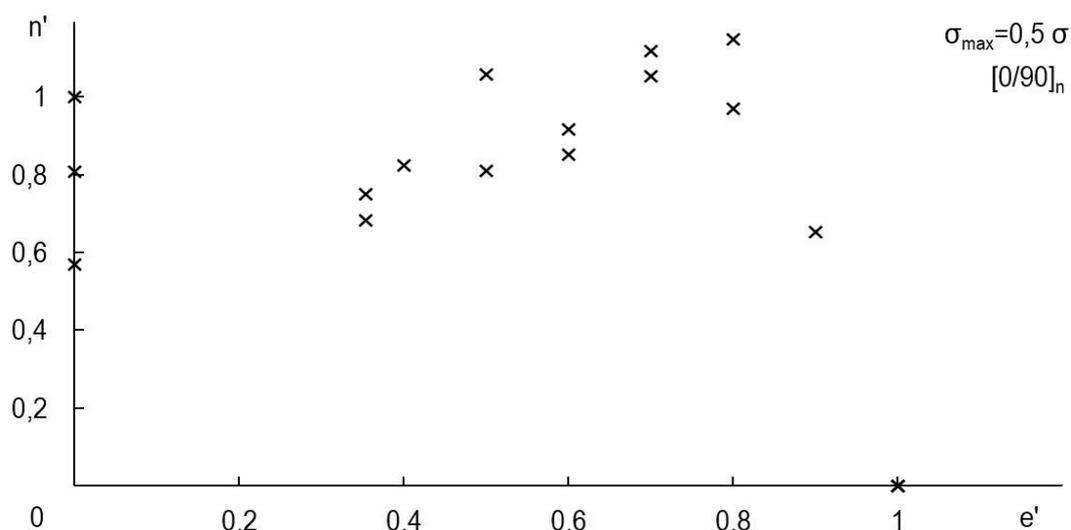


Рисунок 4.2 – Зависимость усталостной долговечности от энергии ударного растяжения стеклопластиковых образцов

В результате экспериментального исследования влияния предварительного ударного растяжения с различными параметрами обнаружено, что данный вид воздействия не оказывает влияния на остаточные прочностные и усталостные характеристики исследуемых стеклопластиковых образцов.

Проведено исследование влияния предварительного низкоскоростного удара по схеме трехточечного изгиба на процессы деформирования и разрушения стеклопластиковых образцов  $[0/90]_n$ . Методика исследования включала в себя предварительное ударное воздействие по схеме трехточечного изгиба с определением энергии разрушения образца. Удар производился по всей ширине образца. После чего образцы подвергались однократному ударному изгибу с различной интенсивностью в диапазоне от  $0,3 \cdot E_{\max}$  до  $0,6 \cdot E_{\max}$ . В дальнейшем образцы подвергались квазистатическому растяжению с определением остаточных прочностных и деформационных характеристик (рис. 4.3).

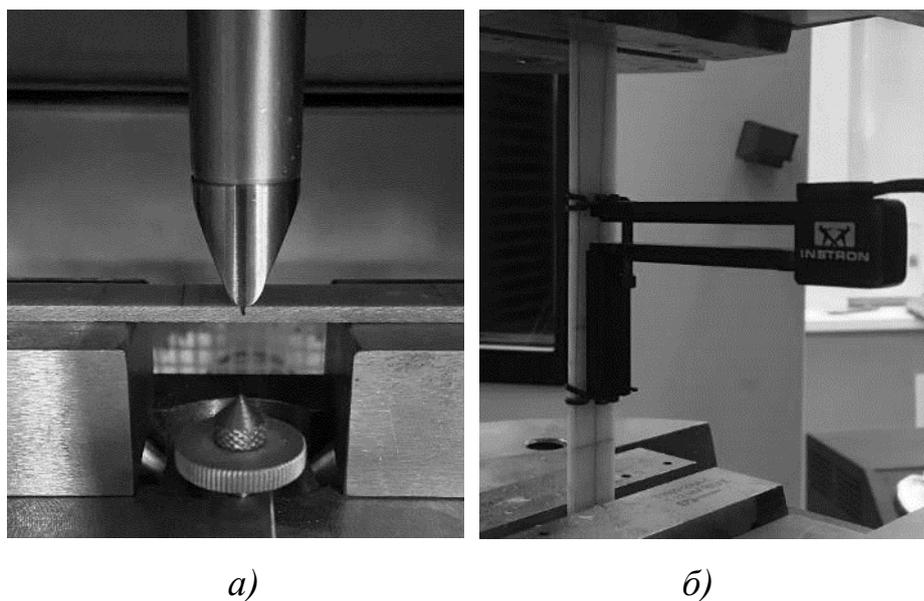


Рисунок 4.3 – Фотографии образцов при ударном изгибе (а)  
и квазистатическом растяжении (б)

По результатам испытаний на предварительный трехточечный ударный изгиб и последующее квазистатическое растяжение построена диаграмма остаточной прочности стеклопластиковых образцов (рис. 4.4).

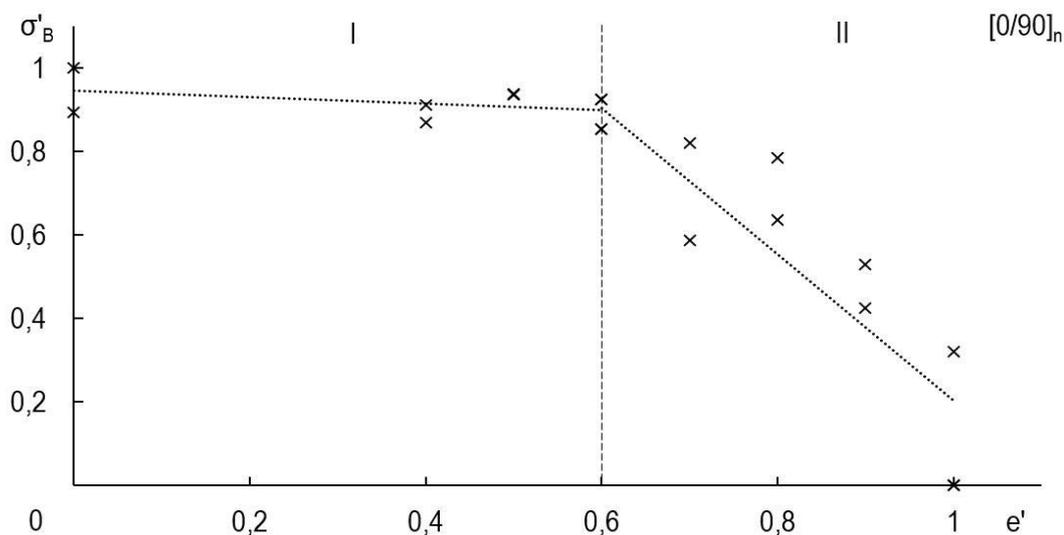


Рисунок 4.4 – Диаграмма зависимости остаточной прочности стеклопластиковых образцов от энергии поперечного удара

На диаграмме видно, что предварительное ударное воздействие с энергий большей  $e' = 0,6$  ( $E = 3$  Дж) приводит к снижению остаточной прочности

стеклопластиковых образцов при растяжении. Таким образом значение энергии удара  $e' = 0,6$  ( $E = 3$  Дж) является пороговым значением ударной чувствительности для исследуемых образцов. При энергиях воздействий выше 3,5 Дж происходило изменение механизмов разрушения образцов с нормального отрыва на нормальный отрыв с расслоением в продольном направлении. Фотографии образцов, разрушенных при растяжении после ударных воздействий с различной энергией, приведены на рисунке 4.5.

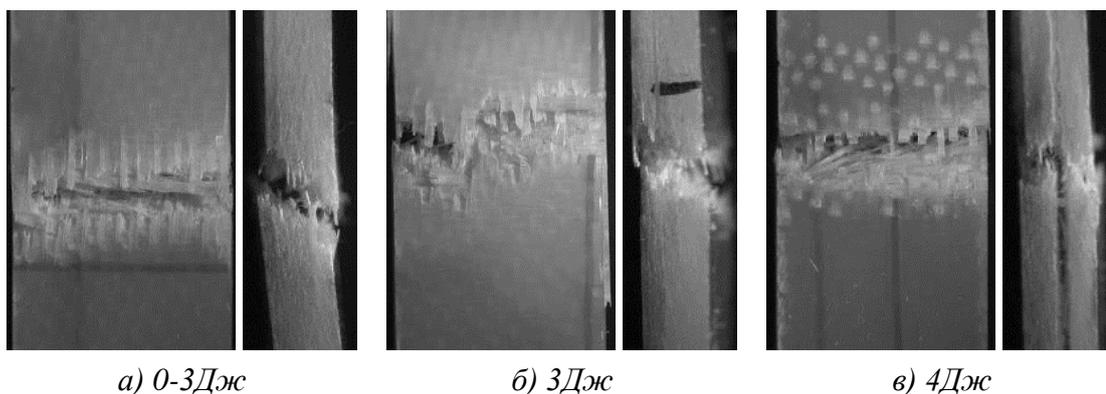


Рисунок 4.5 – Фотографии разрушенных образцов при квазистатическом растяжении после предварительного ударного изгиба

При воздействии удара с энергиями меньше 3 Дж и последующем квазистатическом растяжении разрушение образцов происходило вблизи захватов испытательной системы по типу нормального отрыва (рис. 4.5, а). По мере увеличения энергии воздействия на изломах появлялись участки расслоений, разрушение происходило в рабочей зоне образцов (рис. 4.5, б, в).

Результаты экспериментального изучения влияния предварительного ударного изгиба на остаточный модуль упругости представлены на рисунке 4.6.

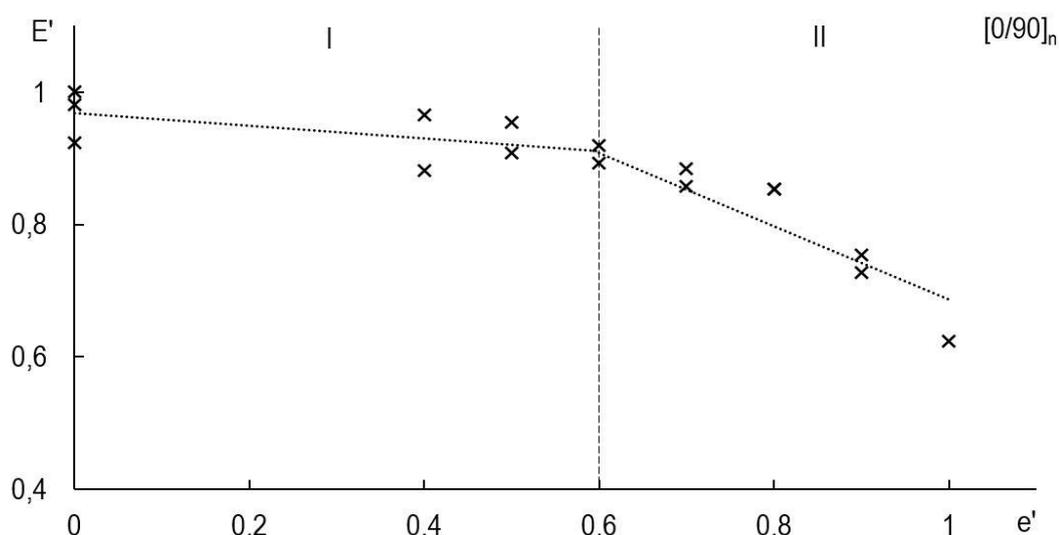


Рисунок 4.6 – Диаграмма зависимости остаточного модуля упругости от предварительного ударного изгиба стеклопластиковых образцов

На диаграмме остаточного модуля упругости, как и для остаточного предела прочности, значение энергии удара  $e' = 0,6$  ( $E = 3$  Дж) является пороговым, при ударах больших 3 Дж происходит значительное снижение остаточного модуля упругости. Так как для стеклопластиковых образцов в условиях предварительного ударного изгиба обнаружен порог ударной чувствительности целесообразным представляется изучение влияния ударного изгиба на усталостную долговечность.

По разработанной методике проведены серии экспериментов с различной энергией удара и последующего циклического растяжения ( $\sigma_{\max} = 0,5 \cdot \sigma_B$ ,  $R = 0,1$ ). Результаты испытаний приведены в виде диаграммы усталостной долговечности от энергии предварительного ударного воздействия (рис. 4.7).

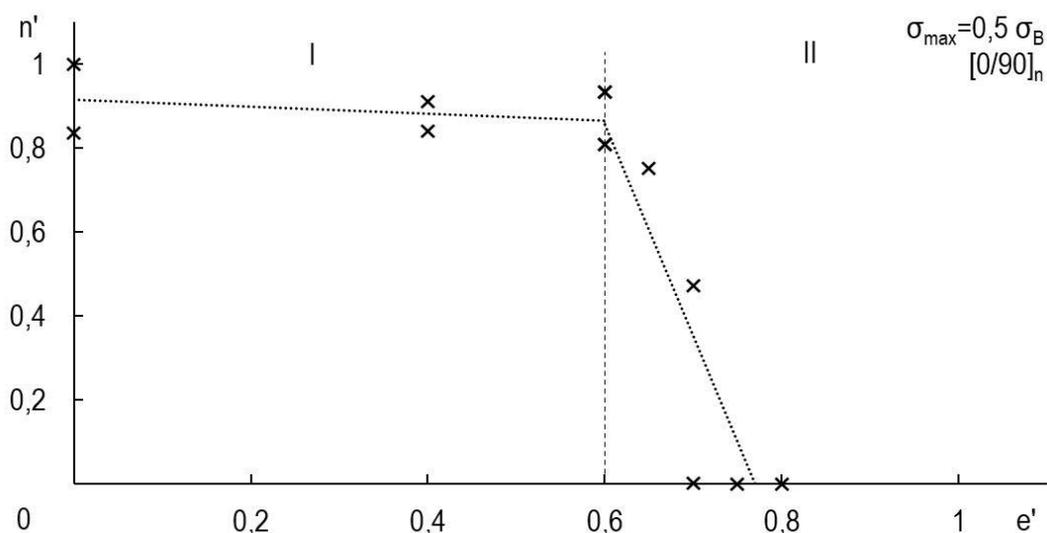


Рисунок 4.7 – Диаграмма зависимости усталостной долговечности от энергии предварительного ударного воздействия стеклопластиков

Как и для остаточной прочности и жесткости значение удара  $e' = 0,6$  ( $E = 3$  Дж) являлось пороговым, при ударах энергией свыше этого значения усталостная долговечность стеклопластиковых образцов снижалась. Фотографии образцов после ударного воздействия представлены на рисунке 4.8.

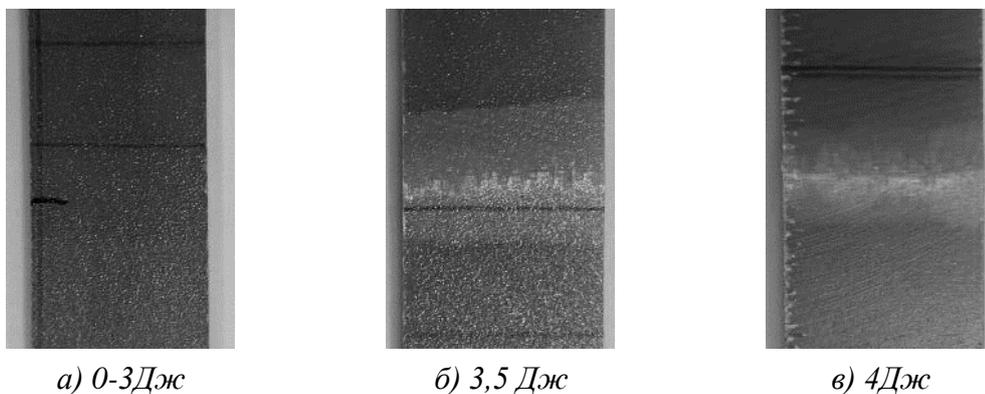


Рисунок 4.8 – Фотографии оборотной стороны стеклопластиковых образцов после ударного изгиба

До энергии удара 3 Дж на оборотной стороне, стороне противоположной удару, отсутствовали видимые повреждения (рис. 4.8, а), при увеличении энергии удара на оборотной стороне появлялись трещины и расслоения (рис. 4.8, б, в). При циклических испытаниях характер разрушения менялся от нормального отрыва

(рис. 4.9, а) к смешанному, с участками расслоений (рис. 4.9, б). Образцы разрушались в рабочей зоне.



Рисунок 4.9 – Фотографии разрушенных стеклопластиковых образцов (а – нормальный отрыв, б – расслоения)

В результате экспериментально изучения влияния предварительного ударного изгиба для исследуемых стеклопластиковых образцов обнаружен порог ударной чувствительности  $E = 3 \text{ Дж}$ . Удары с энергиями, превышающими значения порога ударной чувствительности, приводили к снижению остаточной прочности, жесткости и усталостной долговечности образцов со сменой механизмов разрушения. При ударном растяжении, вдоль ориентации армирующих волокон, изменение остаточных прочностных, жесткостных и усталостных характеристик стеклопластиков не выявлено.

## **4.2 Живучесть крупноячеистых композитных образцов-панелей в опытах на сжатие после удара**

Низкоскоростное ударное воздействие представляет собой серьезную угрозу для использования композитных материалов в реальных технических приложениях, поскольку они вызывают едва видимое повреждение, которое может остаться незамеченным. Появление едва видимого ударного повреждения (в международных статьях принято обозначение BVID) в композиционных узлах и конструкциях ответственного назначения является серьезной проблемой, которая может приводить к снижению безопасности самолета или другой техники, и должно своевременно заменено или отремонтировано в соответствии с требованиями безопасности эксплуатации изделия.

