

На правах рукописи

Староверов Олег Александрович

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

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (ПНИПУ)

Научный руководитель: **Вильдеман Валерий Эрвинович**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Экспериментальная механика и конструкционное материаловедение», директор Центра экспериментальной механики Пермского национального исследовательского политехнического университета

Официальные оппоненты: **Сапожников Сергей Борисович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технической механики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

Федулов Борис Никитович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Центра проектирования, производственных технологий и материалов Автономной некоммерческой образовательной организации высшего образования «Сколковский институт науки и технологий»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук» (ИМАШ РАН) (г. Москва)

Защита состоится «18» декабря 2020 года в 15 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 999.211.02 на базе ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» и ПФИЦ УрО РАН (Институт механики сплошных сред УрО РАН) по адресу: 614990, г. Пермь, пр-т Комсомольский д.29, ауд. 423 б.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (www.pstu.ru).

Автореферат разослан «22» октября 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук, доцент

/ А.Г. Щербинин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в создании научно-методических основ для решения прикладных задач крупных предприятий, таких как ОАО «Авиадвигатель», ПАО «ОДК-Сатурн», АО «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». Получен Акт об использовании результатов научной работы на предприятии ПАО «ОДК-Сатурн».

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.

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, ICSEM (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. Матвеев). 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; основные публикации приведены в списке [1-5], 5 статей [1-5] опубликованы в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК, включая 5 статей, опубликованных в изданиях, индексируемых в WoS и Scopus [1-5], 8 публикаций в изданиях, индексируемых РИНЦ.

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 и списка литературы, содержит 97 рисунков, 3 таблицы. Объем диссертационной работы составляет 140 страниц. Библиографический список включает 168 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы диссертационной работы, сформулированы цели и основные задачи исследования, научная новизна и практическая значимость работы, представлены положения, вынесенные 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 квазистатических, циклических и динамических комплексных испытаний полимерных слоисто-волоконистых композитов. Определены актуальные направления исследований и задачи, включающие в себя исследования закономерностей деформирования, накопления повреждений

и деградации остаточных механических свойств, механизмы разрушения полимерных слоисто-волоконистых композитов при квазистатическом, циклическом, динамическом нагружении в условиях воздействия различных 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, 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.

Третья глава посвящена изучению процессов деформирования и разрушения полимерных композитов с различными углами укладки армирующих слоев в условиях последовательных циклических и квазистатических воздействий при комнатных и повышенных температурах. Приведены закономерности изменения прочностных и деформационных свойств стеклопластиков в процессе усталостного накопления повреждений.

Для описания изменения прочностных свойств перекрестно армированных стеклопластиковых композитов при циклическом воздействии с различной продолжительностью введена диаграмма усталостной чувствительности (рис. 1) в относительных координатах $K'_{Bn}; n'$. 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 σ_{Bn} – предел прочности после циклического воздействия, σ_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.

Диаграмму усталостной чувствительности схематично предложено разбить на 3 характерные зоны: I – стадия начальной усталостной чувствительности; II – стадия стабилизации усталостной чувствительности; III – стадия обострения усталостной чувствительности.

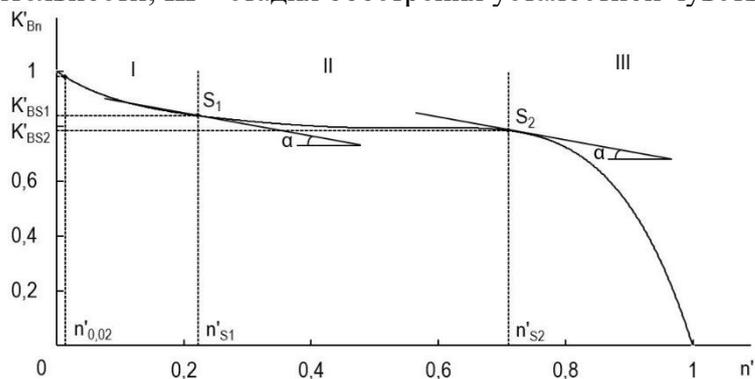


Рис. 1 – Диаграмма усталостной чувствительности

В процессе циклического воздействия на стадии начальных циклов происходит разрушение самых непрочных связей, описать поведение композитного образца 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 δ , это величина тангенса угла наклона касательной α в точках на кривой усталостной чувствительности.

$$\delta = \operatorname{tg} \alpha = -\frac{N}{\sigma_B} \frac{d\sigma_{Bn}}{dn'} \quad (1)$$

Значение δ 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.

