

На правах рукописи

ЛОБАНОВ Дмитрий Сергеевич

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ
И ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ
МАТЕРИАЛОВ И ПАНЕЛЕЙ С ЗАПОЛНИТЕЛЕМ**

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь – 2015

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

**Научный
руководитель**

Вильдеман Валерий Эрвинович,
доктор физико-математических наук, профессор

**Официальные
оппоненты:**

Аптуков Валерий Нагимович,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой фундаментальной математики ФГБОУ
ВПО «Пермский государственный национальный
исследовательский университет»

Шлянников Валерий Николаевич,
доктор технических наук, профессор,
заместитель председателя Казанского научного центра
Российской академии наук

**Ведущая
организация**

Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Институт машиноведения Уральского отделения
Российской академии наук

Защита состоится «8» декабря 2015 года в 16:00 на заседании диссертационного совета Д 212.188.05 при ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» по адресу: 614990, г. Пермь, пр. Комсомольский, д. 29, ауд. 423б.

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

Автореферат разослан « » октября 2015 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук



А.Г. Щербинин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время наблюдается общемировая тенденция широкого использования в ответственных конструкциях композиционных материалов, которые позволяют добиться снижения веса и повышения эксплуатационных характеристик деталей и узлов, применяемых в машиностроении, космической и авиационной технике. В частности, в современном авиационном двигателе в конструкции мотогондолы доля полимерных волокнистых композиционных материалов составляет около 60%. Композиты используются в элементах наружного контура двигателя, звукопоглощающего контура и корпуса вентилятора. Композиционные материалы в элементах деталей авиационных двигателей, как правило, имеют довольно сложную схему армирования, включают несколько слоев заполнителя (сотового, трубчатого, ячеистого), закладные элементы, композитные фланцы и т.п.

Общие тенденции внедрения новых технологий и материалов, связанные с необходимостью повышения эксплуатационных характеристик изделий при снижении материалоемкости новой техники, приводят к повышению требований по надежности в условиях сложных термомеханических воздействий. При внедрении композиционных материалов особое значение приобретают вопросы анализа условий разрушения и живучести изделий. Актуальными задачами становятся решения проблем, связанных с развитием методов экспериментального исследования деформационных и прочностных свойств конструкционных композитов, определением безопасного деформационного ресурса изделий при комплексном воздействии механических нагрузок и эксплуатационных температур, учетом деградации свойств под влиянием внешних эксплуатационных загрязняющих сред, оценкой опасности технологических и эксплуатационных дефектов, возникающих в элементах конструкций, и возможностью их локального ремонта. Актуальной задачей является получение новых фундаментальных результатов в области механики деформирования и разрушения композиционных материалов при реализации температурно-силовых нагружений, максимально приближенных к реальным режимам эксплуатации, на базе экспериментальных исследований с использованием современного испытательного оборудования и измерительных систем.

Целью диссертационной работы является развитие методологии проведения экспериментальных исследований с использованием современных испытательных и измерительных систем и получение новых данных о закономерностях процессов деформирования, накопления повреждений и разрушения волокнистых полимерных композиционных материалов при квазистатических воздействиях в широком диапазоне температур, а также в условиях воздействия эксплуатационных сред.

Задачи работы:

1. Отработка методик экспериментального исследования механических свойств конструкционных волокнистых композитов с использованием современного испытательного оборудования и измерительных систем.
2. Экспериментальное исследование механических свойств и анализ влияния повышенных и пониженных температур на поведение волокнистых композитов при квазистатических испытаниях.
3. Оценка влияния дефектов на механические свойства, а также возможности и эффективности применения восстановительных операций для изделий из волокнистых полимерных композиционных материалов.
4. Оценка влияния внешних загрязняющих эксплуатационных сред на механические свойства композитов.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1. Разработаны новые методические рекомендации по проведению квазистатических испытаний на одноосное растяжение высоконаполненных однонаправленных волокнистых полимерных композиционных материалов в части использования специальных захватных приспособлений, а также учету жесткости нагружающих систем при испытаниях крупногабаритных образцов.

2. Получены новые экспериментальные данные о деформационных и прочностных свойствах конструкционных однонаправленных и тканых стекло-, базальто- и углепластиков при квазистатических испытаниях на растяжение и трехточечный изгиб в условиях пониженных и повышенных температур. Показаны изменения значений пределов прочности и модулей упругости стекло-, базальто- и углепластиков в диапазоне температур от -60°C до 150°C .

3. Проведен цикл квазистатических испытаний на растяжение, сжатие и сдвиг панелей крупноячеистых композиционных материалов с трубчатым наполнителем на основе конструкционных стекло- и углепластиков при нормальной и повышенных 100°C и 150°C температурах, а также после нанесения повреждений и проведения ремонтно-восстановительных операций. Получены новые опытные данные о влиянии повышенных температур и локальных зон ремонта на несущую способность композитных панелей.

4. Выявлены новые зависимости влияния модификаций связующего углеродными нанотрубками в диапазоне массовой доли от 0,01% до 0,07% на деформационные и прочностные свойства стеклотекстолитов на основе стеклоткани марки Т-10-80 из сплошных стеклянных нитей и стеклоткани марки Т-45(П)-76 из стеклянных крученых комплексных полых нитей.

5. Получены новые данные о деградации механических свойств авиационных стекло- и углепластиков, а также несущей способности полунатурных композитных панелей на их основе после воздействия загрязняющих эксплуатационных сред.

Практическая ценность работы заключается в возможности использования новых экспериментальных данных о механическом поведении и свойствах полимерных волокнистых композиционных материалов в научно-исследовательских институтах и конструкторских бюро при проектировании конструкций из новых материалов с требуемым комплексом физико-механических свойств, а также в высших учебных заведениях при подготовке бакалавров и магистров по направлениям «Прикладная механика», «Материаловедение и технология новых материалов», «Наноматериалы». Получены Акты об использовании результатов научной работы на предприятиях ОАО «УНИИКМ» (г. Пермь) и ОАО «НПО САТУРН» (г. Рыбинск).

Достоверность результатов обеспечивается корректным использованием методов и подходов механики деформируемого твердого тела, а также испытательного оборудования и средств измерений, имеющих свидетельства об аттестации и поверке. Экспериментальные исследования проводились в испытательной лаборатории «Центр экспериментальной механики» ПНИПУ, имеющей сертификат аккредитации на проведение механических испытаний конструкционных материалов, а также надлежащую систему менеджмента качества. Достоверность также подтверждается удовлетворительным соответствием полученных результатов известным данным, полученным другими авторами.