Обзор научной литературы показывает, что актуальным направлением экспериментальной механики является получение новых опытных данных о процессах деформирования и разрушения слоисто-волокнуистых полимерных композиционных материалов при наличии концентраторов напряжений эксплуатационного характера. Большое число работ посвящено исследованию деградации остаточной прочности композиционных слоистых пластин при различных условиях окружающей среды [29, 37, 101, 143, 146, 153, 168]. В работах описаны методики проведения испытаний, ход проведения испытаний, результаты в виде зависимостей остаточной прочности (максимальной нагрузки при сжатии после удара) на одном уровне ударного воздействия (энергии удара). Однако отсутствуют данные об изменении остаточных свойств при изменении параметров предварительного воздействия, в частности потенциальной энергии удара. Одним из важных аспектов исследований материалов в условиях предварительных механических воздействий является выявление порогового значения чувствительности [163].

Помимо вышеописанных задач актуальной является задача, связанная с тензометрированием в условиях сложного напряженного состояния, вызванного

наличием концентраторов напряжений. А также актуальная задача анализа кинетики разрушения в процессе распространения трещин при сжатии образцов. Различные датчики регистрации перемещений, такие как тензодатчики, тензорезисторы и т.д. позволяют отслеживать взаимное смещение между двумя точками поверхности образцов в соответствии с прикладываемым усилием.

Для изучения напряженно-деформированного состояния конструкций и исследовании механического поведения материалов в механике активно используют оптические методы дефектоскопии. Использование неразрушающих оптических методов измерений обусловлено бесконтактной регистрацией перемещений и широким спектром применимости метода по отношению к исследуемым материалам.

В работе [153] применялся один из оптических методов теневой муаровый метод для измерения внеплоскостных смещений в композитах с искусственно созданными расслоениями при сжимающих нагрузках. Метод муаровых полос дает визуальное представление о распределении деформаций, но не дает высокой точности измерений, целесообразен только там, где ожидается возникновение относительно больших деформаций, задачи, связанные с анализом пластически деформированных сред или с поведением конструкций в условиях ползучести [73]. Авторы в работе [139] измеряли деформацию композитных образцов при сжимающих нагрузках после ударного воздействия, используя метод электронной спекл-интерферометрии. Для измерения внеплоскостных смещений данный метод не подходит. Спекл-интерферометрия дает возможность изучения объектов, недоступных для непосредственного наблюдения, с целью измерения параметров микрорельефа, формы и перемещений [27].

К числу наиболее распространённых неразрушающих методов оценки напряженно-деформированного состояния материалов и конструкций можно отнести метод корреляции цифровых изображений (КЦИ).

Использование бесконтактной оптической видеосистемы Vic-3D, на основе КЦИ, позволяет решать проблемы тензометрии в условиях сложного напряженного

состояния и анализа кинетики разрушения в процессе распространения трещин при сжатии образцов [96, 107, 153, 160].

Для решения вышеописанных задач проведена отработка методики оценки живучести углепластиковых образцов-пластин в опытах на сжатие после локального поперечного удара.

Методика испытаний, размеры образцов, геометрия ударника, испытательные системы соответствовали рекомендациям стандартов ASTM D7136, ASTM D7137 [86, 878]. Апробация проводилась на углепластиковых образцах-пластинах со схемой укладки  $[0/\pm 45]_n$  размерами  $150 \times 100 \times 4$  мм (рис. 4.10) при поперечном локальном ударном воздействии падающим грузом.

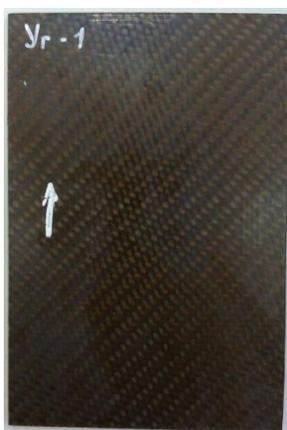


Рисунок 4.10 – Фотография углепластикового образца-пластины

Все образцы были разделены на группы по 6 образцов на каждый уровень энергии удара: 0-25 Дж с шагом в 5 Дж, масса молота при этом оставалась постоянной 5,01 кг. Для нанесения ударных повреждений на поверхность образцов исследуемых материалов использовался копер вертикального типа Instron CEAST 9350. Удар производился по геометрическому центру образцов полусферическим наконечником диаметром 16 мм (рис. 4.11).

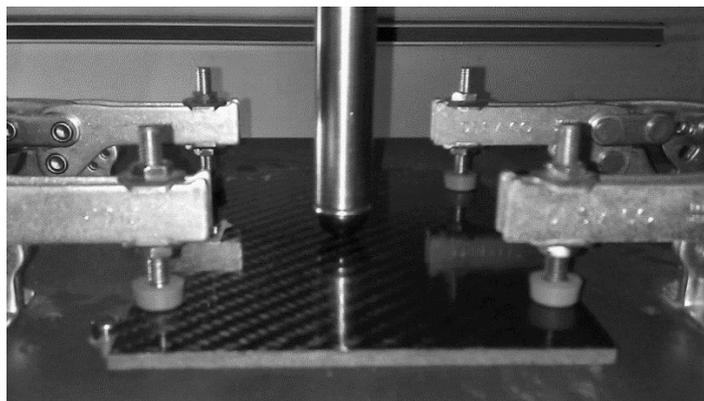


Рисунок 4.11 – Фотография углепластикового образца при ударном воздействии падающим грузом

Квазистатическое сжатие после удара выполнялось на электромеханической испытательной системе Instron 5982 со скоростью перемещения сжимающей плиты  $v = 1,25$  мм/мин до полного разрушения или потери устойчивости образца (рис. 4.12). В качестве примера на рисунке 4.12 представлена фотография углепластикового образца, установленного в специальное приспособление для сжатия.

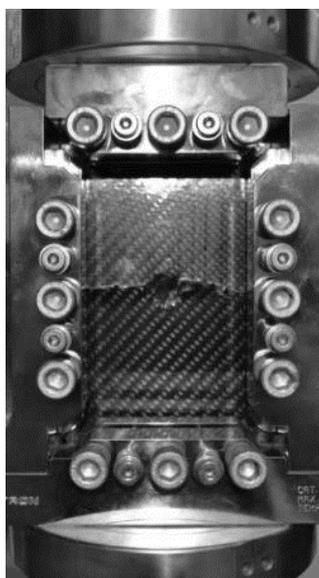
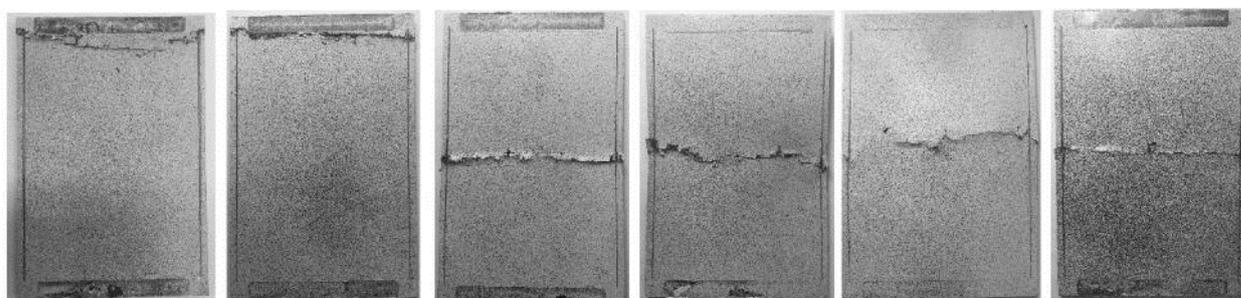


Рисунок 4.12 – Фотография углепластикового образца, установленного в приспособления для сжатия

Для анализа полей перемещений и деформаций во время испытания использовалась трехмерная цифровая оптическая система Vic-3D.

В результате проведенных серий испытаний было обнаружено, что при предварительном воздействии ударами с энергиями меньшими 10 Дж все образцы разрушались в области верхнего захвата, что не является предпочтительным типом разрушения (рис. 4.13).



0 Дж

5 Дж

10 Дж

15 Дж

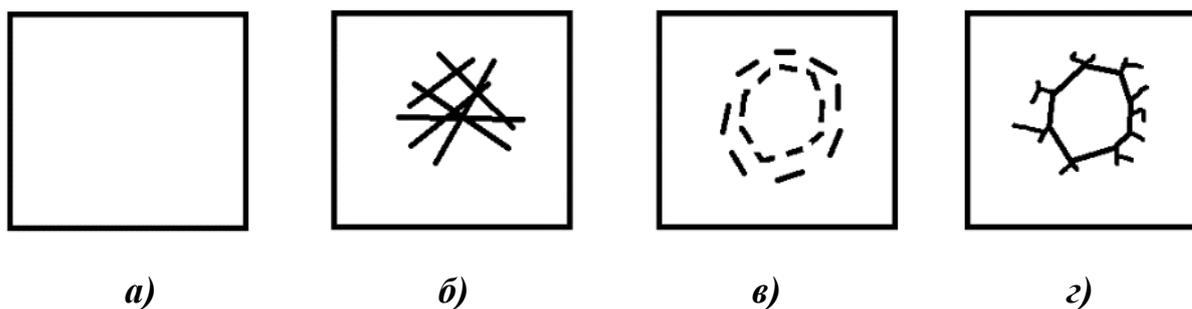
20 Дж

25 Дж

Рисунок 4.13 – Характерные типы разрушений углепластиковых образцов в опытах на сжатие после удара

После испытаний падающим грузом проводился визуальный осмотр образцов, все повреждения на поверхности образцов можно классифицировать следующим образом (рис. 4.14):

а – видимых повреждений нет, б – видимые трещины, в – значительные повреждения в виде трещин и вмятины (пятно контакта), г – сквозной пробой.



а)

б)

в)

г)

Рисунок 4.14 – Схема типов повреждений в образцах после удара

Фотографии лицевой и тыльной (оборотной) поверхностей образцов приведены на рисунке 4.15.

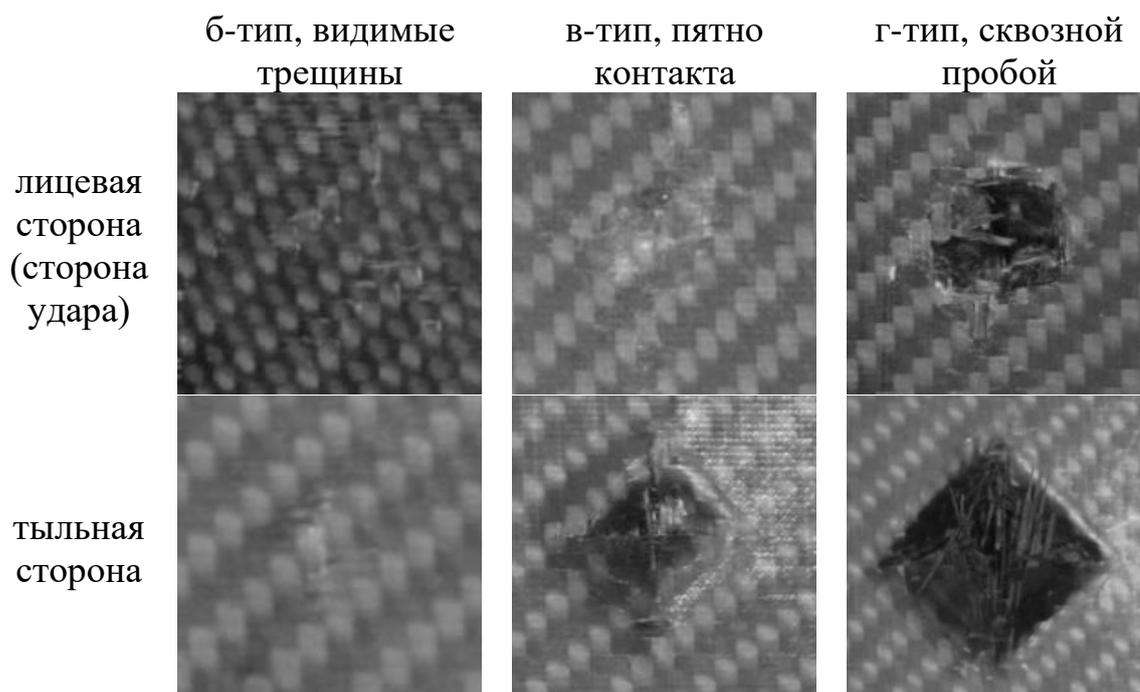


Рисунок 4.15 – Фотографии поверхностей образцов

Как видно из полученных данных, при повреждениях б-типа (энергия удара  $E = 5$  Дж) на лицевой и оборотной сторонах образца наблюдались трещины без видимых вмятин и выпуклостей; в-типа ( $E = 10$  Дж) – на лицевой стороне значительные вмятины и трещины, на тыльной стороне выпуклость с расслоениями и локальными разрывами волокон; г-типа ( $E = 25$  Дж) – сквозное повреждение по всей толщине образца.

Данные о стойкости материала к повреждениям, допустимые повреждения и особенности деформирования и разрушения композитов необходимо учитывать при проектировании объектов ответственного назначения. Визуальный осмотр, подкрепленный результатами оценки остаточной прочности, в значительной степени облегчает мониторинг живучести конструкции в процессе её эксплуатации. Для анализа изменения остаточной несущей способности образцов построены диаграммы зависимости остаточной несущей способности (рис. 4.16).

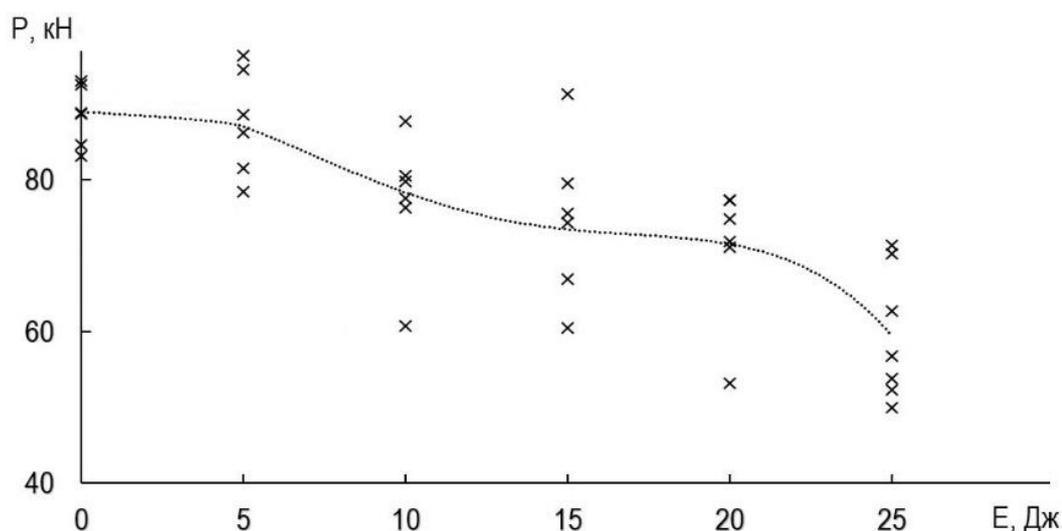


Рисунок 4.16 – Диаграмма зависимости остаточной несущей способности углепластиковых образцов-пластин от энергии удара

Из диаграммы остаточной прочности (рис. 4.16) видно снижение остаточной несущей способности на 13% при предварительном ударном воздействии в диапазоне 5-10 Дж. Разрушение образцов происходило в области концентраторов, образованных после нанесения повреждений, что свидетельствует о достаточной степени концентрации напряжений. Удары в диапазоне 10-20 Дж способствовали не значительному изменению значения разрушающей нагрузки. При ударе с энергией 25 Дж максимальная нагрузка при сжатии снизилась на 33%. Таким образом область в диапазоне удара с энергиями 5-10 Дж соответствует участку ударной чувствительности. Получаемые повреждения при этой энергии удара могут быть визуально неопределимы, а дальнейшая эксплуатация конструкции приведет к снижению несущей способности и возможному преждевременному разрушению.

Использование видеосистемы Vis-3D позволило получить больше данных о процессах разрушения углепластиковых образцов-панелей в опытах на сжатие после удара. На рисунке 4.17 приведены эпюры распределения внеплоскостного смещения вдоль горизонтальной линии, проходящей на образце через место удара. Для удобства эпюры смещены по оси ординат  $W$ .

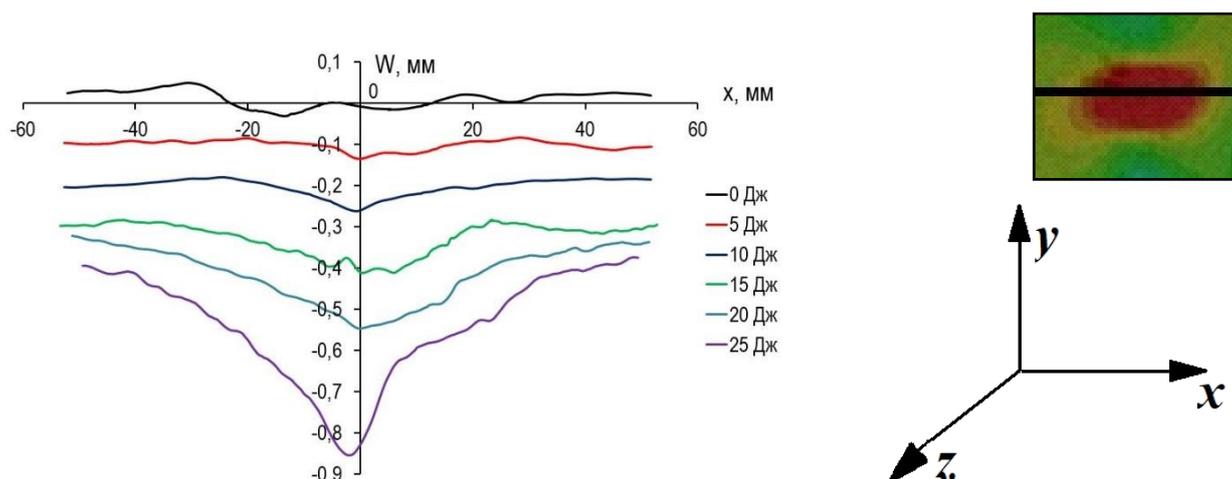


Рисунок 4.17 – Профили распределения внеплоскостного смещения вдоль горизонтальной линии на поверхности углепластиковых образцов-панелей в опытах на сжатие после удара

При энергии удара 10 Дж и больше отмечается локальное выпучивание в поврежденной зоне. При энергии удара 15, 20 и 25 Дж локальное выпучивание еще больше поскольку расслаивание уже распространяется в этой области и вызывает существенное снижение жесткости образца. Также можно отметить, что по мере увеличения сжимающей нагрузки деформационная зона увеличивается.