Представлены результаты исследования усталостной чувствительности стеклопластиковых композитов с различными схемами укладки армирующих слоев и параметрами предварительного циклического воздействия в условиях нормальных и повышенных температур.

Проведена серия испытаний стеклопластиковых композитных образцов, изготовленных с тремя вариантами ориентации укладки армирующих слоев $[0/90]_n$, $[\pm 45]_n$, $[0/30/0/60]_n$. Опытные данные, полученные в ходе исследования, остаточной прочности слоистого стеклопластика при предварительном циклическом и последующем квазистатическом растяжении приведены на рисунке 2, а. Анализ процесса изменения остаточной прочности после предварительного циклического воздействия проведен с использованием диаграмм усталостной чувствительности (рис. 2, б).

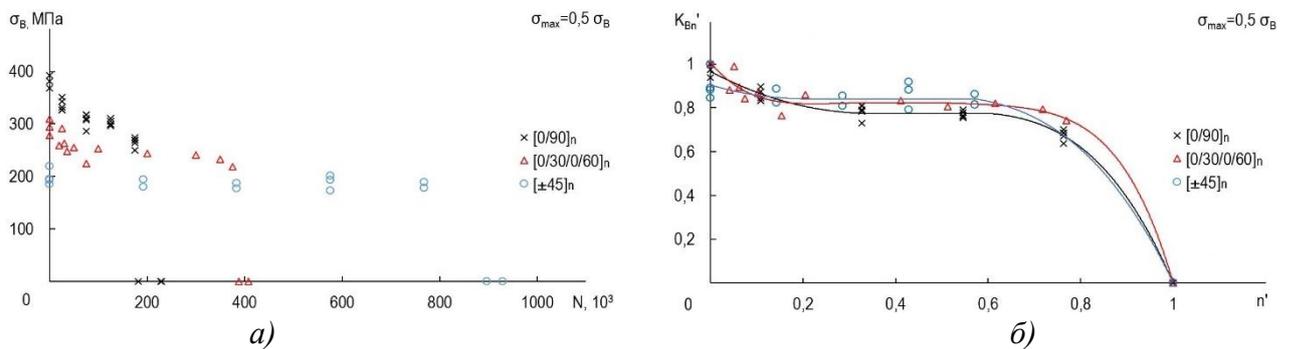


Рис. 2 – Диаграммы зависимости остаточного предела прочности от наработки (а) и усталостной чувствительности (б) стеклопластиков с различными углами укладки армирующих слоев

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. Участок начальной чувствительности для образцов $[0/90]$ составлял $(0-0,3) \cdot n'$, стабилизации $(0,3-0,6) \cdot n'$, обострения $(0,6-1) \cdot n'$; для образцов $[0/30/0/60]$ участок начальной чувствительности $(0-0,2) \cdot n'$, стабилизации $(0,2-0,7) \cdot n'$, обострения $(0,7-1) \cdot n'$.

Таким образом, при анализе диаграммы усталостной чувствительности выявлено, что стадийный характер изменения остаточных прочностных свойств стеклопластиков характерен для образцов, у которых в структуре присутствуют слои армирования, совпадающие с направлением приложения нагрузки.

На рисунке 3 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 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.

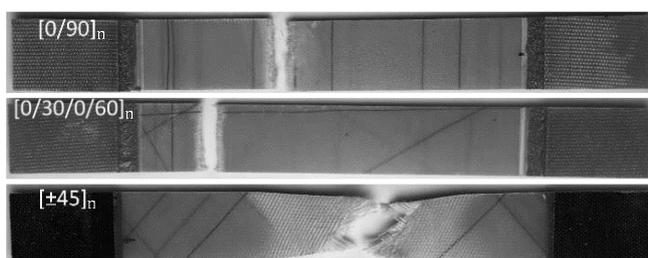


Рис. 3 – Фотографии разрушенных стеклопластиковых образцов с различными схемами укладки армирующих слоев

Исследование закономерностей деградации 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 $[0/90]_n$ (рис. 4, а).