На защиту выносятся результаты анализа методических вопросов и совокупность полученных новых данных экспериментальных исследований закономерностей деформирования и разрушения конструкционных полимерных волокнистых композиционных материалов при квазистатических испытаниях в

условиях воздействия пониженных и повышенных температур, внешних загрязняющих сред и модификации связующего углеродными нанотрубками.

Апробация работы. Основные результаты исследований, представленные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались на 17 Всероссийских и международных конференциях: на Всероссийских школах-конференциях молодых ученых «Математическое моделирование в естественных науках» (Пермь, 2009, 2011, 2014), Всероссийских научно-технических конференциях «Аэрокосмическая техника и высокие технологии» (Пермь, 2009, 2011), «Механика микронеоднородных материалов и разрушение» (Екатеринбург, 2010, 2014), 10-м Всероссийском съезде по теоретической и прикладной механике (Нижний Новгород, 2011), Зимних школах по механике сплошных сред (Пермь, 2011, 2013, 2015), Международной конференции по экспериментальной механике - ICSEM 2010 (Куала-Лумпур, 2010), Евразийской научно-практической конференции «Прочность неоднородных структур» (Москва, 2012), Международной конференции по механике композиционных материалов МСМ-2012 (Рига 2012); Европейских конференциях по композиционным материалам ЕССМ 15 и ЕССМ 16 (Венеция, 2012, Севилья, 2014); Международной конференции по механике материалов ICM 12 (Карлсруэ, 2015).

Полностью диссертация обсуждалась на научных семинарах:

- кафедры механики композиционных материалов и конструкций Пермского национального исследовательского политехнического университета, руководитель – доктор физико-математических наук, профессор Ю.В. Соколкин;
- Центра экспериментальной механики Пермского национального исследовательского политехнического университета, руководитель – доктор физико-математических наук, профессор В.Э. Вильдеман;
- кафедры вычислительной математики и механики Пермского национального исследовательского политехнического университета, руководитель – доктор технических наук, профессор Н.А. Труфанов;
- Института механики сплошных сред УрО РАН, руководитель – академик РАН, доктор технических наук, профессор В.П. Матвеевко.

Результаты диссертационной работы использованы при выполнении научно-исследовательской работы в рамках проектов Российского фонда фундаментальных исследований (№ 12-08-31336 (руководитель), № 13-08-00304, № 13-08-96016, № 13-01-92608, № 13-01-96003); в рамках Федерально-целевых программ «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2012 годы» (гос. контракт № 02.518.11.7135) и «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 годы» (гос. контракт № 02.740.11.0157); в рамках Аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы» (2011, 2012 гг.); а также при выполнении гранта по постановлению Правительства Российской Федерации №220 от 9 апреля 2010 года (договор № 14В.25.310006 от 24 июня 2013 года); в рамках научно-исследовательских работ совместно с ОАО «УНИИКМ», ОАО «Авиадвигатель», ОАО «НПО САТУРН» и НОЦ АКТ ПНИПУ.

Публикации. Результаты исследований по теме диссертационной работы отражены в 37 публикациях, в том числе 8 статей [1-8] опубликованы в ведущих рецензируемых научных изданиях, включая 6 публикаций в изданиях, индексируемых в Scopus [4-8] и 2 публикации в Web of Science [6, 8] и 1 монография в соавторстве [14].

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованной литературы. Работа содержит 71

рисунок, 30 таблиц и 1 приложение. Общий объем диссертационной работы составляет 148 страниц, список литературы включает 187 источника.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы исследования, сформулированы цели и основные задачи работы, полученные новые научные результаты, обоснованы их достоверность и практическая значимость, приводятся сведения об апробации работы, краткое описание содержания диссертации по главам.

Первая глава посвящена анализу научных литературных источников отечественных и зарубежных авторов, направленных на исследования особенностей структуры и механических свойств конструкционных полимерных волокнистых композитов. Рассмотрены вопросы, связанные с методическими аспектами экспериментальных исследований и стандартизации в области квазистатических испытаний полимерных волокнистых композитов. Определены наиболее важные направления исследований и актуальные задачи, включающие в себя исследования закономерностей деформирования и механизмы разрушения полимерных волокнистых композитов при квазистатическом нагружении в условиях воздействия климатических и внешних эксплуатационных факторов.

Во второй главе рассмотрены вопросы, связанные с методическими аспектами экспериментальных исследований волокнистых полимерных композитов, в том числе возможности и особенности современного испытательного оборудования, сравнение отечественных и зарубежных стандартных методов испытаний, а также приведены методические рекомендации в части использования специальных приспособлений при испытании однонаправленных и крупноячеистых слоистых композитов.

Проведен анализ сопоставимых отечественных (ГОСТ, ОСТ, РД) и зарубежных (ASTM D) стандартных методов статических испытаний полимерных волокнистых композитов на одноосное растяжение, трехточечный изгиб и межслоевой сдвиг по методу короткой балки, выявлены сходства и различия, указаны недостатки. Отмечено, что зарубежные стандарты, в частности, ASTM, более точно описывают методологию проведения испытания, дифференцированный подход к геометрии образцов, имеют классификацию большинства видов разрушения образцов при испытаниях на растяжение и таблицу соответствия разрушений.

Для механических испытаний на одноосное растяжение однонаправленных композиционных материалов и композиционной арматуры при нормальных повышенных и пониженных температурах, разработаны новые методические рекомендации в части закрепления и обеспечения разрушения образцов в рабочей зоне. Суть метода заключается в том, что образцы однонаправленных КМ выполняются в виде стержня постоянного сечения, который с обоих концов вклеивается в стальные гильзы с конусным отверстием, что обеспечивает увеличение усилия поперечного обжатия при увеличении нагружающего усилия в направлении армирования [4, 12]. Условия проведения испытаний определяются (скорость нагружения, температура, влажность, требования к испытательному оборудованию) в соответствии с ГОСТ, деформации измеряются при помощи бесконтактного видеоэкстензометра AVE, что обеспечивает отсутствие внешних физических воздействий на рабочую зону образца и снимает необходимость остановки разрывной машины во время испытания для снятия навесных экстензометров [1,2, 14].