Использование видеосистемы регистрации полей перемещений и деформаций в процессе испытаний на сжатие после удара углепластиковых образцов-пластин позволило зафиксировать и отслеживать процессы деформирования и разрушения в области концентраторов напряжений, вызванных внеплоскостным ударом. Испытания с различными уровнями энергии воздействия позволили выявить порог ударной чувствительности исследуемых композитных образцов.

По разработанной и отработанной ранее методике проведена оценка остаточной несущей способности используемых в авиационной промышленности стекло- и углепластиковых образцов-панелей с крупноячеистым сотовым наполнителем (honey-cell) с толщиной ячейки 2 мм и высотой 10 мм (рис. 4.18, а) размерами 150 × 100 мм на основе полимерного связующего ВСЭ 1212. Композиты с такой внутренней структурой используются в звукопоглощающем контуре

авиационного двигателя. Для большей эффективности шумоподавления одну из сторон подвергают перфорации (рис. 4.18, б).

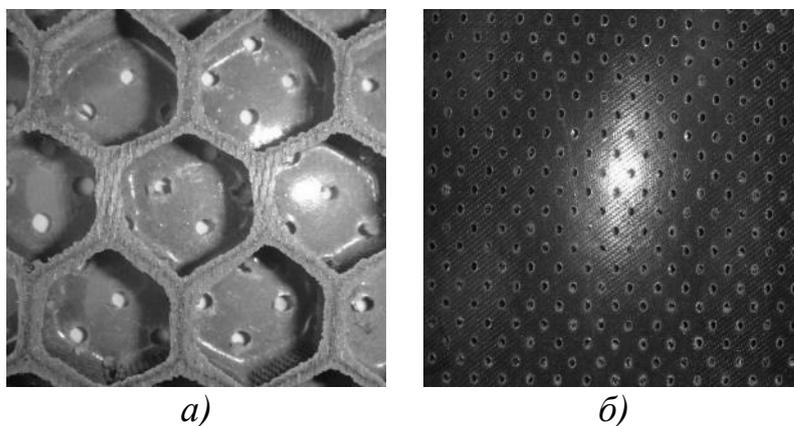


Рисунок 4.18 – Фотография внутреннего крупноячеистого сотового заполнителя композитных образцов-панелей (а), наружной обшивки перфорированного образца (б)

Здесь и далее в работе принято следующее обозначение: стеклопластиковые образцы-панели без перфорации (Ст), с перфорацией (СтП), углепластиковые без перфорации (Уг), с перфорацией (УгП).

По отработанной ранее методике проведены серии испытаний на сжатие после удара падающим грузом с различными уровнями воздействия: 1 Дж (визуально невидимые повреждения), 5 Дж (трещины и вмятины на поверхностной обшивке образца), 10 Дж (значительные повреждения поверхностной обшивки, пробивание поверхностного слоя), 50 Дж (сквозной пробой всего образца). Фотографии поверхностей образцов представлены на рисунке 4.19. Вид повреждений, получаемых после испытаний на удар падающим грузом, был схож с видами, описанными на рисунке 4.14.

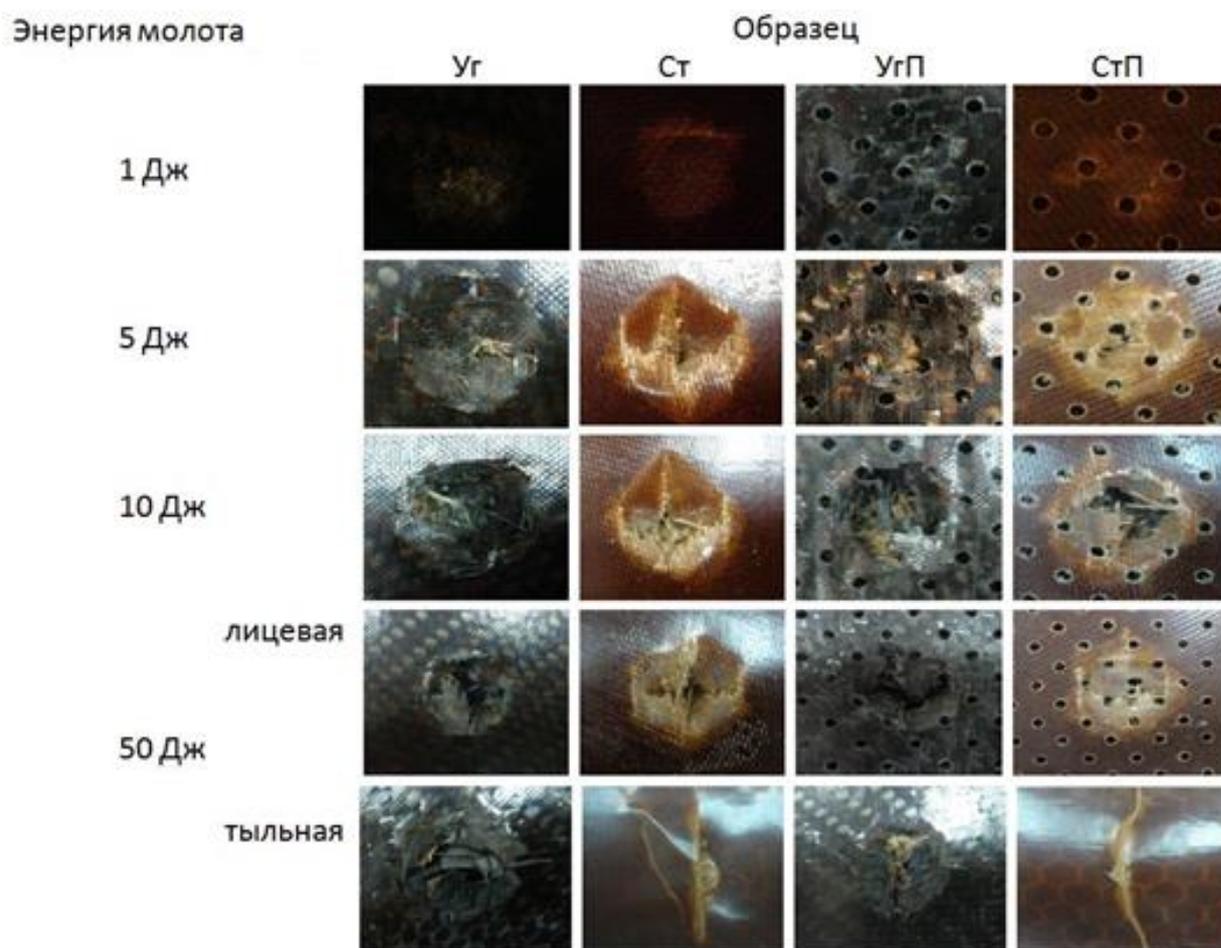


Рисунок 4.19 – Фотографии стекло- и углепластиковых образцов

Полученные в результате сжатия после удара опытные данные остаточной несущей способности представлены на рисунке 4.20.

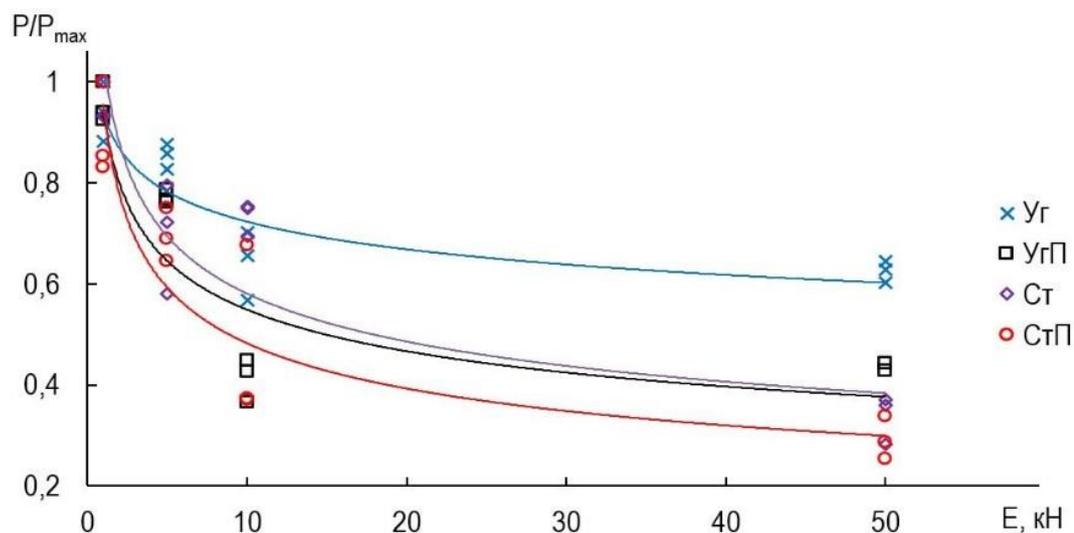


Рисунок 4.20 – Диаграмма остаточной несущей способности композиционных крупноячеистых образцов-панелей

Из диаграммы видно, что углепластиковые образцы-панели при локальном поперечном ударе обладают большей стойкостью. При полученных сквозных повреждениях углепластиковые (УГ) сотовые панели сохраняют несущую способность на 60%. У углепластиковых панелей с перфорацией (УГП) – 45%, стеклопластиковых (Ст) – 35%, стеклопластиковых с перфорацией (СтП) – 30%. Так же стоит отметить, что удар с энергией 5 Дж приводил к значительному снижению остаточной несущей способности.

Фотографии образцов после испытаний на сжатие с предварительным ударом приведены на рисунке 4.21.



*а)*

*б)*

Рисунок 4.21 – Характерный внешний вид образцов-панелей после испытания на сжатие (а – стеклопластиковые, б – углепластиковые)

Макротрещины, которые образовались при сжатии, на лицевой (сторона удара) и тыльной сторонах образца проросли в различных местах, такой характер распространения может быть связан со сложной структурой образца. Наличие концентраторов технического назначения (перфорация поверхности) способствует разгрузке и диссипации энергии разрушения в процессе нагружения образца.

На основании опытных данных по остаточной прочности дальнейшее исследование проводилось для углепластиковых образцов-панелей с перфорацией и без. Для более подробного анализа механизмов разрушения композитных

образцов-панелей испытания проводились с применением видеосистемы регистрации полей перемещений и деформаций Vic-3D.

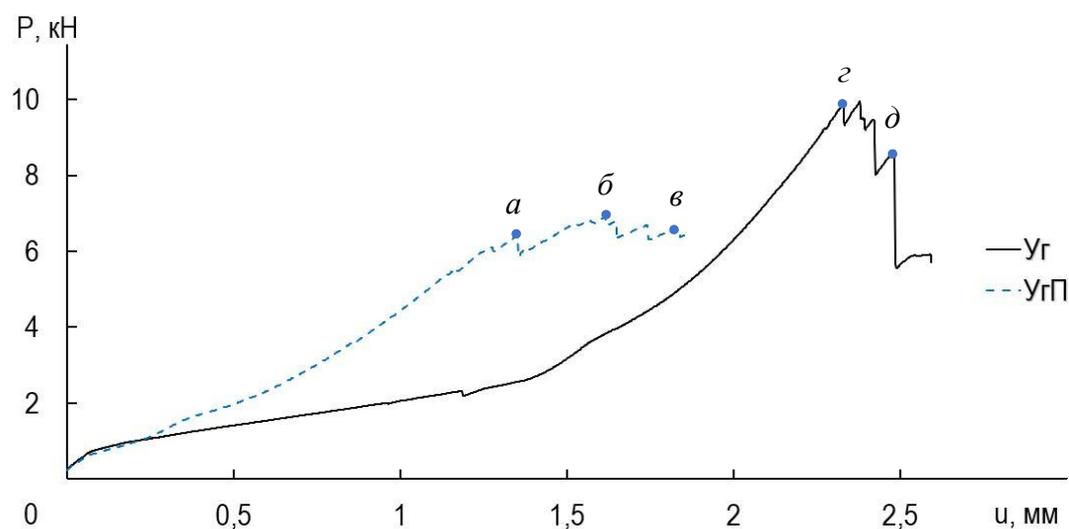


Рисунок 4.22 – Диаграмма нагружения углепластиковых образцов-панелей с перфорацией и без в опытах на сжатие после удара энергией 10Дж

На диаграмме нагружения углепластиковых панелей (рис. 4.22) наблюдаются срывы, связанные со структурным разрушением. Разрушение происходило в несколько этапов, каждый сопровождался спадом нагрузки порядка 6%. При дальнейшем нагружении происходило незначительное увеличение нагрузки и полное разрушение образца. Представляется интересным анализ конфигурации неоднородных полей деформаций для углепластиковых панелей. На диаграмме нагружения (рис. 4.22) отмечены точки а-д, для которых приведены поля интенсивности деформаций  $\varepsilon_i$  при соответствующих напряженно-деформированных состояниях (рис. 4.23).

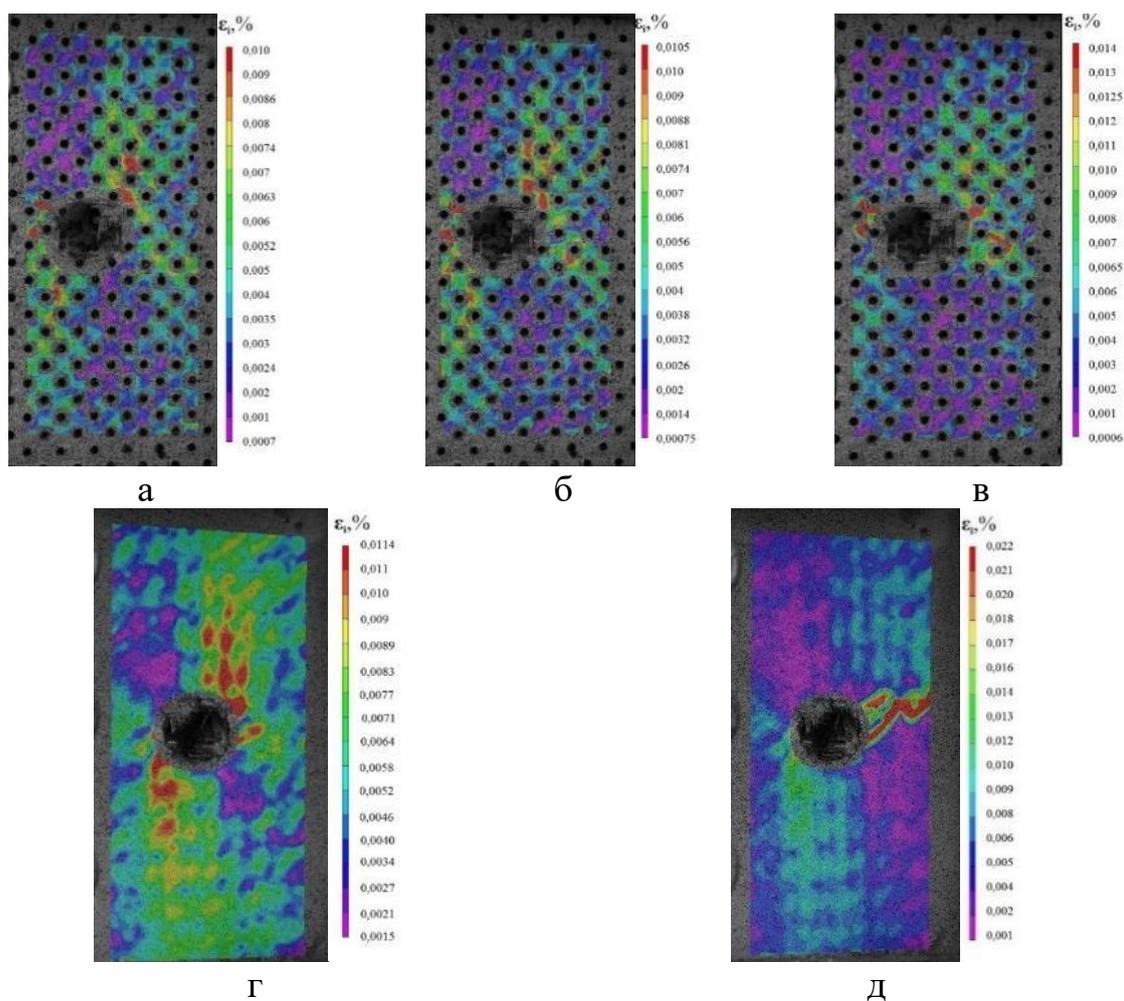


Рисунок 4.23 – Поля интенсивности деформаций  $\epsilon_i$  углепластиковых образцов-панелей в опытах на сжатие после удара при энергии 10 Дж при соответствующих напряженно-деформированных состояниях

Приведенные поля интенсивности деформаций при максимальной нагрузке наглядно демонстрируют место локализации дефектов, которые приводят к полному разрушению образца.

В результате проведения испытаний на сжатие после удара стеклопластиковых образцов-панелей с перфорацией и без были построены поля интенсивности деформаций. В качестве примера на рисунке 4.24 представлена диаграмма нагружения и отмечены точки а-е (при максимальном значении нагрузки), для которых приведены поля интенсивности деформаций  $\epsilon_i$  при соответствующих напряженно-деформированных состояниях (рис. 4.25).

