

ФГБОУ ВПО

«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

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

Диссертация
на соискания учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель д.ф.-м.н., профессор В.Э. Вильдеман

Пермь – 2015

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. ВОПРОСЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ.....	15
1.1. Особенности структуры и свойств конструкционных волокнистых композиатов.....	15
1.2. Методы экспериментальных исследований и вопросы стандартизации в области испытаний конструкционных волокнистых композиатов.....	18
1.3. Закономерности деформирования и механизмы разрушения волокнистых композиционных материалов при квазистатических нагружениях.....	20
Выводы по главе 1.....	23
2. МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	24
2.1. Определение механических свойств композиатов при квазистатических испытаниях с использованием современных электромеханических испытательных систем.....	24
2.2. Статические испытания композиционных материалов	28
2.2.1. Испытания композиционных материалов на одноосное растяжение	28
2.2.2. Испытания композиционных материалов на трехточечный изгиб.	33
2.2.3. Испытания композиционных материалов на межслойный сдвиг...	35
2.3. Методики испытаний полунатурных образцов-панелей из волокнистых полимерных композиционных материалов.....	38
Выводы по главе 2.....	42

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИОННЫХ ВОЛОКНИСТЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ ПРИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ	43
3.1.Исследования механических свойств полимерных волокнистых композиционных материалов при квазистатических испытаниях на растяжение, трехточечный изгиб	43
3.1.1.Испытания на растяжение углепластиков.....	43
3.1.2.Испытания на одноосное растяжение однонаправленных композиционных.....	46
3.1.3.Испытания на трехточечный изгиб углепластика.....	59
3.2.Влияние повышенных температур на механические свойства композиционных.....	62
3.3.Исследования механических свойств стеклотекстолитов с наномодифицированной матрицей при квазистатических испытаниях на растяжение, сжатие, межслоевой сдвиг.....	68
3.3.1.Испытания на одноосное растяжение наномодифицированных композиционных.....	71
3.3.2.Испытания на сжатие наномодифицированных композиционных.....	73
3.3.3.Испытания на трехточечный изгиб короткой балки наномодифицированных композиционных	76
3.3.4.Испытания на межслойный сдвиг наномодифицированных композиционных.....	78
Выводы по главе 3.....	83
4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ПОЛУНАТУРНЫХ ОБРАЗЦОВ КРУПНОЯЧЕИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СТЕКЛО- И УГЛЕПЛАСТИКОВ С КОРОВЧАТЫМ (ТРУБЧАТЫМ) ЗАПОЛНИТЕЛЕМ	84

4.1.Учет жесткости нагружающей системы при испытаниях полунатурных образцов крупноячеистого композита.....	84
4.2.Испытания образцов-панелей из композиционных материалов на растяжение, сжатие, сдвиг.....	93
4.2.1.Испытания образцов-панелей на растяжение.....	93
4.2.2.Испытания образцов-панелей на сжатие.....	96
4.2.3.Испытания образцов-панелей на сдвиг.....	99
4.3.Экспериментальное исследование эффективности локального ремонта в конструкциях из полимерных волокнистых композиционных материалов.....	102
Выводы по главе 4.....	110
5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ ФАКТОРОВ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ПОЛИМЕРНЫХ ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	111
5.1.Влияние загрязняющих эксплуатационных сред на механические свойства композитов.....	111
5.1.1.Испытания на трехточечный изгиб образцов стекло- и углепластиков.....	112
5.1.2.Испытания на межслоевой сдвиг (метод изгиба короткой балки) образцов стекло- и углепластиков.....	115
5.2.Влияние загрязняющих эксплуатационных сред на механические свойства полунатурных образцов панелей.....	117
Выводы по главе 5.....	122
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	123
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	125

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- σ_v - предел прочности [Па];
- E - модуль упругости [Па];
- P - нагрузка [Н];
- l - расстояние между опорами [м];
- ΔP - приращение нагрузки [Н];
- h - толщина образца [м];
- b - ширина образца [м];
- τ_v - предел прочности при сдвиге [Па];
- d - диаметр [м];
- x_i - полученные значения;
- $\langle x \rangle$ - среднее значение;
- n - количество;
- s - среднеквадратическое отклонение;
- v - коэффициент вариации;
- τ_{max} - максимальное касательное напряжение при межслоевом сдвиге [Па];
- τ''_{max} - максимальное касательное напряжение при межслоевом сдвиге (при изгибе короткой балки) [Па];
- u - удлинение [м];
- ω - прогиб [м];
- $u(t)$ - удлинение всей нагружающей цепи, включая образец [м];
- $u_0(t)$ - удлинение всей нагружающей цепи [м];
- R_{nc} - жесткость нагружающей системы [Н/м];
- $S(t)$ - прикладываемая нагрузка [Н];
- R_{zn} - жесткость захватного приспособления [Н/м];
- R_m - жесткость испытательной машины [Н/м];
- $H_{обр}$ - жесткость рабочей зоны образца [Н/м];
- T - температура [$^{\circ}$ C];

ВВЕДЕНИЕ

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.

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 значимость 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» и ОАО «НПО САТУРН».

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:

Всероссийской школе-конференции молодых ученых «Математическое моделирование в естественных науках» (Пермь, 2009, 2011, 2014); Всероссийской научно-технической конференции «Аэрокосмическая техника и высокие технологии» (Пермь, 2009, 2011); Всероссийской конференции «Механика микронеоднородных материалов и разрушение» (Екатеринбург, 2010, 2014); X Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике (Нижний Новгород, 2011); Зимних школах по механике сплошных сред (Пермь,

2011, 2013, 2015); Международной конференции по экспериментальной механике «ICEM (The International conference on experimental mechanics)» (Куала-Лумпур, 2010); Евразийской научно-практической конференции «Прочность неоднородных структур» (Москва, 2012); Международной конференции по механике композиционных материалов «Mechanics of composite Materials (MCM-2012)» (Латвия, Рига 2012); Европейской конференции по композиционным материалам (ECCM 15, ECCM 16) (Венеция, 2012, Севилья, 2014); Международной конференции по механике материалов «International Conference on the Mechanical Behavior of Materials (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 Соколкин Ю.В.;
- Центра экспериментальной механики Пермского национального исследовательского политехнического университета, руководитель – доктор физико-математических наук, профессор Вильдеман В.Э.;
- кафедры вычислительной математики и механики Пермского национального исследовательского политехнического университета, руководитель – доктор технических наук, профессор Труфанов Н.А.;
- Института механики сплошных сред УрО РАН, руководитель – академик РАН, доктор технических наук, профессор Матвеев В.П.

Результаты диссертации использованы при выполнении научно-исследовательских работ 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 «НПО САТУРН» и НОЦ Авиационных композитных технологий ПНИПУ.

Публикации. Результаты исследований по теме диссертационной работы отражены в 37 публикациях [5, 12-14, 26, 27, 30-32, 49, 68-76, 111, 127, 128, 135-139, 153, 154, 170-174, 183, 184], в том числе 8 статей [5, 12, 14, 26, 74, 136, 139, 154] опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК, включая 6 публикаций в изданиях, индексируемых в Scopus [76, 136, 139, 153, 154, 171], 1 монография [30] и 2 учебных пособия [13, 27].

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованной литературы, содержащего 187 наименований. Работа содержит 71 рисунок, 30 таблиц и 1 приложение, изложена на 148 страницах.

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

В первой главе рассмотрены вопросы экспериментального исследования деформационных и прочностных свойств полимерных волокнистых композиционных материалов. Проведен краткий обзор работ по методам экспериментального исследования механических свойств композитов при квазистатическом нагружении.

Во второй главе рассмотрены основные механические характеристики, определяемые при статических испытаниях полимерных волокнистых

композитов. Приведено описание испытательного оборудования, которое использовалось в диссертационной работе.

Рассмотрены существующие экспериментальные методы механических испытаний полимерных волокнистых композиционных материалов. Проведен анализ сопоставимых отечественных (ГОСТ, ОСТ, РД) и зарубежных (ASTM D, ISO) стандартных методов статических испытаний композитов, выявлены сходства и различия, указаны недостатки.

Разработаны новые методические рекомендации по проведению механических испытаний однонаправленных композиционных материалов и композиционной арматуры на одноосное растяжение при нормальных повышенных и пониженных температурах.

Рассмотрены специальные методики механических испытаний на растяжение, сжатие и сдвиг для крупногабаритных полунатурных образцов-панелей звукопоглощающего контура авиационного двигателя из полимерных волокнистых композиционных материалов.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований механических свойств полимерных волокнистых композиционных материалов при испытаниях на одноосное растяжение, сжатие, трехточечный изгиб и межслоевой сдвиг в условиях нормальных, пониженных и повышенных температур.

Приведены результаты испытаний образцов углепластика на растяжение и трехточечный изгиб при нормальной и повышенной температурах, однонаправленных стекло- и базальтопластиков на одноосное растяжение с учетом разработанных методических рекомендаций по закреплению образцов в захватах испытательной системы. Испытания проводились в диапазонах температур от -30°C до 120°C , кроме того, были проведены испытания по термоциклированию образцов базальтопластика, которые имитировали температурные режимы реальных условий эксплуатации. По полученным результатам испытаний были проанализированы механизмы разрушения и

построены зависимости механических свойств от повышенных и пониженных температур для углепластика и однонаправленных стекло- и базальтопластиков.

Описаны исследования механических свойств стеклотекстолитов с наномодифицированной матрицей при квазистатических испытаниях на растяжение, сжатие и межслоевой сдвиг. Для сопоставления и последующей оценки экспериментально исследуемых характеристик испытания также проведены для номинальных (не модифицированных многослойными углеродными нанотрубками) композиционных материалов.

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

Предложена методика учёта жесткости нагружающей системы при испытаниях полунатурных образцов крупноячеистого композита. Методика основана на использовании цифровой оптической системы и метода корреляции цифровых изображений.

Приведены результаты механических испытаний полунатурных образцов крупноячеистых композиционных материалов на основе стекло- и углепластиков с наполнителем при испытаниях на растяжение, сжатие и сдвиг. Испытания проводились при нормальных и повышенных температурах. По результатам испытаний проведен анализ потери несущей способности полунатурных образцов при испытаниях в условиях повышенных температур.

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 наполнителем с залеченными дефектами типа сквозного пробоя.

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

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.

В заключении сформулированы и изложены основные результаты диссертационной работы.

В приложении приводятся акты использования результатов научно-исследовательских работ на предприятиях ОАО «УНИИКМ» и ОАО «НПО САТУРН».

Автор считает своим приятным долгом выразить искреннюю благодарность доктору физико-математических наук, профессору Вильдеману Валерию Эрвиновичу за научное руководство исследованиями и постоянное внимание к работе. Автор высоко ценит поддержку члена-корреспондента Российской академии наук Ломакина Евгения Викторовича, доктора физико-математических наук, профессора Соколкина Юрия Викторовича, кандидата технических наук Бабушкина Андрея Викторовича и выражает особую признательность за ценные советы и рекомендации.

1. ВОПРОСЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ

Настоящая глава посвящена обзору 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.

1.1. Особенности структуры и свойств конструкционных волокнистых композитов

Наибольшее распространение среди композитов получили полимерные волокнистые композиционные материалы, которые сочетают в себе легкость с прочностью и жесткостью в заданных направлениях. Волокнистые композиционные материалы на основе стекло-, угле-, боро-, базальто-, органоволокон широко применяются в ответственных конструкциях в машиностроении, авиационной и космической технике, промышленном и гражданском строительстве и др. Направленный выбор компонентов с учетом их свойств, соотношения и структуры позволяет получать композиционные материалы с заданными свойствами.

Современное состояние и направления развития в области производства и применения армированных пластиков на основе стекло-, угле- и органоволокон приведены в обзорных работах сотрудников ведущих отечественных предприятий и организаций [42, 51, 79, 80, 110, 122, 134 и др.].

Применение полимерных волокнистых композитов в ответственных конструкциях предъявляет высокие требования к прочностным свойствам и живучести материала. Наиболее широкое замещение металлических конструкционных материалов композитами наблюдается в авиастроении [7, 40, 48, 95, 122, 133]. Авиационные полимерные композиты можно условно разделить на 4 группы: конструкционные пластики для слабо- и средненагруженных конструкций; баллистически-стойкие пластики для защитных конструкций; антифрикционные пластики для тяжело нагруженных узлов трения, звукопоглощающие пластики для снижения шума самолетов на местности. В обзорной статье [7] приведены варианты применения композиционных материалов в узлах и деталях вентиляторов авиационных двигателей ведущих мировых компаний.

В работах [48, 122] рассмотрены вопросы целесообразности и опыт применения перспективных полимерных композитов в конструкциях узлов и деталей авиационных силовых установок и ракетно-космической техники.

Особенностью волокнистых полимерных композиционных материалов является влияние на физико-механические свойства технологии изготовления и существование материала только в виде изделия, например, кожух звукопоглощающего контура авиационного двигателя (ЗПК) [6-9, 40, 41, 122 и др.]. Такие изделия представляют собой многослойную панель, состоящую из несущих слоев и заполнителя (сотового, ячеистого, коробчатого, складчатого типа z-гофра), со сложной геометрией и крупногабаритной структурой.

Определение эффективных механических свойств таких изделий является важной проблемой в виду недостаточности отечественной нормативной базы в этой области и, в большинстве случаев, решение которой ограничивается

математическим моделированием без экспериментального подтверждения [107, 108].

Важное значение приобретают разработка конструкторско-технологических решений и моделирование технологических процессов изготовления ответственных деталей из композиционных материалов [7, 9, 17, 20, 24, 28, 29, 42, 50, 82, 96, 103, 133 и др.].

Особое место занимают материалы, имеющие наномасштабную структуру. Преимущество таких материалов заключается в их высоких удельных характеристиках и функциональных свойствах. Перспективы широкого применения нанокompозитов в различных областях промышленности связаны с достижением высоких значений механических (деформационных и прочностных) характеристик.

Для обеспечения интенсивного развития nanoиндустрии, в частности, технологий производства материалов и используемых для модификации наполнителей, создания основ для применения нанокompозитов в ответственных конструкциях, необходимо проведение комплексных исследований по определению их механических характеристик и эффектов механического поведения. Особенность данного рода материалов заключается в том, что введение малых добавок нанонаполнителей приводит в отдельных случаях к существенному изменению эффективных характеристик материала. Исследованию свойств современных наноматериалов и нанокompозитов посвящены работы [39, 44, 63, 79, 134, 160, 161, 167 и др.]. Метрологические аспекты исследований наноматериалов содержатся в [80]. Анализ литературных данных свидетельствует о перспективности применения углеродных нанотрубок в качестве модификаторов при создании композиционных материалов конструкционного назначения. Внедрение углеродных нанотрубок в производство композиционных материалов открывает возможность создания современных легких и прочных материалов [94].

1.2. Методы экспериментальных исследований и вопросы стандартизации в области испытаний конструкционных волокнистых композитов

История развития и, в определенной степени, современное состояние экспериментальных методов исследования свойств материалов отражены в следующих фундаментальных работах авторов Ф.Дж. Белла, С. Алтури, А. Кобаяси, Д. Дэлли и др. [15, 16, 151 и др.].

Методическим вопросам экспериментальной механики материалов уделено внимание в работах авторов Я. В. Фридмана, И.М. Керштейна, Е.В. Ломакина, Э. Беккера, И. Кестера, Г. Фрейера, Б.Д. Аннина, В.М. Жигалкина, А.С. Вольмира, А.А. Лебедева, Ф.С. Савицкого, А.И. Станкевича, А.М. Локощенко, Р.А. Васина, Б.В. Букетина, А.А. Горбатовского, И.Д. Кисенко, А. Дюрелли, Дж. Холла, Ф. Стерна и др. [4, 21, 36, 56, 98, 129-131 и др.].

В области испытаний композиционных материалов накоплен большой опыт [109, 126], однако развитие материаловедения в части создания новых конструкционных композиционных материалов значительно опережает процессы стандартизации в области разработки и создания научно-обоснованных методов испытания композитов. В связи с чем исследователям часто приходится самостоятельно дорабатывать, если это возможно, существующие стандартные методы испытаний композитов, а зачастую разрабатывать собственные методики экспериментального исследования свойств композитов с проектированием и созданием соответствующей специализированной оснастки. В работах [142, 143] внимание уделяется совместному многоосному нагружению материалов. Варианты модификаций стандартной оснастки для статических испытаний полимерных волокнистых композитов рассмотрены в статьях [97, 147-152, 155, 163-165, 178, 187]. Методическим вопросам экспериментального исследования прочности элементов конструкций на основе композитов посвящены работы [41, 132].

Наиболее актуальными и применяемыми на практике методами определения механических свойств полимерных волокнистых композитов

являются испытания на одноосное растяжение, сжатие, изгиб и сдвиг. Численной обработке экспериментальных данных уделено внимание в работах [1, 33, 36]. Анализу нормативной базы по механическим испытаниям композитов посвящены работы [2, 11, 126, 144 и др.].

Статические испытания на одноосное растяжение и сжатие армированных композиционных материалов регламентированы в ГОСТ 25.601-80 и ГОСТ 25.602-80, при этом из испытаний определяются модуль упругости, предел прочности и коэффициент Пуассона. Механические свойства стеклопластиков определяются по ГОСТ 11262-80 и ГОСТ 4651-82 [64]. Однако данные стандартные методы испытаний имеют ограниченное применение, в частности, при исследовании механических свойств высоконаполненных однонаправленных композиционных материалов, при испытании которых возникает ряд проблем. Основной проблемой при испытаниях однонаправленных композитов является закрепление образцов и обеспечение разрушения в рабочей части. Это объясняется тем, что при повышенном проценте наполнения волокном материал обладает высокой прочностью в продольном направлении, и значительно меньшей прочностью в поперечном направлении. Данной проблеме посвящены работы [66, 97 и др.], при этом некоторые исследователи склоняются к отказу использования прямого метода испытаний на растяжение и применению альтернативных методов определения механических свойств однонаправленных композитов [85, 126]. Одним из таких методов является метод испытания на изгиб с последующим пересчетом и обработкой результатов испытаний. Однако необходимо отметить что, несмотря на большой объем получаемых результатов (модуль упругости, модуль межслойного сдвига, прочность по нормальным напряжениям и прочность при межслойном сдвиге), испытания на изгиб считаются второстепенными в виду особенностей испытываемых материалов и напряженного состояния при изгибе [85, 125, 126].

Статические испытания композиционных материалов на сдвиг являются недостаточно изученными [88, 92, 126, 150-152]. Определение пределов

прочности при сдвиге на плоских образцах является сложной и до конца не решенной задачей. Существует ряд методов экспериментального исследования упругих постоянных и прочности при сдвиге, однако универсальных методов для всех волокнистых композитов нет [126]. Среди методов экспериментального определения характеристик сдвига волокнистых композиционных материалов можно выделить три группы: испытания на сдвиг в плоскости укладки волокон (арматуры), испытания на межслойный сдвиг и испытания на срез. Более подробно эти методы рассмотрены в работах [92, 126, 144].

Принципиальные трудности, возникающие при испытаниях композиционных материалов, были проанализированы в работах [93, 124-126]. Основные особенности и методики проведения экспериментальных исследований механических свойств при квазистатических испытаниях армирующих и композиционных материалов системно проанализированы в исследованиях Ю.Н. Работнова, Ю.М. Тарнопольского, Т.Я. Кинциса, В.В. Болотина, А.Н. Полилова, В.П. Тамужа, В.С. Куксенко, С.Б. Сапожникова, В.Д. Протасова, В.А. Вознесенского, С.В. Ломова, Д.Ф. Адамса и др. [17-20, 92, 93, 99, 109, 124, 126, 146-152, 156, 158, 175-179, 186 и др.].

1.3. Закономерности деформирования и механизмы разрушения волокнистых композиционных материалов при квазистатических нагружениях

Анализ процессов деформирования и механизмов разрушения полимерных волокнистых композиционных материалов проводился в работах В.Э. Вильдемана, Ю.В. Соколкина, А.А. Ташкинова, Г.А. Ванина, Б.Е. Победри, В.П. Матвеевко, А.Н. Аношкина, А.А. Адамова, С.Б. Сапожникова, В.С. Кривободрова, А.Н. Воронцова, А.С. Овчинского, В.В. Парцевского, Ю.Ю. Перова, В.П. Тамужа, Ю.М. Тарнопольского, А.В. Лаврова, М.Г. Петрова, С.В. Ломова, В.А. Скрипняка и др. [8, 9, 24, 25, 28, 29, 34, 36, 45, 50, 62, 82, 107, 108].

Анализ влияния технологических и эксплуатационных дефектов является немаловажной задачей. Например, при эксплуатации конструкций из композиционных материалов в составе двигательной установки неизбежно возникают различные дефекты, в том числе, обусловленные случайными механическими воздействиями. Дефекты могут носить поверхностный характер в виде царапин, надрезов, повреждений одного или нескольких поверхностных слоев, а могут иметь вид несквозного и сквозного пробоя стенки элемента конструкции [95, 99, 103]. При этом возникает сложная проблема оценки работоспособности конструкции с дефектом (или несколькими дефектами), для решения которой необходимо проведение комплекса исследований: влияния размера дефекта на работоспособность конструкции и определение допустимого размера дефекта, выбора способа его залечивания (ремонта конструкции) и оценка остаточной прочности и ресурса работы конструкции с дефектом.

Актуальной задачей является исследование и анализ влияния повышенных и пониженных (эксплуатационных) температур на механические свойства и механизмы разрушения армирующих и композиционных материалов, а также установления температурных зависимостей упругих и прочностных свойств волокнистых композитов, применяемых в ответственных конструкциях. Экспериментальные исследования температурных зависимостей механических свойств композитов описаны в работах В.В. Болотина, Г.Х. Мурзаханова, В.Н. Щугорева, С.А. Кузьмина, В.Н. Булманиса, А.С. Стручкова, А.М. Скудры, Д.Р. Бертулиса, В.Ф. Савина, А.Н. Лугового, Ю.П. Волкова и др. [18, 19, 43, 65, 105, 106, 168]. В работе А.А. Скудры [104] предложена методика прогнозирования упругих свойств волокнистых композиционных материалов при разных температурах.

Также важной задачей является оценка опасности деградации физико-механических свойств полимерных волокнистых композитов ответственного назначения при воздействии эксплуатационных загрязняющих сред, таких как – топливо, машинное масло, растворители и т.д. [11, 180]. В работе [11] представлены результаты исследования деградации механических свойств

углепластика после насыщения эксплуатационными жидкостями в течении 30 суток при испытаниях на межслоевой сдвиг. Приводится разработанная методика определения прочности при межслоевом сдвиге в исходном состоянии и после насыщения эксплуатационными жидкостями. По мнению авторов работы [11], наиболее важной характеристикой, ответственной за эксплуатационные свойства деталей из слоистых полимерных композитов является прочность при межслоевом сдвиге, в том числе после воздействия на композит эксплуатационных жидкостей, поэтому результаты исследования деградации свойств при других видах квазистатических испытаниях не приводятся.

Большое количество исследований проводятся сотрудниками «Всероссийского института авиационных материалов» в части изучения влияния внешних воздействующих атмосферных факторов (температура, влажность, солнечная радиация, циклическое изменение температуры, тропический и морской климат и т.д) при эксплуатации конструкций из полимерных композитов авиационного назначения [38, 52-55]. В работах Ю.М. Вапирова, В.Н. Кириллова, О.В. Старцева, Е.Н. Каблова, В.Н. Булманиса и др. приводятся результаты исследований влияния климатических факторов в процессе лабораторных тепловлажностных [3, 10, 22, 162, 166, 180, 181, 185] и натурных комплексных климатических испытаний [57-61, 78, 81, 84, 120] при статическом нагружении и в свободном состоянии на изменение остаточной прочности материала, влагосодержания и структурных превращений в композите.

Важной задачей является диагностика и контроль климатического старения полимерных волокнистых композитов на ранней стадии. Прогнозированию свойств полимерных композитов при термовлажностном старении посвящены работы [112-119]. Результаты исследования состояния поверхности полимерных композиционных материалов авиационного назначения при их климатическом старении отражены в работах [23, 52-55, 84, 157, 159, 175 и др.].

Выводы по главе 1.

Таким образом на основе анализа научных публикаций отечественных и зарубежных авторов, работы которых посвящены проблемам, связанным с методическими вопросами и экспериментальным исследованиям закономерностей деформирования конструкционных полимерных волокнистых композиционных материалов при квазистатическом нагружении, можно сделать вывод, что к актуальным направлениям исследований в области экспериментальной механики и механики деформируемого твердого тела относятся следующие.

1. Развитие научно-обоснованных методик экспериментального исследования механических свойств конструкционных полимерных волокнистых композиционных материалов на базе эффективного использования современного испытательного оборудования.

2. Получение новых экспериментальных данных о закономерностях деформирования в условиях воздействия внешних атмосферных и эксплуатационных факторов на механические свойства полимерных волокнистых композитов.

3. Получение новых данных о влиянии дефектов на механические свойства, а также эффективности применения ремонтно-восстановительных операций для изделий из волокнистых композитов.

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Проектирование конструкций и сооружений, создание новых материалов неотъемлемо от развития моделей механики деформируемого твердого тела, базирующихся на экспериментальных данных об основных закономерностях механического поведения материалов и их характеристиках.

В 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.

Содержание главы отражено в следующих публикациях автора [12-14, 27, 30, 32, 49, 69, 154].

2.1. Определение механических свойств композитов при квазистатических испытаниях с использованием современных электромеханических испытательных систем

В соответствии с ГОСТ Р 50583-93 «Материалы композиционные полимерные. Номенклатура показателей» и ГОСТ Р 54072-2010 «Изделия космической техники. Материалы композиционные полимерные. Номенклатура показателей» при квазистатических испытаниях полимерных волокнистых композитов определяются 23 механических показателя. Основные, наиболее часто определяемые из эксперимента – 9 упругих констант, такие как модуль упругости, модуль сдвига и коэффициент Пуассона в трех направлениях, а также разрушающие напряжения и относительные удлинения при разрушении при

растяжении/сжатии в направлении оси армирования и в направлении, перпендикулярном к оси армирования.

Помимо нахождения значений основных характеристик в процессе испытания также необходимо определять и анализировать диаграммы нагружения и деформирования. С этой целью используются сервогидравлические и электромеханические испытательные и высокоточные измерительные системы. Современные испытательные системы позволяют проводить экспериментальные исследования закономерностей процессов деформирования и разрушения различных конструкционных и функциональных материалов в широком диапазоне скоростей нагружения, а также условиях реализации сложных режимов температурно-силового воздействия [13, 27, 30].

Все экспериментальные исследования, результаты которых приведены в настоящей работе, проведены на универсальной электромеханической испытательной системе Instron 5882 (рисунок 2.1), предназначенной для квазистатических испытаний на растяжение, сжатие, трехточечный изгиб и сдвиг с нагрузкой до 100 кН и скоростью нагружения от 0,001 до 500 мм/мин. Точность измерения нагрузки составляет 0,4% от измеряемой величины в диапазоне 1%–100% номинальной мощности датчика нагрузки и 0,5% от измеряемой величины в диапазоне 0,2%–1% номинальной мощности датчика нагрузки.

В состав испытательной системы входит климатическая камера Instron серии SFL 3119 (рисунок 2.2), которая позволяет проведение термомеханических испытаний при повышенных (до +350°C) и пониженных (до –100°C) температурах. Температура камеры регулируется с помощью программируемого контроллера. Контроллер обеспечивает управление всеми температурными режимами в соответствии с заданными программами, установлен в заднем отсеке камеры, а его дисплей находится на пульте управления, который предназначен для подачи всех необходимых управляющих воздействий в процессе эксплуатации камеры.

Для работы в области отрицательных температур климатическая камера оснащена холодильным агрегатом, который работает с использованием жидкого

азота. Для хранения, транспортировки и разлива жидкого азота используется сосуд Дьюара. Конструкция сосуда позволяет автоматически поддерживать давление, заданное пользователем в зависимости от конкретных требований.

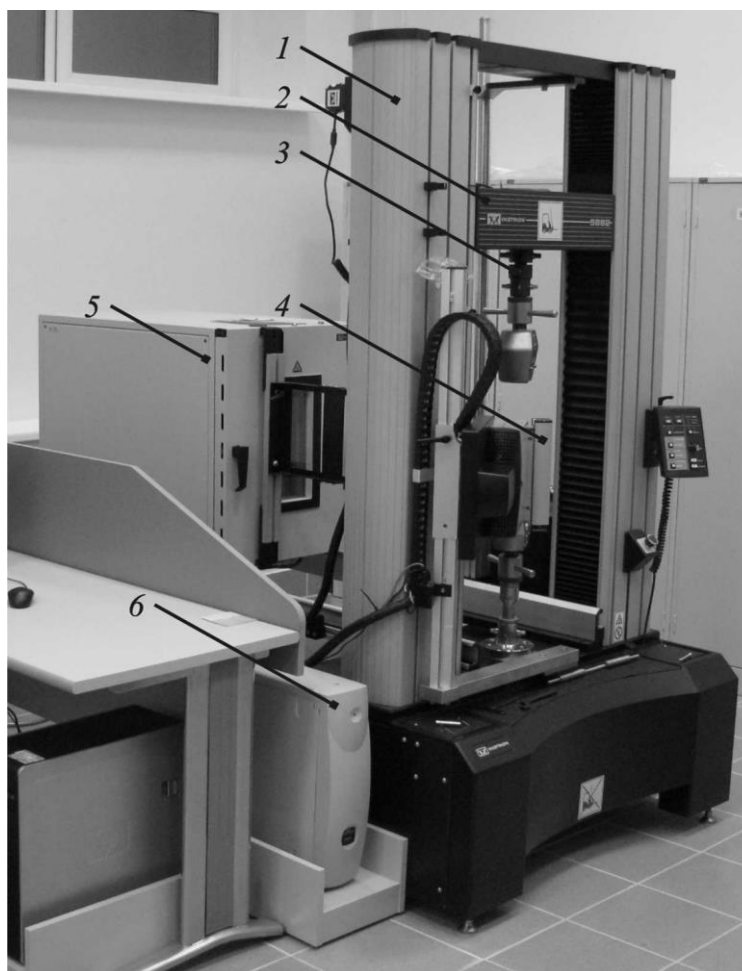


Рис.2.1. Электромеханическая испытательная система Instron 5882:

1 — двухколонная нагружающая рама 100 кН; 2 — подвижная траверса;
3 — датчик нагрузки; 4 — видеоэкстензометр AVE; 5 — климатическая камера Instron 3119-406 с контроллером Eurotherm 2408; 6 — контроллер сбора и обработки экспериментальных данных FastTrack 5800

Полный контроль и управление машиной производится при помощи контроллера FastTrack 5800. Контроллер позволяет осуществлять калибровку датчиков, установку пределов измерений, контроль за параметрами испытания по дисплеям, сбор и сохранение данных, построение графиков и диаграмм в

реальном масштабе времени процесса. Управление испытательной системой и настройка контроллера осуществляется с помощью программы для испытаний материалов Console. Настройка параметров испытания, эксплуатация системы, сбор и анализ данных испытаний осуществляется программным обеспечением Bluehill 2.