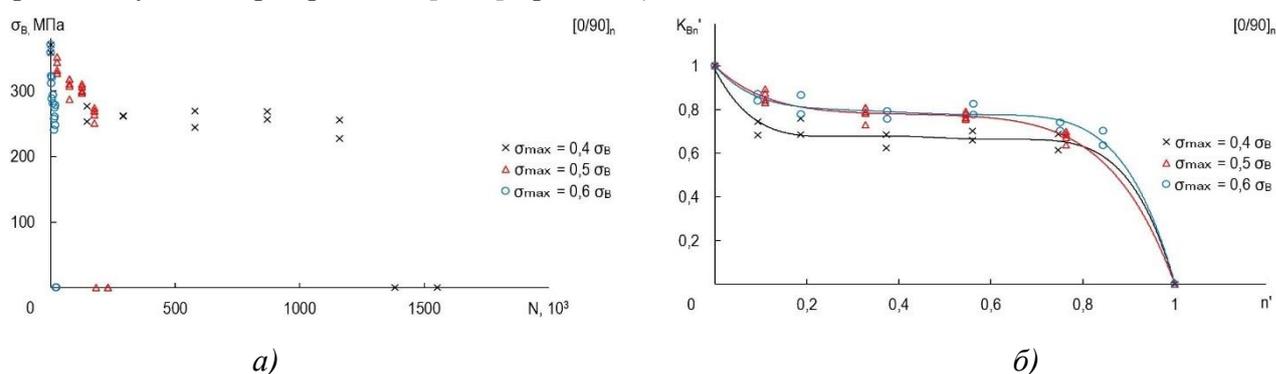


Рис. 4 – Диаграммы зависимости остаточного статического предела прочности от наработки (а) и усталостной чувствительности (б) стеклопластиковых образцов с различными параметрами воздействия

Анализ построенных диаграмм усталостной чувствительности (рис. 4, б) позволяет сделать вывод, что циклическое воздействие с параметрами $\sigma_{\max} = 0,4 \cdot \sigma_{\text{в}}$ 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 $\sigma_{\max} = 0,5 \cdot \sigma_{\text{в}}$ и $\sigma_{\max} = 0,6 \cdot \sigma_{\text{в}}$, менее чем на 20%.

Участок стабилизации является самым информативным с точки зрения проектирования, эксплуатации и безопасности конструкции из композиционных материалов. Например, при циклическом воздействии продолжительностью 3000 циклов на конструкцию усталостное разрушение не происходит, но статический предел прочности снижается более чем на 25%. Таким образом, при проектировании конструкций использование диаграммы усталостной чувствительности для прогнозирования является целесообразным.

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 $K'_{En}; n'$ (рис. 5, б).

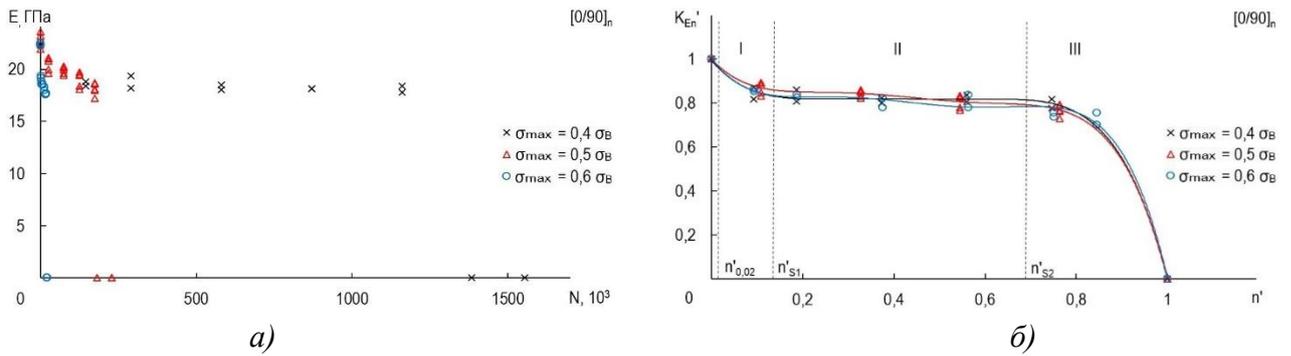


Рис. 5 – Диаграмма зависимости остаточной жесткости от предварительного циклического воздействия в абсолютных (а) и относительных (б) значениях стеклопластиковых образцов с различными параметрами воздействия