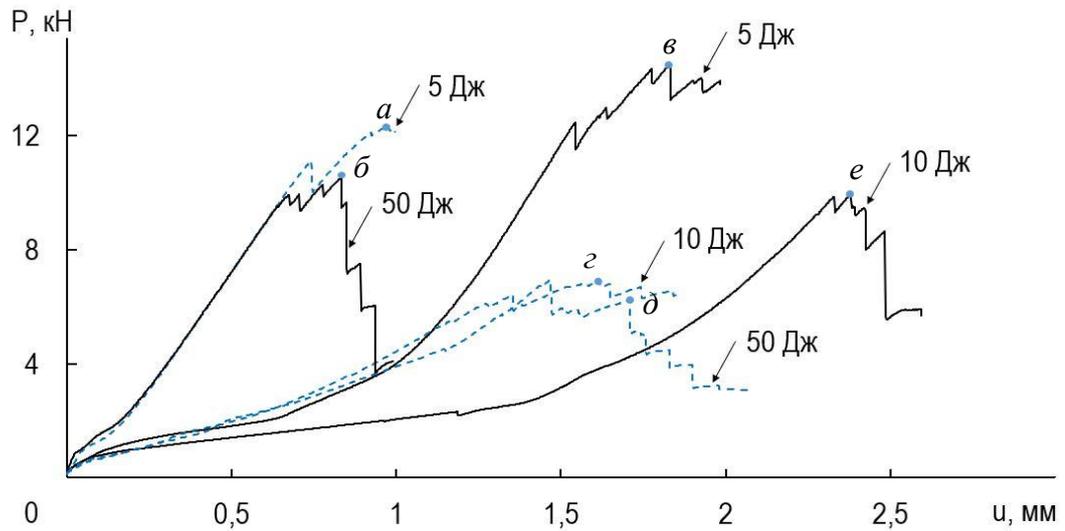


Рисунок 4.24 – Диаграмма нагружения стеклопластиковых образцов-панелей с перфорацией и без в опытах на сжатие после удара энергией 5, 10 и 50 Дж

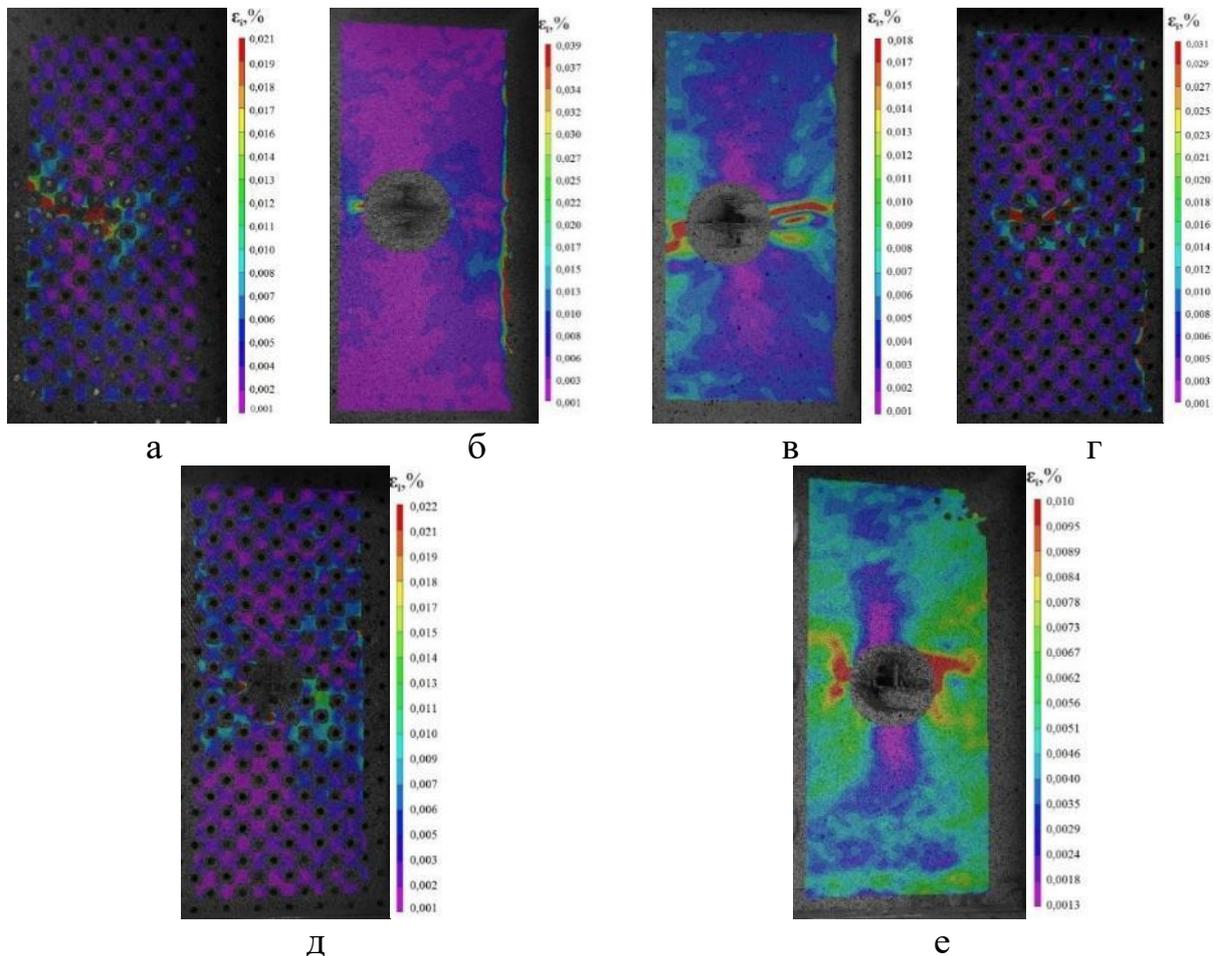


Рисунок 4.25 – Поля интенсивности деформаций  $\epsilon_1$  стеклопластиковых образцов-панелей с перфорацией и без в опытах на сжатие после удара при энергии 5, 10 и 50 Дж при соответствующих напряженно-деформированных состояниях

Анализ результатов данных, полученных при использовании видеосистемы, позволил выявить характерные особенности поведения стекло- и углепластиковых крупноячеистых образцов-панелей в опытах на сжатие после локального поперечного удара, которые заключались в высокой концентрации деформаций с левой и правой сторон от места удара и низкую в направлении сжатия. Данная особенность характерна как для стекло-, так и для углепластиковых образцов-панелей. Видеосистема позволила зафиксировать разрыв армирующих волок в области концентратора.

### **4.3 Деформирование и разрушение композитных образцов-пластин с пространственными схемами армирования после предварительных ударных воздействий**

Проблема экспериментального определения необходимого набора характеристик ПКМ имеет важное значение для проектирования изделий и конструкций из них. Для армирования ПКМ все большее применение находят многослойные углеродные ткани объемного плетения. На сегодняшний день ткани такого плетения используются в качестве армирующего материала углепластиков, работающих в сложных и жестких условиях воздействия высокоскоростных аэродинамических потоков, вибрации при наличии высоких температур. Обзор технологических и структурных аспектов, а также современное состояние и перспективы применения трехмерных тканей в полимерных композитах приведены в [57, 74, 92, 128].

Трехмерные пространственно-армирующие наполнители или 3D структуры используются для высокоэффективных композитных материалов в различных областях промышленности при проектировании и производстве ответственных деталей и конструктивных элементов. При этом реализуется основное преимущество многослойных тканей – их значительная прочность в трансверсальном (перпендикулярном слоям) направлении, что обеспечивает

нерасплаиваемость волокнистых пластиков в процессе их эксплуатации. Наряду с использованием новых технологий производства возникают проблемы в области получения знаний о процессах деформирования и разрушения, снижения прочностных и жесткостных характеристик при случайных ударно-волновых воздействиях в процессе эксплуатации изделий из композиционных материалов, требующие комплексных методик экспериментальных исследований.

Оценка влияния типов структур пространственно-армированных полимерных композиционных материалов на характер их механического поведения в условиях сжатия после удара с использованием методов дефектоскопии проведена для 8 серий образцов, изготовленных в рамках НИР совместно с ПАО «ОДК-Стаурн». Образцы были изготовлены из 6 различных схем переплетения 3D-тканых преформ, пропитанных методом «Resin Transfer Molding» с размерами  $152 \times 102 \times 4$  мм (RTM): Серия «А» – ортогональная (Orthogonal); «В» – ортогональная комбинированная (Orthogonal conjoint); «С» – с попарно межслойным армированием (Layer-to-layerinterlocked); «D» – с попарно межслойным армированием и продольным слоем (Layer-to-layerinterlocked with warp); «Е» – с попарно межслойным комбинированным армированием (Layer-to-layerinter lockedconjoint); «F» – со сквозным межслойным армированием (Angleinterlocked) (рис. 4.26). А также слоистые образцы из 2D-тканых преформ «G» – слоистые образцы; «H» – слоистые образцы, усиленные в поперечном направлении методом прошивки Tufting (рис. 4.27).

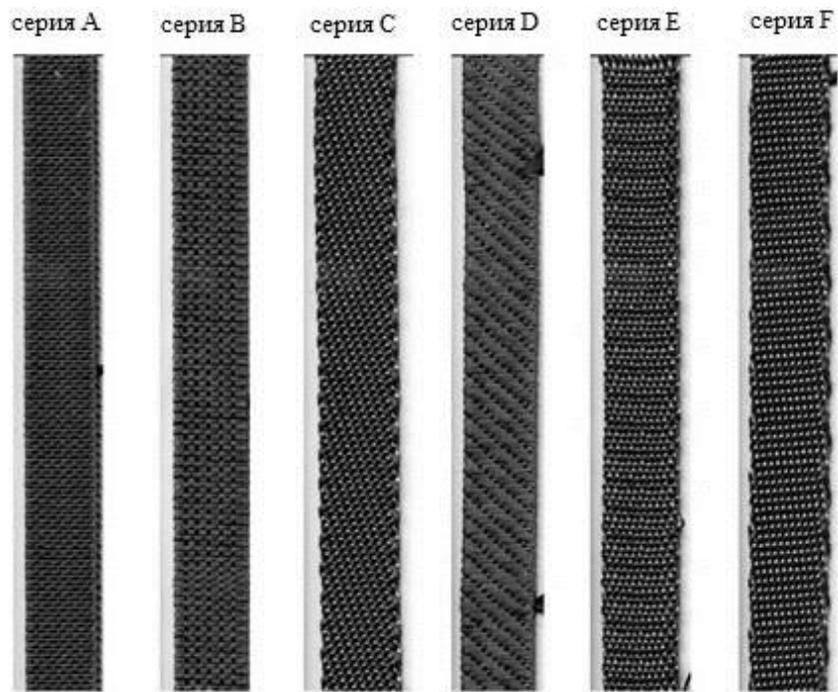


Рисунок 4.26 – Образцы 3D-тканых преформ

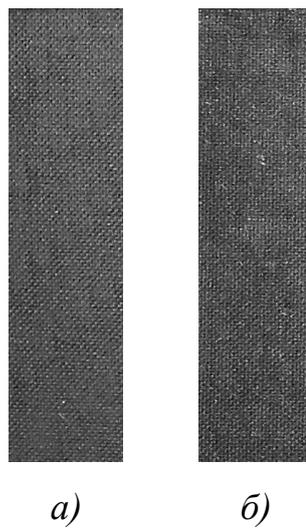


Рисунок 4.27 – Фотографии поверхности образцов структур серии «G» (а) и серии «H» (б)

На рисунке 4.28 приведены иллюстрации, отражающие сущность технологического метода Tufting.

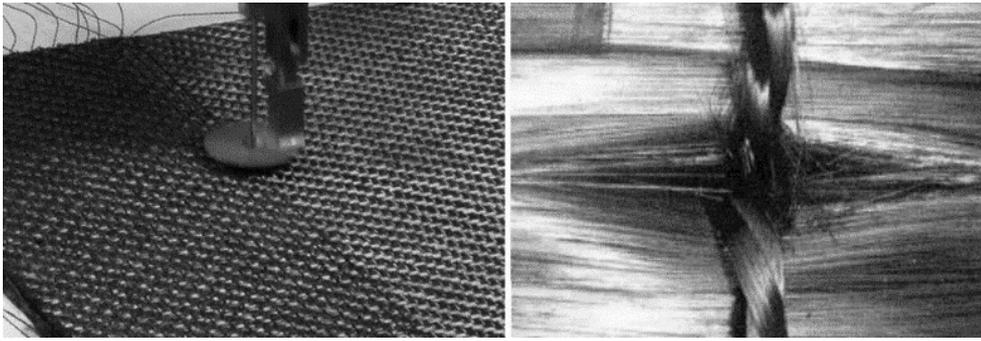


Рисунок 4.28 – Изготовление слоистых преформ, усиленных методом Tufting.

Методика испытаний была аналогичной методике, описанной в пункте 4.2. Энергии удара составляли 30, 40 и 50 Дж при постоянной массе груза. Минимальная энергия удара 30 Дж была выбрана в соответствии с стандартом ASTM D7136 [87], и соответствовала появлению видимых повреждений на поверхности образца, и рассчитана по формуле 4.1:

$$E = C_E \cdot h, \quad (4.1)$$

где:

$E$  – потенциальная энергия бойка до испытания, Дж;

$C_E$  – указанное отношение энергии удара к толщине образца, 6,7 Дж/мм;

$h$  – номинальная толщина образца, мм.

Максимальная энергия удара 50 Дж соответствовала значительным повреждениям, но не сквозному пробою.

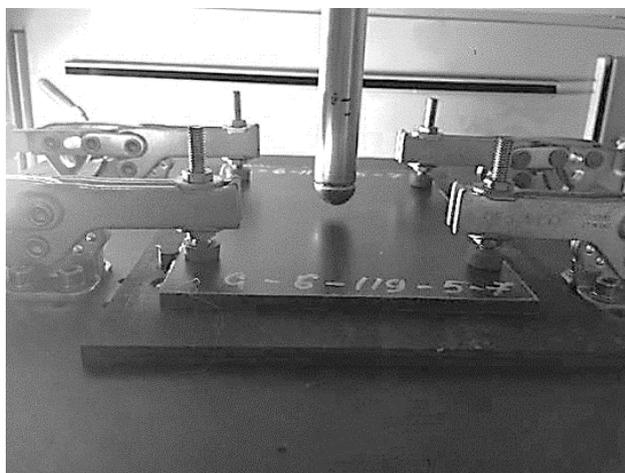


Рисунок 4.29 – Фотография образца-пластины, установленного в приспособлении для испытаний на удар испытательной системы Instron CEAST 9350

Удар производился перпендикулярно плоскости образца по геометрическому центру. Глубина вмятины фиксировалась сразу же после удара образца с помощью щупа электронного штангенциркуля. Так же для определения «релаксации» вмятины, проводились замеры через 7 суток после удара.

Оценка области повреждения после испытаний на удар также проводилась с использованием установки для проведения дефектоскопии методом шерографии Steinbichler ISIS mobile 3100 (рис. 4.30). При неразрушающем контроле определялся размер повреждения, возникшего в результате удара, с использованием метода шерографии, который основан на принципе сравнения интерференционных образов двух состояний поверхности объекта: начального и измененного (смещенного или деформационного).



Рисунок 4.30 – Фотография системы шерографии Steinbichler ISIS mobile 3100 при проведении исследования

Данный метод позволяет обнаруживать дефекты типа нарушение сплошности в многослойных конструкциях, отслоение оболочки от сотового или трубчатого заполнителя, непрочлеи, неприклеи и тому подобные дефекты (рис. 4.31). Для определения распространения внутренних дефектов были выбраны по три образца каждого материала, испытанных на каждом из трех уровней потенциальной энергии ударника, всего 24 шт.

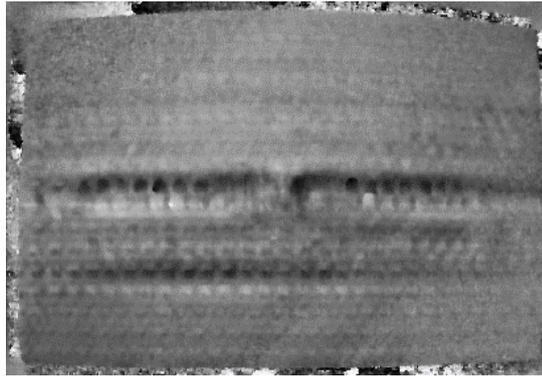


Рисунок 4.31 – Изображение образца-пластины после удара, полученное с помощью шерографа

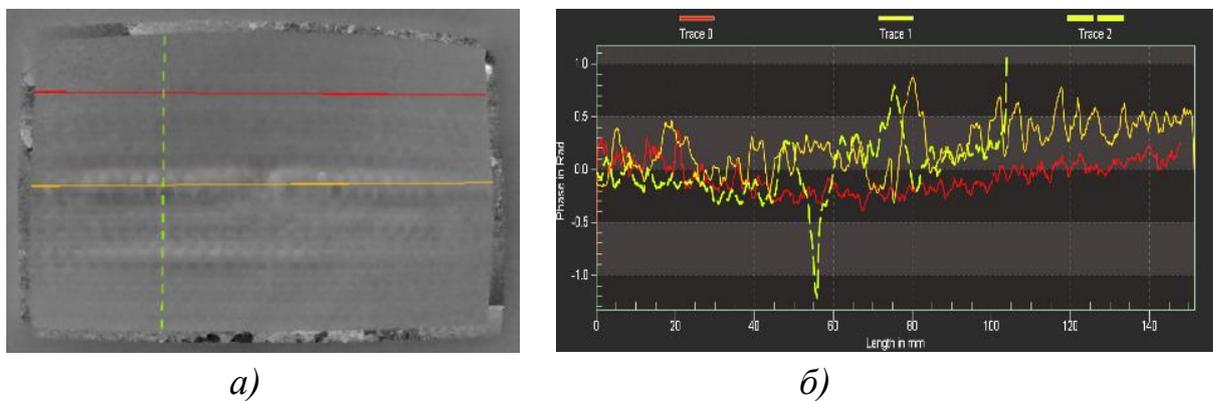


Рисунок 4.32 – Определение размера дефекта с использованием шерографа

Получив изображения (рис. 4.32, *a*) необходимо провести калибровку по образцу с использованием виртуальной линейки. При дальнейшей обработке изображения можно установить номинальные стробы перемещения (красная линия) на поверхности в бездефектной зоне образца. Стробы перемещений, обозначенные желтым и зеленым цветами, соответствуют зонам с наибольшими несплошностями образца. После того как зафиксированы области с дефектами образца производится замер несплошности. На рисунке 4.32, *б* представлены стробы перемещений после обработки изображения образца. Максимальное отклонение продольной стробы (желтой) от номинальной (красной) стробы являлось значением пятна повреждения в продольном направлении. Аналогичным образом определялись значения для продольного значения пятна повреждения.