Рис. 2.2. Климатическая камера с видеоэкстензометром AVE в составе испытательной системы

Для измерения деформаций непосредственно на образце испытательная система оснащена бесконтактным видеоэкстензометром AVE Instron и навесными контактными датчиками измерения деформаций Instron и Epsilon.

Принцип работы AVE основан на точном определении координат меток измерительной базы, нанесенных на образец, при помощи цифровой видеокамеры с высоким разрешением. Цифровая камера высокого разрешения содержит двумерный видеодатчик. При проведении эксперимента видеокамера постоянно получает изображение испытываемого образца. Скорость оцифровки видеосигнала составляет один кадр информации в 20 мкс. Для снижения влияния шумов и оптических искажений на измерения деформаций видеокамера

установлена на конце воздушной трубы, через которую проходит постоянный поток воздуха.

Калибровка выполняется при помощи специализированного программного обеспечения и эталонной калибровочной пластины. Перед проведением тестирования производятся проверки допустимости уровня освещения образца и достаточной контрастности меток на фоне образца.

Реализация заданного режима испытания осуществляется специализированным программным обеспечением Bluehill 2. Изменения длины измерительной базы между метками отслеживаются с частотой съемки камеры. Величина деформации вычисляется по значениям исходной и текущей длины измерительной базы. Величина деформации может быть получена непосредственно в виде цифровых данных [27, 30].

2.2. Статические испытания композиционных материалов

2.2.1. Испытания композиционных материалов на одноосное растяжение

Наиболее распространенными и применяемыми на практике являются испытания полимерных волокнистых композиционных материалов на растяжение. Характеристики, полученные при одноосном растяжении, служат для оценки несущей способности материала. Метод механических испытаний на растяжение стандартизирован в отечественном ГОСТ 25.601-80 и зарубежном ASTM D3039/3039M. Полимерные волокнистые композиционные материалы на основе стеклянных волокон ГОСТ 25.601-80 предписывается испытывать по ГОСТ 11262-80 «Пластмассы. Метод испытания на растяжение». Суть методов состоит в кратковременном испытании образцов из композиционного материала на растяжение с постоянной скоростью деформирования, при котором определяют разрушающие напряжения при растяжении в направлении оси армирования и в перпендикулярном направлении. Для измерения деформаций и последующего определения модуля упругости и коэффициента Пуассона по ГОСТ рекомендуется использовать тензодатчики, наклеиваемые в продольном и

поперечном направлениях, или экстензометры с достаточной точностью, погрешность которых не превышает 10^{-5} относительных единиц деформации.

Основные различия между отечественными и зарубежными методами испытаний на растяжения представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1. Характерные отличия стандартных методов испытания на растяжение

Стандарты	ГОСТ 25.601-80	ГОСТ 11262-80	ASTM D 3039/3039M-08
Накладки	стеклотекстолит ($E_{\text{накл}} < E_{\text{обр}}$)	не регламентируется	нетканый ортогонально армированный стеклопластик
Скорость нагружения	5-20мм/мин	не регламентируется	2мм/мин
Форма и размеры образца (включая захватные части)	полоски, лопатки захватная часть >80 мм	полоски, лопатки захватная часть от 30 до 50мм	полоски захватная часть 50 -55мм

Необходимо отметить, что зарубежные стандарты, в частности, ASTM, более точно описывают методологию проведения испытания, предусматривают дифференцированный подход к геометрии образцов, имеют классификацию большинства видов разрушения образцов и таблицу соответствия разрушений (таблица 2.2). При анализе и практическом использовании ГОСТ серии 25.600 выявлен ряд повторяющихся ошибок и опечаток, например, в формулах для определения разрушающего напряжения и модуля упругости неверно указана размерность приращения нагрузки, допущена опечатка в формулах определения коэффициента Пуассона и еще ряд ошибок в наборе формул и текста, отмеченных в работе [2].

Использование методик проведения испытаний на одноосное растяжение волокнистых полимерных композитов на основе ГОСТ 25.601-80 и ГОСТ 11262-80 встречает трудности при определении механических характеристик однонаправленных армированных пластиков и композиционной арматуры, в

особенности высококомодульных высоконаполненных композитов. Это связано с тем, что при увеличении процента заполнения повышается продольная прочность и значительно снижается прочность в поперечном направлении. Главной проблемой испытаний однонаправленных высоконаполненных композитов становится закрепление в захватах испытательной машины.

Таблица 2.2. Классификация и обозначение по трем символам основных видов разрушения при испытании на растяжение по ASTM D 3039

Первый символ		Второй символ		Третий символ	
Тип разрушения	Шифр	Область разрушения	Шифр	Направление разрушения	Шифр
под углом	A	под накладкой/захватом	I	снизу	B
межслойное расслоение	D	по накладке/захвату	A	сверху	T
захватная часть/накладка	G	вблизи накладки/захвата	W	слева	L
поперечный разрыв	L	рабочая зона	G	справа	R
сочетание типов разрушения	M(xyz)	множественное (несколько)	M	по середине	M
продольное растрескивание	S	различная	V	различное	V
потеря устойчивости	X	неизвестно	U	неизвестно	U
другое	O	-	-	-	-

В 2012 году был выпущен ГОСТ 31938-2012 «Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Общие технические условия», аналогичный международному стандарту ISO 10406-1:2008 и предписывающий метод испытания на растяжение с использованием специальных захватных частей (муфт), качественно повторяющий схему закрепления, предложенную в работах [12-14]. Отличие проявляется в геометрических размерах образцов, которые в большинстве случаев не позволяют проводить испытания в лабораторных условиях с использованием стандартного испытательного оборудования. Так, например, согласно ГОСТ

образец композитной арматуры диаметром от 4 мм до 10 мм с учетом минимальных размеров захватных муфт должен иметь общую длину не менее 800 мм. Такое условие серьезно сокращает перечень испытательных систем, рабочая зона между захватами которых должна превышать 800 мм. Также в ГОСТ отсутствуют рекомендации по испытаниям образцов квадратного и прямоугольного сечений.

Таким образом, становится необходимым разработка специального захватного приспособления для испытаний однонаправленных высоконаполненных композитов на одноосное растяжение. Один из вариантов такого приспособления был предложен в работах [12-14, 69-72, 170], однако по результатам испытаний при повышенных температурах захватное приспособление нуждалось в доработке.

Было спроектировано и изготовлено захватное приспособление, которое является модификацией выше упомянутого, эскиз представлен на рисунке 2.3. Идея заключается в том, что образец однонаправленного композита выполняется в виде стержня постоянного сечения и с обоих концов вклеивается в стальные гильзы с конусным отверстием, которое обеспечивает увеличение распределенного усилия поперечного обжатия при увеличении нагружающего усилия в направлении армирования [69, 154]. Условия проведения испытаний определяются (скорость нагружения, температура, влажность, требования к испытательному оборудованию) в соответствии с ГОСТ 31938-2012, деформации измеряются при помощи бесконтактного видеоэкстензометра AVE, что обеспечивает отсутствие внешних физических воздействий на рабочую зону образца и освобождает от необходимости остановки испытательной системы во время испытания для снятия навесных экстензометров.

Алгоритм основных действий при подготовке к испытанию образцов однонаправленных композитов с использованием специальных захватных приспособлений включает в себя: отбор образцов однонаправленного композита постоянного сечения, по возможности без наружных дефектов (отслоение, трещины, сколы связующего); измерение геометрических параметров; очистка

от замасливания образцов при помощи ацетона; очистка от замасливания внутренних поверхностей стальных гильз; приготовление эпоксидного клея и заливание готового клея в стальную гильзу; установка образца материала в гильзе; выдержка в течении 24 ч. в сушильном шкафу с постоянной температурой (+ 30°C - + 35°C); нанесение меток на рабочую часть образца при помощи специального маркера.

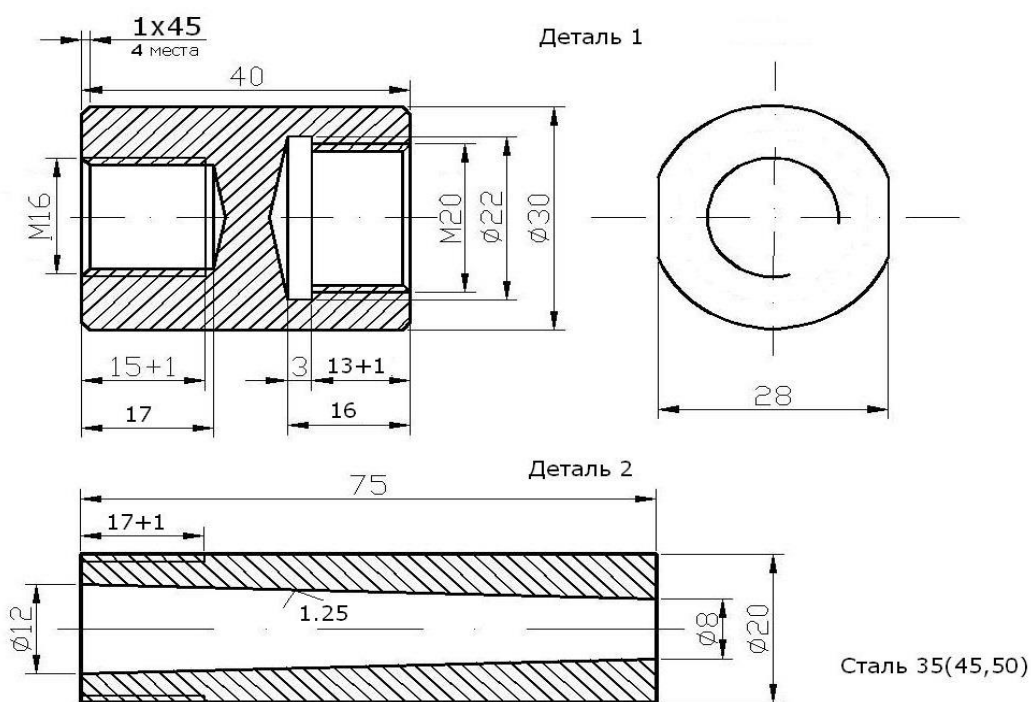


Рис. 2.3. Схема специального захватного приспособления для испытаний
однонаправленных композитов на одноосное растяжение

Другим предлагаемым вариантом закрепления образцов однонаправленных композитов и композитной арматуры являются съемные многоразовые полувтулки. Длина втулок составляла 65 мм. Диаметр внешней части - 12,5 мм, внутренней - 6,5 мм. Между втулками и образцом прокладывалась алюминиевая фольга толщиной 10 мкм (рисунок 2.4).



Рис. 2.4. Закрепление образцов однонаправленных композитов в разъемные втулки

Такой метод закрепления имеет ряд преимуществ и недостатков. К преимуществам можно отнести значительное снижение временных затрат на подготовку испытаний, простоту закрепления образцов, многократность использования без дополнительной подготовки и очистки после проведения испытаний, применимость при повышенных температурах. Недостатком является раздавливание образцов в захватной части (для однонаправленных образцов базальтопластика диаметром 6 мм экспериментально установлено, что при продольной нагрузке свыше 30кН происходит раздавливание в захватах).

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.

2.2.2. Испытания композиционных материалов на трехточечный изгиб

Испытания на трехточечный изгиб получили широкое распространение как альтернативный растяжению метод определения механических свойств благодаря простоте осуществления, доступности и невысокой стоимости. Однако возникающее при изгибе напряженно-деформируемое состояние является неоднородным, регистрируемые показатели интегрально содержат информацию о растяжении, сжатии и межслоевом сдвиге [126].

Определяемые характеристики при испытаниях на изгиб установлены стандартами ГОСТ Р 50583-93 «Материалы композиционные полимерные. Номенклатура показателей» и ГОСТ Р 54072-2010 «Изделия космической техники. Материалы композиционные полимерные. Номенклатура показателей» как механические показатели, определяемые на этапе разработки материала. В ходе испытания определяются значения нагрузки и прогиба. Предел прочности σ_B (МПа) при поперечном изгибе и модуль упругости E (ГПа) при поперечном изгибе определяются по формулам:

$$\sigma_B^u = \frac{3P_{\max} l}{2bh^2}; \quad (2.1)$$

$$E^u = \frac{\Delta P l^3}{4bh^3 \Delta \omega}; \quad (2.2)$$

где $P_{\max}$ – максимальная нагрузка, (Н); l – расстояние между опорами, (мм); h – толщина образца, (мм); b – ширина образца, (мм); ΔP – приращение нагрузки (Н); $\Delta \omega$ – приращение прогиба в середине образца, (мм).

Испытания на трехточечный изгиб стандартизированы по ГОСТ 25.604-82 «Метод испытания на изгиб при нормальной, повышенной и пониженной температурах». Данный стандарт распространяется на полимерные волокнистые композиты, армированные непрерывными высокомодульными углеродными, борными, органическими и другими волокнами, структура укладки которых симметрична относительно срединной плоскости композита. Испытания этих материалов на изгиб проводятся при нормальной (20°C), повышенной (до +180°C) и пониженной (до - 60°C) температурах. Испытания композитов на основе стеклянных волокон регламентированы в ГОСТ 4648-71. Зарубежными аналогами являются ASTM D 7264/D7264M-07 и ASTM D 790. Основные технические отличия в методах испытаний приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3. Характерные отличия стандартных методов испытания на трехточечный изгиб

Стандарты	ГОСТ 25.604-82	ГОСТ 4648-71	ASTM D 7264 / D7264M-07, ASTM D 790
Скорость нагружения	5-20мм/мин	10 мм/мин	определяется по формуле для каждого образца
Расстояние между опорами	40h	15-17h	дифференцированный подход
Радиус закругления наконечника и опор	наконечник 5 ± 1 , опоры 2 ± 1 мм	наконечник $5\pm 0,1$ опоры: $2\pm 0,2(h>3\text{мм})$; $0,5\pm 0,2(h>3\text{мм})$	наконечник и опоры 5мм (минимальный 3,2мм)

* – здесь и далее h – толщина образца

Несмотря на большой объем получаемой информации, испытания на изгиб часто считаются второстепенными, и их результаты многие авторы не рекомендуют использовать при расчете конструкций из армированных пластиков. Причин недоверия к такому методу определения механических характеристик композитов несколько: ограниченные возможности корректной обработки результатов испытаний, особенности испытываемых материалов и неоднородное напряженное состояние при изгибе [124, 126].

Главная трудность при испытаниях на изгиб связана с обработкой результатов испытаний. При испытаниях на изгиб замеряются нагрузка и прогиб и по этим параметрам оцениваются свойства материала. Измеряемые величины связаны с исследуемыми характеристиками материала аналитическими зависимостями, точность которых определяется лежащими в их основе гипотезами.

2.2.3. Испытания композиционных материалов на межслоевой сдвиг

Исследования характеристик межслойного сдвига может быть осуществлено различными методами. Самым распространенным методом

исследования характеристик межслойного сдвига является метод испытания на сдвиг по слою при трехточечном изгибе или «метод короткой балки». Данный вид испытаний стандартизирован в отраслевом стандарте ОСТ 92-1472-78 и РД 50-675-88, зарубежным аналогом является ASTM D 2344/ D 2344M-00E01.

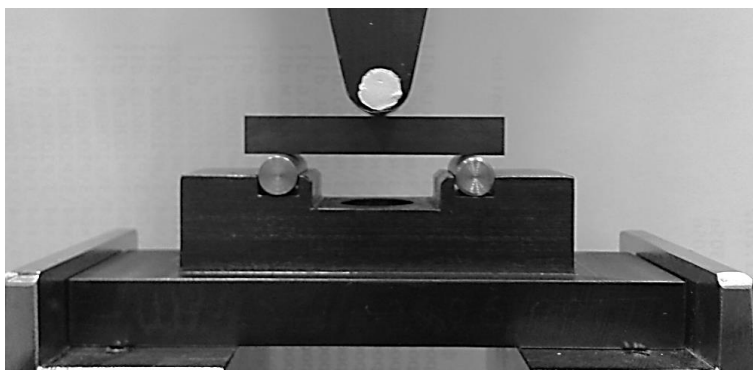


Рис. 2.4. Межслойный сдвиг по методу изгиба короткой балки

Таблица 2.4. Характерные отличия стандартных методов испытаний на межслойный сдвиг

Стандарт	ОСТ 92-1472-78	РД 50-675-88	ASTM D 2344/ D 2344M-00E01
Скорость нагружения	10-20мм/мин	1-2 мм/мин	1мм/мин
Расстояние между опорами	5÷6 h	5h	6h
Радиус закругления наконечника и опор	наконечник $5\pm 0,1$ мм опоры: $2\pm 0,2$ мм	наконечник $5\pm 0,5$ мм опоры $3\pm 0,5$ мм	наконечник 6мм, опоры 3мм

Сущность методов заключается в приложении нагрузки к образцу при постоянной температуре и скорости движения траверсы испытательной машины, определении разрушающего напряжения при сдвиге путем изгиба образца в виде короткой балки (рисунок 2.4). При этом выбор длины образца обусловлен необходимостью реализации механизма разрушения – сдвиг по слою. При реализации других механизмов, разрушение происходит от сжатия верхних, либо растяжения нижних слоев образца. Формула по определению прочности

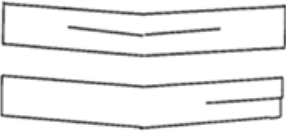
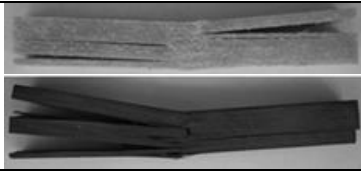
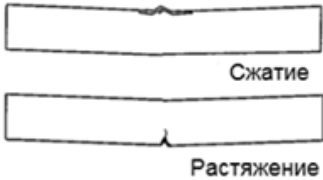
при межслойном сдвиге в отечественных и зарубежных стандартах идентична и имеет вид:

$$\tau = 0,75 \frac{P_{\max}}{h \cdot b} \quad (2.3)$$

где τ – прочность межслойного сдвига, (МПа); $P_{\max}$ – максимальная нагрузка, (Н); h – толщина образца, (мм); b – ширина образца (мм).

Отличия в условиях испытания и в характерных размерах оснастки приведены в сравнительной таблице 2.4.

Таблица 2.5. Характерные виды разрушения при испытании на межслоевой сдвиг по методу изгиба короткой балки

№	Механизм разрушения	Схема разрушения	Пример	Приемлемость
1	Межслоевой сдвиг			+
2	Изгиб	 Сжатие Растяжение		-
3	Пластическое деформирование			-

Аналогично, как и в ASTM D 3039/3039M-08, так и в ASTM D 2344/D 2344M присутствуют описания характерных типов разрушения образцов и приемлемость результатов испытаний, которые представлены в таблице 2.5 с примерами.

2.3. Методики испытаний полунатурных образцов-панелей из волокнистых полимерных композиционных материалов

Волокнистые полимерные композиционные материалы создаются вместе с конструкциями, которые ввиду широкого разнообразия могут иметь габаритную крупноячеистую структуру [6, 83]. В таких случаях использование стандартных методов для определения механических характеристик композитов не всегда возможно, поэтому исследователи пользуются специально разработанными методиками.

В настоящем параграфе разработаны (совместно с ОАО «УНИИКМ» и НОЦ АКТ ПНИПУ) и предложены методики механических испытаний полунатурных образцов-панелей, которые являются элементами конструкций звукопоглощающего контура авиационного двигателя. 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. 2.5-2.7), 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.

Испытание на сдвиг реализуется в условиях одноосного растяжения с перекашиванием в шарнирной раме образца-панели с квадратным рабочим полем (рис.2.7). 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.

Предел прочности силовых оболочек при одноосном растяжении-сжатии $\sigma_{\sigma}^{*раст(сж)}$ (МПа) и при сдвиге τ_{σ}^{*} (МПа) рассчитываются по формулам (2.4)-(2.6), которые учитывают толщину заполнителя и перфорацию одной из силовых оболочек:

$$\sigma_B^{раст(сж)*} = \frac{P_{max}}{b \cdot h^*} \quad (2.4)$$

$$\tau_B^* = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{P_{max}}{a \cdot h^*} \quad (2.5)$$

$$h^* = h_1 + h_2 + h_3 - \frac{h_3}{l_p \cdot b} \left(n \frac{\pi \cdot d^2}{4} \right). \quad (2.6)$$

где P_{max} – разрушающая (максимальная) нагрузка при испытании образца, (Н); a, b – ширина рабочей зоны образца, (мм); h – расчетная толщина образца, (мм); h_1 – толщина силовой неперфорированной оболочки, (мм); h_2 – толщина заполнителя, (мм); h_3 – толщина силовой перфорированной оболочки, (мм); l_p – длина рабочей зоны образца, (мм); n – количество отверстий в рабочей зоне образца; d – диаметр отверстий, (мм).

Отработка методик проводилась на базе Центра экспериментальной механики ПНИПУ. По результатам испытаний проводится статистическая обработка данных. Схемы установки и эскизы оснастки для испытаний образцов-панелей при растяжении, сжатии и сдвиге представлены на рис. 2.5-2.7.

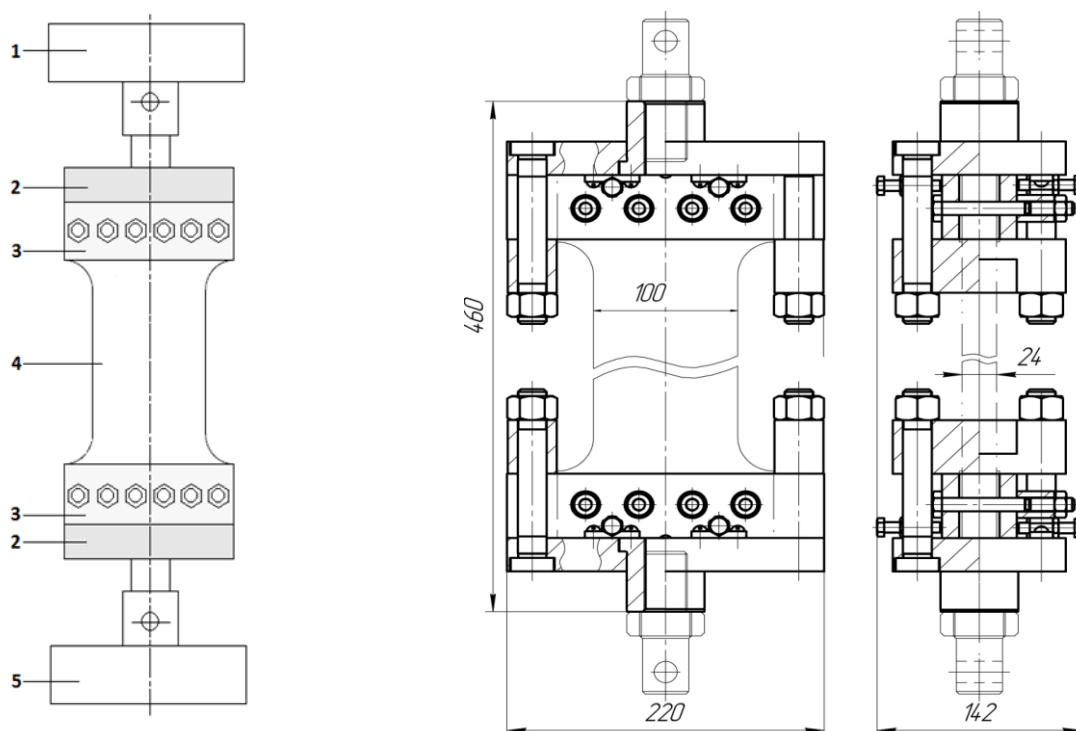


Рис. 2.5. Схема закрепления и эскиз оснастки для проведения испытаний образцов-панелей на растяжение (1 – подвижная траверса; 2 – захваты; 3 – стальные пластины-накладки; 4 – образец; 5 – неподвижная траверса)

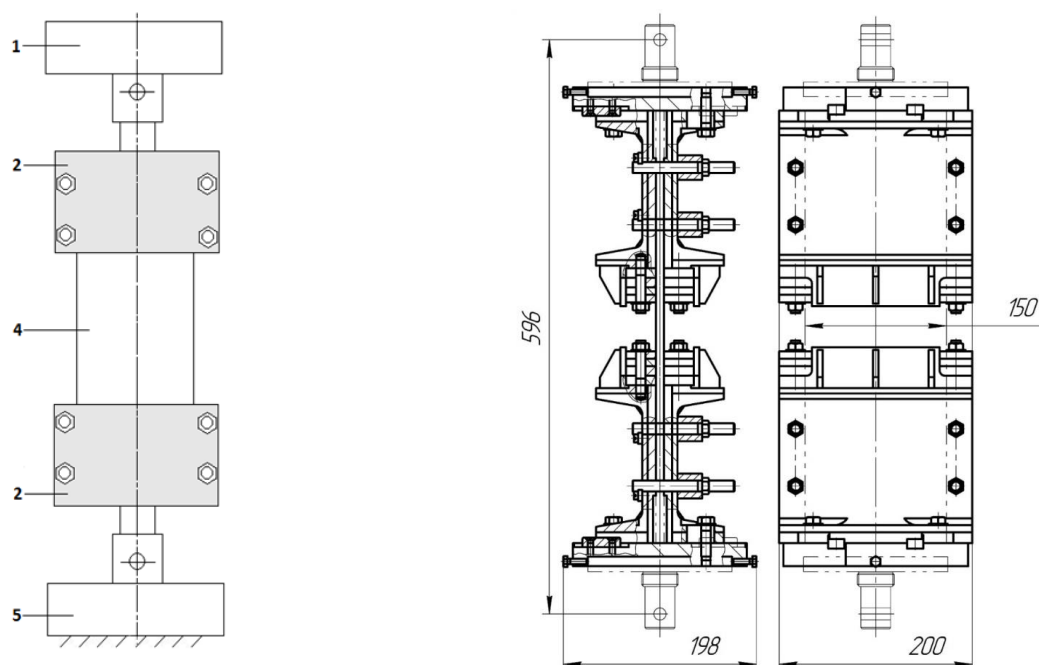


Рис. 2.6. Схема закрепления и эскиз оснастки для проведения испытаний образцов-панелей на сжатие (1 – подвижная траверса; 2 – захваты; 4 – образец; 5 – неподвижная траверса)

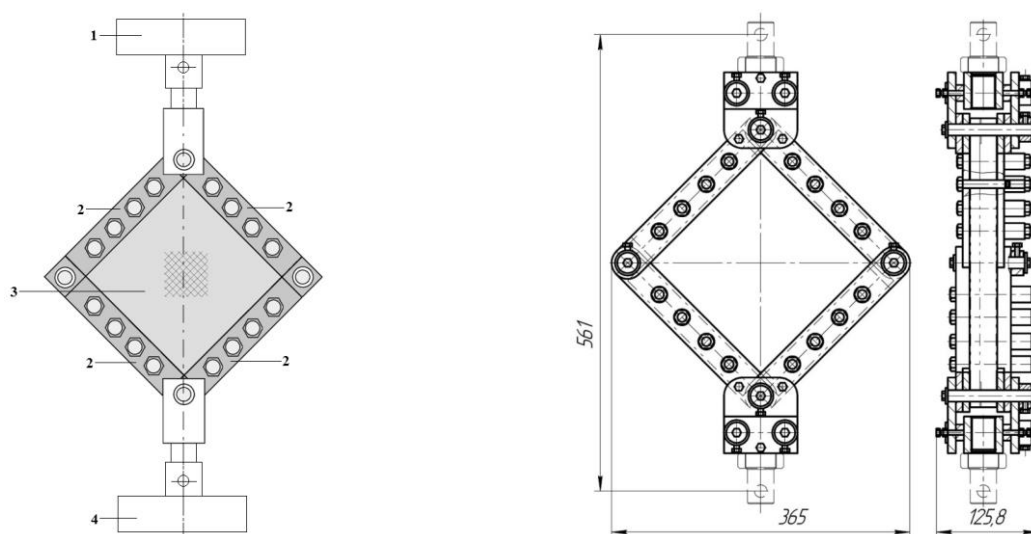


Рис. 2.7. Схема закрепления и эскиз оснастки для проведения испытаний образцов-панелей на сдвиг (1 – подвижная траверса; 2 – захваты (шарнирная рама); 3 – образец; 4 – неподвижная траверса)

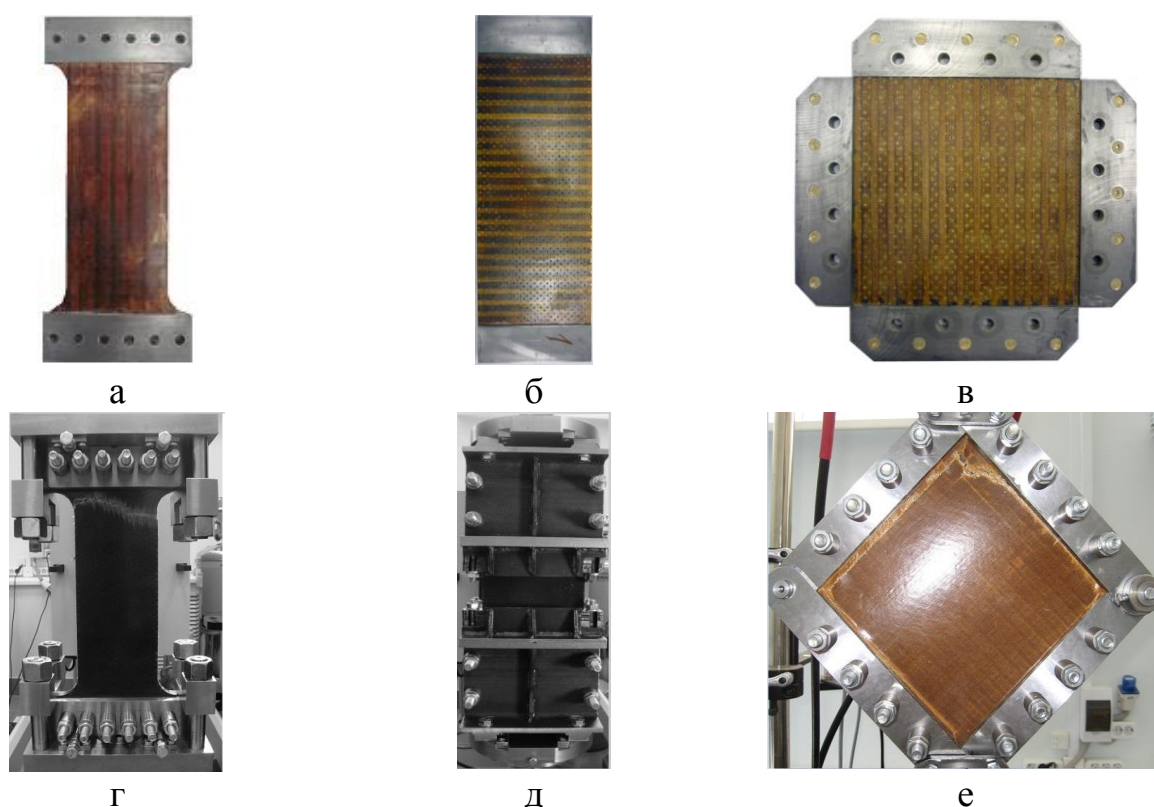


Рис. 2.8. Внешний вид образцов-панелей для статических испытаний на одноосное растяжение (а), сжатие (б) и сдвиг (в); образцы-панели, закрепленные в оснастке во время испытаний на растяжение (г), сжатие (д) и сдвиг (е)

На рисунке 2.8 представлен внешний вид образцов-панелей для испытаний на растяжение, сжатие и сдвиг. На образцы были наклеены пластины-накладки из конструкционной стали. Для образцов-панелей в накладках были выполнены отверстия (за исключением образцов для сжатия) под крепеж. Полости внутри образцов под накладками во избежание локального смятия заполнялись полимерным наполнителем [49].