Другим предлагаемым вариантом закрепления образцов однонаправленных композитов и композитной арматуры являются съемные многоразовые полувтулки. Такой метод закрепления имеет ряд преимуществ и недостатков. К преимуществам можно отнести значительное снижение временных затрат на подготовку испытаний,

простоту закрепления образцов, многообразие использования без дополнительной подготовки и очистки после проведения испытаний, применимость при повышенных температурах.

В случае, когда данная методика не позволяет определить истинные значения предела прочности материала, она может использоваться для определения модуля упругости, а также, если предложенный метод испытания (способ закрепления образца в испытательной машине), повторяет реальные условия технологического закрепления и эксплуатации однонаправленных композитов и конструкций из них.

Предложены специальные методики механических испытаний на растяжение, сжатие и сдвиг для крупногабаритных полунатурных образцов-панелей на основе полимерных волокнистых композиционных материалов, которые максимально приближены к реальной конструкции звукопоглощающего контура авиационного двигателя [10]. Испытания по данным методикам могут проводиться при нормальной и повышенных температурах. Идея заключается в использовании специальной оснастки для испытаний крупногабаритных полунатурных образцов панелей. Полунатурные образцы-панели имеют сложную составную структуру, которая состоит из силовых оболочек и заполнителя. Причем предполагается, что заполнитель не несет нагрузку и поэтому не учитывается при прочностных расчетах.

Методики испытания полунатурных образцов-панелей при одноосном растяжении, сжатии и сдвиге включают в себя установку и закрепление образца в специально разработанные приспособления (рис. 1-3), измерение разрушающей нагрузки в процессе испытаний, а также обработка получаемых из испытаний экспериментальных данных. Испытания полунатурных образцов проводятся с постоянной заданной скоростью перемещения активной траверсы испытательной машины, т.е. при «жестком» (кинематическом) нагружении.

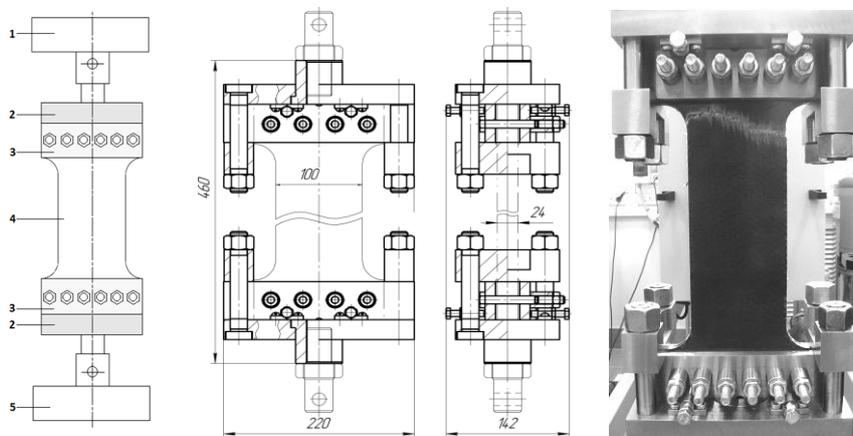


Рис. 1. Схема закрепления, эскиз оснастки и образец-панель закреплённый в оснастке во время испытаний на одноосное растяжение (1 –траверса; 2 – захваты; 3 – стальные пластины-накладки; 4 – образец; 5 – основание)

Испытание на сдвиг реализуется в условиях одноосного растяжения с перекашиванием в шарнирной раме образца-панели с квадратным рабочим полем (рис. 3). Образец должен быть вырезан так, чтобы основа и уток ткани силовой оболочки составляли угол 45 град. с направлением приложения нагрузки. Прочность при сдвиге характеризуют величиной касательных напряжений, действующих в момент разрушения в поперечном сечении образца по площадкам, параллельным сторонам его рабочего поля.

Расчет предела прочности силовых оболочек при одноосном растяжении-сжатии $\sigma_{в}^{*раст(сж)}$ (МПа) и при сдвиге $\tau_{в}^*$ (МПа) учитывают толщину заполнителя и перфорацию одной из силовых оболочек.

Отработка методик проводилась на базе Центра экспериментальной механики ПНИПУ. Схемы установки и эскизы оснастки для испытаний образцов-панелей при растяжении, сжатии и сдвиге представлены на рис. 1-3.

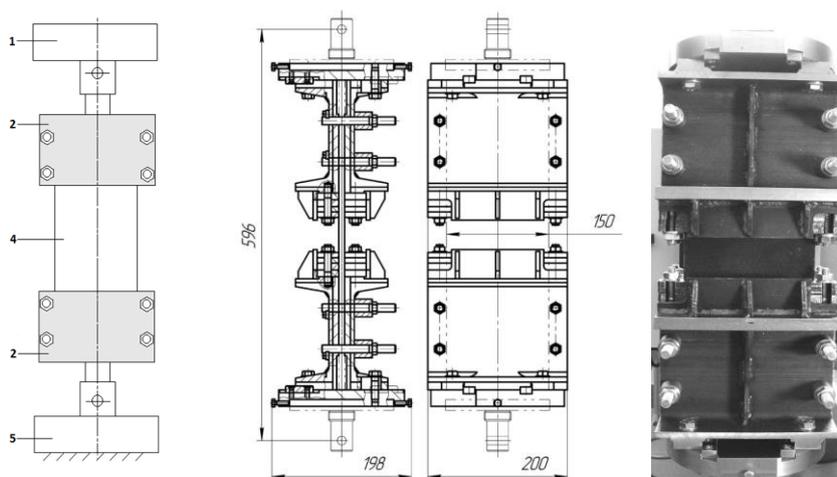


Рис. 2. Схема закрепления, эскиз оснастки и образец-панель в оснастке во время испытаний на сжатие (1 –траверса; 2 – захваты; 4 – образец; 5 – основание рамы)