Испытания на одноосное сжатие проводились с перемещением нагружающей траверсы  $v = 2$  мм/мин до разрушения или потери устойчивости образца с использованием стандартного зажимного приспособления (рис. 4.33).



Рисунок 4.33 – Фотография зажимного приспособления для испытания на сжатие с установленным образцом

В результате испытаний углепластиковых пластин при ударном воздействии различной интенсивности были получены диаграммы зависимости силы от времени  $P(t)$ . На рисунке 4.34 изображены диаграммы зависимости силы от времени при испытаниях с различными уровнями энергии удара.

Использование встроенного датчика и системы сбора и обработки данных позволяли получать информацию о работе разрушения образцов. Для получения значения работы разрушения в программном обеспечении Visual Impact проводилась следующие процедуры:

$$D_i = \iint_i \frac{F(t) - gm}{m} d^2 t, \quad (4.2)$$

где:  $D_i$  – перемещения (рассчитанная деформация) образца в точках;

$F(t)$  – сигнал зависимости силы от времени, получаемый системой сбора данных;

$g$  – ускорение свободного падения;

$m$  – полная масса ударника;

$t$  – время;

$i$  – номер точки.

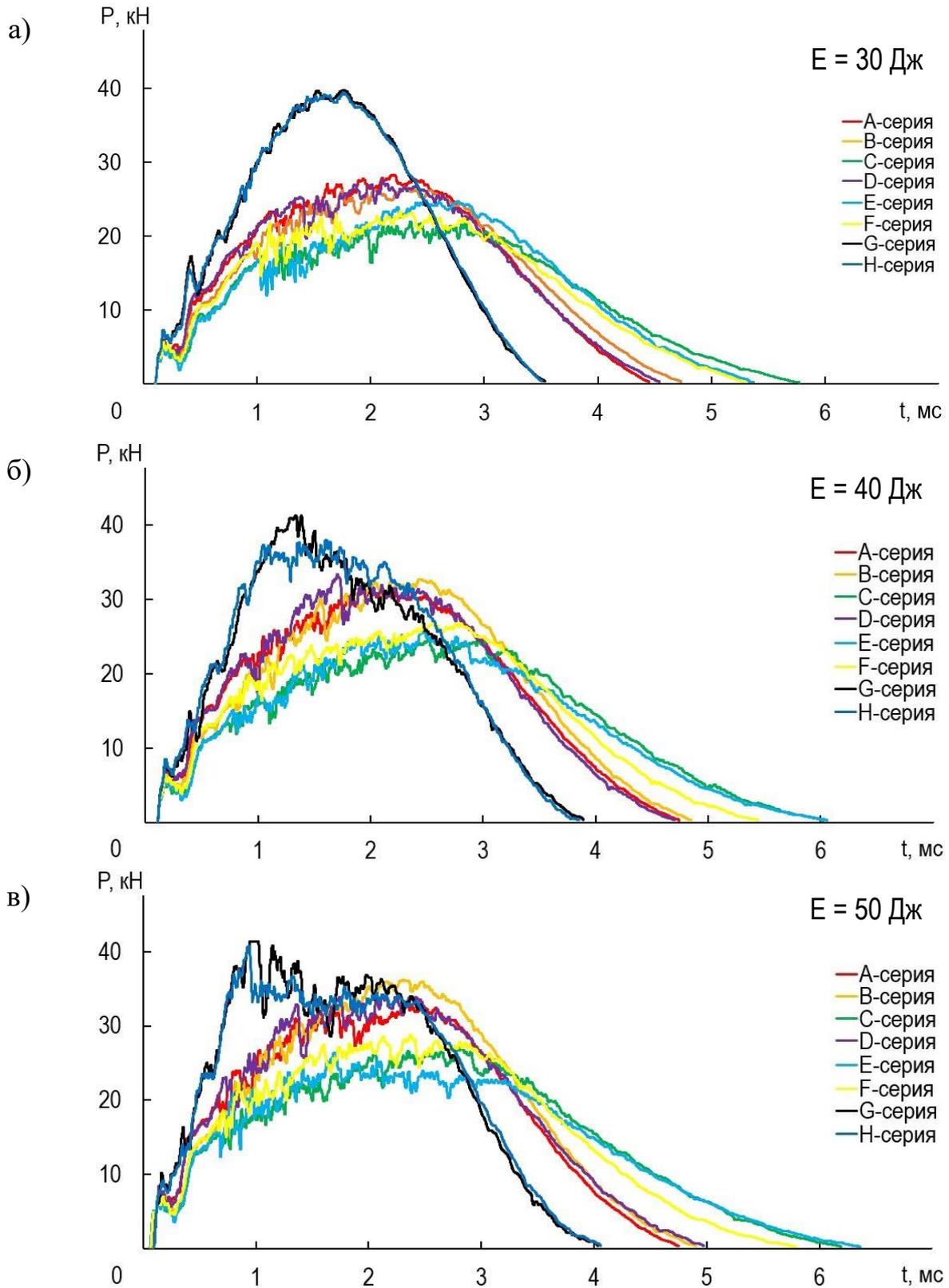


Рисунок 4.34 – Диаграммы зависимости силы от времени при различных потенциальных энергиях ударного воздействия углепластиковых образцов (а – 30 Дж, б – 40 Дж, в – 50 Дж)

Анализ результатов испытаний на ударное сопротивление позволяет сделать вывод, что образцы серии G и H (слоистые 2D) обладают повышенной сопротивляемостью поперечному локальному ударному воздействию по сравнению с пространственными схемами армированиями 3D.

При анализе программным обеспечением Visual Impact перемещения образца рассчитываются по формуле 4.3:

$$u = \sum_{i=0}^{i-1} u_i + t_{sampling} \frac{v_i + v_{i-1}}{2}, \quad (4.3)$$

$$t_{sampling} = t_i - t_{i-1}$$

где:

$t_{sampling}$  – время забора данных;

$v$  – скорость деформирования;

$$v_i = \int_i \frac{F(t) - gm}{m}. \quad (4.4)$$

Расчет энергии разрушения (работы) производился с помощью следующих уравнений 4.5 - 4.7:

$$A_i = \int_i F(u) du, \quad (4.5)$$

где:

$A_i$  – работа разрушения в каждой точке функции деформации;

$F(u)$  – кривая функции деформации.

При анализе программой поглощенная энергия рассчитывалась по формуле:

$$A = \sum_{i=0}^{i-1} A_i + t_{sampling} \frac{F_i v_i + F_{i-1} v_{i-1}}{2}, \quad (4.6)$$

Расчет энергии повреждения позволял оценить степень поглощения ударного воздействия образцов-пластин углепластиковых композитов.

$$A_{\%} = \frac{A}{E} \times 100\%. \quad (4.7)$$

Стоит отметить, что практически для всех образцов степень поглощения при энергии удара 30 Дж составляла 82%, при 40 Дж – 88%, при 50 Дж – 91%. Исключение составляет серия образцов А при энергии удара 40 Дж, у которой степень поглощения составляла 83%, что на 5% меньше других серий (рис. 4.35).

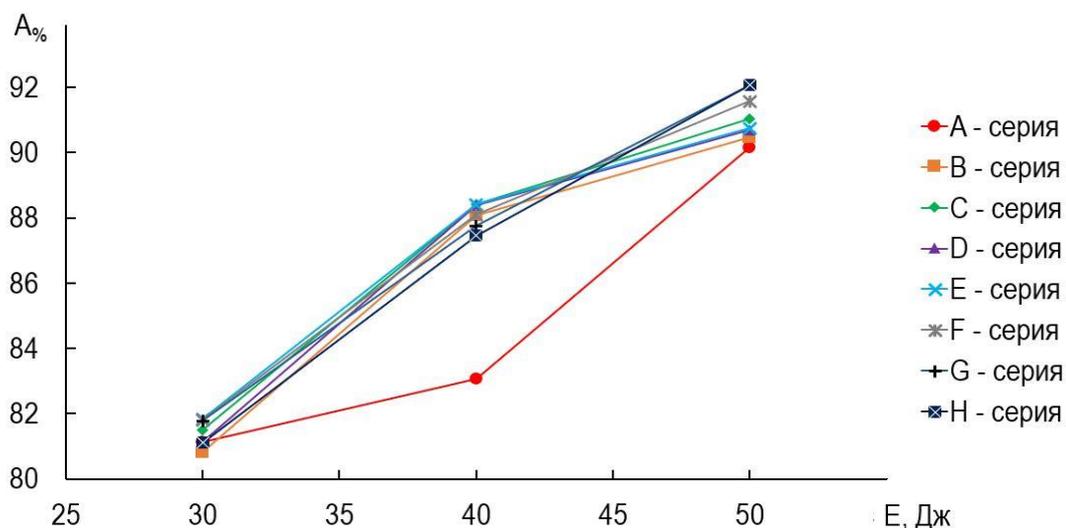


Рисунок 4.35 – Диаграмма степени поглощения удара углепластиковых образцов

В результате замеров глубины участков повреждения (впадин) сразу после испытания  $h_d$  и через 7 суток  $h'_d$ , а также характерного размера несплошности методом шерографии  $D$  были получены линейные геометрические характеристики вмятин. Целью измерения размеров участков повреждения материала после воздействия ударных нагрузок (измерение глубины вмятины и параметров шерографии) являлась оценка неразрушающими методами поврежденности материала после удара.

Для оценки поврежденности неразрушающими методами введем геометрическую характеристику  $Q$ , отражающую степень поврежденности образца после ударного воздействия с учетом данных неразрушающего контроля, как объем условного сегмента сферы-вмятины:

$$Q = \pi \cdot h_d'^2 \cdot \left( \frac{D}{2} - \frac{h_d'}{3} \right) \quad (4.8)$$

где  $Q$  – геометрический аналог степени поврежденности образца,  $\text{мм}^3$ ;

$h'_d$  - глубина вмятины через 7 суток после удара,  $\text{мм}$ ;

$D$  – размер несплошности образца, полученный методом шерографии,  $\text{мм}$ .

Влияние интенсивности ударного воздействия на геометрический аналог степени поврежденности представлено в виде диаграммы (рис. 4.36).

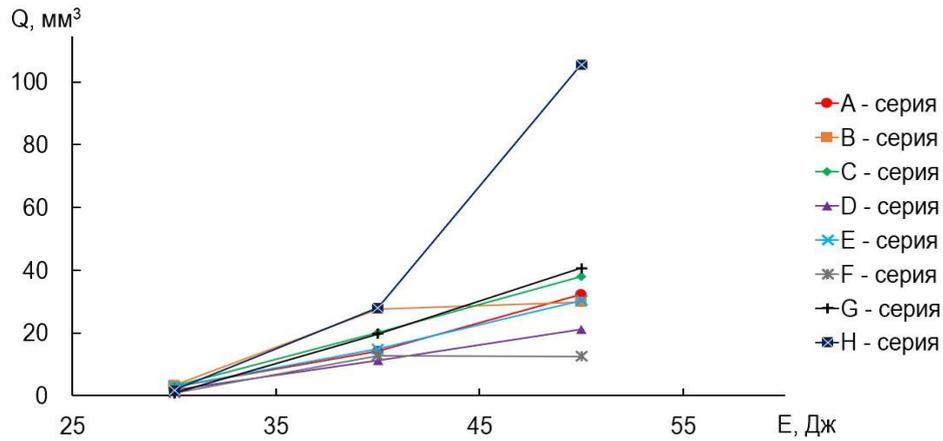


Рисунок 4.36 – Диаграмма зависимости геометрического аналога поврежденности от потенциальной энергии удара углепластиковых образцов

Рассматриваемые характеристики,  $A_{\%}$  – степень поглощения удара и  $Q$  – геометрический аналог поврежденности материала, можно учитывать при анализе работоспособности материала конструкции после ударного воздействия, когда разрушающий контроль невозможен.

Для выявления наличия или отсутствия функциональной зависимости была построена диаграмма «степени поглощения удара от геометрического аналога поврежденности» углепластиковых образцов (рис. 4.37). На диаграмме у образцов серии В и F при относительно одинаковых значениях поврежденности, может быть различная степень поглощения удара, при различной интенсивности удара.

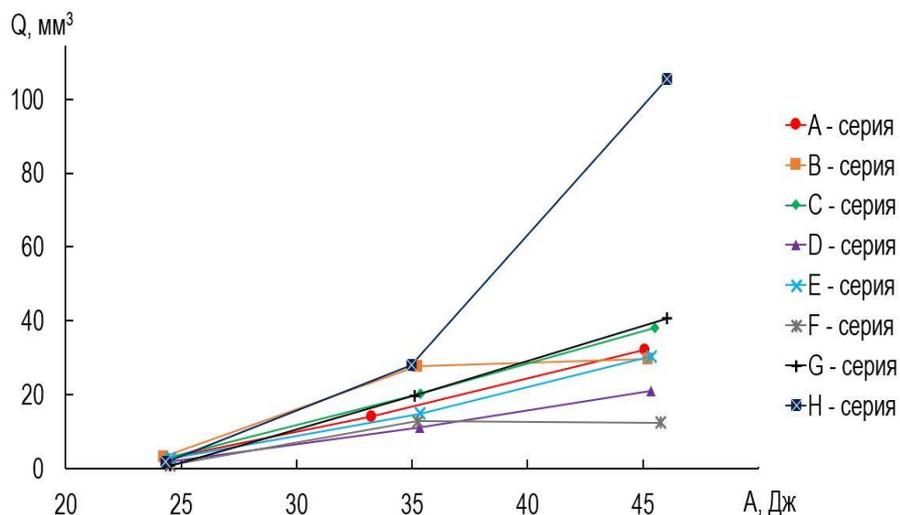


Рисунок 4.37 – Диаграмма зависимости геометрического аналога поврежденности углепластиковых образцов от поглощенной энергии удара

Для последующей оценки необходимы данные об остаточной несущей способности поврежденного материала (рис. 4.38).

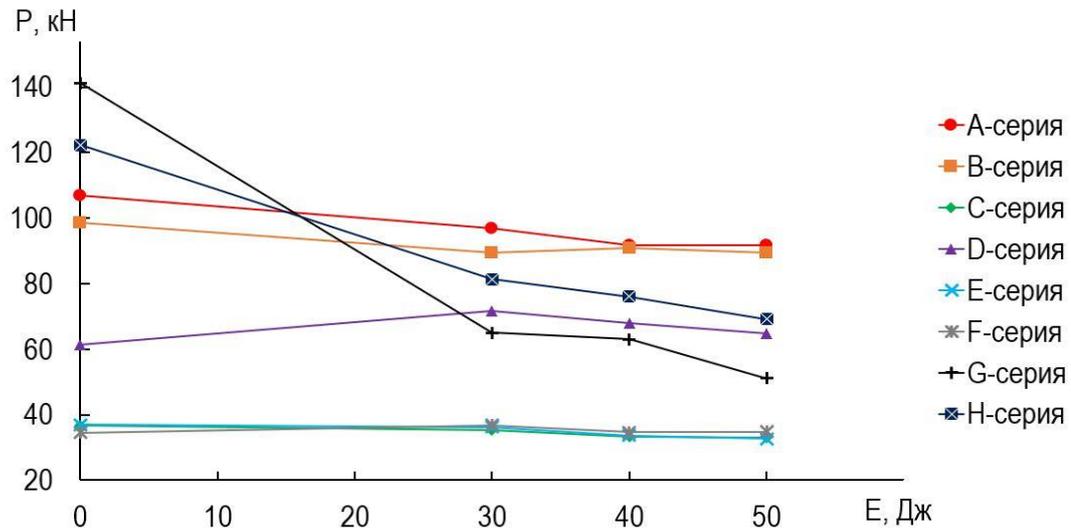


Рисунок 4.38 – Диаграмма зависимости значений максимальной нагрузки при сжатии от энергии удара углепластиковых образцов

Влияние интенсивности ударного воздействия на остаточные прочностные характеристики углепластиковых образцов-пластин отражает диаграмма зависимости значений максимальной нагрузки при сжатии от энергии удара (рис. 4.38). При сжатии неповрежденные образцы серии G и H из 2-D тканых преформ обладали более высокими характеристиками по сравнению с 3-D образцами. Однако после нанесения повреждений благодаря наличию трансверсально ориентированных волокон в структуре материала образцов A и B серий снижение остаточных характеристик происходило менее чем на 20% от номинальных значений при потенциальной энергии удара 50 Дж. У слоистых 2-D образцов снижение составляло более 60% в аналогичных условиях воздействий. Образцы серии C, E, F, в отличие от остальных, в процессе сжатия теряли устойчивость и сминались, при этом уровень несущей способности (самый низкий из представленных материалов) практически не менялся.