В рамках исследования выявлено, что для исследуемых стеклопластиковых образцов при изменении параметров воздействия сохраняется стадийность изменения остаточной прочности, характеризующаяся наличием участков начальной, стабилизации и обострения усталостной чувствительности. При анализе диаграммы изменения жесткости стеклопластиковых образцов отмечено, что вариации параметров предварительного циклического воздействия не сказались на виде кривых, описывающих изменение остаточной жесткости в процессе усталостного накопления повреждений.

Повышенные температуры могут значительно оказывать влияние на процессы деформирования и разрушения, усталостной долговечности и живучести полимерных композитов. На основании экспериментальных данных представлена диаграмма усталостной чувствительности стеклопластиковых композитов при повышенных температурах (рис. 6, б). Данные испытания выполнены на образцах с углами укладки армирующих слоев $[0/90]_n$.

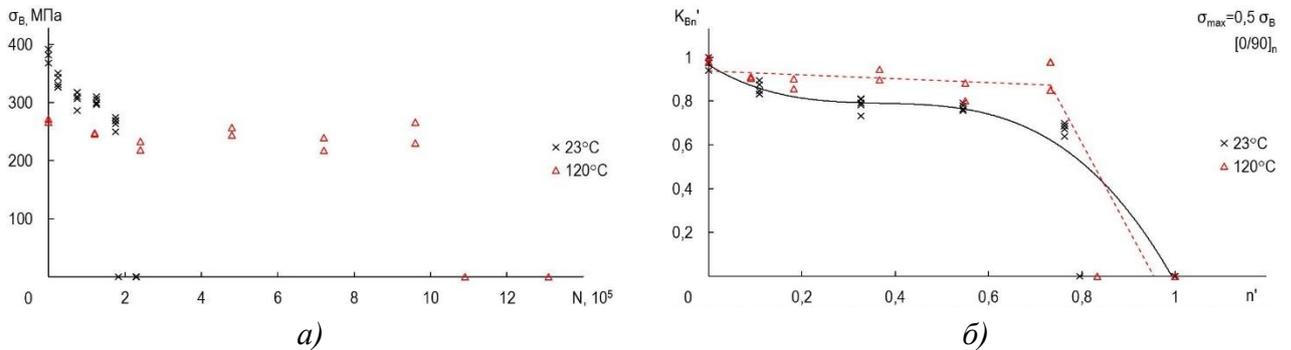


Рис. 6 – Диаграммы зависимости остаточного предела прочности от предварительного циклического воздействия (а) и усталостной чувствительности (б) при комнатных и повышенных температурах

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 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 в диапазоне от $0,8 \cdot n'$ до $1 \cdot n'$ происходило резкое снижения остаточной прочности с последующим усталостным разрушением образцов.

Известно, что дополнительные вибрационные крутильные воздействия оказывают стабилизирующий эффект процесса закритического деформирования в условиях растяжения сплошных цилиндрических образцов конструкционных сталей. Исходя из этого, можно предположить, что дополнительные вибрационные воздействия, помимо изменения

механических характеристик, могут также влиять на процессы накопления повреждений и разрушения композитов.

С целью исследования влияния возможных эффектов дополнительных вибрационных воздействий на процессы деформирования и разрушения полимерных композиционных материалов проведены серии экспериментов стеклопластиковых стержневых образцов диаметром 8 мм (ГОСТ 31938-12) в соответствии с разработанными методиками. Результаты исследования приведены в виде диаграмм нагружения (рис. 7).

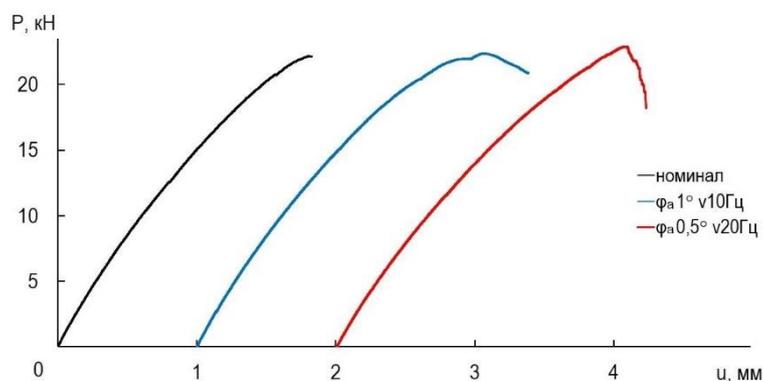


Рис. 7 – Характерные диаграммы нагружения однонаправленных композиционных образцов-стержней (кривые смещены относительно друг друга по оси абсцисс).