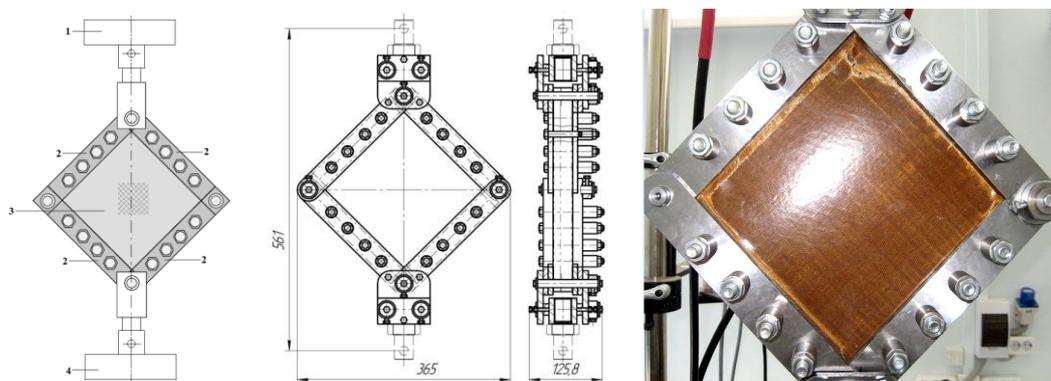


Рис. 3. Схема закрепления, эскиз оснастки и образец-панель закреплённый в оснастке во время испытаний на сдвиг (1 –траверса; 2 – захваты (шарнирная рама); 3 – образец; 4 – основание)

В третьей главе приведены результаты экспериментального исследования механических свойств образцов стекло-, угле- и базальтопластиков при испытаниях на растяжение и изгиб. Проведен анализ влияния повышенных и пониженных температур на механические свойства полимерных волокнистых композитов.

На основе данных испытаний проведена оценка влияния температуры на упругие характеристики полимерных волокнистых композиционных материалов. Полученные данные показывают, что повышенная температура (150° С), практически, не оказывает влияние на модуль упругости углепластика при испытаниях на одноосное растяжение и изгиб, а небольшая разница в значениях может являться следствием статистического разброса, что характерно для волокнистых композиционных материалов. Однако изучение влияния повышенных температур на прочностные свойства углепластиков показало, что при повышенной температуре 150° С значение предела прочности при растяжении снижается на 20%, а при изгибе – на 30% по сравнению со значениями, полученными при нормальной температуре. Такие потери, безусловно, должны учитываться при проектировании изделий и конструкций из данного материала.

В ходе экспериментальных исследований механических характеристик волокнистых композиционных материалов было установлено, что один и тот же

материал при различных температурах разрушается по разным механизмам. Для примера рассмотрим более подробно разрушение углепластика в испытаниях на изгиб при нормальной и повышенной (150° С) температуре. На рис. 4 показаны характерные виды разрушений при испытании на трехточечный изгиб.

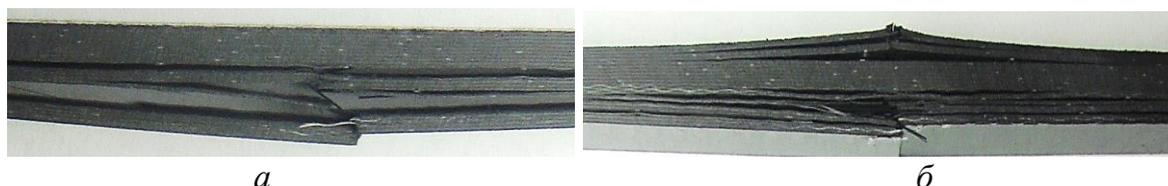


Рис. 4. Характер разрушения углепластика при испытании на трехточечный изгиб в условиях нормальной (а) и повышенной 150° С (б) температур

При температуре испытания 22° С образец углепластика разрушается от растяжения нижних слоев (рис. 4, а) с последующим отслоением разрушенных слоев. При температуре испытания 150° С первичное разрушение происходит от нормальных напряжений в виду сжатия верхних слоев (рис. 4, б). Визуально этот процесс похож на перерезывание верхних слоев индентором (ножом). После разрушения первых верхних слоев от сжатия, происходит вспучивание уже разрушенных слоев с последующим отслоением. Баклинг слоев происходит из-за снижения прочности связующего в результате нагрева и выдерживании образца углепластика при температуре 150° С, отслоение происходит от касательных напряжений. Далее происходит разрушение от нормальных напряжений, возникающих при растяжении нижних слоев (как в испытаниях при нормальной температуре).

Однонаправленные стекло- и базальтопластики испытывались на одноосное растяжение с учетом предложенных в главе 2 методических рекомендаций в части закрепления образцов в диапазоне температур от -30° С до + 120° С. Получены данные о влиянии температуры на изменения модуля упругости и предела прочности однонаправленного стеклопластика при испытаниях на растяжение. Для стеклопластика Direct "E" Roving 0,7- ortophthalic polyester resin 0,3. выявлено снижение модуля упругости при пониженных и повышенных температурах относительно испытаний при нормальных температурах. Влияния на предел прочности температур не выявлено ввиду значительного статистического разброса полученных данных [1, 2, 4, 9, 14].

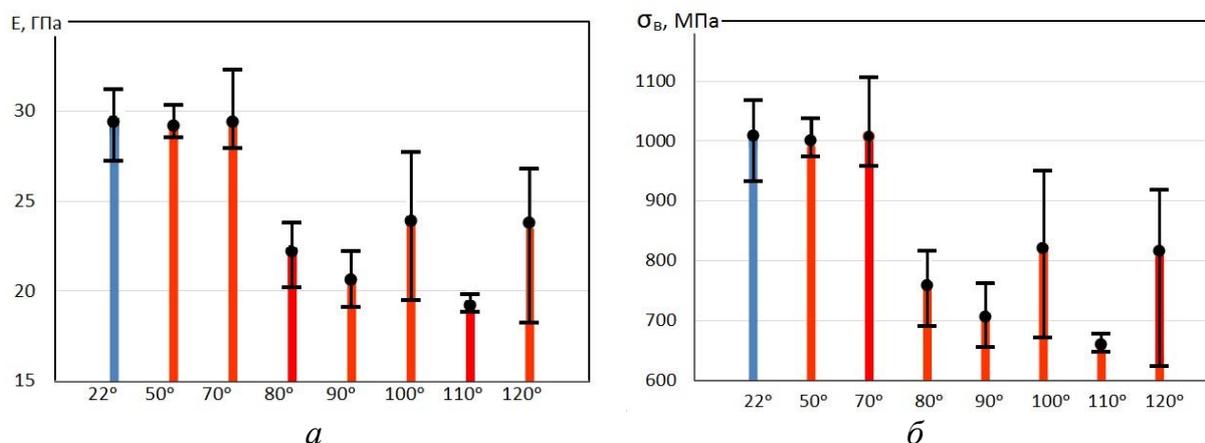


Рис. 5. Диаграммы разброса значений модуля упругости (а) и предела прочности (б) однонаправленного базальтопластика при нормальной и повышенных температурах

На основе полученных результатов испытаний для образцов базальтопластика при нормальных и повышенных температурах построены графики зависимости предела прочности и модуля упругости при растяжении от температуры (рис.5).