Для косвенной оценки остаточной прочности поврежденной зоны конструкции предлагается использовать диаграммы зависимостей остаточной прочности при сжатии от работы поглощения удара углепластиковых образцов.

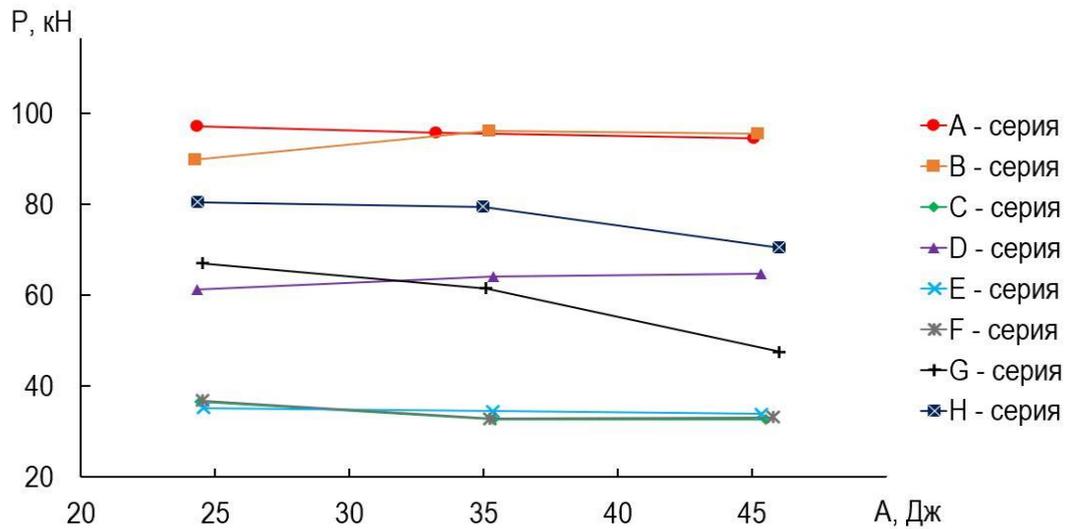


Рисунок 4.39 – Диаграмма зависимости нагрузки при сжатии от работы поглощения удара

Линейные зависимости на диаграммах (рис. 4.39) с пространственными схемами армирования свидетельствуют о том, что вся энергия удара была поглощена образцом без механизмов расслаивания, за исключением образцов с слоистыми типами армирования.

Альтернативным методом оценки поврежденности и остаточной прочности пространственноармированных углепластиковых композитов можно с использованием совмещенной диаграммы (рис. 4.40).

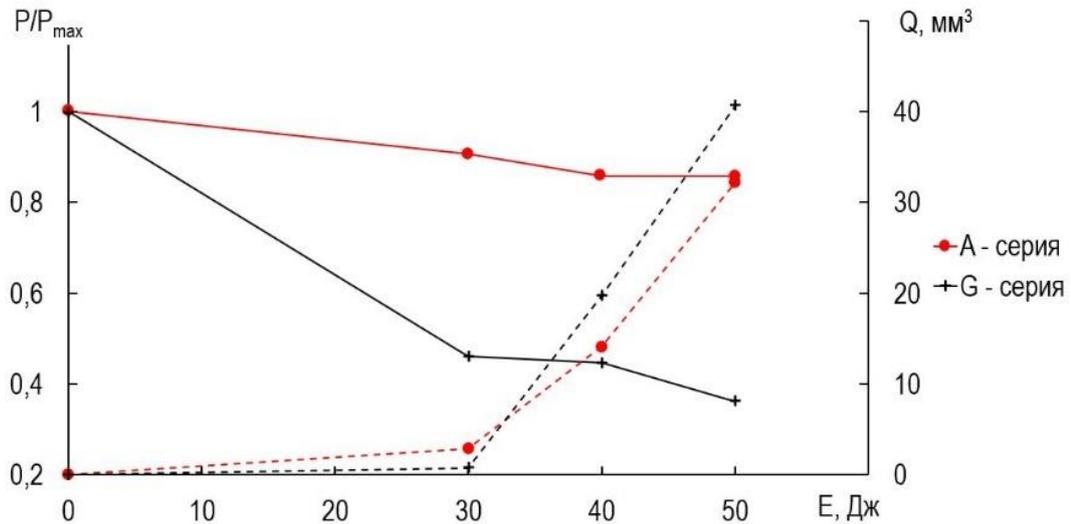


Рисунок 4.40 – Совмещенная диаграмма остаточной прочности и геометрического аналога поврежденности углепластиковых образцов

На совмещенной диаграмме остаточной несущей способности и геометрического аналога поврежденности (рис. 4.40) видно, что при одинаковой относительной поврежденности у 3D пространственно-армированных образцов относительное снижение остаточной прочности происходило менее чем на 15%, по сравнению с 2D слоистыми образцами, у которых остаточная прочность снижалась более чем на 60% от номинального значения.

В рамках исследования было выявлено влияние предварительного ударного воздействия на деформационные свойства углепластиковых образцов. Для примера на рис. представлена диаграмма нагружения образцов-пластин серии А при сжатии (рис. 4.41).

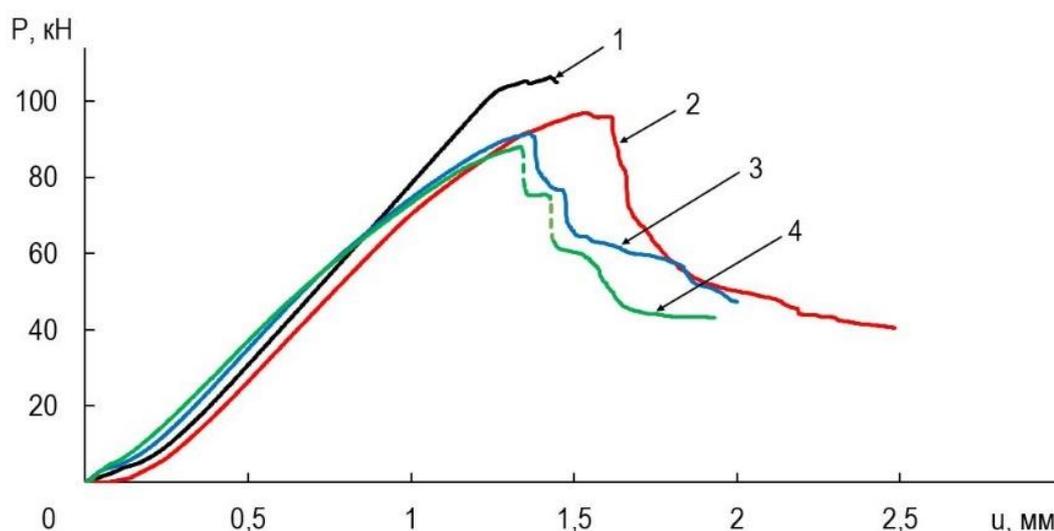


Рисунок 4.41 – Диаграммы нагружения образцов-пластин при сжатии после удара (1 – без ударного воздействия; 2 – удар с энергией 30 Дж; 3 – 40 Дж; 4 – 50 Дж), штриховой линией обозначены зоны динамического разрушения

В результате анализа диаграмм нагружения сделан вывод, что дополнительный предварительный удар способствует реализации деформационного ресурса композиционного материала в процессе сжатия.

### Выводы по главе

1. Проведены серии экспериментов по оценке влияния предварительного ударного воздействия на статическую прочность, жесткость и усталостную долговечность слоистых полимерных композитов. При поперечном ударном воздействии выявлено наличие порогового значения ударной чувствительности, до достижения которого снижения остаточной прочности, как и жесткости, стеклопластика не наблюдалось, в отличие от предварительного ударного растяжения. Аналогичные зависимости наблюдались в исследованиях влияния предварительного ударного растяжения и изгиба на усталостную долговечность. Отмечено изменение механизмов разрушения образцов при статическом и циклическом растяжении с увеличением энергии предварительного удара.
2. Выполнен комплекс испытаний с целью исследования живучести углепластиковых слоистых образцов-пластин с использованием видеосистемы

анализа полей перемещений и деформаций. Анализ результатов механических испытаний позволил сделать вывод, что для углепластиковых образцов в определенном диапазоне энергии воздействия существует область ударной чувствительности. Проведена количественная оценка остаточной несущей способности стекло- и углепластиковых образцов-панелей с перфорацией и без. Выявлено, что углепластиковые образцы-панели без перфорации при локальном поперечном ударе обладают большей стойкостью. При полученных сквозных повреждениях углепластиковые (УГ) сотовые панели сохраняют несущую способность на 60%. У углепластиковых панелей с перфорацией (УГП) – 45%, стеклопластиковых (СТ) – 35%, стеклопластиковых с перфорацией (СТП) – 30%. Так же стоит отметить, что удар с энергией 5 Дж приводил к значительному снижению остаточной несущей способности всех образцов.

3. Изучены зависимости деформирования и разрушения композитных образцов-пластин с пространственными схемами армирования после предварительных ударов с различными энергиями воздействия. Предложена методика оценки поврежденности композитных образцов-пластин, на основе результатов неразрушающего контроля с использованием метода шерографии. Выявлено, что помимо снижения остаточной прочности предварительное ударное воздействие способствует появлению равновесных участков деформирования.

Основные результаты, содержащиеся в главе, отражены в публикациях автора [64, 65, 66, 67, 150, 151, 163].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны новые оригинальные методики испытаний композитных образцов при последовательных циклических, ударных и квазистатических нагружениях, позволяющие проводить анализ степени изменения остаточных механических свойств материалов в зависимости от параметров режимов комплексных термо-механических воздействий. Проведен анализ эффективности использования предложенных методик.
2. Проведено комплексное исследование механического поведения слоисто-волоконистых стеклопластиковых образцов при циклическом и последовательном квазистатическом растяжении. Предложен новый способ интерпретации экспериментальных данных в виде диаграммы усталостной чувствительности. Получены опытные данные, подтверждающие отличие в характере изменения остаточной прочности стеклопластиков с различными схемами укладки армирующих слоев в зависимости от температуры окружающей среды.
3. Получены новые опытные данные, отражающие влияние дополнительных вибрационных воздействий на реализацию деформационных резервов стеклопластиковых стержневых и углепластиковых трубчатых образцов в процессах квазистатического растяжения.
4. Проведено экспериментальное исследование влияния продольного и поперечного ударного воздействия различной интенсивности на остаточную прочность, жесткость и усталостную долговечность слоисто-волоконистых стеклопластиковых образцов. Выявлен порог ударной чувствительности исследуемых образцов. Показана смена механизмов разрушения образцов при поперечных ударах с энергиями, превышающими порог ударной чувствительности.
5. С целью оценки остаточной несущей способности крупноячеистых стекло- и углепластиковых композиционных образцов-панелей проведены серии опытов на сжатие после локального поперечного удара с различными энергиями воздействия. Показано, что использование данных об остаточной несущей способности является

целесообразным для сравнения материалов с точки зрения их живучести и безопасности при эксплуатации.

6. Проведен анализ влияния типов структур пространственно-армированных полимерных композиционных материалов на характер их механического поведения в условиях сжатия после удара с использованием методов дефектоскопии.

7. Результаты работы использованы на предприятии ПАО «ОДК Сатурн» и в учебном процессе кафедры «Экспериментальная механика и конструкционное материаловедение» ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» по направлению 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов» по дисциплинам «Экспериментальная механика материалов» и «Экспериментальная механика композитов», что подтверждается актами об использовании результатов. Акты о внедрении приведены в Приложении.

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

$\varphi_a$  – амплитуда угла закручивания [град/мин];

$t$  – время [с];

$h_d$  – глубина вмятины после ударного воздействия [мм];

$h'_d$  – глубина вмятины через 7 суток после ударного воздействия [мм];

$R$  – коэффициент асимметрии цикла;

$K_{En}'$  – коэффициент сохранения статического модуля упругости;

$K_{Bn}'$  – коэффициент сохранения статической прочности;

$\sigma_{max}$  – максимальное значение напряжений в цикле [Па];

$E$  – модуль упругости [Па];

$E_n$  – модуль упругости после предварительного циклирования [Па];

$P$  – нагрузка [Н];

$i$  – номер точки;

$E'$  – остаточный модуль упругости [Па];

$P'$  – остаточная несущая способность;

$\sigma'$  – остаточный предел прочности [Па];

$n'$  – относительное число циклов предварительного воздействия;

$u$  – перемещение образца [мм];

$D_i$  – перемещения образца в точках при ударном воздействии [мм];

$m$  – полная масса ударника [кг];

$n'_{0,02}$  – порог усталостной чувствительности;

$A_{\%}$  – поглощенная энергия [Дж];

ПКМ – полимерные композиционные материалы;

$\sigma_b$  – предел прочности [Па];

$\sigma_{Bn}$  – предел прочности после предварительного циклирования [Па];

$M$  – приложенный момент [Н·м];

$D$  – размер несплошности образца, полученный методом шерографии [мм];

$Q$  – геометрический аналог степени поврежденности [мм<sup>3</sup>];

$v$  – скорость деформирования;

$h$  – толщина образца [м];

$\varphi$  – угол закручивания образца [град/мин];

$C_E$  – указанное отношение энергии удара к толщине образца [Дж/мм];

$g$  – ускорение свободного падения [ $\text{м/с}^2$ ];

$\nu$  – частота циклического нагружения [Гц];

$N_{\text{max}}$  – число циклов до разрушения при циклическом нагружении (усталостная долговечность);

$b$  – ширина образца [м];

$e'$  – энергия предварительного ударного воздействия;

$E_{\text{max}}$  – энергия разрушения [Дж];

$A$  – энергия разрушения (работа разрушения) [Дж].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адамов А.А., Лаптев М.Ю., Горшкова Е.Г. Анализ отечественной и зарубежной нормативной базы по механическим испытаниям полимерных композиционных материалов // Конструкции из композиционных материалов. – 2012. – № 3. – С. 72–77.
2. Амбарцумян С.А. Разномодульная теория упругости. – М.: Наука. – 1981. – 278 с.
3. Амбарцумян С.А., Хачатрян А.А. Основные уравнения теории упругости для материалов, разносопротивляющихся растяжению и сжатию // Изв. АН СССР. МТТ. – 1966. – № 2. – С. 44–53.
4. Бабушкин А.В. Экспериментальное исследование усталости порошковых композитов на основе технически чистого железа // Вестник пермского государственного технического университета. Механика. – 2010. – № 2. – С. 17–33.
5. Биомеханика прочности волокнистых композитов. Полилов А.Н., Татусь Н.А. М.: Физматлит, 2018. – 328 с. – ISBN 978-5-9221-1760-9.
6. Вильдеман В.Э., Бабушкин А.В., Третьяков М.П., Ильиных А.В., Третьякова Т.В., Ипатова А.В., Словигов С.В., Лобанов Д.С. Механика материалов. Методы и средства экспериментальных исследований: учебное пособие / под ред. В. Э. Вильдемана. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2011. – 165 с. ISBN 978-5-398-00652-0.
7. Вильдеман В.Э. Закономерности и модели процессов накопления повреждений, закритического деформирования и структурных разрушений композиционных материалов // Вестник Пермского государственного технического университета. Динамика и прочность машин. – 2001. № 2. – С. 37-45.
8. Вильдеман В. Э., Ломакин Е. В., Третьяков М. П. Эффект вибрационной стабилизации процесса закритического деформирования // Доклады академии наук. – 2016. – Т. 467. – № 3. – С. 284–288.

9. Вильдеман В.Э., Соколкин Ю.В., Ташкинов А.А. Механика неупругого деформирования и разрушения композиционных материалов / Под ред. Ю.В. Соколкина. — М.: Наука, Физматлит, 1997. — 288 с.
10. Вильдеман В.Э., Староверов О.А. Оценка остаточных свойств слоисто-волоконистых стеклопластиков после предварительных циклических воздействий // XII Международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций», 21-25 мая, 2018 г. - Екатеринбург, 2018. – с 375.
11. Вильдеман В.Э., Третьякова Т.В., Лобанов Д.С. Методика экспериментального исследования закритического деформирования на образцах специальной усложненной конфигурации с применением метода корреляции цифровых изображений // Вестник Пермского государственного технического университета. Механика. – 2011. – № 4. – С. 15–28.
12. Воронов Л.В., Coles L.A., Нихамкин М.Ш., Silberschmidt V.V., Семенов С.В., Болотов Б.П. Экспериментальное исследование баллистического повреждения углепластика, используемого в авиастроении // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2018. – №54. – С. 5–16.
13. Гольдштейн Р.В., Морозов Н.Ф. Механика деформирования и разрушения наноматериалов и нанотехнологии. //Физическая мезомеханика, – 2007. – С. 17–30.
14. ГОСТ 11262-80. Пластмассы. Метод испытания на растяжение.
15. ГОСТ 19109-84. Пластмассы. Метод определения ударной вязкости по Изоду.
16. ГОСТ 25.601-80. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания плоских образцов на растяжение при нормальной, повышенной и пониженной температурах.
17. ГОСТ 25.604-82. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей

- (композитов). Метод испытания на изгиб при нормальной, повышенной и пониженной температурах.
18. ГОСТ 33495-2015. Композиты полимерные. Метод испытания на сжатие после удара.
  19. ГОСТ 33496-2015. Композиты полимерные. Метод испытания на сопротивление повреждению при ударе падающим грузом.
  20. ГОСТ 34250-2017. Пластмассы. Метод определения прочности при ударном растяжении.
  21. ГОСТ 4648-71. Пластмассы. Метод испытания на статический изгиб.
  22. ГОСТ Р 57143-2016. Композиты полимерные. Метод испытания на усталость при циклическом растяжении.
  23. ОСТ 92-1472-78. Пластмассы теплозащитного и конструкционного назначения. Метод испытания на сдвиг по слою.
  24. ГОСТ 4647-2015. Метод определения ударной вязкости по Шарпи.
  25. ISO 179-1:2000. Plastics — Determination of Charpy impact properties — Part 1: Non-instrumented impact test.
  26. ISO 8256:2004. Plastics — Determination of tensile-impact strength.
  27. Джоунс Р., Уайкс К. Голографическая и спекл-интерферометрия. — М.: Мир. — 1986. — С. 328.
  28. Долганина Н.Ю., Сапожников С.Б. Исследование влияния типа переплетения нитей на прочность тканевых преград при локальном ударе // Вестник южно-уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. — 2013. — Т. 13. — №2. — С. 95–104.
  29. Ерасов В.С., Крылов В.Д., Панин С.В., Гончаров А.А. Испытания полимерного композиционного материала на удар падающим грузом // Авиационные материалы и технологии. — 2013. — №3 (28). — С. 60-64.
  30. Жихарев М.В., Сапожников С.Б. Баллистические повреждения слоистого стеклопластика и их ремонт методом ультразвуковой пропитки матричным компаундом // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. — 2015. — №4. — С. 94–109.