Выявлено, что параметры дополнительных крутильных колебаний оказывают влияние на поведение материала в процессе деформирования и разрушения и на реализацию деформационных ресурсов стеклопластиковых стержневых образцов. Изменение параметров крутильных колебаний сказывается на наклоне ниспадающей кривой. Увеличение амплитуды колебаний привело к снижению числа срывов на кривой нагружения образца.

В рамках работы получены опытные данные о процессах деформирования и разрушения углепластиковых трубчатых тонкостенных образцов при дополнительных вибрационных воздействиях в процессе квазистатического растяжения (рис. 8).



Рис. 8 – Фотография испытательной системы Instron 8852 и видеосистемы Vic 3D для испытаний на растяжение с кручением трубчатых образцов

Исследование включало в себя эксперименты на квазистатическое растяжение и кручение, а также растяжение с крутильными вибрационными воздействиями. На основании результатов квазистатических испытаний были выбраны три режима вибрационных воздействий. В результате наложения дополнительных воздействий на диаграммах нагружения при растяжении появились участки стадийного разрушения (рис. 9).

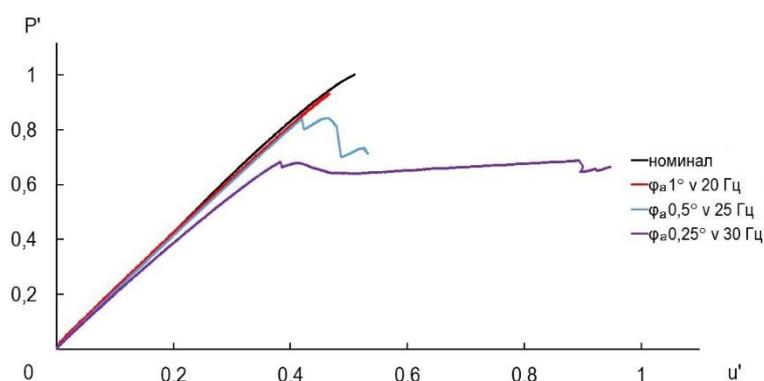


Рис. 9 – Диаграммы нагружения углепластиковых трубчатых образцов при воздействии дополнительных крутильных вибраций

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.

Четвертая глава содержит результаты исследования зависимости характеристик статической прочности, жесткости и усталостной долговечности полимерных композитов от динамических воздействий различной интенсивности.

Низкоскоростное ударное воздействие представляет собой серьезную угрозу для использования композитных материалов в реальных технических приложениях, поскольку они вызывают едва видимые повреждения, которые могут приводить к снижению прочности конструкции, и должны своевременно заменены или отремонтированы в соответствии с требованиями безопасности.

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 из препрега марки ВПС-48 и связующего ВСЭ 1212 со схемой армирования $[0^\circ/90^\circ]_n$. Анализ результатов испытаний на предварительное ударное и последующее квазистатическое и циклическое растяжение позволяет сделать вывод, что ударное растяжение в направлении, совпадающим с направлением укладки армирующих волокон, не оказывает влияния на остаточную прочность и усталостную долговечность исследуемого стеклопластикового композита.

Проведено исследование влияния предварительного низкоскоростного ударного трехточечного изгиба на процессы деформирования и разрушения стеклопластиковых композиционных материалов (рис. 10).