Выводы по главе 2

1. Проведено сравнение и анализ основных отечественных и зарубежных стандартных методов статических испытаний полимерных волокнистых композиционных материалов.
2. Предложены методические рекомендации и специальные захватные приспособления для проведения механических испытаний однонаправленных полимерных волокнистых композиционных материалов и композиционной арматуры на одноосное растяжение при нормальных, повышенных и пониженных температурах.
3. Предложены методики проведения механических испытаний на растяжение, сжатие и сдвиг для крупногабаритных полунатурных образцов-панелей из полимерных волокнистых композитов при нормальной и повышенной температуре.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИОННЫХ ВОЛОКНИСТЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ ПРИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

В 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. Представлены результаты экспериментального исследования влияния добавления в связующее углеродных нанотрубок на механические свойства стеклотекстолитов.

Результаты исследований, представленные в главе отражены следующих публикациях автора [12-14, 26, 27, 30, 70-75, 139, 154, 170, 172].

3.1. Исследования механических свойств полимерных волокнистых композиционных материалов при квазистатических испытаниях на растяжение, трехточечный изгиб

3.1.1. Испытания на растяжение углепластиков

Экспериментальное исследование механических характеристик при испытании на растяжение в условиях нормальных и повышенных температур проведено на образцах углепластика. За основу методики испытаний для экспериментального исследования механических свойств углепластика использовался ГОСТ 25.601-80.

Испытания углепластика на растяжение проводились на образцах в виде лопатки. Эскиз образца из углепластика представлен на рисунке 3.1.

Испытания проводились с использованием шлифовальной шкурки в качестве прокладки между захватной частью образца и клиновыми захватами испытательной машины, что позволяет уйти от проскальзывания образца в

захватах. Скорость перемещения подвижного захвата 5 мм/мин. Внешний вид образцов углепластика представлен на рисунке 3.2. Деформации измерялись непосредственно на образце при помощи бесконтактного видеоэкстензометра, что обеспечивает отсутствие дополнительных внешних воздействий на поверхности образца.

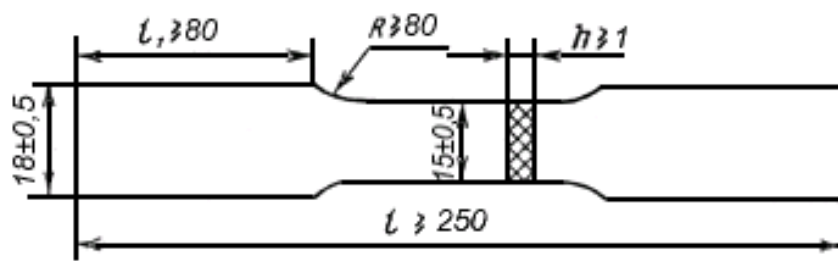


Рис.3.1. Эскиз образца в виде двусторонней лопатки для испытаний на одноосное растяжение с размерами, выполненными по ГОСТ 25.601-80



Рис. 3.2. Образцы углепластика в виде лопаток для испытаний на одноосное растяжение.

Образец углепластика на растяжение, установленный в захватах испытательной системы, с метками для видеоэкстензометра представлен на рисунке 3.3 а. Испытания при повышенной температуре 150° С проводились с использованием термокамеры (рис. 3.3 б), при этом образец выдерживался при заданной температуре исходя из требований ГОСТ – 20 мин. на 1 мм толщины.

Испытания проводились непосредственно при заданной температуре внутри термокамеры. На рисунке 3.4 представлена типовая диаграмма деформирования образцов углепластика при испытаниях на растяжение в условиях нормальных (22°C) и повышенных (150°C) температур. Результаты испытаний приведены в таблице 3.1.

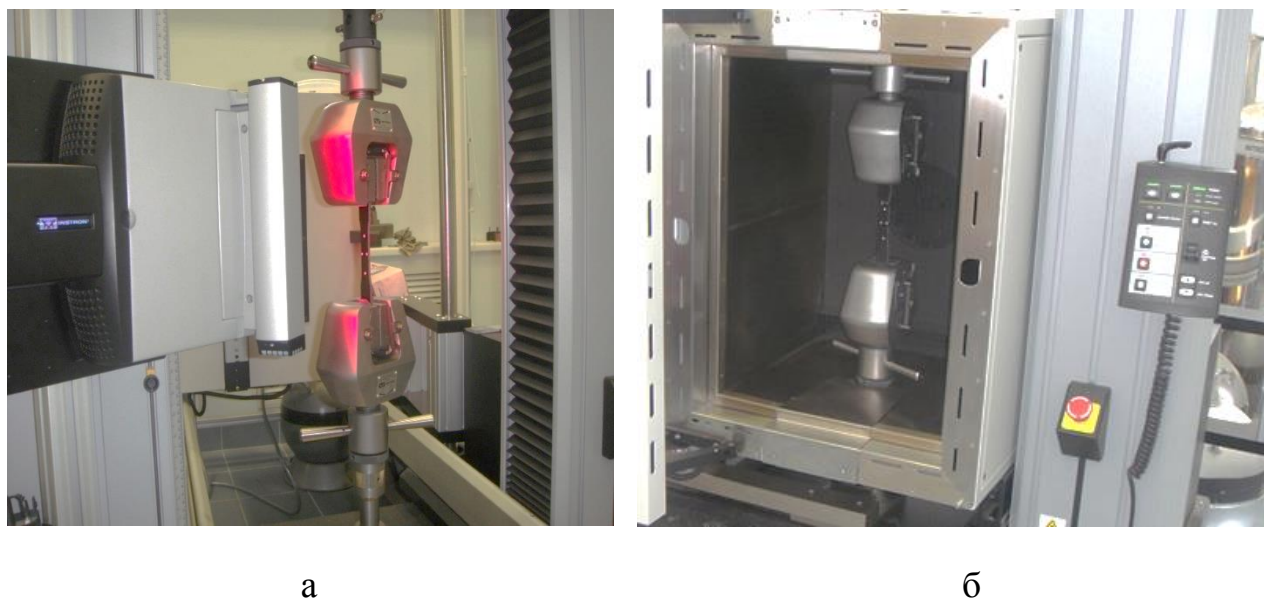


Рис. 3.3. Образец углепластика в захватах испытательной системы при нормальной (а) и повышенной (б) температуре

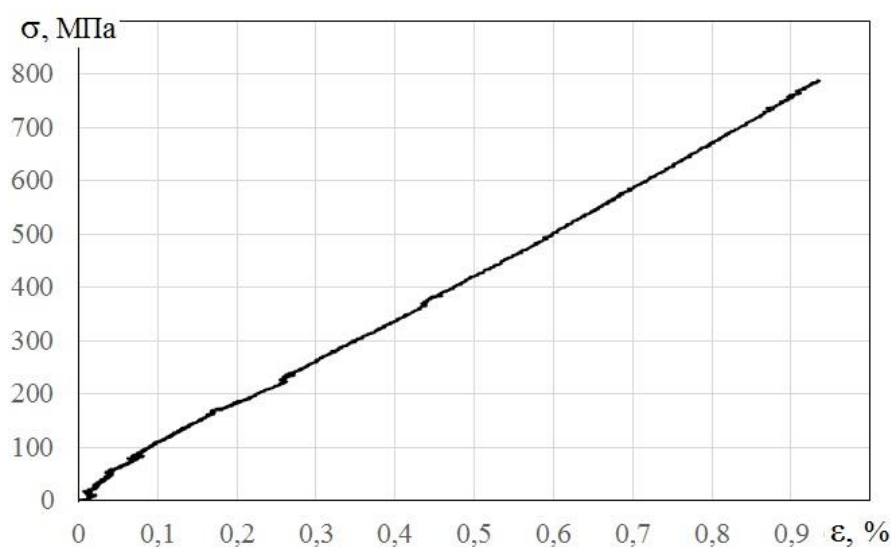


Рис. 3.4. Характерный вид диаграммы деформирования из испытаний на одноосное растяжение образца углепластика

Таблица 3.1. Результаты испытаний на растяжение образцов из углепластика при нормальной (22° С) и повышенной (150° С) температурах

темп. режим - № образца	Максимальная нагрузка при разрыве P_{max} , кН	Предел прочности при разрыве σ_B , МПа	Модуль упругости при растяжении E , ГПа
1-p1	46,944	727,817	81,421
1-p2	49,602	783,063	84,834
1-p3	50,068	788,579	83,105
2-p1	39,467	616,002	83,039
2-p2	36,260	562,181	77,276
2-p3	40,886	638,141	81,089

1 – температура испытания 22° С; 2 – температура испытания 150° С.

Разрушение при одноосном растяжении происходило в рабочей части образцов по механизму отрыва и в соответствии с классификацией ASTM D 3039 имеют шифры LGM и LWT, на рисунке 3.5 представлены поверхности разрушения. Статистическая обработка по трем образцам не проводилась.

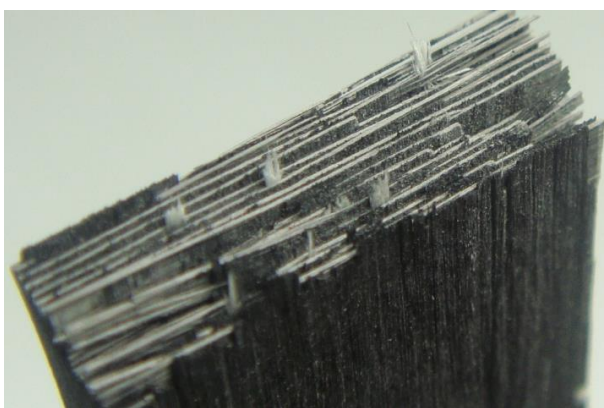


Рис. 3.5. Поверхность разрушения образцов углепластика при испытании на одноосное растяжение

3.1.2. Испытания на одноосное растяжение однонаправленных композитов

Экспериментальные исследования механических свойств проводились для однонаправленного стеклопластика Direct "E" Roving 0,7- ortophthalic polyester

resin 0,3. Особенностью данного материала (производства Италии) является повышенное (70%) содержание в композиции армирующего компонента (стеклянные высокомодульные волокна Direct "E").

Увеличение объемной доли волокна приводит к увеличению прочности материала вдоль направления армирования и к уменьшению прочности в поперечном направлении. Также особенностью объекта исследования является существование материала в виде первичного элемента конструкции – однонаправленной ленты поперечным размером 40×5 мм с периферийной обсыпкой кварцевым песком. Перечисленные обстоятельства приводят к определенным ограничениям использования для испытаний данного материала стандартных подходов и методов. Испытания однонаправленного стеклопластика проводились по методике, рассмотренной в п. 2.2.1. Образцы были изготовлены в виде стержней постоянного сечения, которые были вклеены в стальные гильзы [12-14].

На рисунке 3.6 представлен образец однонаправленного стеклопластика, с нанесенными метками для использования бесконтактного экстензометра Instron AVE, вклеенный в специальные захватные части. Необходимость применения видеоэкстензометра Instron AVE или иного бесконтактного экстензометра обусловлена характером разрушения образцов данного материала, т.е. расщеплением в результате разрушения матрицы.



Рис. 3.6. Внешний вид образца высоконаполненного стеклопластика для проведения испытаний на одноосное растяжение с нанесенными метками для возможности использования бесконтактного экстензометра Instron AVE

На рисунке 3.7 показан типичный график зависимости напряжения от осевой деформации при испытании стеклопластикового образца на растяжение при нормальной температуре.

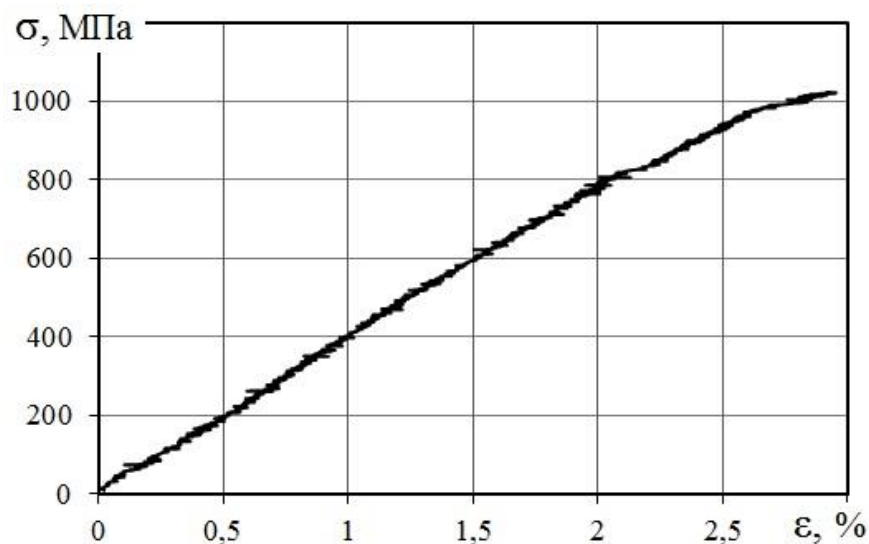


Рис. 3.7. Типовая диаграмма деформирования однонаправленного стеклопластика при растяжении

В ходе испытаний были определены модуль упругости и предел прочности однонаправленного стеклопластика. Результаты испытаний на растяжение образцов при нормальной температуре представлены в таблице 3.2. Статистическая обработка проводилась по методу Стьюдента с доверительной вероятностью 0,95, по формулам (3.1) – (3.3) [36].

$$\langle x \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i; \quad (3.1)$$

$$s_{\langle x \rangle} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \langle x \rangle)^2}; \quad (3.2)$$

$$\nu = \frac{s}{\langle x \rangle}. \quad (3.3)$$

где x_i – полученные значения; $\langle x \rangle$ – среднее значение; n – количество испытаний; s – среднее квадратическое отклонение; v – коэффициент вариации.

Первичное разрушение образцов сопровождалось характерными щелчками и происходило при выпрямлении и отслоении перерезанных волокон. Далее разрушение происходило прорастанием относительно длинных трещин, в направлении приложения нагрузки, возникающим вследствие сдвига и расслоения в результате частичного разрушения армирующих волокон и полного разрушения матрицы, что согласно классификации типов разрушений, приведенных в ASTM D 3039/3039M соответствует разрушению XGM. Из испытанных образцов 50% разрушались в рабочей части и считались зачетными по определению предела прочности.

Таблица 3.2. Результаты испытаний однонаправленного стеклопластика при растяжении в условиях нормальных температур

№ образца	Модуль упругости при растяжении E , ГПа	Предел прочности при разрыве σ_B , МПа	Предел прочности при разрыве σ_B с доверительной вероятностью 0,95, МПа	Модуль упругости при растяжении E с доверительной вероятностью 0,95, ГПа
1	40,7	-	1095±84	47,4±2,7
2	42,4	700*		
3	46,0	-		
4	53,0	-		
5	44,0	952		
6	50,0	-		
7	49,0	1165		
8	48,1	1170		
9	48,4	-		
10	47,8	1100		
11	47,6	1065		
12	51,5	1118		

* – значение не учитывалось при обработке

Остальные 50% образцов разрушались в захватной части из-за потери прочностных свойств клеящего слоя, находящегося между образцом и стальной гильзой, и классифицируемого как разрушение GAT. При испытаниях в условиях повышенных и пониженных температур конструкция захватной части образца требовало доработки.

Для проведения испытаний однонаправленного стеклопластика при пониженных температурах были изготовлены захватные части, эскиз которых представлен на рисунке 2.3. Внешний вид образца показан на рисунке 3.8. Было испытано 8 образцов однонаправленного стеклопластика Direct "E" Roving 0,7-orthophthalic polyester resin 0,3 при пониженных температурах: 4 образца при температуре -30°C , 4 образца при 0°C [14, 69, 154].

Диаграммы деформирования однонаправленного стеклопластика, полученные из испытаний на растяжение при -30°C и 0°C имеют типовой вид, аналогично диаграммам, которые были получены при испытаниях в условиях нормальных температур (рис. 3.7).



Рис. 3.8. Образец однонаправленного стеклопластика, вклеенный в специальные захватные гильзы, для испытаний при пониженных температурах

Результаты испытаний однонаправленного стеклопластика на растяжение при пониженных температурах приведены в таблице 3.3. Все испытываемые образцы разрушились (рис. 3.9) в рабочей зоне, по механизму XGM – аналогично

разрушению при нормальных температурах. Такой вид разрушения происходит от отслоения волокон и полного разрушения матрицы.

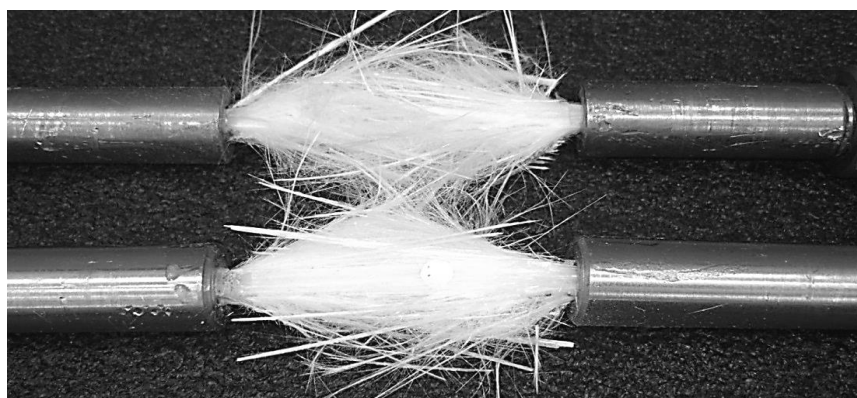


Рис. 3.9. Вид разрушенных образцов однонаправленного стеклопластика после испытания на одноосное растяжение при пониженных температурах

Таблица 3.3. Результаты испытаний однонаправленного стеклопластика на растяжение при пониженных температурах

темпер. режим - № образца	Макси- мальная нагрузка при разрыве P_{max} , кН	Предел прочности при разрыве σ_B , МПа	Модуль упругости при растяжении E , ГПа	Предел прочности при разрыве σ_B с доверительной вероятностью 0,95, МПа	Модуль упругости при растяжении E с доверительной вероятностью 0,95, ГПа
1-p1	24,9	696*	35,8	997,5±73,4	36,2±2,2
1-p2	30,3	1144	40,1		
1-p3	31,4	917	32,6		
1-p4	22,3	930	28,1*		
2-p1	36,1	1021	39,3	980,2±21,6	36,8±2,4
2-p2	33,9	959	35,5		
2-p3	24,0	1010	41,7		
2-p4	29,9	929	30,8		

* – значение не учитывалось при обработке

1 – температура испытания -30° С; 2 – температура испытания 0° С

В результате пробных испытаний при повышенной температуре 50°С разрушение стеклопластиковых образцов со специальной захватной частью происходило при напряжении ниже предела прочности в захватной гильзе. По

диаграммам, полученным в результате испытаний, был определен модуль упругости.

С целью обеспечения разрушения образца в рабочей зоне при достижении предела прочности однонаправленного стеклопластика часть образцов были подвергнуты дополнительной механической обработке для уменьшения размеров поперечного сечения до размеров 5х3 мм. При испытании с рабочей температурой 40° С механически доработанный образец разрушился при достижении предела прочности. Результаты испытаний на растяжение образцов однонаправленного стеклопластика при повышенных температурах представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4. Результаты пробных испытаний однонаправленного стеклопластика на одноосное растяжение при повышенных температурах

темп. режим - № образца	Максимальная нагрузка при разрыве P_{max} , Н	Предел прочности при разрыве σ_B , МПа	Модуль упругости при растяжении E , ГПа
1-p1	4519	-	35,5
1-p2	4942	-	34,0
2-p1	7304	690	37,8

1 – температура испытания 50° С; 2 – температура испытания 40° С

Таким образом, всего было испытано 23 образца однонаправленного высоконаполненного стеклопластика Direct "E" Roving 0,7- ortophthalic polyester resin 0,3 на одноосное растяжение вдоль направления армирования: 12 образцов испытано при нормальной температуре (22° С); 2 образца при температуре 50° С; один образец испытан при температуре 40° С; 4 образца при температуре -30° С и 4 образца при температуре 0° С. Для образцов, испытанных при нормальных и пониженных температурах, определены модуль упругости и предел прочности.

Испытания показали, что методика проведения испытаний однонаправленных высоконаполненных волокнистых композитов при использовании специальных (нестандартных) захватных частей и конструкции

образца дает приемлемый результат в условиях комнатных (нормальных) и пониженных температур, при испытаниях в условиях повышенных температур конструкция захватной части образца требует дальнейшей доработки.

Экспериментальные исследования механических свойств однонаправленных композитов также проводились на образцах базальтопластика, однако вместо клеиваемых стальных гильз использовались латунные полувтулки. Исследования проводились в рамках НИР по темам «Изучение механических свойств композитного сердечника на основе базальтового волокна» и «Исследование поведения базальтового стержня при термомеханических воздействиях имитирующих эксплуатационные условия» совместно с ОАО «Кирскабель». Программа испытания (таблица 3.5) включала в себя испытания стержней однонаправленного базальтопластика при нормальных и повышенных температурах, а также в режиме имитации температурных перепадов (термоциклирование) в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным. Испытания проводились по методике, приведенной в п.2.2 и с использованием оборудования представленным в п.2.1.

Таблица 3.5. Программа испытаний базальтопластиков

№/п	Вид испытания	Кол-во образцов	Температура, °С	Примечание
1	Одноосное растяжение	5+3*7	23,50,70,80,90,100,110, 120	
2	Термоциклирование	3	от -60 до +120	при нагрузке равной 30% от σ_B

Образец закреплялся в разъемных полувтулках, длина втулок составляла 65 мм. Диаметр внешней части - 12,5 мм, внутренней - 6,5 мм. Между втулками и образцом прокладывалась алюминиевая фольга толщиной 10 мкм. Расстояние между захватами составляло 100 мм. На образец по центру наклеивались круглые метки на расстоянии 80 мм для регистрации деформации при помощи

видеоэкстензометра. Скорость перемещения траверсы испытательной машины составляла 5 мм/мин. В ходе испытания фиксировались деформация и нагрузка.

Образец базальтопластика установленный в захватах испытательной системы представлен на рисунке 3.10. Диаграммы деформирования, полученные в ходе испытаний для образцов базальтопластика представлены на рисунке 3.11.



Рис. 3.10. Образец базальтопластика в захватах испытательной системы Instron5882 во время испытания на растяжение

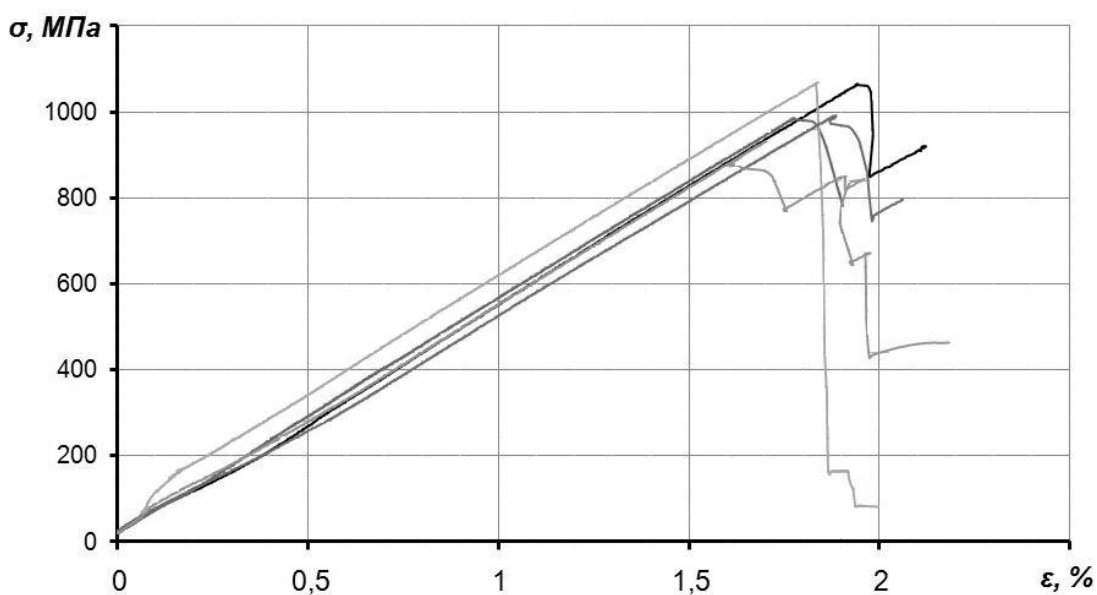


Рис. 3.11. Диаграммы деформирования для образцов базальтопластика при растяжении

Результаты испытаний представлены в таблице 3.6. Образец после разрушения представлен на рисунке 3.12. Разрушение происходило в рабочей зоне образцов в следствии разрушения матрицы и расслоения волокон. Испытания при повышенных температурах (50°, 70°, 80°, 90°, 100°, 110°, 120° С) проводились с использованием термокамеры по аналогичной методике. Диаграммы испытаний базальтопластика при повышенной температуре имеют характерный вид, аналогичный диаграммам испытаний при нормальной температуре (рис.3.11). Результаты испытаний при повышенных сведены в общую таблицу 3.7.



Рисунок 3.12. Вид разрушенного образца базальтопластика после испытания на растяжение

Таблица 3.6. Результаты испытания на растяжение образцов базальтопластика при нормальной температуре

№/п.	Диаметр образца, мм	Модуль упругости, ГПа	Разрушающая нагрузка, кН	Предел прочности, МПа	Предельная деформация при растяжении, %
1	6,1	55	31,1	1064	1,95
2		55	28,8	984	1,80
3		55	31,2	1067	1,90
4		55	28,9	989	1,90
5		55	27,2	932	1,80

Снижение прочности для некоторых образцов при испытаниях в условиях повышенных температур объясняется охрупчиванием матрицы и, как следствие, потерей прочностных свойств образца в поперечном направлении. В результате

происходит преждевременное разрушение в захватах испытательной машины от раздавливания.