31. Засимчук Е.Э., Маркашова Л.И., Турчак Т.В., Чаусов Н.Г., Пилипенко А.П., Параца В.Н. Особенности трансформации структуры пластичных материалов в процессе резких смен в режиме нагружения. // Физ. мезомеханика. – 2009. – Т. 12. – № 2. – С. 77–82.
32. Зайцев А.В. Локальная неустойчивость деформирования и самоподдерживаемое разрушение зернистых композитов на стадии разупрочнения // Физическая мезомеханика. – 2004. – Т. 7 (Спец. выпуск. Часть 1). – С. 351–354.
33. Зорин В.А. Опыт применения композиционных материалов в изделиях авиационной и ракетно-космической технике // Конструкции из композиционных материалов. — 2011. — №4. — С. 44-59.
34. Зубова Е.М., Лобанов Д.С., Струнгарь Е.М., Вильдеман В.Э., Лямин Ю.Б. Применение метода акустической эмиссии к исследованию процесса накопления повреждений функционального керамического покрытия // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2019. – №1. – С. 39–49.
35. Кадыкова Ю.А. Полимерный композиционный материал конструкционного назначения, армированный базальтовым волокном // Журнал прикладной химии. – 2012. – Т. 85. – № 9. – С. 1523–1527.
36. Качанов Л.М. Основы теории пластичности / М.: Наука, 1969. – С. 420.
37. Кудрин А.М., Караева О.А., Габриельс К.С., Солопченко А.В. Определение предела прочности полимерного композиционного материала на сжатие после удара в соответствии со стандартом ASTM D 7137 // Вестник воронежского государственного технического университета. – 2018. – Т.14. – № 2. – С. 164-169.
38. Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность. Справочник / М.: Машиностроение. – 1985. – 224 с.
39. Кудрявцев О.А., Сапожников С.Б. Моделирование на уровне нитей тканых и однонаправленных композитных материалов с термопластичной матрицей

- при баллистическом нагружении // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2016. – №3. – С. 108–119.
40. Лебедев А.А., Марусий О.И., Чаусов Н.Г., Зайцева Л.В. Исследование кинетики разрушения пластичных материалов на заключительной стадии деформирования // Пробл. прочности. – 1982. – № 1. – С. 12–18.
41. Лебедев А.А., Чаусов Н.Г., Евецкий Ю.Л. Методика построения полных диаграмм деформирования листовых материалов // Пробл. прочности. – 1986. – № 9. – С. 29–32.
42. Лобанов Д.В, Сидоренко С.А., Ющенко Д.А., Большепанова А.В. Анализ и рациональный выбор полимерных композиционных материалов для изделий по их физико-механическим свойствам // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2015. – № 2. – С. 206–212.
43. Лобанов Д.С., Вильдеман В.Э., Спаскова Е.М., Чихачев А.И. Экспериментальное исследование влияния дефектов на прочность композитных панелей методами корреляции цифровых изображений и инфракрасной термографии // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2015. – №4. – С. 159–170.
44. Ломакин Е.В. Определяющие соотношения механики разномодульных материалов. – Препринт № 159. М.: ИПМ АН СССР. – 1980. – 64 с.
45. Ломакин Е. В., Работнов Ю. Н. Соотношения теории упругости для изотропного разномодульного тела // Изв. АН СССР МТТ. –1978. – № 6. – С.29–38.
46. Любутин П.С., Панин С.В., Титков В.В., Еремин А.В., Сундер Р. Развитие метода корреляции цифровых изображений для изучения процессов деформации и разрушения конструкционных материалов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2019. – №1. – С. 88–109.

47. Матвиенко Ю.Г. Акустикоэмиссионная диагностика процессов разрушения структуры композита при растягивающих, сжимающих и циклических нагрузках. / Ю.Г. Матвиенко, И.Е. Васильев, В.И. Иванов, С.В. Елизаров. // Дефектоскопия. – 2016. - №8. – С. 30.
48. Матвиенко Ю.Г., Васильев И.Е., Панков А.В., Трусевич М.А., Ранняя диагностика зон повреждения и разрушения композиционных материалов с использованием хрупких тензоиндикаторов и акустической эмиссии // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2016. – Т. 82. – № 1. – С. 45–56.
49. Махутов Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность / М.: Машиностроение. – 1981. – 272 с.
50. Методы статических испытаний армированных пластиков/ Ю.М. Тарнопольский, Т.Я. Кинцис – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия, 1981. – 272 с.
51. Механика материалов. Методы и средства экспериментальных исследований: учебное пособие / В.Э. Вильдеман [и др.]; под ред. В.Э. Вильдемана. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. – 2011. – 165 С.
52. Нихамкин М.Ш., Воронов Л.В., Болотов Б.П. Экспериментальное определение полей динамических деформаций в металлических и композитных пластинах при ударе // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2015. – №2. – С. 103–115.
53. Нихамкин М.Ш., Воронов Л.В., Гладкий И.Л. Экспериментальное исследование высокоскоростного ударного повреждения углепластиков для изготовления деталей авиационных двигателей // Конструкции из композиционных материалов. – 2015. – №4 (140). – С. 74–80.
54. Оборин В.А., Бачурихин В.П., Соковиков М.А., Наймарк О.Б., Исследование морфологии поверхности разрушения алюминиевых сплавов при предварительном динамическом и последующем гигацикловом нагружении// Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации. – 2015. – №1. – С 235-239.

55. Полилов А.Н. Экспериментальная механика композитов: учеб. пособие. — Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. — 375 с.
56. Полилов А.Н., Татусь Н.А. Оценки долговечности композитных пластин с расслоениями // Живучесть и конструкционное материаловедение. — 2016. — С. 86–90.
57. Полимерные композиционные материалы: Научное издание / Баженов С.Л., Берлин А.А., Кульков А.А., Ошмян В.Г. — Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2010. — 352 с.
58. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела / М.: Наука, 1969. — 712 с.
59. Разрушение конструкций из композитных материалов/ И.В. Грушецкий, И.П. Дмитриенко, А.Ф. Ермоленко и др.; Под редакцией В.П. Тамужа, В.Д. Протасова — Рига: Зинатне, 1986. — 264 с.
60. Райхер В.Л. О некоторых ключевых проблемах обеспечения безопасности эксплуатации композитных авиационных конструкций по условиям усталостной долговечности // Композиты и наноструктуры. — 2018. — Т.10. — №3 (39). — С. 116–122.
61. Сапожников С.Б., Жихарев М.В., Кудрявцев О.А. Экспериментальная оценка ударной прочности слоистых композитов с термопластичной матрицей // Вестник Южно-уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. — 2016. — № 1. — С. 72–81.
62. Сапожников С.Б., Жихарев М.В. Типы повреждений тканевого стеклопластика и ремонт расслоений после низкоскоростного удара // Композиты и наноструктуры, г. Москва. — 2014. — Т. 6. — № 3. — С. 68–75.
63. Спаскова Е.М., Третьякова Т.В. Методика экспериментального исследования напряженно-деформированных состояний материала с использованием метода корреляции цифровых изображений // Прикладная математика, механика и процессы управления. — 2013. — Т.1. — С. 109–118.
64. Староверов О.А. Экспериментальное исследование влияния низкоскоростных ударных нагрузок на остаточные прочностные характеристики

- композиционных материалов // Всероссийская научная конференция «Проблемы деформирования и разрушения материалов и конструкций», 17-19 июня 2015 г. – Пермь, 2015. – С. 96.
65. Староверов О.А., Бабушкин А.В., Горбунов С.М. Оценка степени поврежденности углепластиковых композиционных материалов при ударном воздействии. // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2019. – №1. – С. 161–172.
66. Староверов О.А., Вильдеман В.Э. Деформирование и разрушение полимерных композитов в условиях комплексных механических воздействий // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, 19-24 августа 2019, Уфа – С. 270.
67. Староверов О.А., Вильдеман В.Э. Исследование деформационных и прочностных свойств полимерных композиционных материалов в условиях комплексных механических воздействий. // XXI Зимняя школа по механике сплошных сред. 18 – 22 февраля 2019, Пермь – С. 282.
68. Староверов О.А., Вильдеман В.Э. Экспериментальное исследование влияния предварительных циклических нагрузок на жесткостные и прочностные свойства стеклопластиковых композитов // Сборник трудов Международной научно-технической молодежной конференции «Перспективные материалы конструкционного и медицинского назначения», 26–30 ноября 2018 г., – Томск, 2018. – С. 84-85.
69. Староверов О.А., Струнгарь Е.М., Третьяков М.П., Третьякова Т.В. Особенности экспериментальных исследований трубчатых образцов композиционных материалов в условиях сложного напряженного состояния // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2017. – № 51. – С. 104–114.
70. Стрижиус В.Е. Методы расчета усталостной долговечности элементов авиаконструкций. Справочное пособие / М.: Машиностроение. – 2012. – 272 с.
71. Стружанов, В.В., Миронов В.И. Деформационное разупрочнение материала в элементах конструкций / Екатеринбург: УрО РАН. – 1995. – 191 с.

72. Стружанов, В.В. Свойства разупрочняющихся материалов и определяющие соотношения при одноосном напряженном состоянии // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Физико-математические науки». – 2007. – № 2(15). – С. 69–78.
73. Сухарев И.П., Ушаков Б.Н. Исследования деформаций и напряжений методом муаровых полос. – М.: Машиностроение. – 1969. – С. 208.
74. Третьякова Т.В. Особенности использования программного обеспечения vis-3D, реализующего метод корреляции цифровых изображений, в приложении к исследованию полей неупругих деформаций // Вычислительная механика сплошных сред. – 2014. – Т.7. – №2. – С. 162–171.
75. Третьякова Т.В., Душко А.Н., Струнгарь Е.М., Зубова Е.М., Лобанов Д.С. Комплексный анализ механического поведения и процессов разрушения образцов пространственно-армированного углепластика в испытаниях на растяжение // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2019. – № 1. – С. 173-183. DOI:10.15593/perm.mech/2019.1.15.
76. Фалин И.А., Староверов О.А. Экспериментальное исследование поведения материалов при низкоскоростных ударных воздействиях // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2012. – № 2. – С. 204–213.
77. Халиулин В.И., Батраков В.В. Анализ применения инновационных методов для производства интегральных конструкций из композитов // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2016. – №3. – С. 129–33.
78. Экспериментальные исследования свойств материалов при сложных термомеханических воздействиях / В.Э. Вильдеман, М.П. Третьяков, Т.В. Третьякова, Р.В. Бульбович, С.В. Словигов, А.В. Бабушкин, А.В. Ильиных, Д.С. Лобанов, А.В. Ипатова. Под ред. В.Э. Вильдемана. – М.: Наука. Физматлит, 2012. – 204 с.

79. Ющенко Д.А., Кузнецов Е.М. Перспективы применения полимерных композиционных материалов // Механики XXI Веку. – 2015. – № 14. – С. 194–198.
80. Alam, P., Mamalis, D., Robert, C., Floreani C., Ó Brádaigh C.M. The fatigue of carbon fibre reinforced plastics - A review // Composites Part B: Engineering. – 2019. – Vol. 166. – P. 555–579.
81. Alves M., Pimenta S. A computationally-efficient micromechanical model for the fatigue life of unidirectional composites under tension-tension loading // International Journal of Fatigue. – 2018. – Vol. 116. – P. 677–690.
82. Anastasios P. Vassilopoulos. Fatigue life prediction of composites and composite structures. 2<sup>nd</sup> Edition. – 2019. – P. 762.
83. ASTM D2344 / D2344M – 16. Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates.
84. ASTM D 3039 / 3039M – 17. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials.
85. ASTM D 3479 / D3479M – 19. Standard Test Method for Tension-Tension Fatigue of Polymer Matrix Composite Materials.
86. ASTM D 6110 – 18. Standard Test Method for Determining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics.
87. ASTM D 7136 / 7136M – 15. Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event.
88. ASTM D 7137 / D7137M – 17. Standard Test Method for Compressive Residual Strength Properties of Damaged Polymer Matrix Composite Plates.
89. ASTM D 7264 / D7264M – 15. Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials.
90. ASTM D 790 – 17. Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials.
91. Barbu L.G., Oller S., Martinez X., Barbat A.H. High-cycle fatigue constitutive model and a load-advance strategy for the analysis of unidirectional fiber reinforced

- composites subjected to longitudinal loads // *Composite Structures*. – 2019. – Vol. 220. – P. 622–641.
92. Bilisik K. Multiaxis three-dimensional weaving for composites: A review // *Textile Research Journal*. – 2012. – Vol. 82. – №7. – P. 725–743.
93. Carraro P. A, Quaresimin M. Fatigue damage and stiffness evolution in composite laminates: a damage-based framework // *Procedia engineering*. – 2018. – Vol. 213. – P. 17–24.
94. Chen X., Sun Y., Wu Z., Yao L., Zhang Y., Zhou S., Liu Y. An investigation on residual strength and failure probability prediction for plain weave composite under random fatigue loading // *International Journal of Fatigue*. – 2019. – Vol. 120. – P. 267–282.
95. Coles L.A., Roy A., Voronov L., Semenov S., Nikhamkin M., Sazhenkov N., Silberschmidt V.V. Impact damage in woven carbon fibre/epoxy laminates: analysis of damage and dynamic strain fields // *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 199. – P. 2500–2505. DOI:10.1016/j.proeng.2017.09.420.
96. Da Liu, Ruixiang Bai, Zhenkun Lei, Jingjing Guo, Jianchao Zou, Wen Wu, Cheng Yan Experimental and numerical study on compression-after-impact behavior of composite panels with foam-filled hat-stiffener // *Ocean Engineering*. – 2020. – Vol. 198. – 106991.
97. Degrieck J., Van Paepegem W. Fatigue damage modeling of fibre-reinforced composite materials: Review // *Applied Mechanics Reviews*. – 2001. – Vol. 54 (4). – P. 279–300.
98. Deveci H.A., Artem H.S. On the estimation and optimization capabilities of the fatigue life prediction models in composite laminates // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. – 2018. – Vol. 37 (21). – P. 1304–1321.
99. Dubary N., Bouvet C., Rivallant S., Ratsifandrihana L. Damage tolerance of an impacted composite laminate // *Composite Structures*. – 2018. – Vol. 206. P. 261–271.
100. Galehdaria S.A., Kadkhodayana M., Hadidi-Mouda S. Analytical, experimental and numerical study of a graded honeycomb structure under in-plane impact load with

- low velocity // *International Journal of Crashworthiness*. – 2015. – Vol. 20. – P. 387–400.
101. Guillaud N., Froustey C., Dau F., Viot P. Impact response of thick composite plates under uniaxial tensile preloading // *Composite Structures*. – 2015. – Vol. 121. – P. 172 – 181.
102. Hack M., Carrella-Payan D., Magneville B., Naito T., Urushiyama Y., Yamazaki W., Yokozeki T., Van Paepegem W. A progressive damage fatigue model for unidirectional laminated composites based on finite element analysis: Theory and practice // *Frattura ed Integrita Strutturale*. – 2018. – Vol. 12 (46). – P. 54–61.
103. Haggui M., El Mahi A., Jendli Z., Akrouf A., Haddar M. Static and fatigue characterization of flax fiber reinforced thermoplastic composites by acoustic emission // *Applied Acoustics*. – 2018.
104. Heidary H., Karimi N. Z., Ahmadi M., Rahimi A., Zucchelli A. Clustering of acoustic emission signals collected during drilling process of composite materials using unsupervised classifiers // *Journal of Composite Materials*. – 2015. – Vol. 49. – P. 559–571.
105. Heimbs S., Bergmann T., Schueler D., Toso-Pentecôte N. High velocity impact on preloaded composite plates // *Composite Structures*. – 2014. – Vol. 111. – P. 158–168.
106. Hiremath C.P., Senthilnathan K., Naik N.K., Guha A., Tewari A. Mechanistic model for fiber crack density prediction in cyclically loaded carbon fiber-reinforced polymer during the damage initiation phase // *Journal of Composite Materials*. – 2019. – Vol. 53 (8), P. 993–1004.
107. Hongliang Tuo, Zhixian Lu, Xiaoping Ma, Jun Xing, Chao Zhang Damage and failure mechanism of thin composite laminates under low-velocity impact and compression-after-impact loading conditions // *Composites Part B: Engineering*. – 2019. – Vol. 163. – P. 642–654.
108. Huang J., Pastor M.L., Garnier C., Gong X.J. A new model for fatigue life prediction based on infrared thermography and degradation process for CFRP composite laminates // *International Journal of Fatigue*. – 2019. – Vol. 120. – P. 87–95.