Представлены результаты экспериментального исследования влияния добавления в связующее углеродных нанотрубок на механические свойства стеклотекстолитов [3]. Испытания проведены для материалов шести рецептур: композиты на основе стеклоткани Т-45(П)-76, не модифицированный (номинал), модифицированные углеродными нанотрубками 0,07 % и 0,01% по массе; композит на основе стеклоткани Т-10-80, не модифицированный (номинал), модифицированные углеродными нанотрубками 0,07 % и 0,01% по массе.

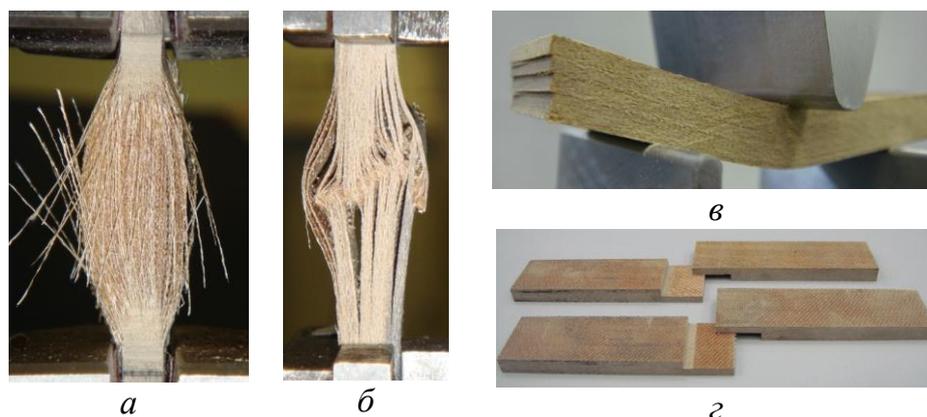


Рис. 6. Виды разрушений стеклотекстолитов с наномодифицированной матрицей: *а* – растяжение, *б* – сжатие, *в* – изгиб, *г* – межслойный сдвиг

Для приведенных материалов выполнены испытания на одноосное растяжение, сжатие, трехточечный изгиб короткой балки, растяжение полосы с двухсторонними надрезами. Определены модуль упругости при растяжении и сжатии, предел прочности при растяжении и сжатии, предел прочности при изгибе короткой балки и межслоевом сдвиге. Результаты испытаний сведены в таблицу 1 характерный вид разрушения образцов представлен на рис. 6. Для наглядности результатов построены и представлены на рис. 7 диаграммы зависимости механических свойств от массовой доли модифицирующего компонента. Диаграммы построены для механических характеристик с наиболее четко выраженным влиянием нанодобавок и соответствуют пунктам 2, 4 и 5 таблицы 1.

Таблица 1

Сводная таблица средних значений механических свойств нанокompозитов.

№ п/п	Мех. характеристики	Номер рецептуры материала					
		на основе стеклоткани Т-45(П)-76			на основе стеклоткани Т-10-80		
		номинал	0,07%	0,01%	номинал	0,07%	0,01%
1	E , ГПа	21,29 ± 4,64	21,20 ± 0,98	19,85 ± 1,43	28,25 ± 3,95	30,44 ± 3,65	29,09 ± 2,90
2	σ_B , МПа	339,55 ± 12,07	336,34 ± 14,27	262,45 ± 16,37	502,68 ± 17,14	520,40 ± 7,41	571,91 ± 21,04
3	E^C , ГПа	21,70 ± 2,33	22,28 ± 1,56	21,92 ± 1,70	27,85 ± 2,67	31,13 ± 2,89	31,19 ± 4,39
4	σ_B^C , МПа	209,40 ± 26,25	213,95 ± 27,13	183,10 ± 20,93	209,77 ± 15,56	315,32 ± 41,07	238,85 ± 8,68
5	τ_{max}^u , МПа	20,79 ± 3,98	23,06 ± 6,09	16,75 ± 0,49	24,54 ± 3,29	36,33 ± 3,76	13,98 ± 1,11
6	τ_{max} , МПа	5,09 ± 1,44	9,20 ± 1,84	5,75 ± 0,82	6,00 ± 0,80	8,28 ± 0,47	4,56 ± 1,59