Таблица 3.7. Результаты испытания на растяжение образцов базальтопластика при повышенной температуре

Темп., °С	№ образ.	Максимальная нагрузка при разрушении, кН	Предел прочности, МПа	Предельная деформация при растяжении, %	Модуль упругости, ГПа
50	1	28,9	988	1,7	56
	2	30,3	1037	1,9	57
	3	28,5	974	1,7	55
70	1	28,0	960	1,8	53
	2	32,3	1105	2,1	53
	3	28,0	957	1,7	56
80	1	23,8	816	1,6	52
	2	22,6	772	1,4	53
	3*	20,2	690	1,2	54
90	1	22,2	761	1,5	52
	2	20,5	702	1,3	53
	3*	19,1	654	1,2	52
100	1	27,7	950	2,5	52
	2	24,6	840	2,2	52
	3*	19,6	670	1,3	53
110	1*	18,9	646	1,2	53
	2*	19,2	659	1,4	49
	3*	19,8	677	1,3	52
120	1*	18,2	623	1,2	54
	2	26,6	909	1,8	53
	3	26,8	917	1,8	54

* - разрушение образцов в захватной части

На втором этапе на образцах наносятся метки при помощи высокотемпературной краски на базе 100 мм. Имитация температурных перепадов осуществлялась при помощи температурной камеры. Образцы нагружались в продольном направлении и удерживались с усилием в 11 кН, т.е. примерно соответствующем 35% от значений максимальной нагрузки, полученной при испытаниях базальтопластика в условиях нормальных температур. Далее при помощи термокамеры реализовывался температурный

режим, который включал в себя нагрев со скоростью 10°C в минуту до 120°C и охлаждение с такой же скоростью до -60°C , и так десять полных циклов. Достижение отрицательных температур обеспечивалось при помощи жидкого азота. Деформирование образца в термокамере под воздействием температуры контролировалось по бесконтактному видеоэкстензометру AVE.

Характерный вид диаграммы деформирования при термоциклировании образца представлен на рисунке 3.13. Для каждого цикла максимальное значение деформации соответствует значению температуры $+120^{\circ}\text{C}$, а минимальное - 60°C .

После термоциклирования производилась термостабилизация образца в условиях нормальных температур, после чего без освобождения от захватов образец испытывался на растяжение при температуре 22°C . Диаграммы испытания образцов представлены на рисунке 3.15. Численные значения представлены в таблице 3.8.

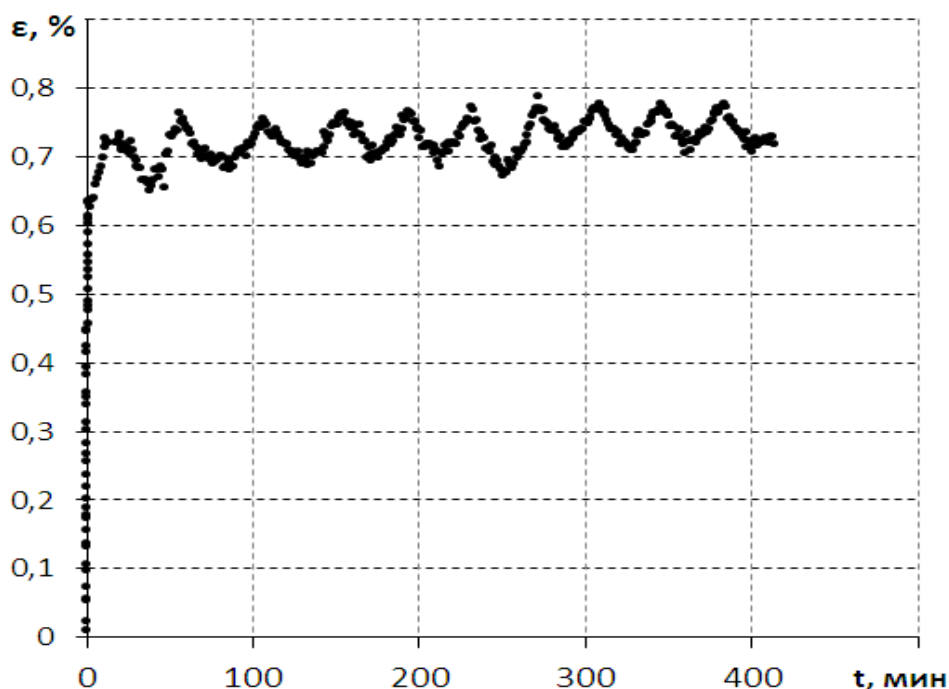


Рис. 3.13. Термоциклирование базальтового сердечника при нагрузке 11 кН

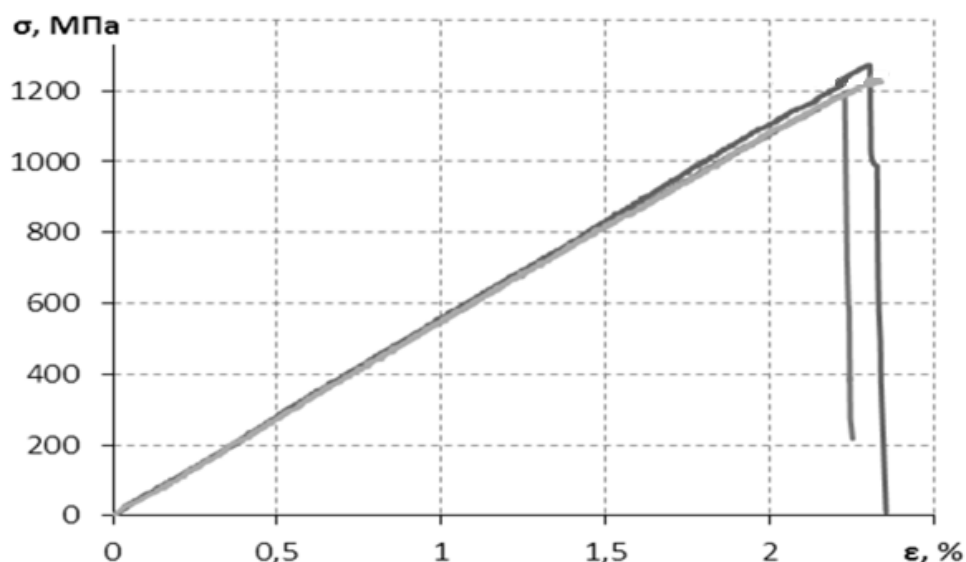


Рис. 3.14. Диаграмма деформирования образцов базальтопластика после термоциклирования

Сравнение полученных значений с результатами испытаний без термоциклирования (табл. 3.6) позволяет сделать заключение об отсутствии влияния на значение максимальной нагрузки и на другие механические характеристики процесса кратковременного термоциклирования.

Таблица 3.8. Результаты испытаний на растяжение образцов базальтопластика после термоциклирования

№ образца	Измерительная база экстензометра, мм	Макс. нагрузка при разрушении, кН	Макс. напряжение, МПа	Предельная деформация при растяжении, %	Модуль упругости, ГПа
1	66,00	35,02	1198	2,25	54
2	65,34	37,21	1273	2,31	55
3	67,98	36,47	1248	2,35	54

При анализе результатов испытаний отмечалось повышение максимального напряжения (нагрузки) при разрушении, которое можно объяснить адаптацией (более равномерное обжатие) образца в захватных полувтулках в процессе термоциклирования. Среднее значение максимальной нагрузки для одного и того же типа образцов возросло с 29,45 кН до 36,23 кН.

3.1.3. Испытания на трехточечный изгиб углепластика

Альтернативным методом определения механических свойств композитов, которым активно пользуются исследователи является метод испытания на трехточечный изгиб.

Испытания на трехточечный изгиб были выполнены на образцах углепластика той же марки, который был в испытаниях на одноосное растяжение п.п. 3.1.1. За основу методики испытаний использовался ГОСТ 25.604-82. Расстояние между опорами выбиралось исходя из соотношения $l=40h$, что соответствует рекомендациям ГОСТ на данное испытание. Испытания проводились на образцах в виде полос с прямоугольным поперечным сечением $10,0 \times 4,5$ мм при температурах 22°C и 150°C .

Значение прогиба измерялось при помощи бесконтактного видеоэкстензометра, для этого на край индентора была нанесена метка, вторая метка наносилась на неподвижную часть оснастки (рис. 3.15).



Рис. 3.15. Разрушенный в ходе испытания на трехточечный изгиб образец углепластика

В испытаниях при нормальной температуре определен модуль упругости материала и предел прочности при трехточечном изгибе. Результаты проведения

испытаний на трехточечный изгиб образцов углепластика приведены в таблице 3.9.

Таблица 3.9. Результаты испытаний углепластика на трехточечный изгиб при нормальной температуре (22°C)

Темп. режим - № образца	Максимальная нагрузка P_{max} , Н	Предел прочности σ_B , МПа	Модуль упругости E , ГПа
1-и1	697	901	62,3
1-и2	837	1091	66,1
1-и3	721	941	66,3

Механизм разрушения образцов идентичен, разрушение произошло от растяжения нижних слоев с последующим разрывом и отслоением (рисунок 3.15). График зависимости прогиба от нагрузки представлен на рисунке 3.16.

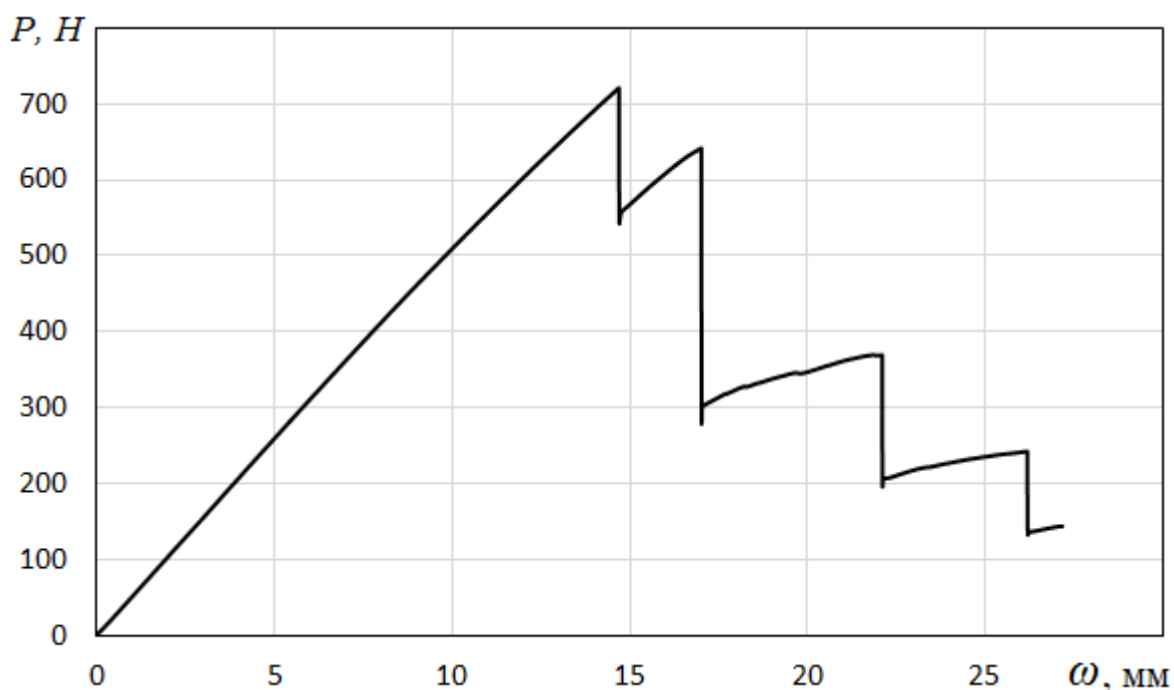


Рис. 3.16. Типовой график зависимости прогиба от нагрузки при испытании образца углепластика на трехточечный изгиб

Также для сравнения механических свойств и построения температурных зависимостей проводились испытания аналогичных образцов углепластика при повышенной температуре 150° С. На рисунке 3.17 показан образец углепластика внутри температурной камеры после проведения испытания.

Диаграммы нагружения при испытании на трехточечный изгиб при повышенной температуре 150° С, идентичны графикам при нормальной температуре. Результаты испытаний приведены в таблице 3.10.

Таблица 3.10. Результаты испытаний углепластика на трехточечный изгиб при повышенной температуре (150° С)

Темп. режим - № образца	Максимальная нагрузка P_{max} , Н	Предел прочности σ_B , МПа	Модуль упругости E , ГПа
2-и1	482	629	63,5
2-и2	500	650	65,4
2-и3	475	617	63,6

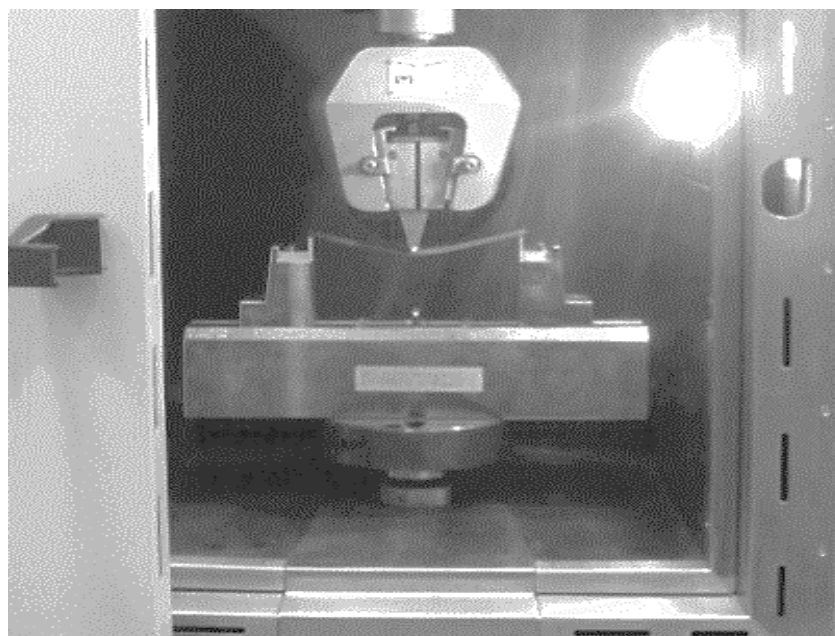


Рис. 3.17. Образец углепластика, установленный внутри температурной камеры для испытания на трех точечный изгиб при температуре 150° С

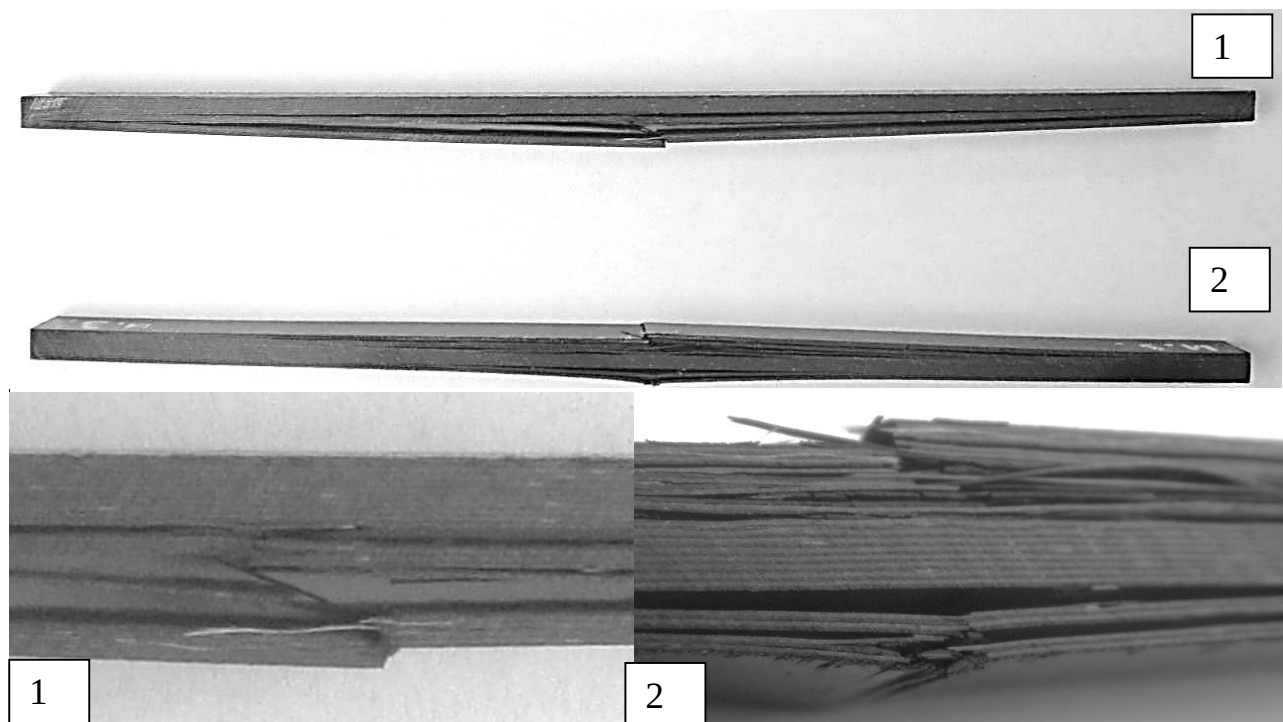


Рис. 3.18. Виды разрушения образцов углепластика: 1 – при нормальной температуре (22°C); 2 – при повышенной температуре (150°C)

Разрушение образцов при испытаниях в условиях повышенной температуры 150°C происходило по механизму отличному от аналогичных испытаний в условиях нормальной температуры 22°C . Индентер, через который к образцу прикладывается нагрузка, перерезал верхний слой образца, в результате происходило вспучивание и отслоение верхнего слоя. Это явление встречается в литературе под термином «баклинг». На рисунке 3.18 показаны виды разрушений образцов углепластика при нормальной и повышенной температурах.

3.2. Влияние повышенных и пониженных температур на механические свойства композитов

В настоящем параграфе показана возможность построения температурных зависимостей механических характеристик полимерных волокнистых

композиционных материалов; рассмотрено изменение механизмов разрушения при термомеханическом воздействии [18, 19, 43, 65, 105, 106, 146].

Прочностные характеристики являются ключевыми в проектировании, конструировании и производстве изделий и конструкций из полимерных волокнистых композиционных материалов. Поэтому важно знать особенности изменения прочностных характеристик в условиях воздействия повышенных и пониженных температур.

На основе данных испытаний, показанных в параграфе 3.1, можно провести оценку влияния температуры на упругие характеристики полимерных волокнистых композиционных материалов. В настоящем параграфе будет выявлено влияние температуры на модуль упругости и предел прочности углепластика и однонаправленного стекло- и базальтопластиков при испытаниях на одноосное растяжение, а также углепластика при испытании на трехточечный изгиб.

Данные о влиянии температуры на значения модуля упругости и предела прочности углепластика при испытании на растяжение и трехточечный изгиб показаны на диаграммах (рис. 3.19), при этом горизонтальными рисками отмечены максимальные и минимальные значения.

Приведенные данные показывают, что повышенная температура (150°C), 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°C среднее значение предела прочности при растяжении снижается на 15%, а при изгибе – на 30% по сравнению со средними значениями, полученными при нормальной температуре. Такие потери, безусловно, должны учитываться при проектировании изделий и конструкций из данного материала.

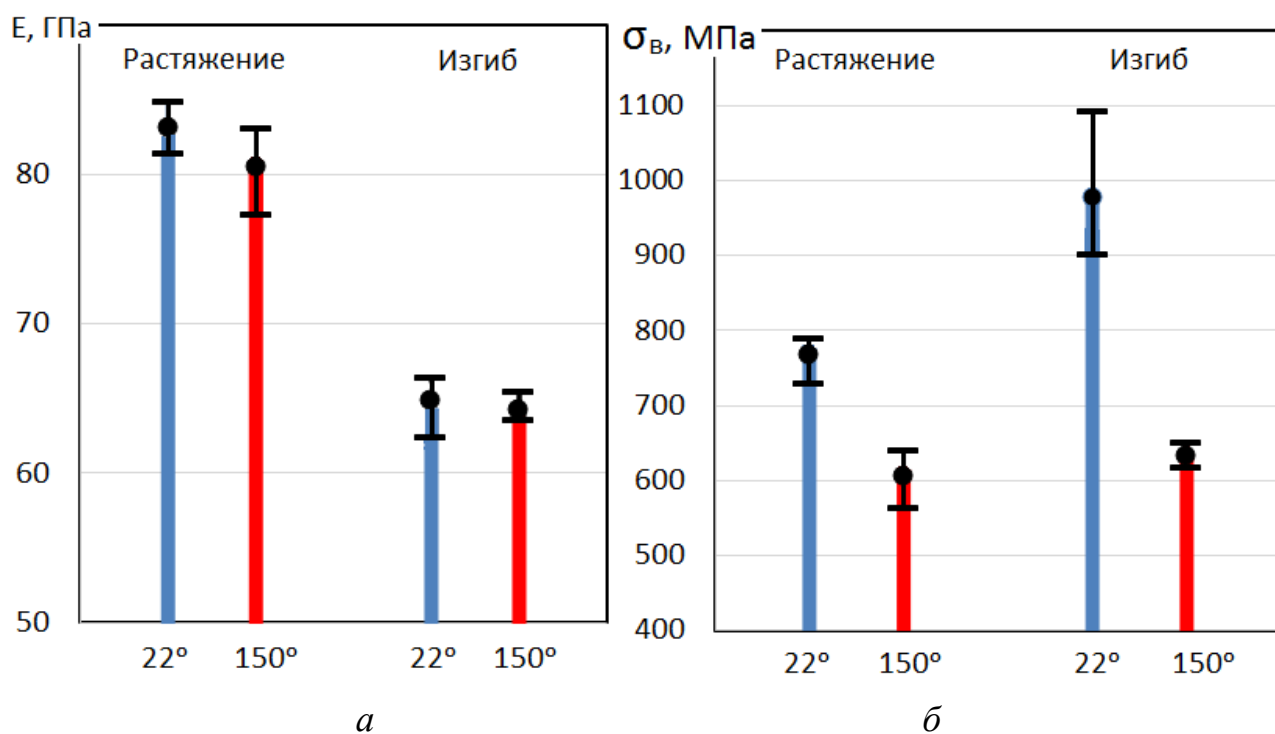
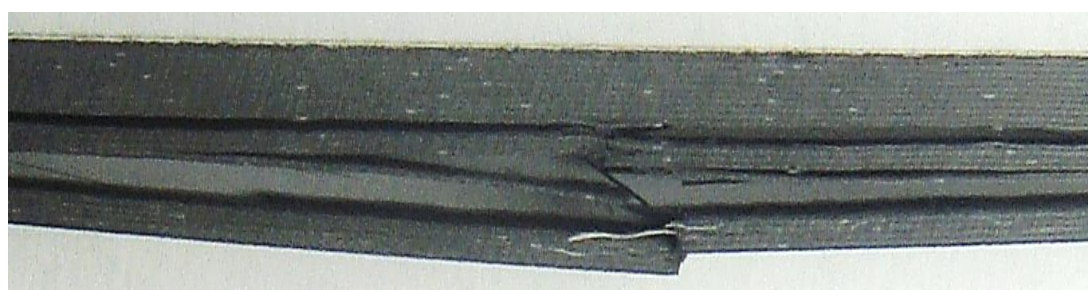
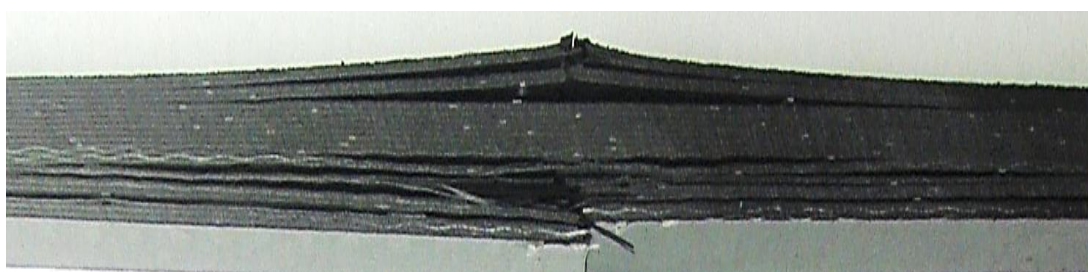


Рис. 3.19. Диаграммы разброса значений модуля упругости (а) и предела прочности (б) углепластика при растяжении и трехточечном изгибе в зависимости от температуры



а



б

Рис. 3.20. Характер разрушения углепластика при испытании на трехточечный изгиб в условиях нормальной (а) и повышенной 150° С (б) температур

В ходе проведения 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°C) температуре. На рисунке 3.20 показаны характерные виды разрушений при испытании на трехточечный изгиб [29, 82, 121, 123-126].

При температуре испытания 22°C образец углепластика разрушается от растяжения нижних слоев (рисунок 3.20, а) с последующим отслоением разрушенных слоев.

При температуре испытания 150°C первичное разрушение происходит от нормальных напряжений в виду сжатия верхних слоев (рисунок 3.20, 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°C , отслоение происходит от касательных напряжений. Далее происходит разрушение от нормальных напряжений, возникающих при растяжении нижних слоев (как в испытаниях при нормальной температуре).

Данные о влиянии температуры на изменения модуля упругости и предела прочности однонаправленного стеклопластика Direct "E" Roving 0,7- ortophthalic polyester resin 0,3 при испытаниях на растяжение показаны на рисунках 3.21. и 3.22.

Для стеклопластика выявлено немонотонное снижение модуля упругости при пониженных и повышенных температурах относительно испытаний при нормальных температурах. Четкого влияния на предел прочности температур не выявлено ввиду высокого статистического разброса полученных значений.

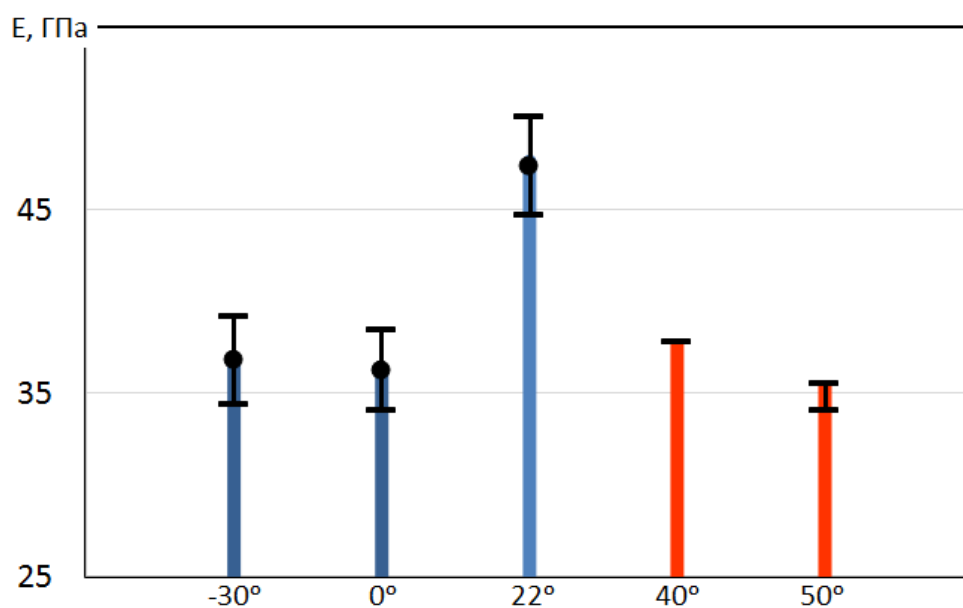


Рис. 3.21. Диаграммы разброса средних значений модуля упругости однонаправленного стеклопластика при различных температурах

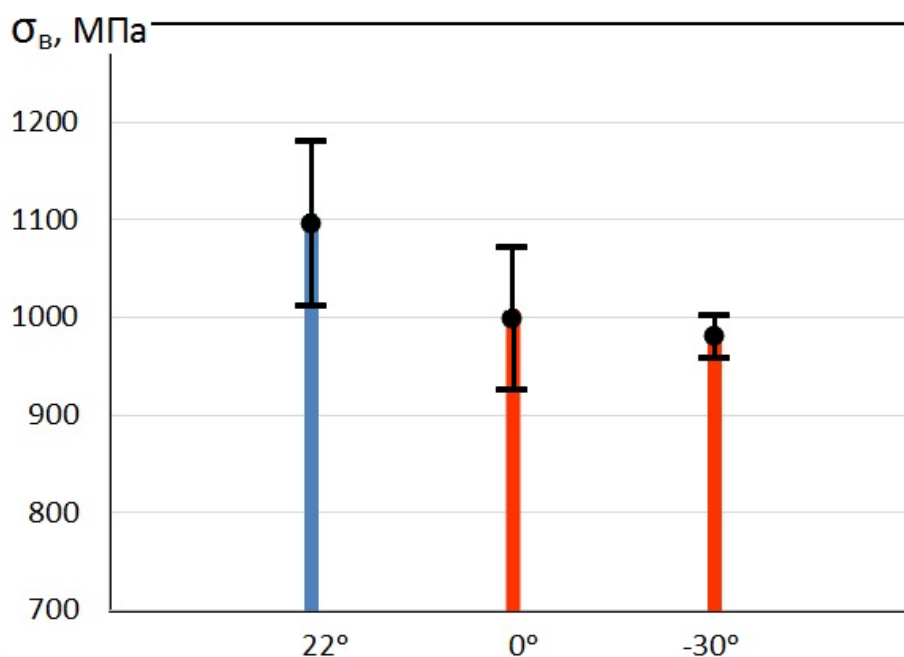


Рис. 3.22. Диаграммы разброса средних значений предела прочности однонаправленного стеклопластика при различных температурах

На основе полученных результатов испытаний для образцов базальтопластика при нормальных и повышенных температурах построены диаграммы зависимости средних значений с учетом разброса для предела

прочности, модуля упругости и предельной деформации при растяжении от температуры (рисунки 3.23-3.25).