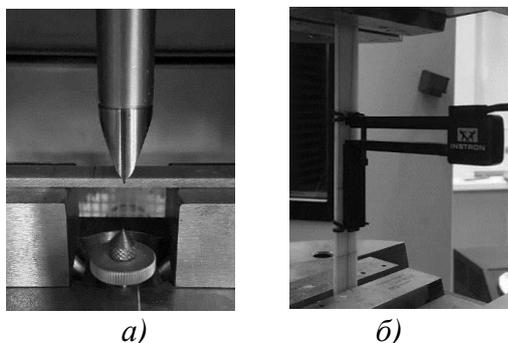


Рис. 10 – Фотографии стеклопластиковых образцов при ударе по схеме трехточечного изгиба (а) и одноосном квазистатическом растяжении (б)

Удар падающим грузом наносился по всей ширине образца. Образцы подвергались однократному удару по схеме трехточечного изгиба с различной потенциальной энергией в диапазоне от $0,4 \cdot E_{\max}$ до $0,9 \cdot E_{\max}$. Остаточные прочностные и деформационные характеристики композита определялись при квазистатическом растяжении.

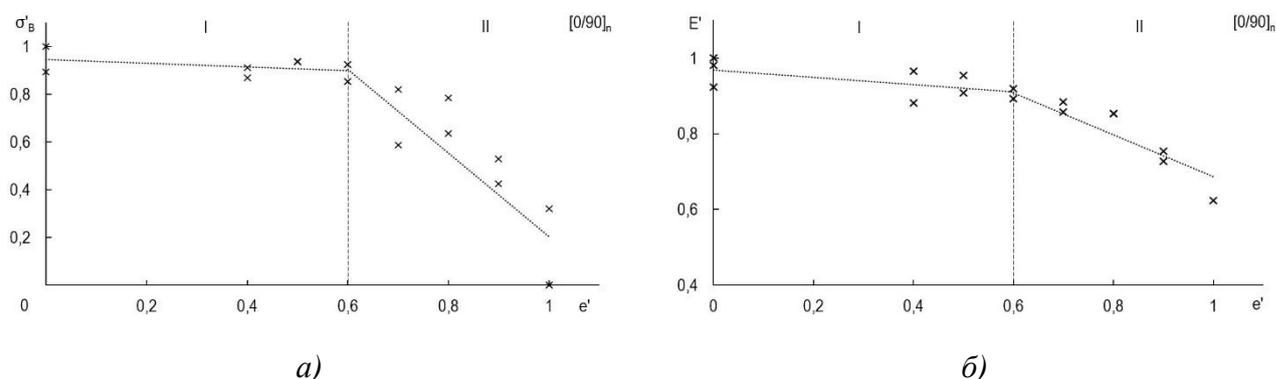


Рис. 11 – Диаграмма зависимости остаточной прочности (а) и жесткости (б) от предварительного ударного изгиба стеклопластиковых образцов

На диаграммах зависимости остаточной прочности и жесткости от энергии предварительного удара стеклопластиков (рис. 11) видно, что предварительное ударное воздействие $e' = 0,6$ ($E = 3$ Дж) приводит к снижению остаточной прочности и жесткости стеклопластиковых образцов при растяжении. Таким образом значение энергии удара $e' = 0,6$ ($E = 3$ Дж) является пороговым значением ударной чувствительности для исследуемых образцов.

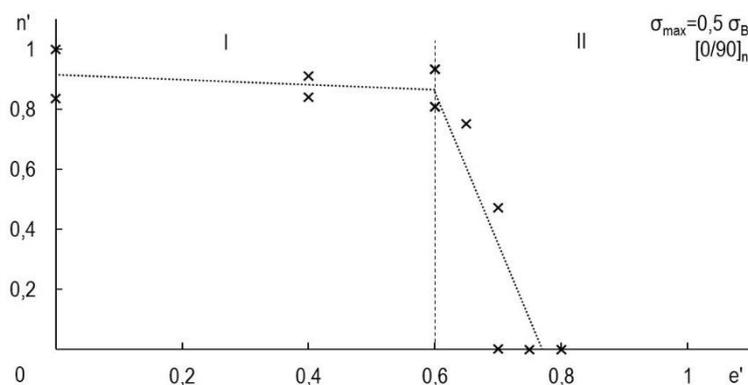


Рис. 12 – Диаграмма зависимости усталостной долговечности от энергии предварительного ударного воздействия

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 (рис. 12). 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 13.