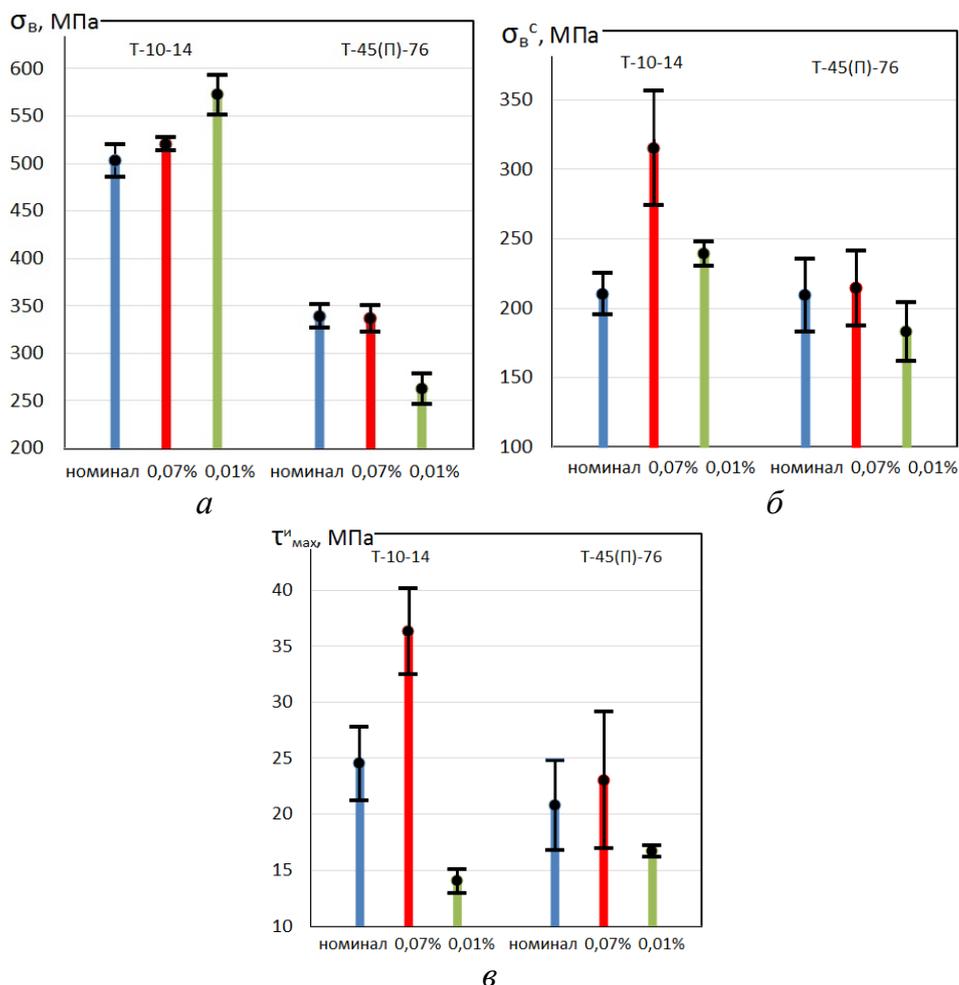


Рис. 7. Диаграммы зависимости средних значений (●) с учетом среднеквадратического отклонения (I) предела прочности при растяжении (а), предела прочности при сжатии (б) и прочности при межслоевом сдвиге (в) от массовой доли модифицирующего компонента для стеклотекстолитов

Полученные данные показывают, что небольшие добавки многослойных углеродных нанотрубок (в проведенных опытах до 0,07 % по массе), приводят в ряде случаев к существенному изменению механических характеристик композитов. При этом наблюдается немонотонная зависимость механических свойств нанокомпозитов от массовой доли модифицирующего компонента.

Четвертая глава посвящена экспериментальным исследованиям свойств полунатурных образцов крупноячеистых композиционных материалов на основе стекло- и углепластиков с коробчатым (трубчатым) наполнителем с продольным и поперечным расположением.

Предложена методика учёта жесткости нагружающей системы при испытаниях полунатурных образцов крупноячеистого композита. Методика основана на использовании цифровой оптической системы и метода корреляции цифровых изображений. В ходе тестовых экспериментов были определены значения жесткости нагружающей системы, которые в дальнейшем использовались при проведении последующих испытаний. Данная методика обусловлена необходимостью учитывать удлинения нагружающей цепи испытательной системы, т.к. результаты испытания берутся со встроенного датчика перемещений, в виду того что габариты образцов не позволяют использовать имеющиеся видеозкстензометр и навесные датчики измерения деформации [11].

Квазистатические испытания на растяжение, сжатие и сдвиг проводились по методикам, предложенным в главе 2. Испытания проводились при нормальных и повышенных (100°С и 150°С) температурах. По результатам испытаний проведен анализ потери несущей способности полунатурных образцов при испытаниях в условиях повышенных температур. Было испытано по 5 образцов-панелей для каждого материала (стеклопластик, углепластик) вдоль и поперек расположения каналов заполнителя при нормальной и повышенной (100° С, 150° С) температурах.

Таким образом, экспериментально установлено, что при растяжении снижение несущей способности при повышенной (100° С) температуре испытаний относительно несущей способности при нормальной температуре для образцов-панелей из стеклопластика в среднем составило: вдоль оси каналов – 28%, поперек – 34,7%. Для образцов-панелей из углепластика вдоль оси каналов – 9,5%, поперек каналов потери несущей способности при повышенной температуре не выявлено. Также необходимо отметить что при испытаниях на растяжение часть образцов-панелей разрушались в местах перехода скруглений в рабочую зону, а при повышенной температуре у части образцов-панелей имело место разрушение в области крепежных отверстий по причине разрушения клеевого слоя между накладками и образцом. Результаты испытаний образцов-панелей разрушенных в местах креплений не учитывались при статистической обработке.

При испытаниях на сжатие, необходимо отметить что при повышенной температуре происходит существенное снижение несущей способности образцов-панелей. Снижение для образцов из стеклопластика составляет 67% с продольным и 62% с поперечным расположением каналов заполнителя. Для образцов из углепластика с продольным и поперечным расположением заполнителя снижение составляет 72% и 73% соответственно. При испытаниях на сдвиг при температуре 100° С, происходит потеря несущей способности образцов-панелей из стеклопластика на 21% и углепластика на 23%.

Проведены экспериментальные исследования эффективности локального ремонта в конструкциях из полимерных волокнистых композиционных материалов. Приведены результаты испытаний по оценке остаточной статической прочности трехслойных композитных панелей с заполнителем с залеченными дефектами типа сквозного пробоя [6, 13]. Всего было испытано по 3 образца без дефекта, с дефектом и с зоной ремонта дефекта на растяжение и сжатие. Результаты испытаний представлены в виде графических зависимостей на рис. 8.

По результатам экспериментов, сделан вывод, что после локального ремонта происходит снижение прочности конструкции при сжатии на 15-20%. Однако при испытаниях на растяжение образцов-панелей четкой зависимости снижения прочности не установлено, а разницу в значениях разрушающей нагрузки можно объяснить статистическим разбросом.

Таким образом, рассмотрена возможность проведения эффективного локального ремонта дефектов, возникающих во время эксплуатации в типичных элементах композитных конструкций авиационных газотурбинных установок. Проведены оценочные экспериментальные исследования статической остаточной прочности на полунатурных образцах панелях при растяжении и сжатии, что способствовало отработке технологического режима локального залечивания дефектов при помощи замещения поврежденных слоев с использованием современного специализированного оборудования (НОЦ АКТ ПНИПУ).