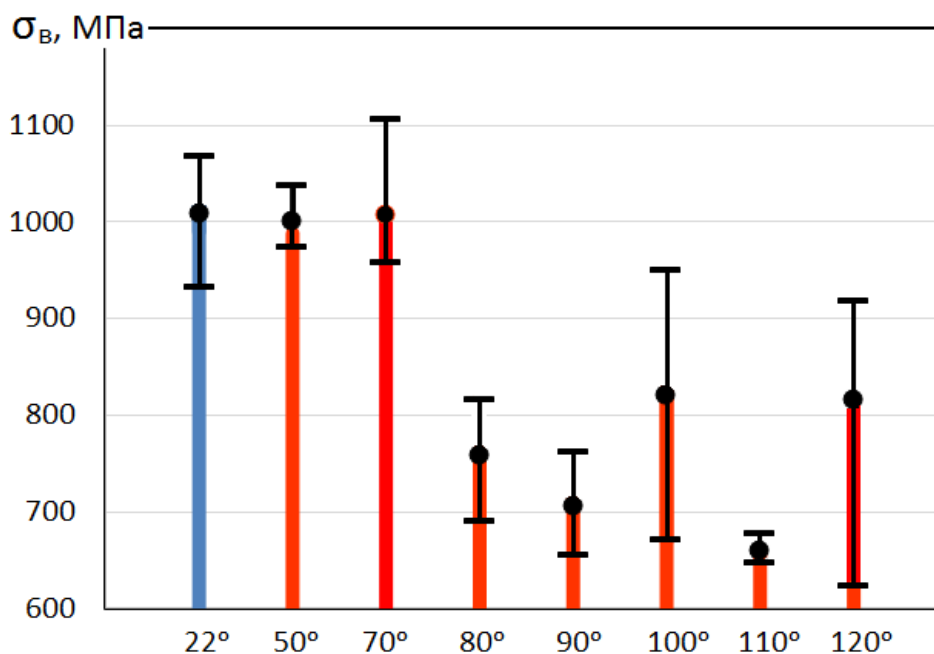


Рисунок 3.23 Диаграммы разброса значений предела прочности однонаправленного базальтопластика при различных температурах

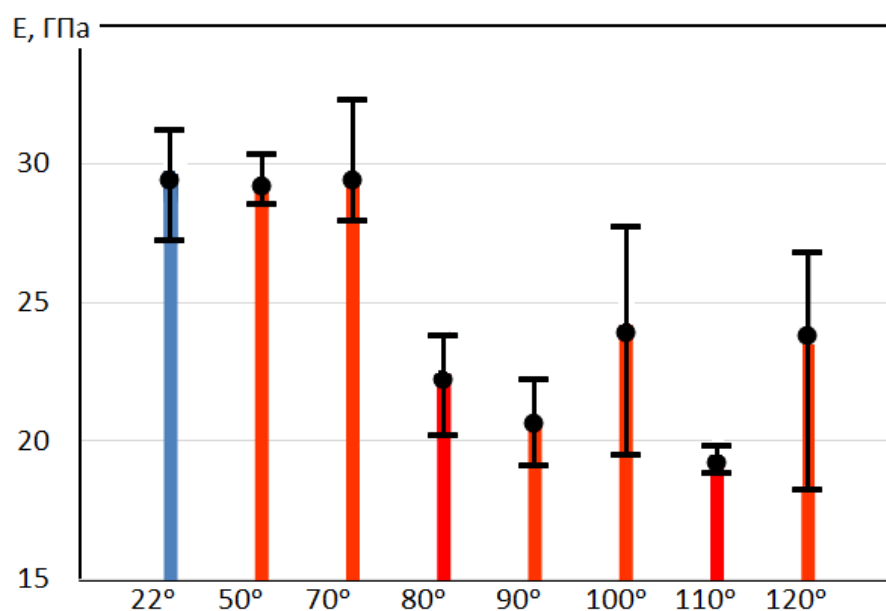


Рисунок 3.24. Диаграммы разброса значения модуля упругости однонаправленного базальтопластика при различных температурах

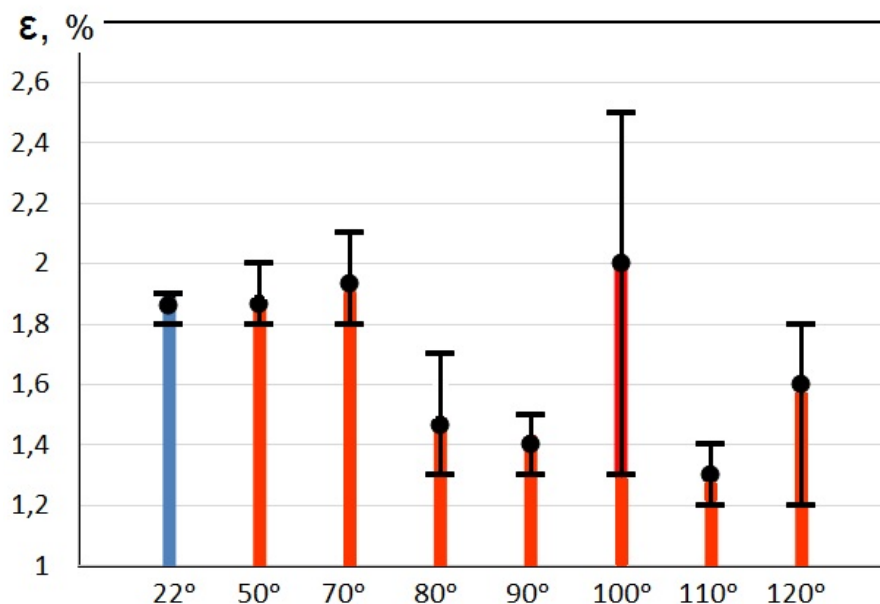


Рисунок 3.25. Значение предельной деформации однонаправленного базальтопластика при различных температурах

3.3. Исследования механических свойств стеклотекстолитов с наномодифицированной матрицей при квазистатических испытаниях на растяжение, сжатие, межслоевой сдвиг

Выполнены экспериментальные исследования для композиционных материалов на основе стеклоткани с матрицей, модифицированной многослойными углеродными нанотрубками, соответствующими требованиям ТУ 2166-030-07523132-2010 «Многослойные углеродные нанотрубки» (разработаны ОАО «УНИИКМ»).

Бездефектные углеродные нанотрубки представляют собой цилиндрические частицы из свернутых графеновых слоев. Они могут быть бесшовными, в идеальном случае строго цилиндрическими или представлять собой рулон. Различают однослойные и многослойные углеродные нанотрубки. По механическим свойствам они превосходят большинство других материалов. При изгибе углеродные нанотрубки проявляют высокую эластичность, образуют своеобразные узлы, которые способны распрямляться. Это свойство отличает

углеродные нанотрубки от большинства других материалов, имеющих сопоставимую прочность, но являющихся весьма хрупкими.

Сравнение некоторых характеристик углеродных нанотрубок со свойствами других материалов приведено в [39]. Особое значение имеет то, что для углеродных нанотрубок характерна низкая плотность: $1,4 \text{ г/см}^3$ для однослойных и $1,8 \text{ г/см}^3$ для многослойных углеродных нанотрубок. По удельной прочности нанотрубки превосходят все остальные материалы.

В ОАО «УНИИКМ» для получения углеродных нанотрубок в лабораторных масштабах используется способ газофазного химического осаждения в процессе каталитического пиролиза природного газа. Продукт синтеза представляет собой переплетение многослойных углеродных нанотрубок, внешний диаметр которых составляет от 5 до 35 нм, длина более 2 мкм. Количество слоев — от 1 до 10, внутренний диаметр — от 3 до 14 нм. Оработана методика химической очистки многослойных углеродных нанотрубок от каталитических частиц. Эффективность методики подтверждена рентгеноспектральными исследованиями.

Необходимым условием получения наилучших свойств полимерных нанокомпозитов, модифицированных углеродными нанотрубками, является достижение максимальной степени диспергирования наполнителя. В качестве метода диспергирования многослойных углеродных нанотрубок в материале матрицы используются ультразвуковые колебания. Методика диспергирования, основанная на воздействии ультразвука, позволяет эффективно разбивать агрегаты многослойных углеродных нанотрубок и равномерно распределять их в объеме связующего. Частота и время воздействия ультразвука зависит от объема композиции и выбирается с учетом скорости разогрева связующего при обработке. Далее производится пропитка стеклоткани модифицированным связующим и комплектование пакета путем последовательного укладывания слоев препрега в необходимом направлении и количестве.

Экспериментальное исследование механических характеристик нанокомпозитов проведено для полимерных композиционных материалов на

основе стеклоткани из сплошных стеклянных нитей (стеклоткань Т-10-80) и стеклоткани из стеклянных крученых комплексных полых нитей (стеклоткань Т-45(П)-76) с использованием связующего ЭНФБ. С целью обеспечения возможности сопоставления экспериментально исследуемых характеристик испытания также проведены для номинальных (не модифицированных многослойными углеродными нанотрубками) композиционных материалов.

Испытания проведены для материалов шести рецептов: 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.

Для материалов проведены квазистатические испытания на растяжение, сжатие, межслоевой сдвиг (трехточечный изгиб по методу короткой балки) и межслоевой сдвиг (растяжение полосы с двухсторонними надрезами). Деформация измерялась бесконтактным видеоэкстензометром AVE непосредственно в рабочей зоне образцов [26].

3.3.1. Испытания на растяжение наномодифицированных композитов

Эскиз образца на одноосное растяжение представлен на рисунке 3.26.

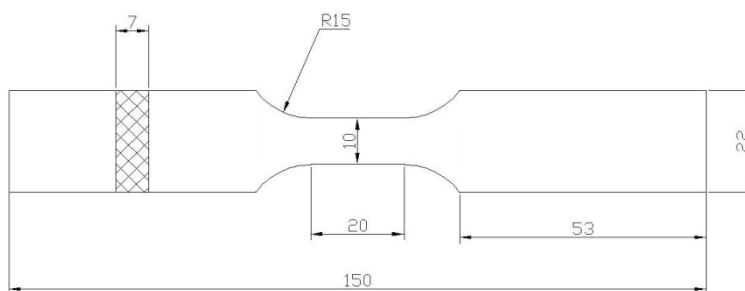


Рис. 3.26. Эскиз образца для испытаний на одноосное растяжение

Испытания проводились со скоростью перемещения траверсы 1 мм/мин. Вид разрушенных в ходе испытаний на растяжение образцов показан на рисунке 3.27. Как видно из рисунков, кроме разрывов волокон наблюдаются

множественные расслоения. Типовая диаграмма деформирования материала при одноосном растяжении приведена на рисунке 3.28.

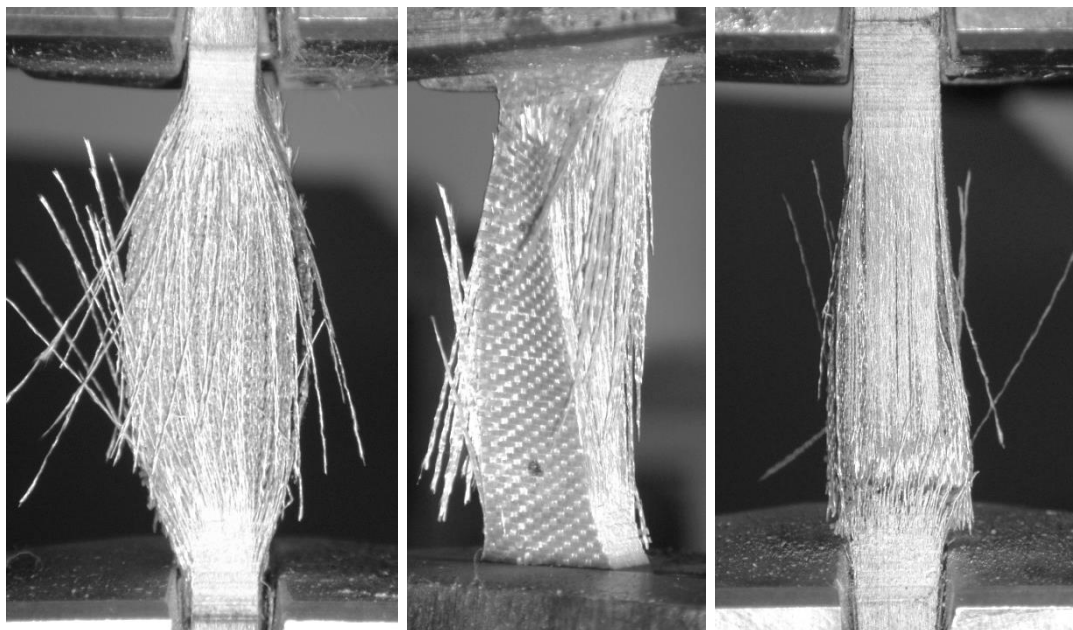


Рис. 3.27. Примеры образцов, разрушенных в ходе испытаний на одноосное растяжение

Результаты испытаний на растяжение представлены в таблице 3.11. Статистическая обработка проведена по формулам (3.1) – (3.3) по методу коэффициентов Стьюдента с доверительной вероятностью 0,95.

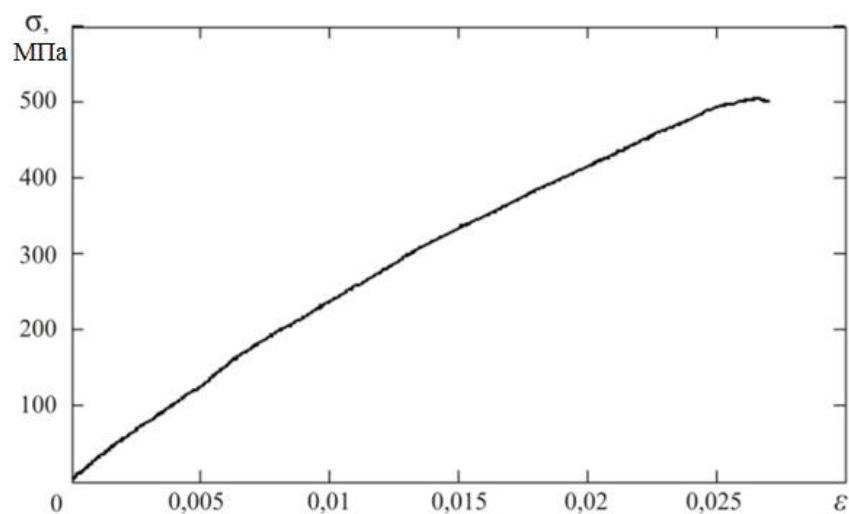


Рис. 3.28. Типовая диаграмма деформирования при одноосном растяжении

Таблица 3.11. Результаты испытаний на одноосное растяжение

Рецептура №	№ Образца	Максимальная нагрузка при разрыве P_{max} , кН	Предел прочности при разрыве σ_B , МПа	Модуль упругости при растяжении E , ГПа	Предел прочности при разрыве σ_B , МПа	Модуль упругости при растяжении E , ГПа
1	1-р1	25,694	341,23	28,943	$339,55 \pm 12,07$	$21,29 \pm 4,64$
	1-р2	24,500	323,00	18,713		
	1-р3	26,745	352,59	20,401		
	1-р4	25,098	330,33	16,032		
	1-р5	26,497	350,38	22,365		
2	2-р1	23,173	316,98	22,575	$336,34 \pm 14,27$	$21,20 \pm 0,98$
	2-р2	25,675	354,35	21,801		
	2-р3	24,683	325,40	20,975		
	2-р4	25,354	344,14	20,761		
	2-р5	25,260	340,82	19,886		
3	6-р1	19,317	271,71	21,383	$262,45 \pm 16,37$	$19,85 \pm 1,43$
	6-р2	18,649	256,46	18,649		
	6-р3	20,142	285,09	19,469		
	6-р4	18,446	259,76	21,470		
	6-р5	17,730	239,23	18,282		
4	3-р1	27,431	509,06	34,689	$502,68 \pm 17,14$	$28,25 \pm 3,95$
	3-р2	27,413	511,25	28,055		
	3-р3	27,192	505,35	23,802		
	3-р4	25,628	471,30	25,622		
	3-р5	27,297	516,43	29,087		
5	4-р1	30,703	527,64	35,061	$520,40 \pm 7,41$	$30,44 \pm 3,65$
	4-р2	29,455	522,10	24,920		
	4-р3	29,187	527,70	29,043		
	4-р4	28,249	513,11	32,681		
	4-р5	28,231	511,43	30,494		
6	5-р1	33,391	591,77	27,512	$571,91 \pm 21,04$	$29,09 \pm 2,90$
	5-р2	32,780	590,20	31,613		
	5-р3	29,991	539,44	33,092		
	5-р4	33,158	577,82	26,686		
	5-р5	32,308	560,34	26,536		

3.3.2. Испытания на сжатие наномодифицированных композитов

Экспериментальные исследования проводились на образцах с прямоугольным поперечным сечением 15×7 мм и длиной 106 мм. Испытания проводились с использованием специального приспособления, которое позволяет минимизировать потерю устойчивости образца во время испытания

(рис. 3.29). Приспособление для сжатия с закрепленным образцом, устанавливалось между плитами испытательной системы. Испытания проводились со скоростью 1 мм/мин. Характер разрушения образцов при сжатии, связанный с разрушением матрицы, и как следствие, расслоением материала и последующей потерей устойчивости слоев, представлен на рисунке 3.30. Типичный вид диаграммы деформирования материала при сжатии представлен на рисунке 3.31. Результаты испытаний приведены в таблице 3.12.

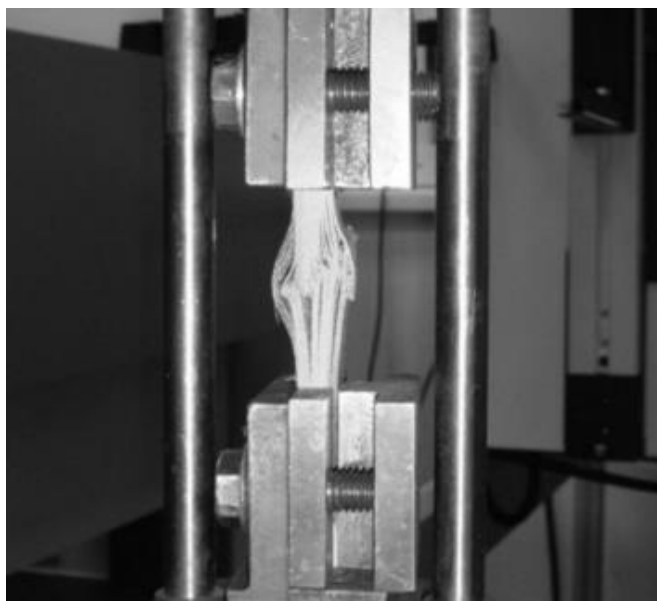


Рис. 3.29. Образец, закрепленный в специальной оснастке для испытаний на сжатие, установленном между плитами испытательной системы

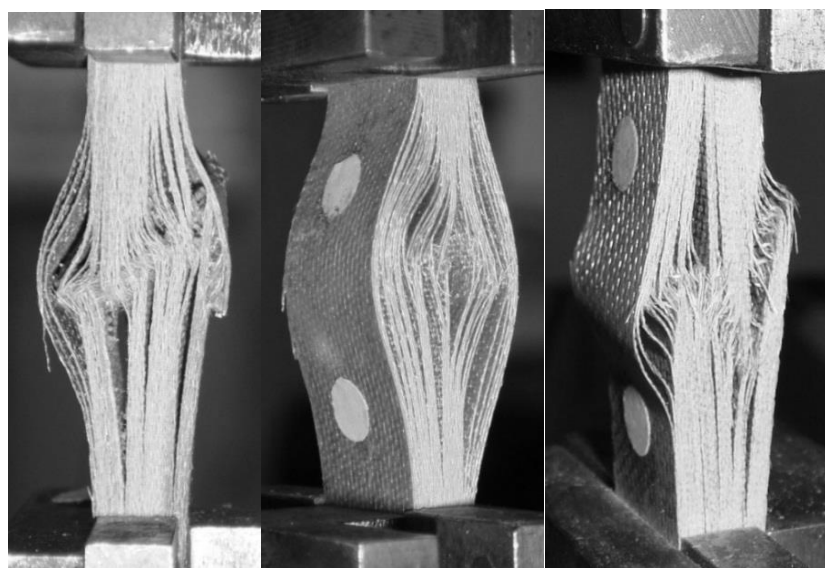


Рис. 3.30. Примеры разрушенных образцов после испытаний на сжатие

Таблица 3.12. Результаты испытаний на сжатие

Рецептура №	№ Образца	Максимальная нагрузка при сжатии P_{max} , кН	Предел прочности при сжатии σ_B^C , МПа	Модуль упругости при сжатии E^C , ГПа	Предел прочности при сжатии σ_B^C , МПа	Модуль упругости при сжатии E^C , ГПа
1	1	26,594	241,22	25,00	$209,40 \pm 26,25$	$21,70 \pm 2,33$
	2	25,455	231,20	22,64		
	3	23,458	211,34	21,94		
	4	20,016	180,45	20,48		
	5	20,237	182,81	18,45		
2	1	18,945	173,85	21,64	$213,95 \pm 27,13$	$22,28 \pm 1,56$
	2	22,199	205,13	21,99		
	3	27,089	252,22	23,30		
	4	23,384	214,99	20,09		
	5	24,111	223,56	24,36		
3	1	19,088	177,76	23,27	$183,10 \pm 20,93$	$21,92 \pm 1,70$
	2	22,137	203,71	21,27		
	3	17,772	168,68	20,02		
	4	22,058	207,88	24,27		
	5	16,487	157,48	20,75		
4	1	18,041	234,13	25,76	$209,77 \pm 15,56$	$27,85 \pm 2,67$
	2	16,677	213,12	30,73		
	3	15,187	191,61	28,66		
	4	15,524	198,38	24,14		
	5	17,005	211,61	29,94		
5	1	23,954	288,86	30,03	$315,32 \pm 41,07$	$31,13 \pm 2,89$
	2	22,610	274,33	34,03		
	3	29,234	359,52	31,46		
	4	23,540	289,31	33,59		
	5	28,895	364,56	26,54		
6	1	20,118	242,61	26,48	$238,85 \pm 8,68$	$31,19 \pm 4,39$
	2	20,976	242,39	31,65		
	3	21,599	247,86	26,55		
	4	19,513	223,93	34,89		
	5	20,013	237,45	36,40		

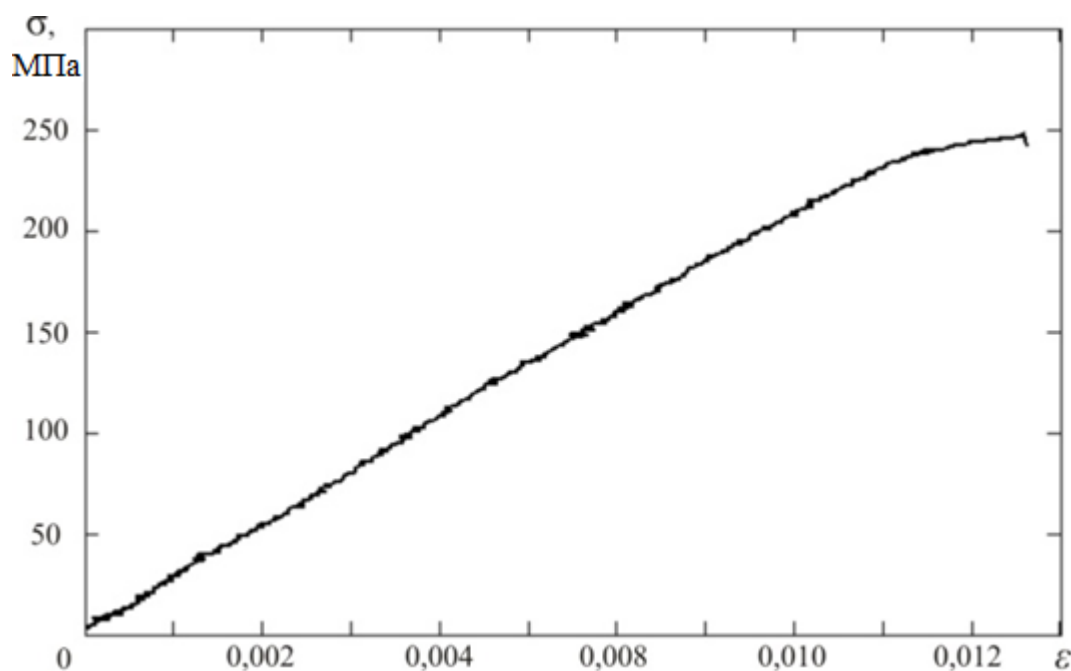


Рис. 3.31. Типовая диаграмма деформирования при сжатии

3.3.3. Испытания на трехточечный изгиб короткой балки наномодифицированных композитов

Испытания проводились на образцах прямоугольного поперечного сечения шириной 20 мм, высотой 7 мм и длиной 64 мм. Расстояние между опорами — 40мм. Скорость перемещения траверсы — 1 мм/мин.

В испытаниях на трехточечный изгиб короткой балки происходило типовое разрушение образцов от касательных напряжений. Характерный вид разрушенных образцов после испытаний представлен на рисунке 3.32.

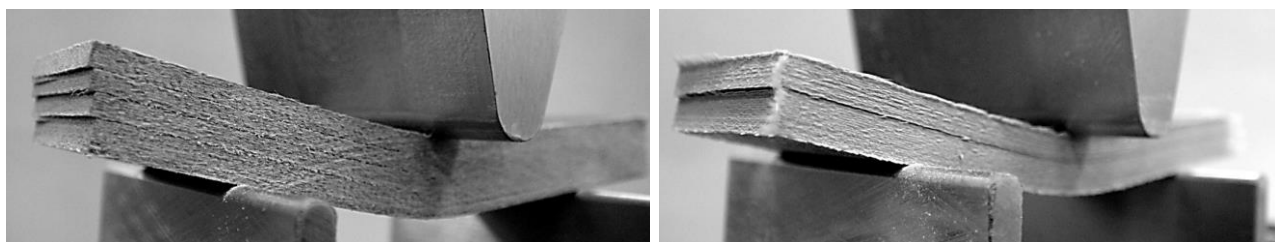


Рис. 3.32. Примеры разрушенных образцов после испытаний на трехточечный изгиб короткой балки

Типовая диаграмма нагружения в испытаниях на трехточечный изгиб (в координатах нагрузка — прогиб) приведена на рисунке 3.33. Срывы на данной диаграмме соответствуют моментам последовательного расслоения образца. Результаты испытаний приведены в таблице 3.13.

Таблица 3.13. Результаты испытаний на изгиб короткой балки

Рецептура №	№ Образца	Максимальная нагрузка при изгибе P_{max}^u , кН	Максимальное касательное напряжение при изгибе τ_{max}^u , МПа	Максимальное касательное напряжение при изгибе τ_{max}^u , МПа
1	1	5,279	27,17	$20,79 \pm 3,98$
	2	4,389	22,59	
	3	3,797	19,51	
	4	3,484	17,88	
	5	3,259	16,81	
2	1	6,410	33,76	$23,06 \pm 6,09$
	2	4,376	22,86	
	3	4,075	21,36	
	4	3,955	20,62	
	5	3,242	16,71	
3	1	3,242	17,50	$16,75 \pm 0,49$
	2	3,063	16,47	
	3	3,023	16,14	
	4	3,101	16,65	
	5	3,170	16,99	
4	1	4,038	29,53	$24,54 \pm 3,29$
	2	3,350	24,50	
	3	3,358	24,75	
	4	3,491	24,14	
	5	2,793	19,79	
5	1	5,372	39,01	$36,33 \pm 3,76$
	2	5,596	40,62	
	3	4,353	30,51	
	4	4,930	34,68	
	5	5,237	36,82	
6	1	2,312	15,14	$13,98 \pm 1,11$
	2	2,281	14,94	
	3	2,013	13,23	
	4	1,886	12,39	
	5	2,152	14,18	

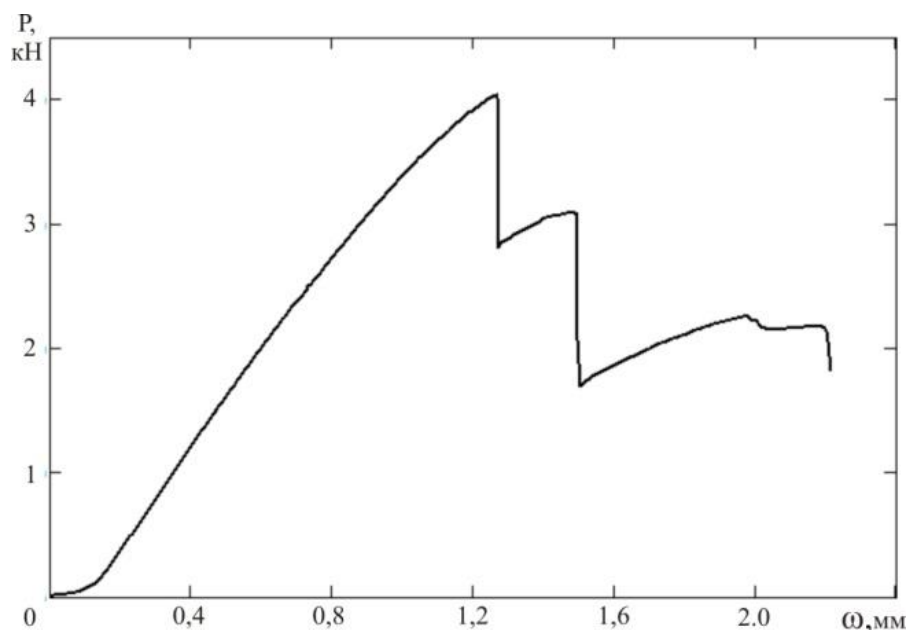


Рис. 3.33. Типовая диаграмма нагружения при межслойном сдвиге

3.3.4. Испытания на межслойный сдвиг наномодифицированных композитов

Испытания реализованы при одноосном растяжении образцов специальной геометрии в виде полос с двухсторонним надрезом. Образцы изготовлены с учетом рекомендаций [126]. Эскиз образца с двухсторонним надрезом для испытаний на растяжение представлен на рисунке 3.34. Расчетным сечением образца является площадка, находящаяся между надрезами и параллельная его продольной оси и слоям материала. При этом между слоями материала в срединной плоскости образца реализуется межслойный сдвиг.