109. Hwang W., Han K.S. Cumulative Damage Models and Multi-Stress Fatigue Life Prediction // *Journal of Composite Materials*. – 1986. – Vol. 20 (2). – P. 125–153.
110. Jagannathan N., Gururaja S., Manjunatha C. M. Matrix crack evolution in multi-directional composite laminates considering thickness effects // *Advanced Composite Materials*. – 2018. – Vol. 27 (6). – P. 541–560.
111. Kaminski M., Laurin F., Maire F.J., Rakotoarisoa C., Hemon E. Fatigue damage modeling of composite structures: the ONERA viewpoint // *AerospaceLab*. – 2015. – Issue 9. – P. 1–12.
112. Katunin A. Criticality of the self-heating effect in polymers and polymer matrix composites during fatigue, and their application in non-destructive testing // *Polymers*. – 2018. – Vol. 11 (1). 19; DOI:10.3390/polym11010019
113. Kawai M., Ishizuka Y. Fatigue life of woven fabric carbon/epoxy laminates under alternating R-ratio loading along non-proportional path in the  $\sigma_m$ - $\sigma_a$  plane // *International Journal of Fatigue*. – 2018. – Vol. 112 – P. 36–51.
114. Khay M., Ngo A.D., Ganesan R. Experimental investigation and phenomenological modeling of hygrothermal effect on tensile fatigue behavior of carbon/epoxy plain weave laminates // *Journal of Composite Materials*. – 2018. – Vol. 52 (27). – P. 3803–3818.
115. Kiang Hwee Tan. R. Jain and L. Lee (eds.). *Impact Resistance of FRP Panels. // Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites for Infrastructure Applications. Strategies for Sustainability*. – 2012. – P. 123–139. DOI 10.1007/978-94-007-2357-3\_7.
116. Kucher N.K., Zarazovskii M.N., Danil'chuk E.L. Deformation and strength of laminated carbon-fiber-reinforced plastics under a static thermomechanical loading // *Mechanics of Composite Materials*. – 2013. – Vol. 48. – № 6. – P. 669–680.
117. Lambert J.P., Jonas G.H. *Towards standardization in terminal ballistics testing: Velocity representation*, BRL Report No. 1852 / U.S. Army Ballistic Research Laboratories. - MD.: Aberdeen Proving Ground. – 1976.
118. Lobanov D.S., Babushkin A.V., Luzenin A.Yu. Effect of increased temperatures on the deformation and strength characteristics of a GFRP based on a fabric of

- volumetric weave // *Mechanics of Composite Materials*. – 2018 – Vol. 54. – № 5. – P. 655–664.
119. Lobanov D.S., Slovikov S.V. Mechanical properties of a unidirectional basalt-fiber-reinforced plastic under a loading simulating operation conditions // *Mechanics of Composite Materials*. – 2017 – Vol. 52 – № 6. – P. 767–772.
120. Lobanov D. S., Staroverov O. A. The fatigue durability GFRP under increased temperatures // *Procedia Structural Integrity*. – 2019. – Vol. 17. – P. 651–657.
121. Lomakin E.V., Fedulov B.N. Nonlinear anisotropic elasticity for laminate composites // *Meccanica*. – 2015. – Vol. 50. – Iss. 6. – P. 1527-1535. DOI: 10.1007/s11012-015-0104-5.
122. Lomov, S.V., From a virtual textile to a virtual woven composite, in *Woven Composites (Computational and Experimental Methods in Structures, vol. 6)*, M.H. Aliabadi, Editor. 2015, Imperial College Press: London. – P. 109–140.
123. Lopresto V., Langella A., Papa I. Residual Strength evaluation after impact tests in extreme conditions on CFRP laminates // *Procedia Engineering*. – 2016. – Vol. 167. – P. 138–142.
124. Maleki A., Saeedifar M., Najafabadi M. A., Zarouchas D. The fatigue failure study of repaired aluminum plates by composite patches using Acoustic Emission // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2018.
125. Martins R.D., Donadon M.V., Muller de Almeida S.F. The effects of curvature and internal pressure on the compression-after-impact strength of composite laminates // *Journal of Composite Materials*. – 2016. – Vol. 50(6). P. 825–848.
126. Moallemzadeh A.R., Sabet S.A.R., Abedini H. Preloaded composite panels under high velocity impact // *International Journal of Impact Engineering*. – 2018. – Vol. 114. – P. 153–159.
127. Movahedi-Rad A.V., Keller T., Vassilopoulos A.P. Creep effects on tension-tension fatigue behavior of angle-ply GFRP composite laminates // *International Journal of Fatigue*. – 2019. – Vol. 123. – P. 144–156.

128. Mouritz A.P., Bannister M.K., Falzon P.J., Leong K.H. Review of applications for advanced three-dimensional fibre textile composites // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 1999. – Vol.30. – № 12. – P. 1445–1461.
129. Peters W. H., Ranson W. F. Digital image techniques on experimental stress analysis // *Optical Engineering*. – 1982. – Vol. 21. – P. 427–31.
130. Philippidis T.P., Passipoularidis V.A. Residual strength after fatigue in composites: Theory vs. experiment // *International Journal of Fatigue*. – 2007. – Vol. 29, Issue 12. – P. 2104–2116.
131. Plekhov O., Palin-Luc T., Saintier N., Uvarov S., Naimark O. Fatigue crack initiation and growth in a 35crmo4 steel investigated by infrared thermography // *Fatigue & fracture of engineering materials & structures*. – 2005. – Vol. 28 (1-2). – P. 169 – 178.
132. Post N.L., Cain J., McDonald K.J., Case S.W., Lesko J.J. Residual strength prediction of composite materials: Random spectrum loading // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2008. – Vol. 75, Issue 9. – P. 2707–2724.
133. Post N.L., Case S.W., Lesko J.J. Modeling the variable amplitude fatigue of composite materials: A review and evaluation of the state of the art for spectrum loading // *International Journal of Fatigue*. – 2008. – Vol. 30, Issue 12. – P. 2064–2086.
134. Ogasawaraa T., Ontab K., Ogiharab S., Yokozekic T., Harad E. Torsion fatigue behavior of unidirectional carbon/epoxy and glass/epoxy composites // *Composite Structures*. – 2009. – Vol. 90. Issue 4. – P. 482-489.
135. Qian C., Westphal T., Kassapoglou C., Nijssen R.P.L. Development of a multi-fibre unit cell for use in modeling of fatigue of unidirectional composites // *Composite Structures*. – May 2013. – Vol. 99. P. 288–295.
136. Quaresimin M., Susmel L., Talreja R. Fatigue behavior and live assessment of composite laminates under multiaxial loadings // *International Journal of Fatigue*. – 2010. – Vol. 32. – P. 2–16.

137. Racle E., Godin N., Reynaud P., Fantozzi G. Fatigue Lifetime of Ceramic Matrix Composites at Intermediate Temperature by Acoustic Emission // *Materials*. – 2017. – Vol. 10 (6). 658; DOI:10.3390/ma10060658
138. Roundi W., El Mahi A., El Gharad A., Rebiere J.-L. Experimental investigation of the fatigue behavior of glass/epoxy composites evaluated by the stiffness degradation and damage accumulation // *Journal of Composite Materials*. – 2019. – Vol. 53 (6), P. 731-740.
139. Ruan J., Wang S., Tong J., Shen M., Aymerich F., Priolo P. Deformation measurement of composite laminate with impact damage under compressive loads // *Polymers and Polymer Composites*. – 2012. – Vol. 20. – No. 1-2. – P. 177–182.
140. Saghafi H., Minak G., Zucchelli A. Effect of preload on the impact response of curved composite panels // *Composites: Part B*. – 2014. – Vol. 60. P. 74–81.
141. Samareh-Mousavi S.S., Mandegarian S., Taheri-Behrooz F. A nonlinear FE analysis to model progressive fatigue damage of cross-ply laminates under pin-loaded conditions // *International Journal of Fatigue*. – 2019. – Vol. 119. – P. 290–301.
142. Schaff J.R., Davidson B.D. Life prediction methodology for composite structures. Part I - Constant amplitude and two-stress level fatigue // *Journal of Composite Materials*. – 1997. – Vol. 31 (2). – P. 128–157.
143. Shahdin A., Morlier J., Michon G., Mezeix L., Bouvet C., Gourinat Y. Application of modal analysis for evaluation of the impact resistance of aerospace sandwich materials // *Advanced aerospace applications. Conference proceedings of the society for experimental mechanics. Series 4*. – 2011. – Vol. 1. – P. 171–177.
144. Shilova A.I., Wildemann V.E., Lobanov D.S. Researching damage mechanisms of carbon composites based on mechanical tests with monitoring acoustic emission // *International Workshop on Failure of Heterogeneous Materials under Intensive Loading: Experiment and Multi-scale Modeling*, Institute of Continuous Media Mechanics Ural Branch of Russian Academy of Sciences, 10-14 February 2014. – Perm, Russia. – P. 62–63.

145. Shirley K. Garcia-Castillo, Carlos Navarro, Enrique Barbero. Damage in preloaded glass/vinylester composite panels subjected to high-velocity impacts // *Mechanics Research Communications*. – 2014. – Vol. 55. P. 66–71.
146. Shaoxiong Liang, Laurent Guillaumat, Papa-Birame Gning. Impact behaviour of flax/epoxy composite plates // *International Journal of Impact Engineering*. – 2015. – P. 56–64.
147. Subramanian S., Reifsnider K.L., Stinchcomb W.W. A cumulative damage model to predict the fatigue life of composite laminates including the effect of a fibre-matrix interphase // *International Journal of Fatigue*. – 1995. – Vol. 17 (5). – P. 343–351.
148. Shokrieh M. M., Fakhar M. N. Experimental, analytical, and numerical studies of composite sandwich panels under low-velocity impact loadings // *Mechanics of Composite Materials*. – 2012. – Vol. 47. – №. 6. – P. 643–658.
149. Spearing S.M., Beaumont P.W.R., Ashby M.F. Fatigue damage mechanics of composite materials. II: A damage growth model // *Composites Science and Technology*. – 1992. – Vol. 44. – P. 169–177.
150. Staroverov O.A., Wildemann V.E., Lobanov D.S., Belonogov N.S., Spaskova E.M. Study vitality and behavior of composite materials under the combined shock, cyclic and quasi-static loadings // II Международная научная конференция «Наука будущего» 20-23 сентября 2016, Казань – С. 388–389.
151. Staroverov O. A., Wildemann V. E., Tretyakov M. P., Yankin A. S. Experimental study of the influence of preliminary complex mechanical loads on the deformation and strength properties of polymer composites // *Procedia Structural Integrity*. – 2019. – Vol. 18. – P. 757–764.
152. Suh S.S., Han N.L., Yang J.M., Hahn H.T. Compression behavior of stitched stiffened panel with a clearly visible stiffener impact damage // *Composite Structures*. – 2003. – Vol. 62. – No. 2. – P. 213–221.
153. Sun X. C., Hallett S. R. Failure mechanisms and damage evolution of laminated composites under compression after impact (CAI): Experimental and numerical

- study // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2018. – Vol. 104. – P. 41–59.
154. Suzuki T., Mahfuz H., Takanashi M. A new stiffness degradation model for fatigue life prediction of GFRPs under random loading // International Journal of Fatigue. – 2019. – Vol. 119. – P. 220–228.
155. Van Paepegem W., Degrieck J. A new coupled approach of residual stiffness and strength for fatigue of fibre-reinforced composites // International Journal of Fatigue. – 2002. – Vol. 24, Issue 7. – P. 747–762.
156. Van Paepegem W., Degrieck J. Coupled residual stiffness and strength model for fatigue of fibre-reinforced composite materials // Composites Science and Technology. – April 2002, Issue 5. – Vol. 62. – P. 687–696.
157. Van Paepegem W., Degrieck J., De Baets P. Finite element approach for modelling fatigue damage in fibre-reinforced composite materials // Composites Part B: Engineering. – 2001. – Vol. 32, Issue 7. – P. 575–588.
158. Van Paepegem W., Degrieck J. Experimental set-up for and numerical modelling of bending fatigue experiments on plan woven glass/epoxy composites // Composite Structures. – 2001. – Vol. 51, Issue 1. P. 1–8.
159. Van Paepegem W., Degrieck J. Modelling damage and permanent strain in fibre-reinforced composites under in-plane fatigue loading // Composites Science and Technology. – 2003. – Vol. 63, Issue 5. – P. 677–694.
160. Wang C., Chen Z., Silberschmidt V.V., Roy A. Damage accumulation in braided textiles-reinforced composites under repeated impacts: Experimental and numerical studies // Composite structures. – Vol. 204. – P. 256–267. DOI:10.1016/j.compstruct.2018.07.084.
161. Wil'deman V. E., Staroverov O. A., Lobanov D. S. Diagram and parameters of fatigue sensitivity for evaluating the residual strength of layered gfrp composites after preliminary cyclic loadings // Mechanics of Composite Materials. – 2018. – Vol. 54. – № 3. – P. 313–320.
162. Wildemann V.E., Staroverov O.A., Lobanov D.S., Belonogov N.S. The effect of cyclic pre-loading to the residual static strength of composite materials samples //

- XLIV International Conference «Advanced Problems in Mechanics», June 27-July 02 2016, St. Petersburg, Russia – P. 114–115.
163. Wildemann V.E., Staroverov O.A., Tretyakov M.P. Deformation and failure of polymer composite materials under preliminary cyclic and low-velocity impacts // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 747. DOI:10.1088/1757-899X/747/1/012034
164. Wu Z., Fang G., Fu M., Chen X., Liang J., Lv D. Random fatigue damage accumulation analysis of composite thin-wall structures based on residual stiffness method // Composite Structures. – 2019. – Vol. 211. – P. 546–556.
165. Yamada Y., Iwata K., Kadowaki T., Sumiya T. Method of reduced variables for stiffness degradation process of unidirectional CFRP composites subjected to alternating bending // Composites science and technology. – 2016. – Vol. 138. – P. 117–123.
166. Yanan Yuan, Shen Wang Measurement of the energy release rate of compressive failure in composites by combining infrared thermography and digital image correlation // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2019. – Vol. 122. – P. 59–66.
167. Yousefi J., Ahmadi M., Nazmadar Shahri M., Refahi Oskouei A., Jalali Moghadas F. Damage categorization of glass/epoxy composite material under mode II delamination using acoustic emission data: a clustering approach to elucidate wavelet transformation analysis // Arab J SciEng. – 2014. – Vol. 39. – P. 1325-1335.
168. Zhou D., Stronge W.J. O.T. Impact damage on lightweight sandwich panels // Thomsen et al. (eds), Sandwich Structures 7: Advancing with Sandwich Structures and Materials. – P. 615–624.

## Приложение

## АКТ

## Использования результатов НИР

Мы, нижеподписавшиеся, от лица ИСПОЛНИТЕЛЯ проректор по науке и инновациям Пермского национального исследовательского политехнического университета Коротаев В.Н. и от лица ЗАКАЗЧИКА генеральный конструктор ПАО «ОДК-Сатурн» Храмин Р.В., составили настоящий акт о том, что в результате научных исследований, выполненных в Центре экспериментальной механики Пермского национального исследовательского политехнического университета (ЦЭМ ПНИПУ) в 2016 г. в рамках договора №831/010-001-2016 по теме «Исследование влияния типов переплетения углеволокна на механические свойства полимерного композиционного материала. Формирование научно-технического задела для проектирования деталей из 3D-армированного ПКМ» (руководитель работ профессор Вильдеман В.Э.) проведен комплекс испытаний (испытания ударное воздействие и сжатие после удара) образцов полимерных композиционных материалов на основе преформ, полученных методами 3D-ткачества, слоистых с дополнительным усилением методом прошивки в поперечном направлении, для получения механических свойств материала. Проведено сравнение результатов со свойствами слоистых образцов, осуществлена оценка влияния схем переплетения на механические характеристики. В результате исследования выявлено влияние предварительного ударного воздействия различной интенсивности на остаточные прочностные характеристики образцов полимерных композиционных материалов.

Результаты исследований используются на предприятии ПАО «ОДК-Сатурн» при оценке свойств полимерных композиционных материалов в зависимости от типов переплетения при проектировании деталей из 3D-армированного ПКМ.

От ИСПОЛНИТЕЛЯ:

Проректор по науке и инновациям ПНИПУ  
Профессор, д.т.н.

В.Н. Коротаев

Руководитель работ, директор ЦЭМ  
ПНИПУ  
Профессор, д.ф.-м.н.

В.Э. Вильдеман

Исполнитель работы  
н.с. ЦЭМ ПНИПУ

О.А. Староверов

От ЗАКАЗЧИКА:

генеральный конструктор ПАО «ОДК-Сатурн»

Р.В. Храмин

Главный конструктор по ПД-35 и изд.156

А.В. Пахоменков



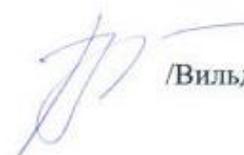
УТВЕРЖДАЮ  
 Проректор по учебной работе  
 Пермского национального  
 исследовательского политехнического  
 университета,  
 доктор технических наук, профессор  
 Лобов Н.В.  
 «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

### АКТ

**внедрения в учебный процесс кафедры «Экспериментальная механика и  
 конструкционное материаловедение» ФГБОУ ВО «Пермский национальный  
 исследовательский политехнический университет»  
 результатов диссертации Староверова Олега Александровича  
 на тему «Деформирование и разрушение полимерных композитов в условиях  
 комплексных механических воздействий»**

Настоящий акт составлен в том, что материалы диссертационной работы Староверова О.А. используются в учебном процессе кафедры «Экспериментальная механика и конструкционное материаловедение» ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» по направлению 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов» по дисциплинам «Экспериментальная механика материалов» и «Экспериментальная механика композитов».

Заведующий кафедрой  
 «Экспериментальная механика и  
 конструкционное материаловедение»,  
 доктор физико-математических наук,  
 профессор

 /Вильдеман В.Э./