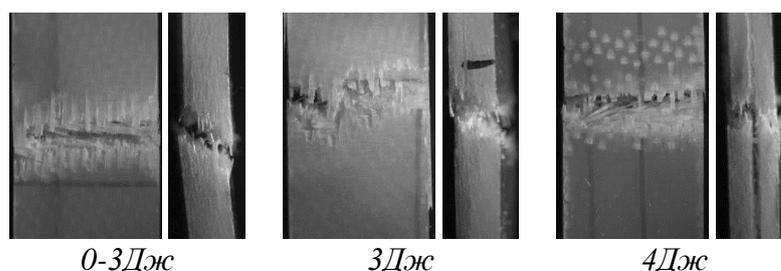


Рис. 13 – Фотографии разрушенных образцов при квазистатическом растяжении после предварительного ударного изгиба

Ударные воздействия, приложенные в поперечном направлении относительно укладки армирующих слоев, в процессе эксплуатации композитной конструкции могут приводить к появлению расслоений, которые в свою очередь значительно снижают прочность и долговечность конструкции.

Исследование влияния локального поперечного ударного воздействия падающим грузом проведено для стекло- и углепластиковых образцов-панелей с крупноячеистым сотовым наполнителем (honey-cell) с толщиной ячейки 2 мм и высотой 10 мм, используемые в авиационной промышленности, в частности в звукопоглощающем контуре авиационного двигателя. 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 образца). Полученные в результате сжатия после удара опытные данные остаточной прочности от энергии удара представлены на рисунке 14.

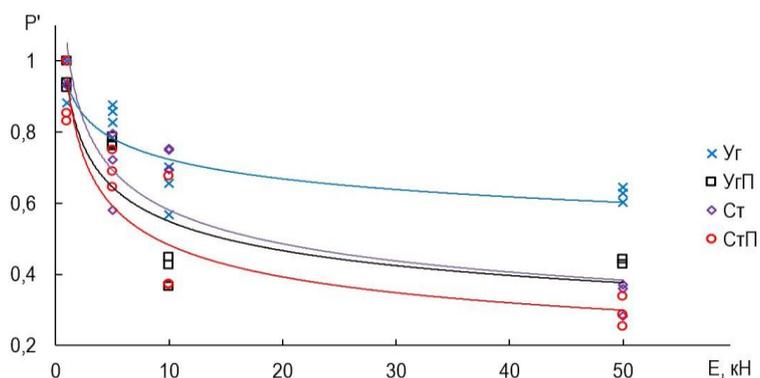


Рис. 14 – Диаграмма остаточной несущей способности композиционных крупноячеистых образцов-панелей

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%. Удар с энергией 5 Дж приводил к значительному, более чем 15% по сравнению с номинальными значениями, снижению остаточной несущей способности.

Проведено экспериментальное исследование процессов деформирования и разрушения композитных образцов-пластин с пространственными схемами армирования после предварительных ударных воздействий различной интенсивности. Исследование проведено для 8 различных вариантов плетения материалов. Образцы, изготовленные из 6 различных схем переплетения 3D-тканых преформ, пропитанных методом RTM (Resin Transfer Molding). А также 2D-слоистые образцы из тканых преформ. Методика исследования включала в себя предварительное низкоскоростное ударное воздействие (рис. 15, а), оценку степени повреждения

с использованием дефектоскопии методом шерографии, испытания на сжатие после удара (рис. 15, б).

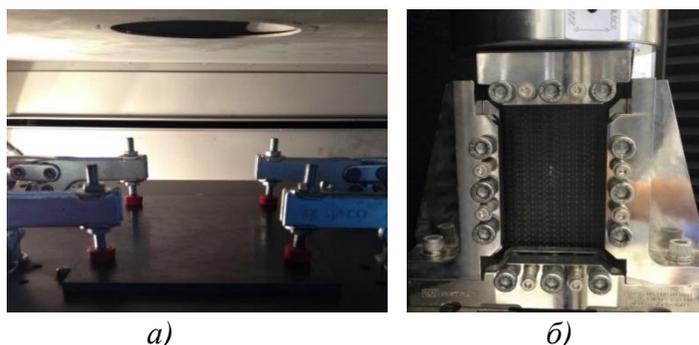


Рис. 15 – Фотографии образцов, установленных в приспособления для нанесения удара (а) и сжатия после удара (б)

Для оценки несущей способности элементов конструкций предложено использование введенного геометрического аналога поврежденности – Q с использованием данных неразрушающего контроля, как объем условного сегмента сферы-вмятины. Введенная характеристика степени поврежденности, в совокупности с экспериментальными данными на сжатие, может быть использована для косвенной оценки остаточных механических свойств композитных конструкций.