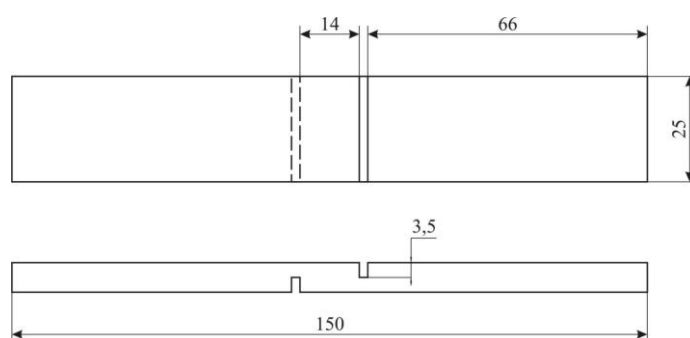


Рис. 3.34. Эскиз образца с двухсторонними надрезами

В экспериментах на растяжение образца с двухсторонними надрезами имело место характерное разрушение по расчетному сечению образца. Примеры разрушенных образцов после проведения испытаний приведены на рисунке 3.35.

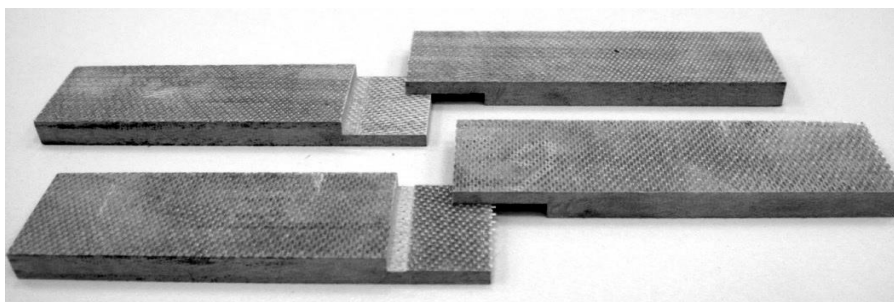


Рис. 3.35. Вид разрушенных образцов с надрезами после испытаний на растяжение

Характерный вид диаграмм нагружения в испытаниях на растяжение образца с двухсторонними надрезами (в координатах нагрузка — перемещение) — на рисунке 3.36. Результаты испытаний приведены в таблице 3.14.

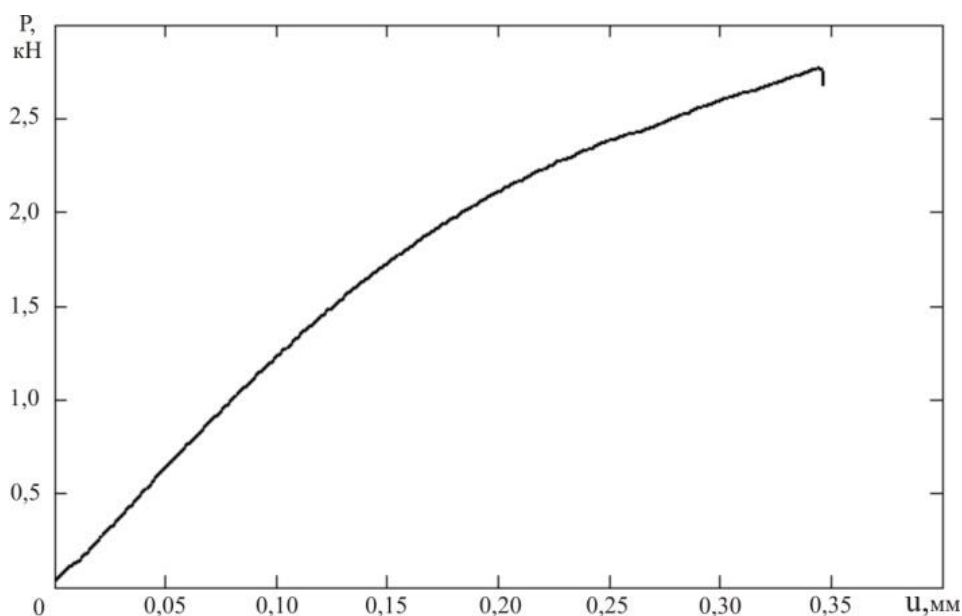


Рис. 3.36. Типовая диаграмма нагружения при одноосном растяжении образца с двухсторонними надрезами

Таблица 3.14. Результаты проведения испытаний на межслойный сдвиг (растяжение полосы с двухсторонними надрезами)

Рецептура	№ Образца	Максимальная нагрузка при межслойном сдвиге P_{max} , кН	Максимальное касательное напряжение при межслойном сдвиге τ_{max} , МПа	Максимальное касательное напряжение при межслойном сдвиге τ_{max} , МПа
1	1	1,545	4,41	$5,09 \pm 1,44$
	2	1,441	4,12	
	3	1,753	4,98	
	4	2,409	6,84	
2	1	4,398	12,49	$9,20 \pm 1,84$
	2	3,228	9,18	
	3	2,823	8,05	
	4	2,678	7,61	
	5	3,035	8,67	
3	1	1,801	5,14	$5,75 \pm 0,82$
	2	1,871	5,32	
	3	2,052	5,84	
	4	2,354	6,70	
	5	3,056*	8,68*	
4	1	2,026	5,82	$6,00 \pm 0,80$
	2	1,812	5,15	
	3	2,373	6,75	
	4	2,214	6,28	
5	1	3,077	8,84	$8,28 \pm 0,47$
	2	2,790	8,02	
	3	2,892	8,30	
	4	2,766	7,96	
6	1	2,615	7,39	$4,56 \pm 1,59$
	2	1,541	4,36	
	3	1,546	4,40	
	4	1,140	3,22	
	5	1,200	3,41	

Таким образом, получены новые результаты исследования эффектов механического поведения нанокompозитов. Экспериментально исследованы нанокompозиты на основе стеклотканей двух марок, изготовленных из сплошных стеклянных нитей (стеклоткань Т-10-80) и из стеклянных крученых комплексных полых нитей (стеклоткань Т-45(П)-76), с модифицированной многослойными углеродными нанотрубками матрицей. Результаты испытаний на растяжение, сжатие, трехточечный изгиб короткой балки (сдвиг по слою), растяжение образцов с двухсторонними надрезами сведены в таблицу 3.15.

Статистическая обработка проводилась по формулам (3.1) – (3.3), по методу коэффициентов Стьюдента.

Таблица 3.15. Сводная таблица результатов исследований механических свойств нанокомпозитов

№ п/п	Механические характеристики	Номер рецептуры материала					
		1	2	3	4	5	6
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

Для наглядности результатов построены и представлены на рис. 3.37 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 3.15

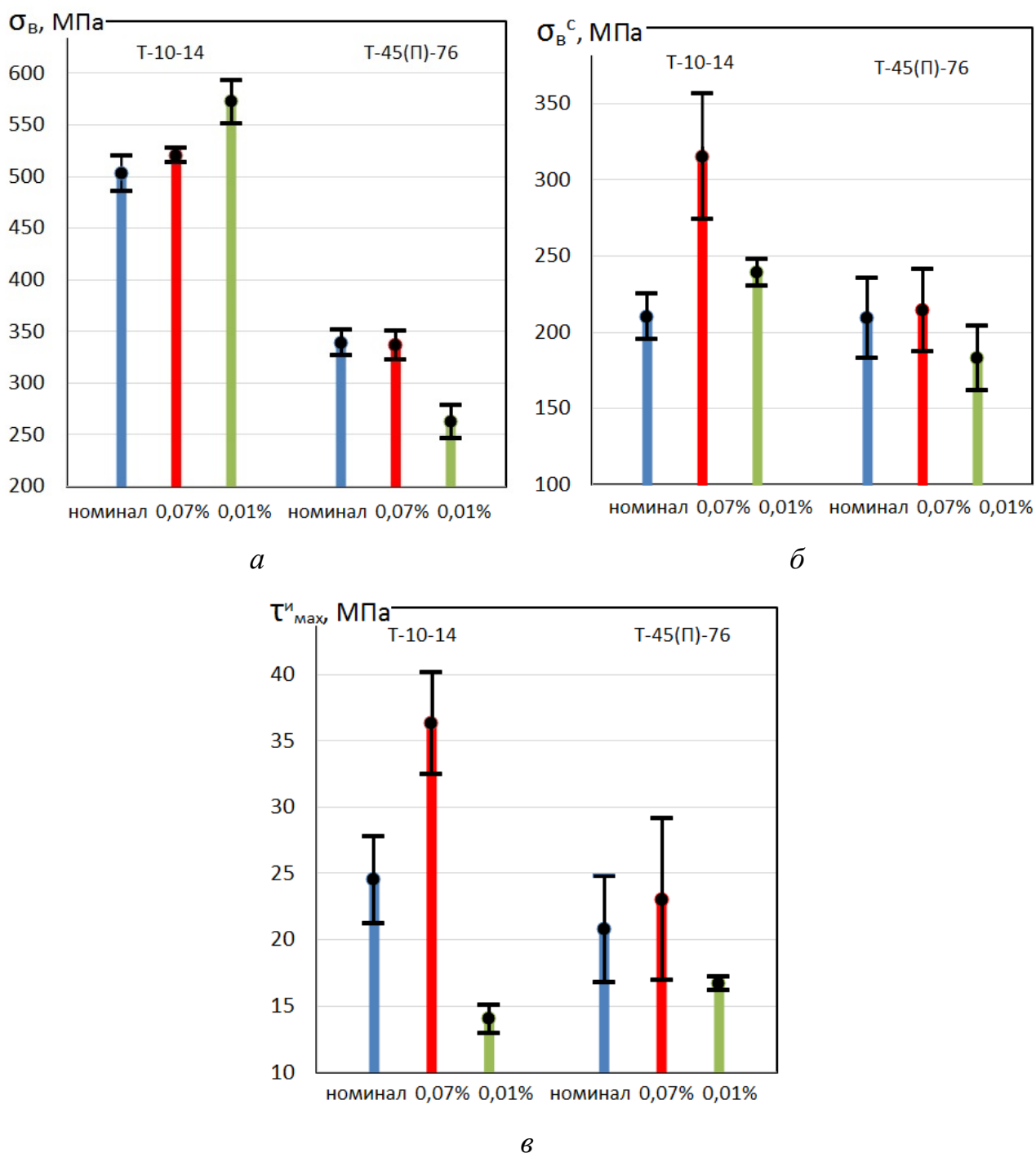


Рис. 3.37. Диаграммы зависимости средних значений (●) с учетом среднеквадратического отклонения ($\bar{I}$) предела прочности при растяжении (а), предела прочности при сжатии (б) и прочности при межслоевом сдвиге (в) от массовой доли модифицирующего компонента для стеклотекстолитов

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 композитов от массовой доли наномодифицирующего компонента [26].

Выводы по главе 3

1. Проведены экспериментальные исследования механических свойств углепластика при одноосном растяжении и трехточечном изгибе в условиях нормальных и повышенных температур.
2. Апробированы методики экспериментальных исследований механических свойств однонаправленных композиционных материалов в широком диапазоне температур, в части использования специальных захватных гильз. Получены новые данные о закономерностях деформирования и разрушения однонаправленных стекло- и базальтопластиков в диапазоне температур от -30°C до 120°C .
3. Получены новые данные о влиянии пониженных, повышенных и нормальных (эксплуатационных) температур на механические свойства полимерных волокнистых композиционных материалов. Построены зависимости влияния температуры на модуль упругости и предел прочности для угле-, стекло- и базальтопластиков.
4. Получены новые результаты исследования комплекса механических характеристик композиционных материалов с наномодифицированной полимерной матрицей при различном содержании наполнителя. Экспериментально исследованы особенности механического поведения нанокомпозитов с модифицированной многослойными углеродными нанотрубками матрицей на растяжение, сжатие, трехточечный изгиб короткой балки (сдвиг по слою), сдвиг при растяжении образцов с двухсторонними надрезами.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ПОЛУНАТУРНЫХ ОБРАЗЦОВ КРУПНОЯЧЕИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СТЕКЛО- И УГЛЕПЛАСТИКОВ С КОРОбЧАТЫМ (ТРУБЧАТЫМ) ЗАПОЛНИТЕЛЕМ

В главе предложены методические рекомендации по учету жесткости нагружающей системы при испытаниях на растяжение крупногабаритных образцов-панелей. Приведены результаты экспериментального исследования механических свойств полунатурных образцов-панелей крупноячеистых композитов на основе стекло- и углепластиков с коробчатым заполнителем при испытаниях на растяжение, сжатие и сдвиг в условиях нормальных и повышенных температур. Проведена оценка эффективности локального ремонта сквозного дефекта на образцах-панелях на основе стеклопластика ВПС-33.

Результаты отражены в следующих публикациях автора [5, 27, 30, 32, 49, 127, 153, 174].

4.1. Учет жесткости нагружающей системы при испытаниях полунатурных образцов крупноячеистого композита

Несмотря на то, что современные испытательные системы обеспечивают высокие жёсткостные характеристики, в процессе нагружения на любой испытательной машине деформация образца сопровождается упругой деформацией частей машины, включая раму, тяги, муфты, захватные приспособления, силоизмерительное устройство и т.п. Чем больше эта деформация, тем податливее «нагружающая система», под которой понимается совокупность всех тел, деформирующихся в результате передачи нагрузки рассматриваемой области. Важность понятия «нагружающая система» с точки зрения исследования процессов деформирования и разрушения была отмечена в работах многих авторов [25, 28, 29, 31, 32, 34, 46, 47, 67, 98, 129, 130].

При испытаниях крупногабаритных (полунатурных) образцов применяются различные дополнительные элементы крепления (оснастка), которые оказывают существенное влияние на податливость всей нагружающей цепи. В данном случае коэффициент жёсткости всей нагружающей системы будет существенно снижен вследствие податливости элементов захватных приспособлений и крепежных элементов, а также возможного проскальзывания в узлах, выборки технологических зазоров, что приведет к дополнительным перемещениям, регистрируемым встроенным датчиком испытательной установки.

По техническим данным фирмы производителя, при максимальной нагрузке — 100 кН средняя жёсткость нагружающей рамы Instron 5882 составляет 255 кН/мм.

Программное обеспечение испытательной установки Bluehill 2, позволяет учесть жёсткость нагружающей системы и произвести корректировку регистрируемых данных. Податливость нагружающей системы определяется путем проведения испытания с использованием нерабочего образца, жёсткость которого должна быть, насколько это возможно, более высокая по сравнению с реальным образцом. В ходе данного испытания система формирует «файл податливости», содержащий значения нагрузки и удлинения. При нагружении реального образца программное обеспечение использует файл податливости для корректировки значений деформации и удлинения, регистрируемых во время этого испытания. В случае, когда коэффициент жёсткости нагружающей системы известен заранее, программное обеспечение также позволяет внести автоматическую корректировку регистрируемых данных.

Встроенные датчики перемещений испытательной машины фиксируют и позволяют контролировать при кинематическом нагружении удлинение всей нагружающей цепи $u_0(t)$, включая удлинение образца $u(t)$ и перемещения, обусловленные упругой деформацией нагруженных частей испытательной машины. Следовательно, в общем случае, удлинение образца будет равно:

$$u(t) = u_0(t) - S(t) \frac{1}{R_{HC}} \quad (4.1)$$

где $S(t)$ — прикладываемая нагрузка, R_{HC} — жёсткость нагружающей системы.

Так как при проведении испытаний полунатурных образцов из крупноячеистого композиционного материала использованы специальные захватные приспособления, то при определении податливости всей нагружающей системы следует учитывать, как податливость испытательной машины R_M , включая нагружающую раму, тяги и встроенный силоизмерительный датчик, так и податливость захватного приспособления $R_{ЗП}$:

$$\frac{1}{R_{HC}} = \frac{1}{R_M} + \frac{1}{R_{ЗП}} \quad (4.2)$$

Следует отметить, что действительная скорость удлинения рабочей зоны образца $\dot{u}$, также отличается от номинально заданной скорости кинематического нагружения $\dot{u}_0$ и может быть определена по формуле:

$$\dot{u} = \frac{\dot{u}_0}{1 + H_{обр} / R_{HC}} \quad (4.3)$$

где $H_{обр}$ — жёсткость рабочей зоны образца, которая определяется модулем упругости материала E , площадью поперечного сечения рабочей зоны образца F и длиной рабочей зоны образца l_0 : $H_{обр} = EF / l_0$.

При проведении испытаний крупногабаритных, полунатурных или нестандартных образцов целесообразно использовать современные оптические системы. На базе использования бесконтактной трёхмерной цифровой оптической системы Vic-3D предложена методика для определения и учёта жёсткости нагружающей системы. Видеосистема предназначена для

регистрации полей перемещений и деформаций на поверхности плоских, цилиндрических образцов и элементов конструкций независимо от типа исследуемого материала [27, 30-32,]. Математический аппарат видеосистемы основан на методе корреляции цифровых изображений (КЦИ), в зарубежной литературе известный как «digital image correlation technique» [30].

Идея предложенной методики заключается в регистрации полей перемещений на поверхности как самого полунатурного композитного образца, так и на поверхности элементов захватного приспособления (рис. 4.1). Применение видеосистемы позволяет получить экспериментальные данные о процессе деформирования материала в рабочей зоне образцов, оценить жёсткость конкретной испытательной установки с учётом встроенного динамометрического устройства и тяг, а также проанализировать степень влияния податливости дополнительного захватного приспособления на жёсткость всей нагружающей системы.

В состав цифровой оптической системы входят две цифровые монохромные CCD-камеры с максимальным разрешением 4,0 МПкс и скоростью съёмки от 8 до 15 кадров/сек (в зависимости от установленного разрешения), система подсветки, блок синхронизации с испытательной системой, а также специальное программное обеспечение для настройки и управления процессом съёмки (Vic-Snap) и последующей математической обработки изображений (Vic-3D).

В связи с тем, что для анализа полей перемещений методом КЦИ требуется предварительная подготовка поверхности исследуемых объектов, на поверхность композитного образца, металлических накладок и тяг испытательной системы нанесено контрастное мелкодисперсное покрытие (рис. 4.1.). Удлинение образца и податливость нагружающей системы регистрировались с помощью дополнительного модуля программного обеспечения видеосистемы «виртуальный экстензометр», краткое описание которого приведено в [30].

Регистрация удлинений на поверхности рабочей зоны образцов и элементов нагружающей системы осуществлялась с помощью оптического метода анализа полей перемещений согласно схеме, приведенной на рисунке 4.2.

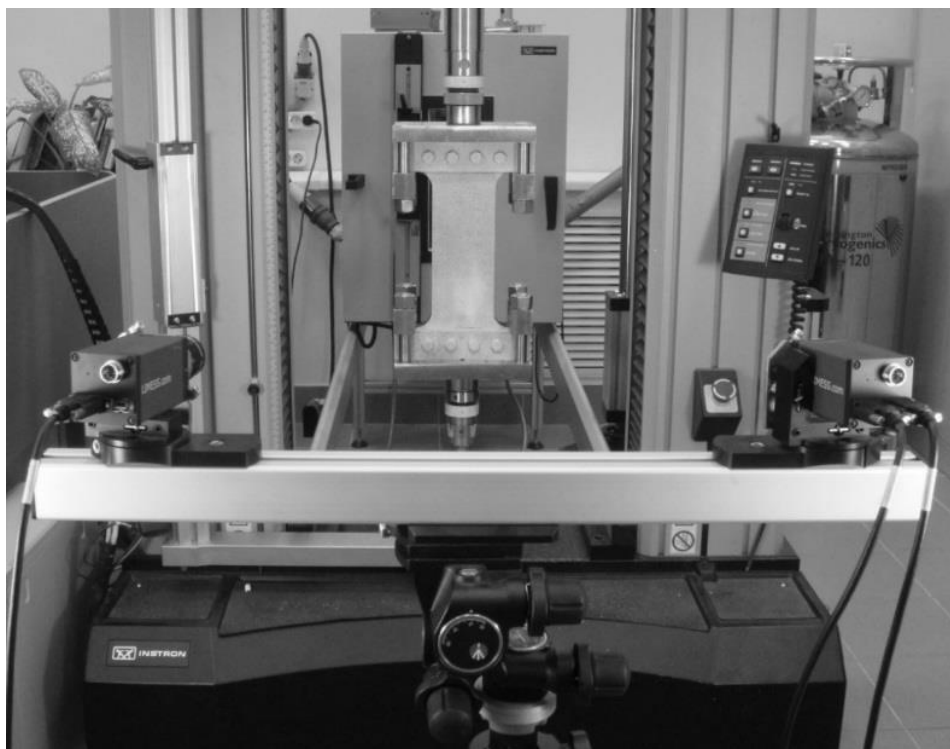


Рис. 4.1. Испытательная и оптическая системы для регистрации полей перемещений на поверхности образца и захватного приспособления методом корреляции цифровых изображений в опыте на одноосное растяжение

На рисунке 4.3 представлены временные зависимости удлинения образца и всей нагружающей системы по данным встроенного динамометрического датчика испытательной машины – $u_0(t)$, удлинения образца и части нагружающей системы, включающей специальное захватное приспособление:

$$u_{nc}(t) = u_4 - u_1 \quad (4.4)$$

а также удлинение рабочей зоны образца:

$$u(t) = u'_{обр} - u_{обр} \quad (4.5)$$

Отличие удлинения всего образца (u_3-u_2), включая области перехода от рабочей зоны к захватным частям, при нагрузке 17,8 кН составило 9,76% ($\Delta u=0,293\text{мм}$) от удлинения рабочей зоны образца.

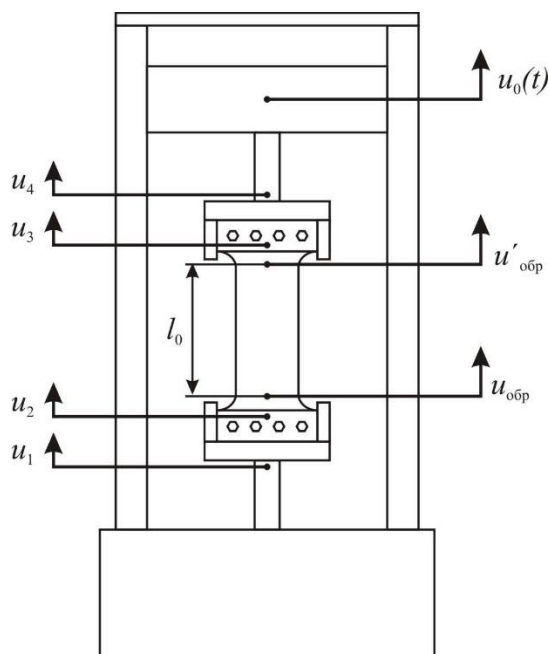


Рис. 4.2. Схема регистрации удлинения рабочей зоны образца и элементов нагружающей системы

На рисунке 4.3 показано перемещение, обусловленное упругой деформацией нагруженных частей испытательной машины (I); перемещение, обусловленное упругой деформацией захватных приспособлений и нерабочих частей образца (II), а также удлинение рабочей зоны образца (III).

На основе полученных экспериментальных данных проведена качественная и численная оценка степени влияния специальных захватных приспособлений на податливость всей нагружающей системы, результаты расчета характеристик жёсткости приведены на рисунке 4.4. Можно также сделать вывод о значительном влиянии встроенного динамометрического датчика и тяг испытательной машины на характеристику жёсткости.

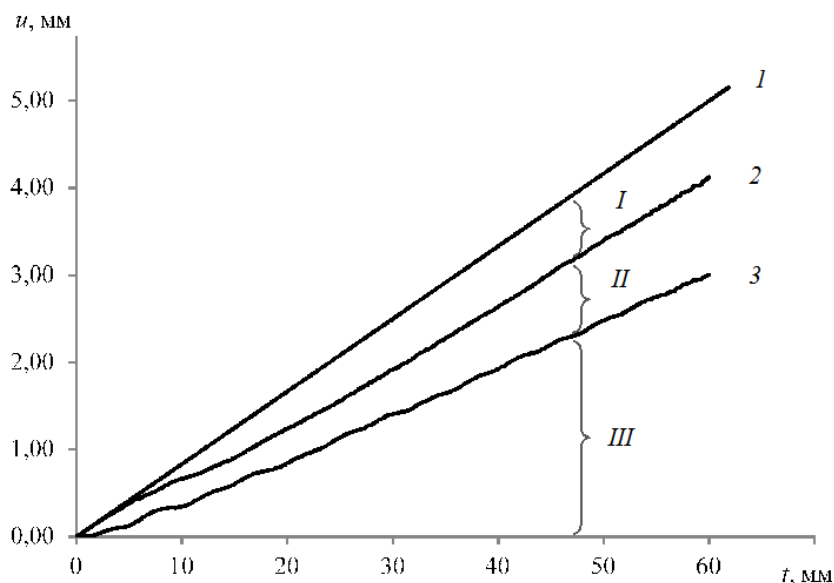


Рис. 4.3. Временные зависимости удлинения образца и всей нагружающей системы $u_0(t)$ по встроенному датчику перемещений (1), образца и части нагружающей системы $u_{НС}(t)$, включающей специальное захватное приспособление (2) и удлинение рабочей зоны образца $u(t)$ (3)

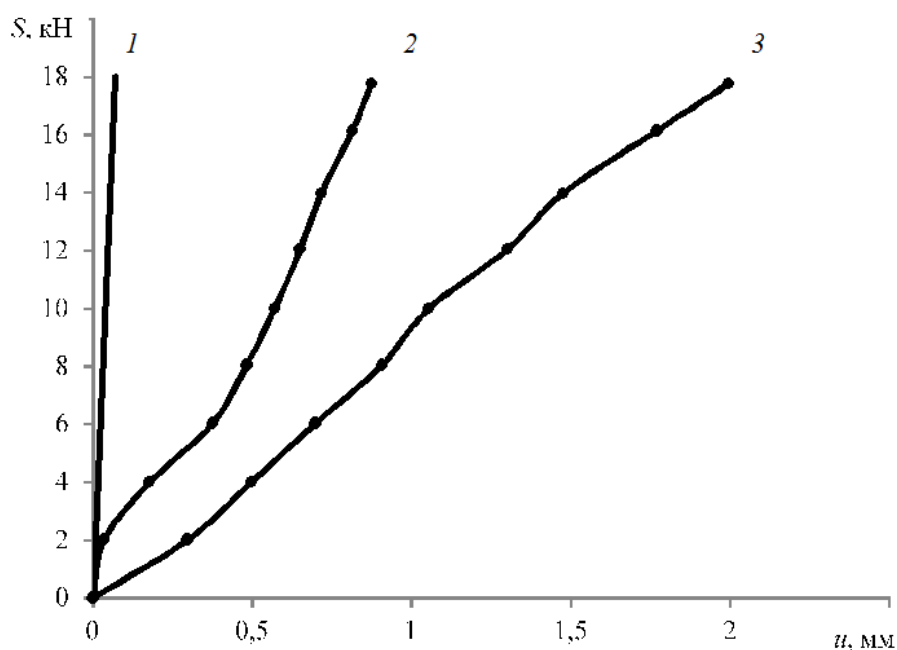


Рис. 4.4. Характеристика жёсткости нагружающей рамы (1), испытательной системы, включая нагружающую раму, тяги и встроенный датчик нагрузки (2) и всей нагружающей системы, включая захватные приспособления (3)

Таблица 4.1. Значения средней жёсткости элементов нагружающей системы

Средняя жёсткость нагружающей рамы Instron 5882	Средняя жёсткость испытательной машины Instron 5882, включая тяги и датчик нагрузки (± 100 кН)	Средняя жесткость нагружающей системы, включая специальные захватные приспособления на растяжение
255 кН/мм	20 кН/мм	9,3 кН/мм

Результаты демонстрируют, насколько важно учитывать влияние жесткостных характеристик нагружающей системы при проведении экспериментальных исследований механических и прочностных свойств материалов, и что отсутствие должной корректировки регистрируемых данных может привести к значительной ошибке при определении деформационных характеристик. Как видим, использование в испытаниях дополнительных элементов крепления и специальных захватных приспособлений может привести к значительному удлинению кинематической цепи и существенному снижению жесткостных характеристик нагружающей системы в целом.

На рисунке 4.5 построены диаграммы нагружения полунатурного образца из крупноячеистого композиционного материала. Из рисунка видно, что кривые (1) и (2), построенные по данным цифровой оптической системы Vis-3D и встроенного датчика перемещений соответственно, отличаются существенно. Так, например, при нагрузке 17,8 кН различие данных по перемещению составило 66,43% ($\Delta u = 1,995$ мм) от удлинения рабочей зоны образца.

Следует отметить, что использование оптического метода анализа полей перемещений позволяет провести контроль правильности проведения экспериментов за счёт выявления возможных недочетов позиционирования крупногабаритных образцов при их закреплении в специальных захватных приспособлениях, а также в случае возникновения перекосов в процессе нагружения, повышая тем самым точность регистрируемых экспериментальных данных.