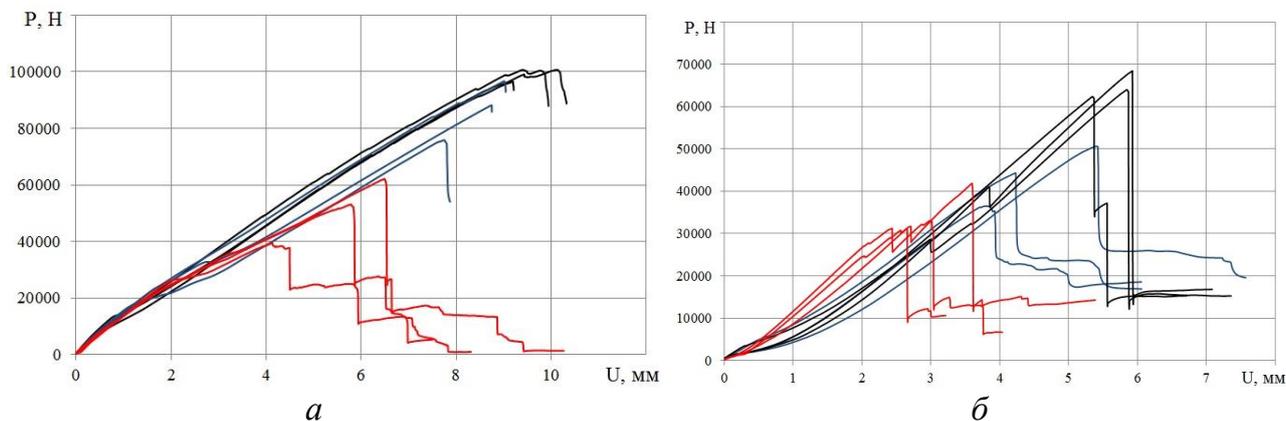


Рис. 8. Диаграммы нагружения образцов панелей при испытании на растяжение (а) и сжатие (б): диаграммы растяжения/сжатия для целых образцов – черная линия, для образцов с дефектом – красная линия, для образцов с зоной ремонта – синяя линия

Пятая глава посвящена экспериментальному исследованию влияния внешних воздействующих факторов и эксплуатационных загрязнений на работоспособность полимерных волокнистых композиционных материалов [8].

Приведены результаты исследования влияния загрязняющих сред при испытаниях на трехточечный изгиб и межслоевой сдвиг. По результатам испытаний 330 образцов проведен анализ изменения значений механических свойств стекло- и углепластиков. Проведены исследования влияния загрязняющих сред при испытаниях полунатурных образцов панелей на основе стекло- и углепластиков при испытаниях на растяжение и сжатие по методикам статических испытаний, предложенным во второй главе. По результатам 240 испытаний проведен анализ влияния загрязняющих сред на несущую способность полунатурных образцов панелей с трубчатым наполнителем.

Из испытаний на трехточечный изгиб установлено, что после вымачивания в загрязняющих средах почти для всех групп образцов стекло- и углепластиков происходит незначительное изменение прочностных характеристик, попадающее в статистический разброс. Однако необходимо отметить, что для стеклопластика СП-97К происходит снижение предела прочности при вымачивании в дистиллированной воде на 11%, для углепластика ПУ-4э/0,1-2м происходит увеличение значений предела прочности при вымачивании образцов в гидравлической жидкости и в масле на 12% и 11,1% соответственно. Для углепластика ЭНФБ 4510-НТС-0,2-40 после вымачивания во всех загрязняющих средах происходит увеличение предела прочности от 11% до 22%. Изменение средних значений модуля упругости после вымачивания в загрязняющих средах для стеклопластиков ВПС-33, ВПС-34 и ЭНФБ-Т-10-14 попадает в статистический разброс. Для стеклопластика СП-97К происходит снижение модуля упругости при вымачивании образцов в нефрасе на 13%, в воде на 9%. Для углепластика ПУ-4э/0,1-2м происходит увеличение средних значений модуля упругости при вымачивании образцов в гидравлической жидкости и нефрасе на 10%, в топливе на 14,7%, в масле на 20,4%, при вымачивании в дистиллированной воде увеличение среднего значения модуля упругости попадает в статистический разброс. Для углепластика ЭНФБ 4510-НТС-0,2-40 после вымачивания во всех загрязняющих средах происходит увеличение модуля упругости от 11% до 18%.

Из испытаний на межслоевой сдвиг определено, что для стеклопластиков ВПС-33, ВПС-34, ЭНФБ-Т-10-14 и углепластиков ПУ-4э/0,1-2м и ЭНФБ 4510-НТС-0,2-40 наблюдается незначительное изменение значений прочности при межслоевом сдвиге, которое не выходит за границы статистического разброса. На образцах

стеклопластика СП-97К, вымоченных в нефрасе, наблюдается увеличение прочностных свойств на 12%, а вымоченных в воде – снижение на 22%.

По результатам испытаний полунатурных образцов-панелей на растяжение и сжатие отмечено, что вымачивание в смешанной загрязняющей среде ведет к незначительному изменению несущей способности элементов конструкций из стеклопластиков. Однако для образцов-панелей из углепластиков при испытании на растяжение выявлено увеличение средних значений несущей способности примерно на 11%. При испытаниях на сжатие выявлено увеличение средних значений несущей способности для стеклопластиков ВПС-33 и ЭНФБ-Т-10-14 на 13,6% и 21,6% соответственно, а для углепластика ЭНФБ 4510-НТС-0,2-40 – на 24,6%. Для остальных материалов изменение средних значений не выходит за рамки статистического разброса.