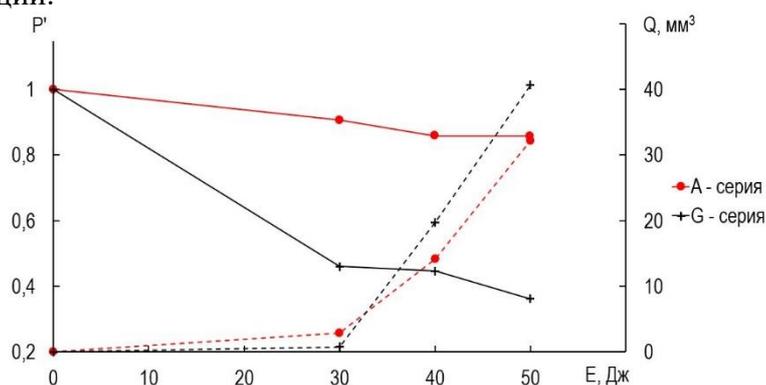


Рис. 16 – Совмещенная диаграмма остаточной несущей способности и геометрического аналога поврежденности углепластиковых образцов

На совмещенной диаграмме остаточной несущей способности и геометрического аналога поврежденности (рис. 16) 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.

Для пространственно-армированных композитов проведена оценка механического поведения в опытах на сжатие после удара. На диаграммах нагружения пространственно-армированных углепластиковых пластин (рис. 17) при сжатии после ударных воздействий с различной энергией воздействия.

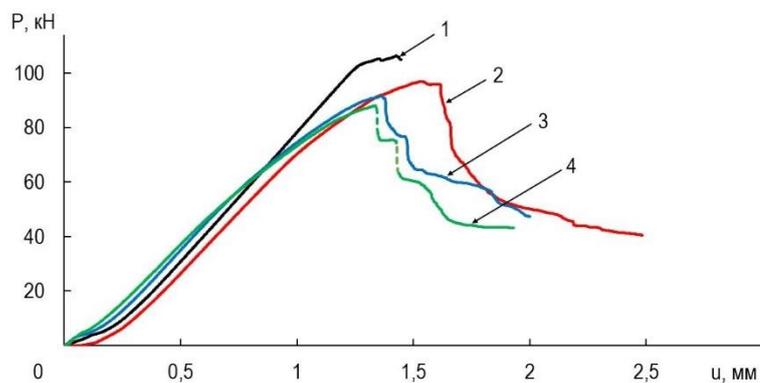


Рис. 17 – Характерные диаграммы нагружения образцов-пластин (1 – без ударного воздействия; 2 – удар 30 Дж; 3 – удар 40 Дж; 4 – удар 50 Дж) штриховой линией обозначены зоны динамического разрушения

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

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

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 крупногабаритных 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.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Староверов О.А.**, Бабушкин А.В., Горбунов С.М. Оценка степени поврежденности углепластиковых композиционных материалов при ударном воздействии. // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2019. – №1. – С. 161 – 172. [BAK, Scopus]
2. Lobanov D. S., **Staroverov O. A.** The fatigue durability GFRP under increased temperatures // Procedia Structural Integrity. – 2019. – Vol. 17. – P. 651–657. [BAK, WoS]
3. **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. [BAK, WoS]
4. 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. [BAK, WoS]
5. 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 [BAK, WoS]

СТАТЬИ В ДРУГИХ ИЗДАНИЯХ И МАТЕРИАЛАХ КОНФЕРЕНЦИЙ

1. 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.
2. **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.
3. **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.
4. **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.
5. **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.
6. 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 ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. — 2017. — № 51, — С. 104-114. [BAK]
7. **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.

8. Wildemann V.E., **Staroverov O.A.**, Lobanov D.S., Belonogov N.S. The effect of cyclic preloading 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.

Подписано в печать 2020 г.
Формат 60 x 90/16. Набор компьютерный.
Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ №

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии издательства
Пермского национального исследовательского политехнического университета.
Адрес: 614990, г. Пермь, пр-т Комсомольский, 29, к. 113. Тел. (342) 219-80-33