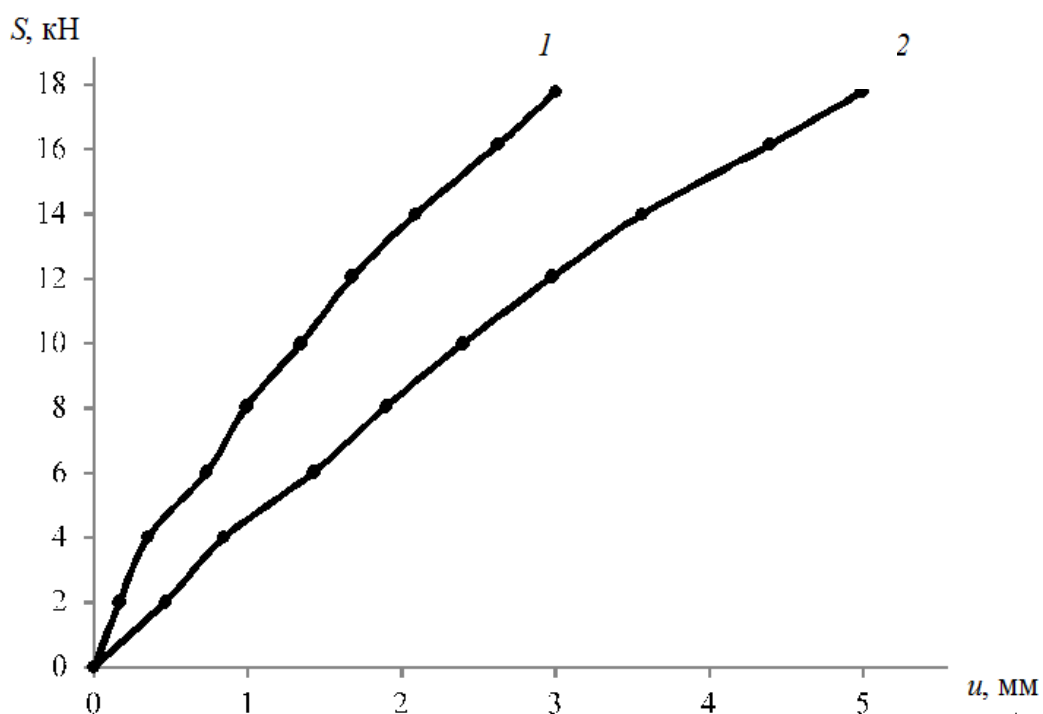


Рис. 4.5. Диаграммы нагружения полунатурного образца из крупноячеистого композиционного материала, построенные по данным цифровой оптической системы Vic-3D (1), по встроенному датчику перемещений (2)

Таким образом, реальная жёсткость нагружающих систем при проведении испытаний в силу использования динамометрических датчиков, тяг, захватных приспособлений и других устройств существенным образом отличается от регламентируемых значений жёсткости нагружающей рамы испытательной системы. Это может коренным образом повлиять не только на значения определяемых деформационных характеристик, но и, как было показано во многих исследованиях, на кинетику разрушения материала. Исследование данных вопросов применительно к конкретному виду испытаний, в особенности при нестандартных опытах с использованием сложной оснастки, может быть осуществлено на базе применения современных оптических методов и аппаратуры анализа полей перемещений и деформаций.

4.2. Испытания образцов-панелей из композиционных материалов на растяжение, сжатие, сдвиг

Исследование выполнялось с целью определения критических нагрузок потери устойчивости и разрушающих нагрузок крупноячеистых полунатурных образцов-панелей из углепластика ЭНФБ 3692-НТА-0,2-40 и стеклопластиков ЭНФБ-Т-10-14 с коробчатым (трубчатым) заполнителем (вдоль и поперек направления каналов) из материала ЭНФБ 4510-НТС-0,2-40 при испытаниях на растяжение, сжатие и сдвиг в условиях нормальной (22°C) и повышенных (100°C и 150°C) температур. Исследование выполнялось в рамках НИР совместно с ОАО «УНИИКМ» и ОАО «Авиадвигатель».

4.2.1. Испытание образцов-панелей на растяжение

Испытания полунатурных образцов панелей проводились по методикам, представленным в п. 2.3. и [49]. Было испытано по 5 образцов-панелей для каждого материала (стеклопластик, углепластик) вдоль и поперек расположения каналов заполнителя при нормальной и повышенной (100°C) температурах.

Типовой вид диаграммы нагружения образцов-панелей при испытаниях на растяжение представлен на рисунке 4.6.

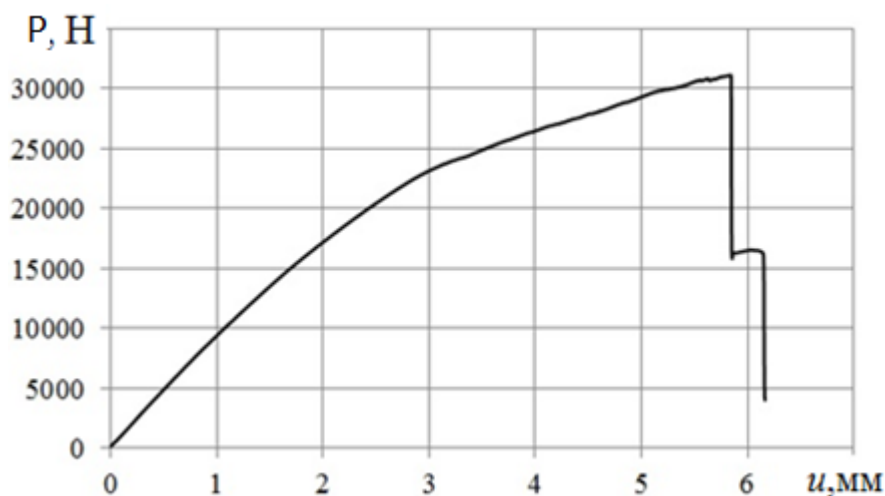
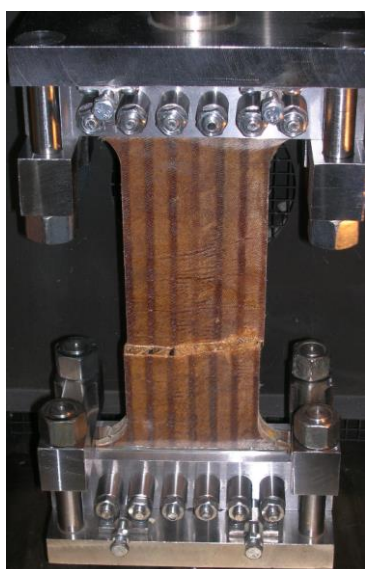


Рис. 4.6. Типовая диаграмма нагружения образцов-панелей при испытаниях на растяжение

Характер разрушения образцов стекло- и углепластиков вдоль и поперек направления каналов заполнителя представлен на рисунке 4.7. Результаты испытаний образцов-панелей из стекло- и углепластиков приведены в таблице 4.2 в виде средних значений разрушающей нагрузки при растяжении, а также на диаграмме распределения значений разрушающей нагрузки (рис. 4.8).



а



б



в



г

Рис. 4.7. Характерный вид разрушения образцов-панелей из стекло- (а, б) и углепластиков (в, г) вдоль (а, в) и поперек (б, г) направления каналов заполнителя

Таблица 4.2. Средние значения разрушающей нагрузки образцов-панелей при испытании на растяжение

Материал	Среднее значение разрушающей нагрузки, кН			
	при 20° С		при 100° С	
	Вдоль оси каналов	Поперек оси каналов	Вдоль оси каналов	Поперек оси каналов
Стеклопластик	57,4±2,7	26,3±2,4	41,3±3,8	17,1±4,3
Углепластик	65,2±1,7	53,1±7,6	59,0±2,1	53,8±1,5

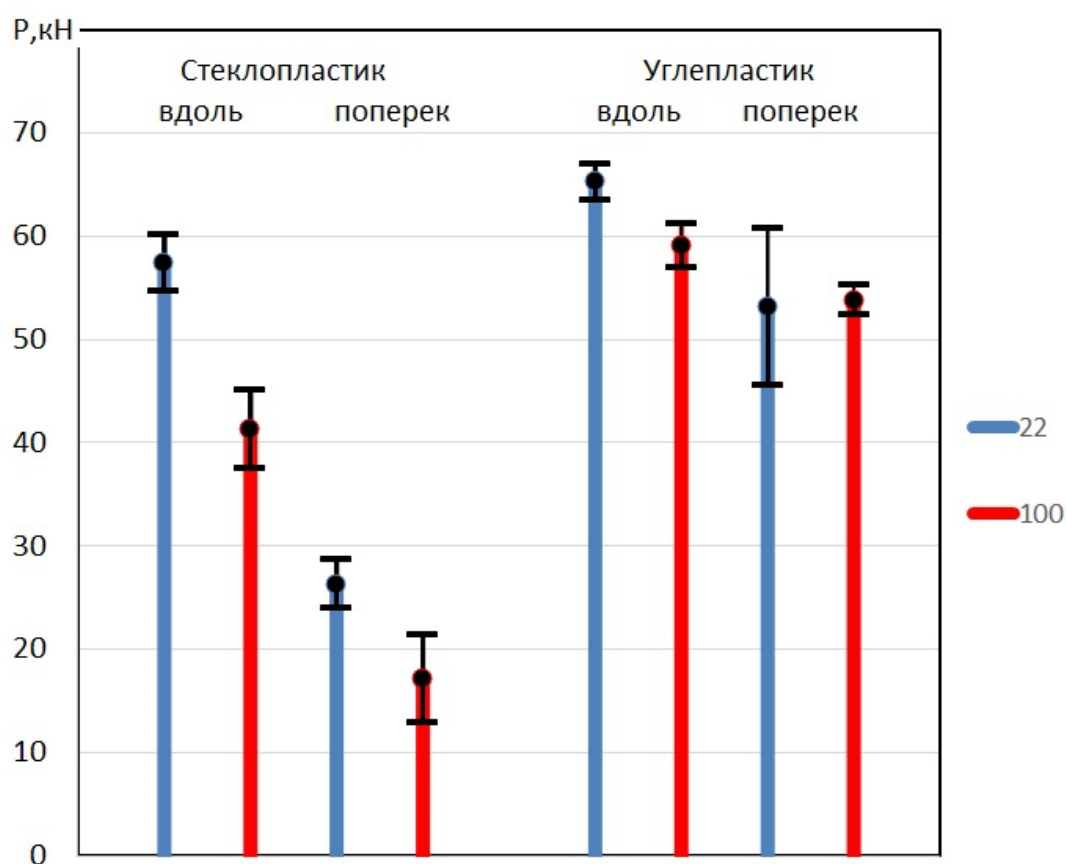


Рис. 4.8. Диаграмма распределения значений разрушающей нагрузки при испытаниях образцов-панелей на растяжение при нормальной (синие линии) и повышенной 100° С (красные линии) температурах

Из таблицы 4.2 и рисунка 4.8 видно, что снижение несущей способности при повышенной (100° С) температуре испытаний относительно несущей способности при нормальной температуре для образцов-панелей из

стеклопластика в среднем составила: вдоль оси каналов – 28%, поперек оси каналов – 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.

4.2.2. Испытание образцов-панелей на сжатие

Программа испытаний образцов-панелей из стекло- и углепластиков на сжатие аналогична программе испытаний на растяжение. Испытания проводились по методике, предложенной в п. 2.3. Испытания при повышенной температуре проводились при 150° С. Образец-панель закрепленный в специальной оснастке для испытаний на сжатие и смонтированный на испытательной машине представлен на рисунке 2.8, д.

Типовой вид диаграммы нагружения образцов-панелей при испытаниях на сжатие представлен на рисунке 4.9. Хотя диаграммы при испытаниях на сжатие имеют схожий, типовой вид, необходимо отметить что разрушения образцов с продольным и поперечным расположением заполнителя происходят по разным механизмам.

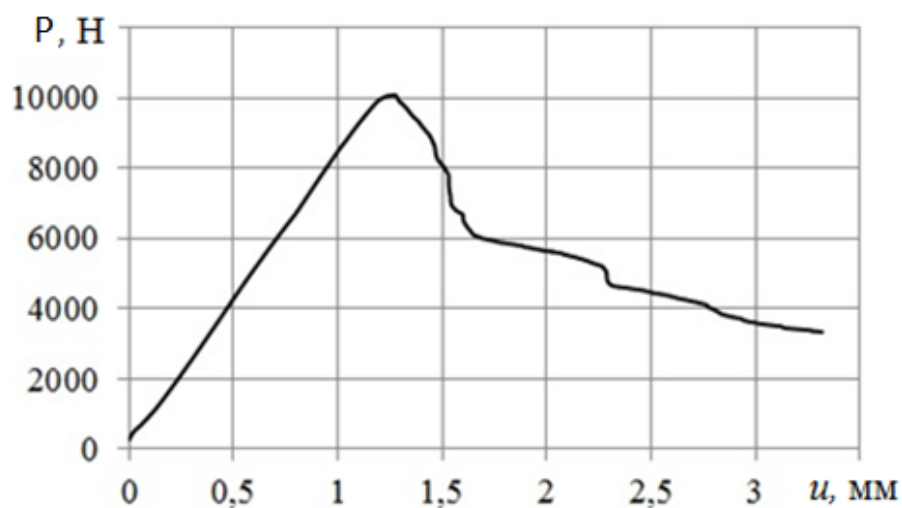


Рис. 4.9. Типовая диаграмма нагружения образцов-панелей при испытаниях на сжатие

Характерный вид разрушения образцов-панелей показан на рисунке 4.10. При разрушении образцов-панелей с продольным расположением заполнителя происходит локальная потеря устойчивости силовых оболочек с их последующим отслоением от заполнителя (рис. 4.11, а). При разрушении образцов с поперечным расположением заполнителя происходит локальная потеря устойчивости с последующим складыванием каналов заполнителя без отслоения силовых оболочек (рис. 4.11, б).

Таблица 4.3. Средние значения разрушающей нагрузки образцов-панелей при испытании на сжатие

Материал	Среднее значение разрушающей нагрузки, кН			
	при 20° С		при 150° С	
	Вдоль оси каналов	Поперек оси каналов	Вдоль оси каналов	Поперек оси каналов
Стеклопластик	65,3±4,7	14,1±0,6	21,6±2,0	5,4±0,9
Углепластик	48,1±5,7	20,3±1,7	13,6±1,8	5,5±1,3

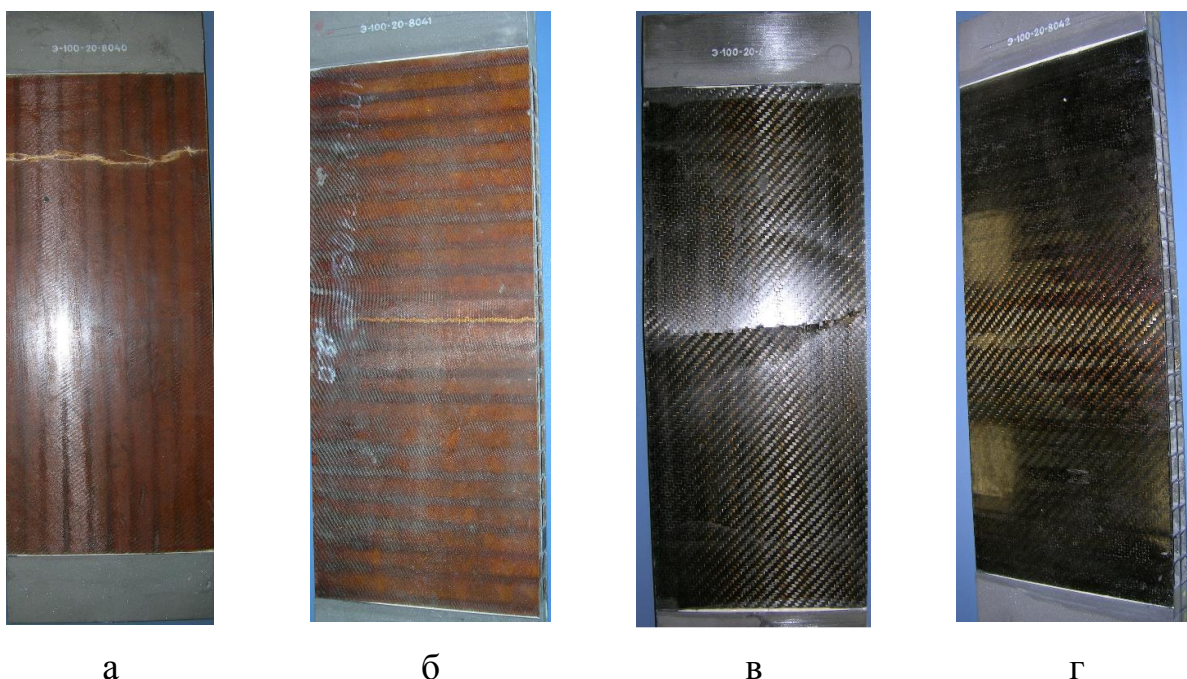


Рис. 4.10. Характерный вид разрушения образцов-панелей из стекло- (а, б) и углепластиков (в, г) вдоль (а, в) и поперек (б, г) направления каналов заполнителя при испытаниях на сжатие

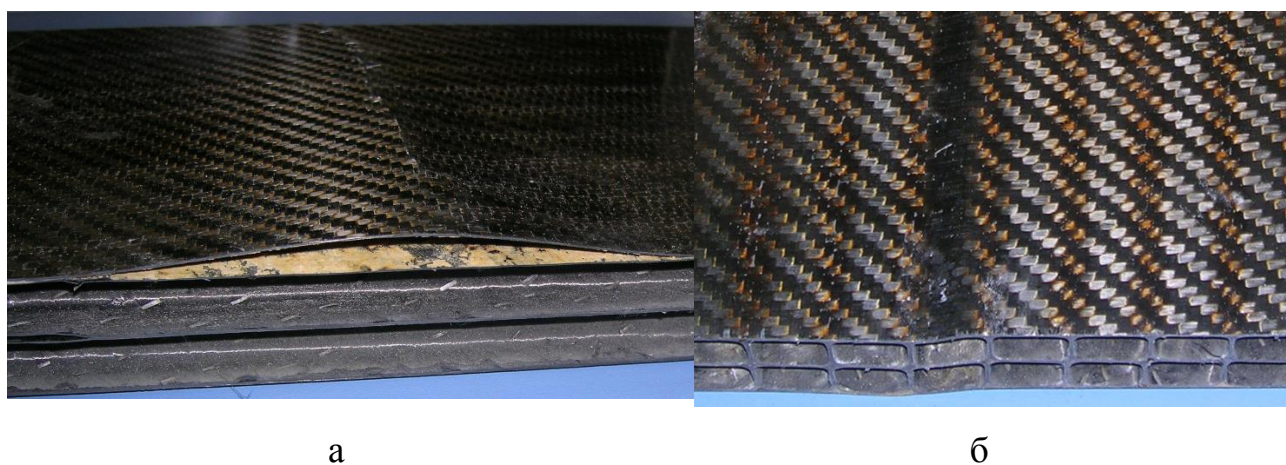


Рис. 4.11. Механизмы разрушения образцов-панелей с продольным (а) и поперечным (б) расположением каналов заполнителя

Результаты испытаний образцов-панелей из стекло- и углепластиков при сжатии приведены в таблице 4.3 и на рисунке 4.12 в виде средних значений разрушающей нагрузки и среднеквадратического отклонения.

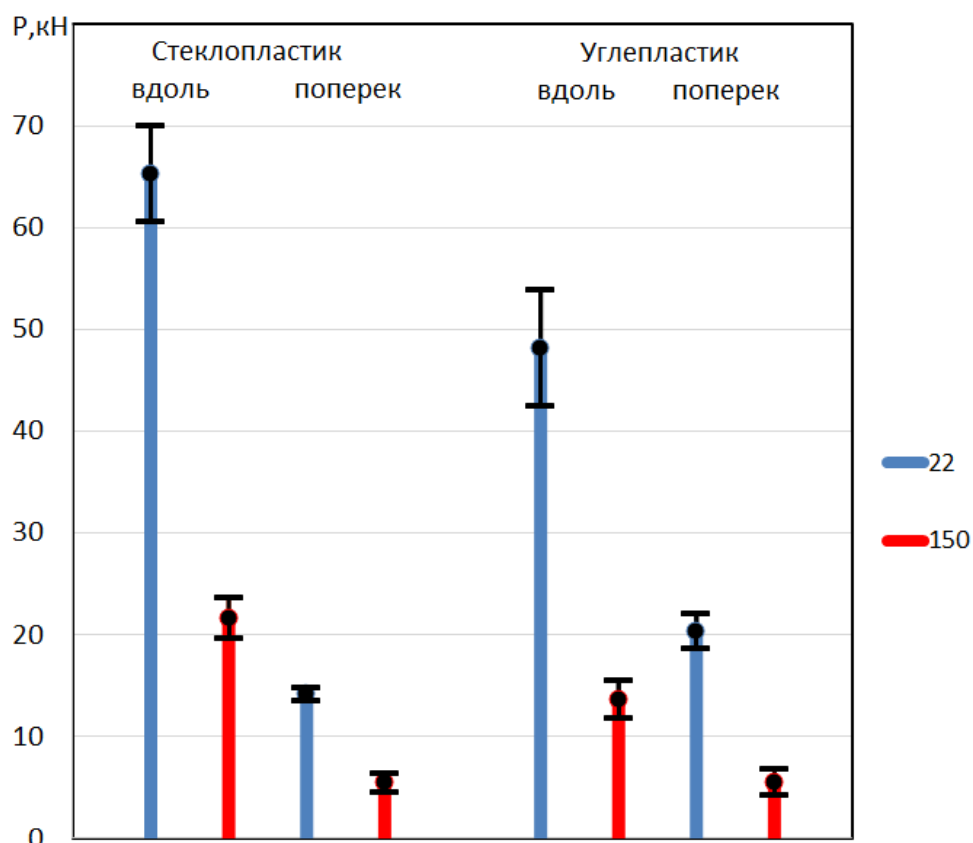


Рис. 4.12. Диаграмма распределения значений разрушающей нагрузки при испытаниях образцов-панелей на сжатие при нормальной (синие линии) и повышенной 150° С (красные линии) температурах

Таким образом, 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.

4.2.3. Испытание образцов-панелей на сдвиг

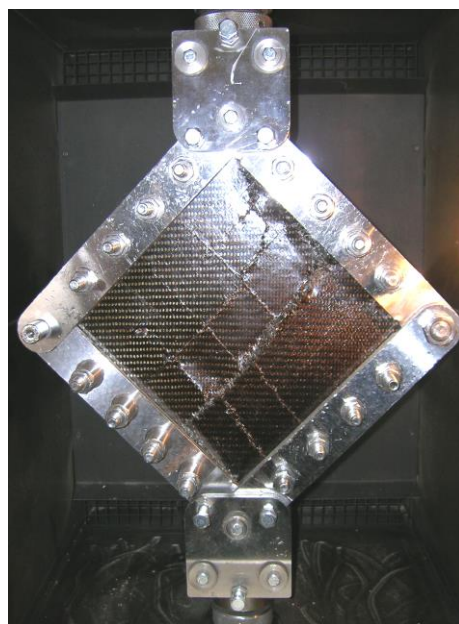
Испытания на сдвиг проводились по предложенной в п. 2.3 методике, при этом каналы заполнителя располагались под углом 45° к оси приложения

нагрузки. Было испытано по 5 образцов для стекло- и углепластика при нормальной и повышенной (100° С) температурах.

Разрушение образцов происходило вблизи металлических накладок, что характерно для данного метода нагружения [124, 126], с последующим отслоением силовых оболочек (рис. 4.13).



а



б

Рис. 4.13. Характерный вид разрушения образцов-панелей из стекло- (а) и углепластиков (б) при испытаниях на сдвиг

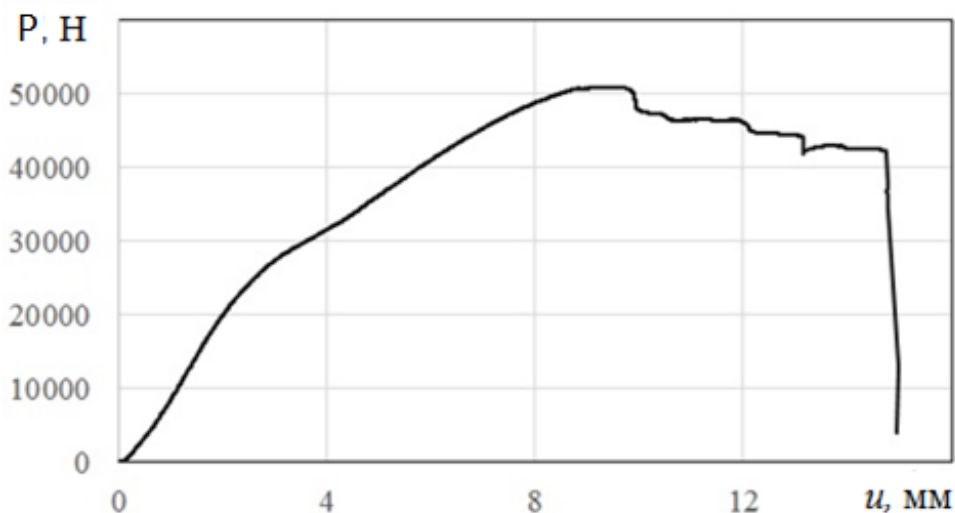


Рис. 4.14. Типовая диаграмма нагружения образцов-панелей при испытании на сдвиг

Типовая диаграмма нагружения представлена на рисунке 4.14. Ниспадающий участок на диаграмме объясняется процессами структурного разрушения композитов [28, 29, 50]. Результаты испытаний на сдвиг представлены в таблице 4.4 и на рис. 4.15 в виде средних значений разрушающей нагрузки с интервалами разброса.

Таблица 4.4. Средние значения разрушающей нагрузки образцов-панелей при испытании на сдвиг

Материал	Среднее значение разрушающей нагрузки, кН	
	при 20°C	при 100°C
Стеклопластик	44,8±3,1	35,3±3,7
Углепластик	48,7±2,5	37,5±2,8

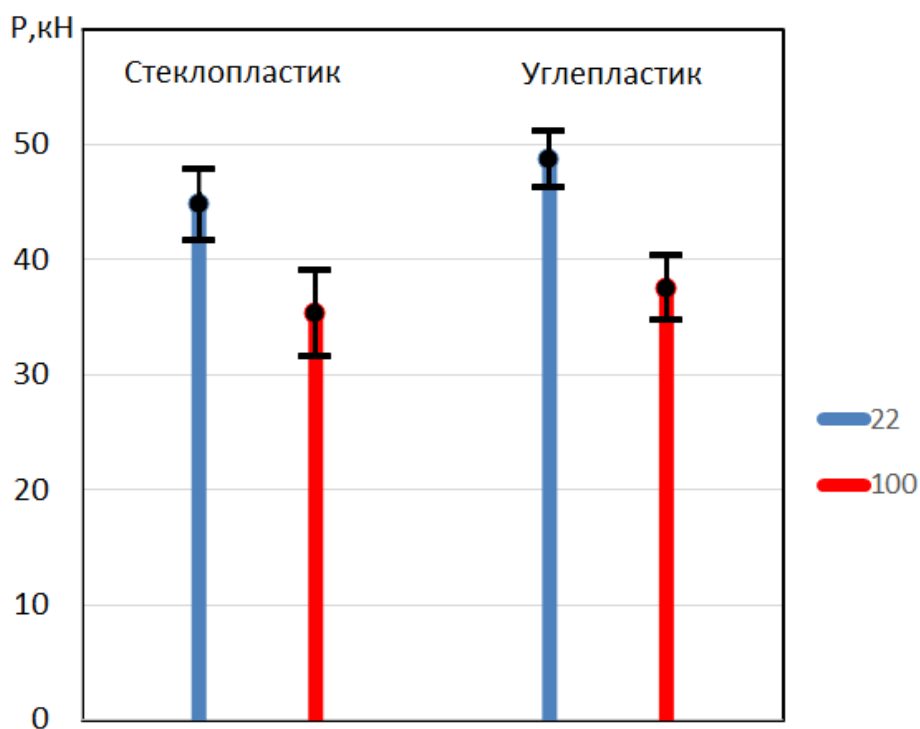


Рис. 4.15. Диаграмма распределения значений разрушающей нагрузки при испытаниях образцов-панелей на сдвиг при нормальной (синие линии) и повышенной 100° С (красные линии) температурах

При проведении испытаний при повышенной (100° С) температуре на сдвиг, происходит потеря несущей способности образцов-панелей из стеклопластика на 21% и углепластика на 23%.

Таким образом, в параграфе 4.2. отработаны методики проведения механических испытаний, которые были предложены в параграфе 2.3, на полунатурных образцах-панелях при нормальных и повышенных температурах. Проведена оценка влияния повышенных температур на несущую способность элементов конструкции при растягивающем, сжимающем и сдвиговом нагружении.

4.3. Экспериментальное исследование эффективности локального ремонта в конструкциях из полимерных волокнистых композиционных материалов

В параграфе приведены результаты экспериментальных исследований по оценке остаточной статической прочности типичных конструктивных элементов композитных конструкций авиационных газотурбинных установок – трехслойных композитных панелей с коробчатым (трубчатым) заполнителем, с дефектами типа сквозного пробоя. Данный вид дефектов неоднократно наблюдался в процессе эксплуатации двигателей. Площадь дефекта, как правило, составляет несколько квадратных сантиметров, что превышает характерные размеры элементов структуры композита, но значительно меньше характерных размеров детали или узла. В настоящее время для ремонта таких конструкций в полевых условиях разработана технология и комплект оборудования. При этом используется технология замещения поврежденных слоев с использованием материалов совместимых с материалами поврежденной конструкции, с обеспечением необходимой температуры и давления для приклеивания ремонтных слоев.

Целью проведения экспериментальных исследований является оценка возможности восстановления прочностных свойств образцов конструктивно подобных элементов звукопоглощающих панелей, которые являются

упрощенной моделью реальной конструкции. Конструктивно подобные элементы изготовлены из серийных материалов по серийной технологии из препрега стеклотекстолита ВПС-33.