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

1. Предложены методические рекомендации по проведению испытаний на одноосное растяжение высоконаполненных однонаправленных композитов при нормальной, пониженных и повышенных температурах в части использования специальных захватных приспособлений, предложены и отработаны методики механических испытаний на одноосное растяжение, сжатие и сдвиг крупногабаритных образцов композитных изделий, а также предложена и апробирована методика определения и учета действительной жесткости нагружающих систем при обработке экспериментальных данных испытаний.
2. Выполнен цикл экспериментальных исследований механических характеристик при квазистатических нагружениях волокнистых композитов и полунатурных образцов-панелей крупноячеистых композиционных материалов с коробчатым наполнителем (панелей звукопоглощающего контура авиационного двигателя). Получены новые данные о модулях упругости, пределах прочности и несущей способности конструкционных композитов.
3. Получены новые данные о влиянии повышенных и пониженных температур на механические свойства полимерных композитов. Установлены зависимости влияния эксплуатационных температур в диапазоне от -60°C до $+150^{\circ}\text{C}$ на модуль упругости и предел прочности при квазистатических испытаниях на растяжение и трехточечный изгиб для композитов на основе стекло-, базальто- и углеволокна, а также проведена оценка влияния повышенных температур (100°C и 150°C) на несущую способность крупноячеистых композитов на основе стекло- и углепластиков при испытаниях на растяжение, сжатие и сдвиг.
4. Проведена серия квазистатических испытаний на растяжение, сжатие и межслоевой сдвиг наномодифицированных стеклотекстолитов на основе стеклоткани из стеклянных сплошных и крученых комплексных полых нитей. Экспериментально установлены диапазоны изменения модулей упругости, пределов прочности и прочности при межслоевом сдвиге стеклотекстолитов от массовой доли (в диапазоне от 0,01% до 0,07%) наномодифицирующего компонента.
5. Получены новые экспериментальные данные при испытаниях на растяжение и сжатие о влиянии эксплуатационных дефектов, а также эффективности локальных ремонтно-восстановительных операций на несущую способность панелей из крупноячеистого композиционного материала авиационного назначения.
6. Экспериментально установлены диапазоны изменения прочностных свойств при квазистатических испытаниях для 6-ти типов авиационных полимерных композитов и полунатурных крупноячеистых панелей авиационного назначения на

их основе, после воздействия загрязняющих эксплуатационных сред (топливо, гидравлическая жидкость, машинное масло, нефтяной растворитель, вода).

7. Результаты работы использованы на предприятиях ОАО «УНИИКМ» и ОАО «НПО САТУРН», что подтверждено актами об использовании результатов.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в ведущих рецензируемых научных изданиях

1. Бабушкин А.В., Вильдеман В.Э., Лобанов Д.С. Испытания на растяжение однонаправленного высоконаполненного стеклопластика при нормальных и повышенных температурах // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 2010. — Т. 76. — №7. — С. 57–59.
2. Бабушкин А.В., Лобанов Д.С. Экспериментальное исследование и моделирование свойств композиционных материалов в условиях сложных термомеханических воздействий // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. — Н.Новгород. — 2011. — № 4(5). — С. 1984-1986.
3. Вильдеман В.Э., Бабушкин А.В., Никулин С.М., Третьяков М.П., Лобанов Д.С., Струк Н.В. Экспериментальные исследования деформационных и прочностных свойств наномодифицированных стеклотекстолитов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 2012. — Т. 78. — № 7. — С. 57-61.
4. Babushkin A.V., Lobanov D.S., Kozlova A.V., Morev I.D. Research of the effectiveness of mechanical testing methods with analysis of features of destructions and temperature effects // *Frattura ed Integrita Strutturale*. — 2013. — Vol.24. — pp. 89-95 (Scopus).
5. Шилова А.И., Вильдеман В.Э., Лобанов Д.С., Лямин Ю.Б. Исследование механизмов разрушения углеродных композиционных материалов на основе механических испытаний с регистрацией сигналов акустической эмиссии // Вестник ПНИПУ. Механика. — 2013. — № 4. — С. 169-179 (Scopus).
6. Аношкин А.Н., Вильдеман В.Э., Лобанов Д.С., Чихачев А.И. Оценка эффективности ремонта в конструкциях из полимерных волокнистых композиционных материалов // Механика композитных материалов — 2014. — №3. — С. 441-450.
(перевод) Anoshkin A.N., Vil'deman V.E, Lobanov D.S., Chikhachev A.I. Evaluation of repair efficiency in structures made of fibrous polymer composite materials // *Mechanics of Composite Materials*. — 2014. — Vol. 50. — No. 3, —pp.311-316 (Scopus, WoS).
7. Шилова А.И., Лобанов Д.С., Вильдеман В.Э., Лямин Ю.Б. Экспериментальное исследование влияния высокотемпературной обработки тканого наполнителя на прочностные свойства углеродных композитов // Вестник ПНИПУ. Механика. — 2014. — № 4. — С. 221–239 (Scopus).
8. Лобанов Д.С., Вильдеман В.Э., Бабин А.Д., Гринев М.А. Экспериментальное исследование влияния внешних воздействующих факторов и эксплуатационных загрязняющих сред на работоспособность полимерных волокнистых композитных материалов // Механика композитных материалов. — 2015. — Т.51, № 1. — С. 1—12.
(перевод) Lobanov D.S., Vildeman V.E., Babin A.D., and Grinev M.A. Experimental research into the effect of external actions and polluting environments on the serviceability of fiber-reinforced polymer composite materials // *Mechanics of Composite Materials*, — 2015 — Vol. 51 — No. 1 —pp. 69-76. (Scopus, WoS).

Статьи в других изданиях и материалах конференций

9. Lobanov D.S., Babushkin A.V. Deformation and fracture of fibrous polymer composites in thermo-mechanical impact conditions // Proc. of ECCM15: European Conference on Composite Materials, Venice, Italy, 24-28 June 2012. – Paper ID: 1224. – ISBN 978-88-88785-33-2 (Scopus).

10. Зуйко В.Ю., Лобанов Д.С., Аношкин А.Н. Методики определения предела прочности полунатурных образцов-панелей из композиционных материалов при статических испытаниях на растяжение, сжатие и сдвиг // Вестник ПНИПУ. Механика. — 2012. — № 2. — С.99-111.
11. Вильдеман В.Э., Третьякова Т.В., Лобанов Д.С. Учёт жёсткости нагружающей системы при испытаниях полунатурных образцов крупноячеистого композиционного материала // Вестник ПНИПУ. Механика. — 2012. — № 2. — С.34-49.
12. Лобанов Д.С., Бабушкин А.В. Методика испытаний на одноосное растяжение однонаправленных композиционных материалов при пониженных температурах // Вестник ПНИПУ. Механика. — 2012. — № 4. — С.33-41.
13. Anoshkin A.N., Matveenko V.P., Roy A., Silberschmidt V.V., Tashkinov M.A., Lobanov D.S. The effect of technological defects on performance of fabric-reinforced composites // proc. of ECCM16: European Conference on Composite Materials, June 22nd-26th, – 2014, Seville-Spain. – ISBN: 978-000000000-2 (Scopus).

Монография

14. Экспериментальные исследования свойств материалов при сложных термомеханических воздействиях / Под ред. В.Э. Вильдемана. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. — 204 с. — ISBN 978-5-9221-1374-8

Подписано в печать 2015 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