В параграфе рассматриваются образцы панелей звукопоглощающего контура (ЗПК) с трубчатым наполнителем. Схема строения образцов показана на рисунке 4.16. Трубчатый наполнитель с продольным расположением трубок и внешние упрочняющие слои изготовлены из стеклотекстолита ВПС-33 по серийным режимам формования. Дефект в центральной части панели изготовлен искусственно.

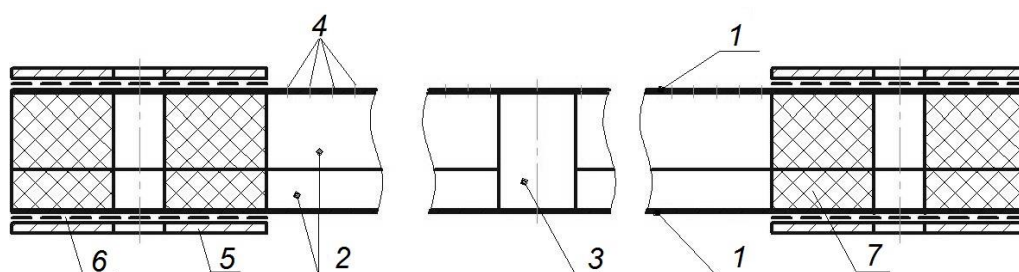


Рис. 4.16. Схема строения образца-панели с перфорацией: 1 – силовая оболочка; 2 – наполнитель; 3 – ремонтная зона; 4 – перфорация силовой оболочки; 5 – стальные накладки на захватные части образца; 6 – клеевой слой; 7 – уплотнитель

Размер дефекта выбран из расчета, чтобы длина дефекта равнялась половине ширины образца-панели. Для проведения исследований был выбран наиболее сложный для реализации ремонта дефект – сквозной пробой конструкции. Образцы-панели изготовлены на базе Научно-образовательного центра авиационных композиционных технологий ПНИПУ. На рисунке 4.17 приведены эскизы образцов-панелей ЗПК с размерами и формой дефекта для испытаний на растяжение и сжатие.

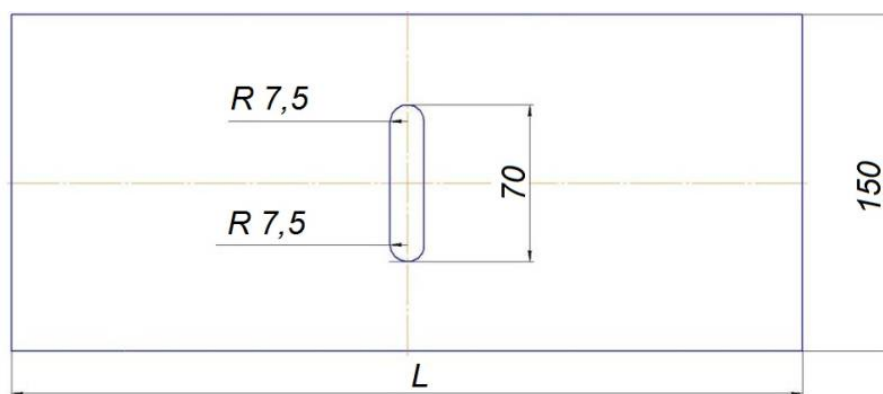


Рис. 4.17. Эскизы образцов-панелей с характерными размерами, на растяжение $L=350\text{мм}$, на сжатие $L=450\text{мм}$

Сквозной пробой оболочки характеризуется повреждением всех армирующих слоев детали, возникшим в результате эксплуатации. Принцип ремонта заключается в удалении и послойном замещении поврежденных слоев материала на ремонтные с соблюдением направления основы, а также добавлением двух дополнительных слоев поверх ремонтных с обеих сторон образца. Схематично ремонт сквозного пробоа представлен на рисунке 4.18. Перфорация в зоне ремонта не восстанавливается.

Замещающие и дополнительные слои выполнены из стеклоткани Т-10-14 и связующего К-300-61. Размеры и направление основы замещающих слоев соответствуют размерам и направлению основы поврежденных слоев.

Для ремонта используется специализированное оборудование ACR3 Hot Bonder. К основным техническим особенностям оборудования Hot Bonder относятся возможность осуществлять ремонт конструкций, не снимая их с летательного аппарата, что позволяет снижать затраты и сокращать цикл выполнения ремонта, позволяет вести контроль процесса ремонта в реальном времени. Hot Bonder имеет возможность программировать режимы ремонтно-восстановительных работ – всего 25 программ, также имеется возможность записи параметров ремонтного цикла на флеш-карту или на бумагу с помощью встроенного принтера [5].

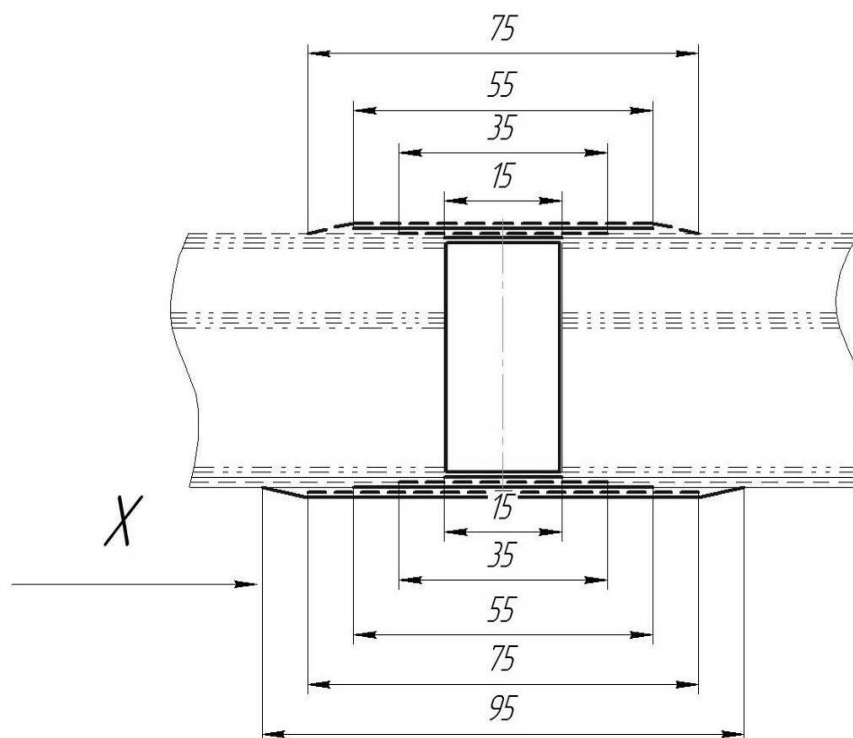


Рис. 4.18. Схема ремонта сквозного пробоя (дефекта) образца:

- слой стеклоткани Т-10-14, направление основы вдоль оси X;
- слой стеклоткани Т-10-14, направление вдоль основы – не регламент.;
- слой препрега ВПС-33, направление основы вдоль оси X;
- - - - - слой препрега ВПС-33, направление основы поперек оси X;
- · · · · - слой препрега ВПС-33, намотка лентой шириной 30мм, допустимый нахлест не более 3 мм, зазоры не допускаются

Принцип работы прибора основан на нагреве места ремонта гибким силиконовым нагревателем, управляемым термоконтроллером по заданной программе с возможностью ступенчатого подъема температуры с заданной скоростью и выдержкой с одновременным созданием вакуума с помощью эжектора и электрического насоса.

При проведении ремонта использовался силиконовый нагреватель без создания вакуума, в связи с тем, что образец выполнен с перфорацией и зоны ремонта находятся с двух сторон образца. Формование замещающих слоев

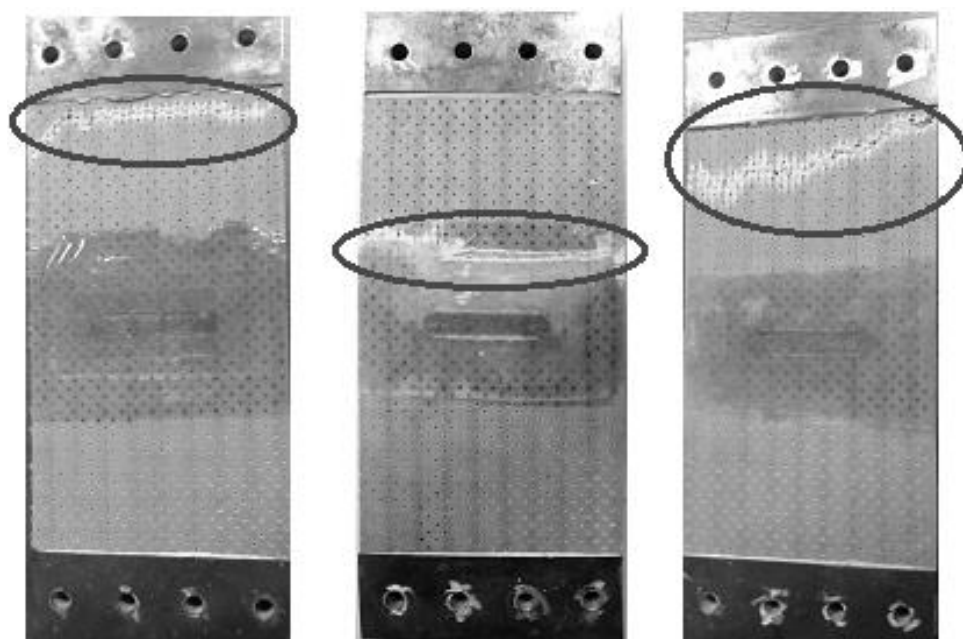
проводилось контактным методом с удельным давлением 0.1 кгс/см^2 . Отверждение проводилось при температуре 60° в течении 10 часов.

Методика определения предела прочности при одноосном растяжении-сжатии образца-панели включает в себя установку и закрепление образца-панели в специальное приспособление, измерение разрушающей нагрузки в процессе испытаний, а также обработка получаемых из испытаний, экспериментальных данных [32, 49].

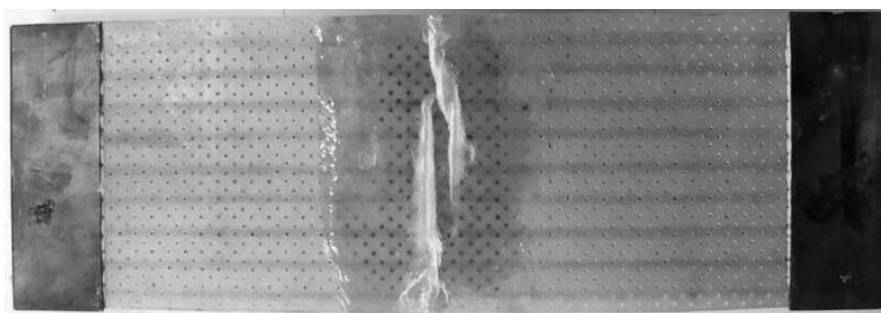
Испытания образцов-панелей ЗПК, выполненных из стеклопластика ВПС-33 с зоной ремонта, на растяжение и сжатие проводились согласно методикам, предложенным в п. 2.3. Скорость перемещения подвижной траверсы составляла 5мм/мин при испытаниях на растяжении и 2мм/мин при испытаниях на сжатие.

Всего было испытано по 3 образца на растяжение и сжатие – без дефекта, с дефектом и с отремонтированным дефектом. На рисунке 4.19 представлены виды разрушения образцов-панелей с зоной ремонта после испытаний на растяжение и на сжатие. Результаты испытаний образцов-панелей на растяжение и сжатие без дефекта и с ремонтом дефектной зоны сведены в таблицу 4.5.

На рисунке 4.20 приведены диаграммы нагружения образцов-панелей на растяжение и сжатие. Процесс нагружения образцов-панелей при испытании на растяжение по достижении нагрузки 20 кН начинал сопровождаться характерными щелчками. По достижению предельных нагрузок происходил мгновенный разрыв перфорированной силовой оболочки с последующим отрывом силовой оболочки без перфорации и трубчатого заполнителя. Разрушение образцов-панелей с зоной ремонта дефекта на растяжение происходило у двух образцов вне зоны ремонта, у третьего – по краю зоны ремонта (рис. 4.19, а). Данный характер разрушения позволяет предположить, что «залеченный» дефект не провоцирует разрушение в зоне концентратора.



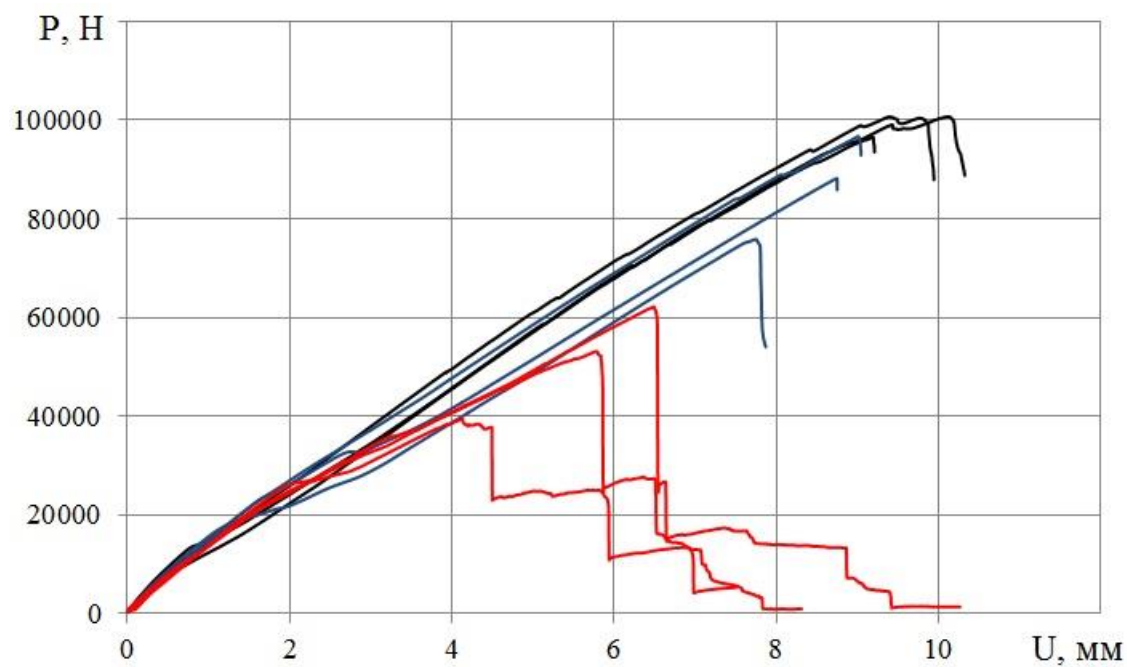
а



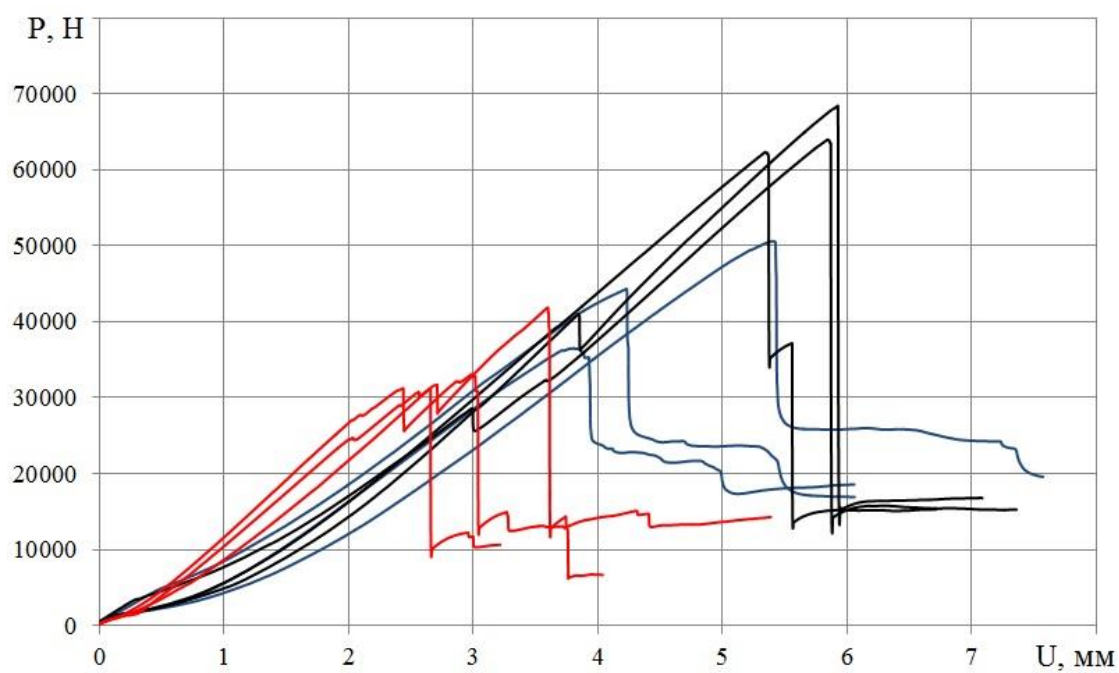
б

Рис.4.19. Виды разрушения образцов-панелей при испытаниях на растяжение (а) и сжатие (б)

При испытании на сжатие у 1 и 3 образца без дефекта на кривых нагружения наблюдаются срывы, которые сопровождались характерным треском и объясняются локальным разрушением клеевого соединения силовых оболочек с трубчатым наполнителем и последующим за этим локальной потери устойчивости силовой оболочки и смятием.



а



б

Рис. 4.20. 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

Разрушение образцов-панелей с зоной ремонта происходило в области дефекта у всех образцов, т.к. трубчатый наполнитель не восстанавливается, а зона дефекта является наиболее слабым местом сечения (рис. 4.19, б). Ниспадающие участки на диаграммах нагружения (рис. 4.20, б) объясняются процессами структурного разрушения с последующим смятием силовых оболочек и трубчатого наполнителя по всей длине сечения образцов-панелей [4, 28, 29, 51].

Таблица 4.5. Результаты испытаний на растяжение и сжатие полунатурных образцов-панелей из стеклопластика ВПС-33 с залеченным дефектом, без дефекта и с дефектом

№/п.п	Максимальная разрушающая нагрузка $R_{\max}$, кН	Удлинение при разрыве U , мм	Максимальная разрушающая нагрузка $R_{\max}$, кН	Удлинение при сжатии U , мм
	Растяжение образцов панелей без дефекта		Сжатие образцов панелей без дефекта	
1	100,7	9,4	68,4	5,9
2	100,7	10,1	62,3	5,3
3	96,5	9,2	63,9	5,8
	Растяжение образцов панелей с залеченным дефектом		Сжатие образцов панелей с залеченным дефектом	
1	96,7	9,0	44,3	4,2
2	75,8	7,8	36,5	3,8
3	88,2	8,8	50,6	5,4
	Растяжение образцов панелей с дефектом		Сжатие образцов панелей с дефектом	
1	39,5	8,3	33,1	3,0
2	53,1	7,5	31,2	2,6
3	62,2	10,3	41,8	3,6

По результатам экспериментов, приведенных в таблице 4.5, видно, 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. Для

сравнения в таблице 4.5 приведены результаты испытаний образцов панелей с дефектом.

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 без создания вакуума (НОЦ АКТ ПНИПУ).

Выводы по главе 4

1. Отработана методика учета жесткости нагружающей системы при испытаниях крупноячеистых композитов с использованием цифровой оптической видеосистемы и бесконтактного анализа эволюции полей перемещений и деформаций.
2. Отработаны методики и получены новые данные механических испытаний на одноосное растяжение, сжатие и сдвиг полунатурных образцов-панелей звукопоглощающего контура авиационного двигателя из стекло- и углепластиков при нормальных и повышенных температурах.
3. Получены новые данные о закономерностях процессов разрушения полунатурных образцов крупноячеистых композиционных материалов с коробчатым наполнителем.
4. Получены новые результаты исследования областей повреждений изделий и элементов конструкций из композиционных материалов на основе стеклопластика ВПС-33, а также эффективности восстановительных технологических операций.

5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ ФАКТОРОВ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ПОЛИМЕРНЫХ ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Особое внимание уделяется исследованию влияния внешних воздействующих факторов при эксплуатации конструкций из полимерных композитов авиационного назначения. Например, большое количество работ опубликованные сотрудниками ФГУП «ВИАМ» посвящены исследованию влияния атмосферных факторов [3, 10, 22, 23, 38, 52-55, 57-61, 78, 81, 84, 112-120 и др.], таких как – температура, влажность, солнечная радиация, циклическое изменение температуры, климатическое старение, тропический и морской климат и т.д., которые способствуют развитию дефектов и повреждений и за срок эксплуатации, а это часто несколько десятилетий, существенно снижают прочностные свойства композиционных материалов.

Помимо атмосферных факторов также необходимо исследовать влияния эксплуатационных загрязнений на свойства полимерных композитов, однако такие исследования опубликованы недостаточно полно.

Результаты отражены в следующих публикациях автора [68, 74, 171, 173].

5.1. Влияние загрязняющих эксплуатационных сред на механические свойства композитов

Основной задачей было провести оценку влияния загрязняющих сред на механические свойства полимерных волокнистых композиционных материалов. Для оценки влияния образцы композиционных материалов в течении месяца вымачивались в ваннах с загрязняющими эксплуатационными средами. После вымачивания проводились статические испытания на трехточечный изгиб и межслоевой сдвиг, образцы предоставлены ОАО «УНИИКМ» (Уральский НИИ

Композиционных материалов) и ОАО «Авиадвигатель» в рамках совместного выполнения НИР.

5.1.1. Испытания трехточечный изгиб образцов стекло- и углепластиков

Испытания проводились по ГОСТ 4648 и ГОСТ 25.604 на образцах стекло и углепластиков 6-ти рецептур. Шесть групп образцов, в каждой группе по 5 образцов, вымачивались в 5 различных загрязняющих средах: нефтяной растворитель (нефрас), масло МТЗ19А, топливо РТ, гидравлическая жидкость Skydrol и дистиллированная вода. Образцы вымачивались в специальных ваннах в течении одного месяца. Из испытаний определялись предел прочности и модуль упругости. Испытания проводились с постоянной скоростью перемещения траверсы 5мм/мин, прогиб образцов (ω) измерялся при помощи бесконтактного видеоэкстензометра. На рисунке 5.1 представлен характерный вид разрушения образцов стекло- и углепластика после испытания. Всего на трехточечный изгиб было испытано 165 образцов.

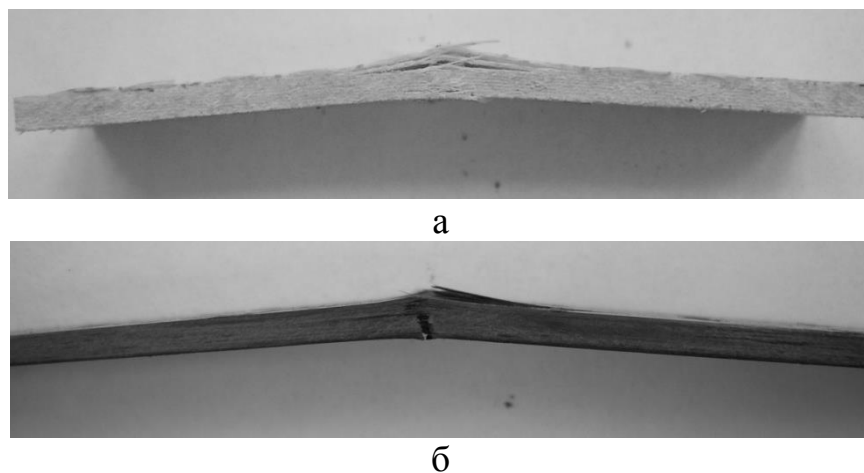


Рис. 5.1. Характерный вид разрушения образцов стекло- (а) и углепластиков (б) после испытания

На рисунке 5.2 представлены типовые диаграммы образцов при испытаниях на статический изгиб. В таблицах 5.1 и 5.2 представлены результаты испытаний (в условных единицах) для стекло и углепластиков. За единицу

приняты средние значения (по пяти образцам) механических характеристик стекло- и углепластиков без вымачивания. Образцы стеклопластиков СП-97К в гидравлической жидкости Skydrol, топливе РТ и в масле МТ319А-2 не вымачивались.

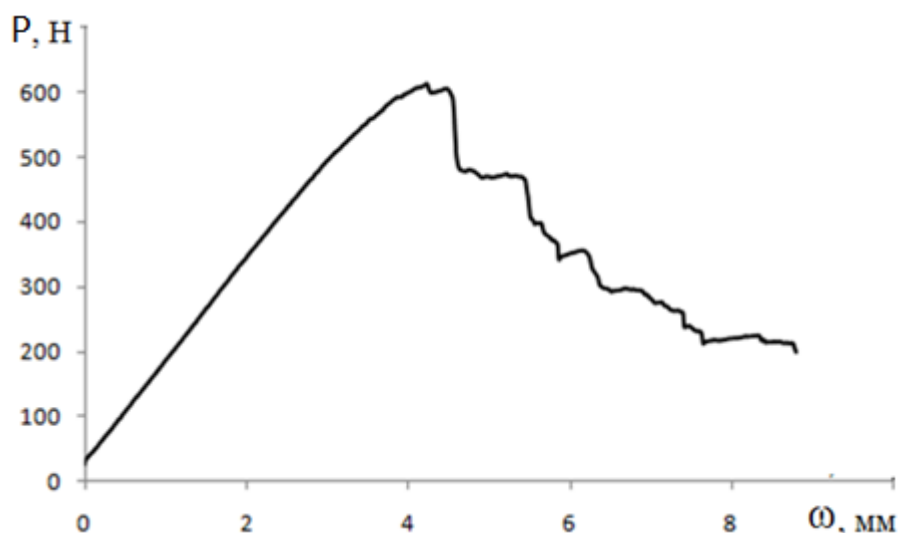


Рис. 5.2. Типовые диаграммы при испытаниях на трехточечный изгиб

Таблица 5.1. Средние относительные значения предела прочности при испытаниях на трехточечный изгиб

Материал среда	Без вымачивания	Гидравлическая жидкость Skydrol	Нефрас	Вода	Топливо РТ	Масло МТ319А-2
Стеклопластик ВПС-33	1 V=1,25%	1,028 V=2,60%	1,078 V=5,43%	1,090 V=4,05%	1,076 V=5,33%	1,069 V=5,48%
Стеклопластик ВПС-34	1 V=4,34%	1,072 V=4,50	1,061 V=3,90%	1,046 V=4,97%	1,038 V=7,07%	1,086 V=3,98%
Стеклопластик СП-97К	1 V=2,15%	-	0,961 V=1,85%	0,889 V=6,75%	-	-
Стеклопластик ЭНФБ-Т-10- 14	1 V=5,12%	0,994 V=3,68%	0,958 V=6,58%	0,936 V=3,83%	0,982 V=1,42%	0,960 V=4,05%
Углепластик ПУ-4э/0,1-2м	1 V=6,11%	1,120 V=5,80%	1,034 V=3,40	1,057 V=4,46%	1,078 V=6,36%	1,111 V=4,79%
Углепластик ЭНФБ 4510- НТС-0,2-40	1 V=4,45%	1,192 V=6,91%	1,226 V=5,66%	1,165 V=2,97%	1,127 V=6,37%	1,115 V=9,5%

V – коэффициент вариации, %

Таблица 5.2. Средние относительные значения модуля упругости при испытаниях на трехточечный изгиб

Материал среда	Без вымачивания	Гидравлическая жидкость Skydrol	Нефрас	Вода	Топливо РТ	Масло МТ319А-2
Стеклопластик ВПС-33	1 V=6,41%	1,075 V=2,78%	0,986 V=3,22%	1,010 V=2,31%	1,053 V=4,96%	1,058 V=3,31%
Стеклопластик ВПС-34	1 V=10,32%	1,122 V=1,41%	1,041 V=7,34%	1,063 V=3,49%	1,041 V=7,34%	1,063 V=9,54%
Стеклопластик СП-97К	1 V=3,13%	-	0,866 V=6,72%	0,913 V=6,45%	-	-
Стеклопластик ЭНФБ-Т-10- 14	1 V=1,85%	1,018 V=2,33%	0,908 V=10,91%	0,904 V=6,55%	0,957 V=3,03%	0,907 V=7,35%
Углепластик ПУ-4э/0,1-2м	1 V=5,48%	1,108 V=9,06%	1,096 V=5,37%	1,062 V=3,46%	1,147 V=5,81%	1,204 V=9,06%
Углепластик ЭНФБ 4510- НТС-0,2-40	1 V=7,53%	1,149 V=6,76%	1,116 V=4,97%	1,165 V=5,97%	1,180 V=5,99%	1,178 V=8,77%

V – коэффициент вариации, %

Из таблицы 5.1 видно, 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 Skydrol и в масле МТ319А-2 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%.

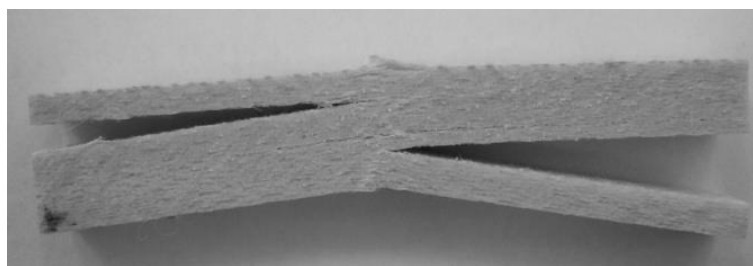
Изменение средних значений модуля упругости после вымачивания в загрязняющих средах для стеклопластиков ВПС-33, ВПС-34 и ЭНФБ-Т-10-14 попадает в статистический разброс. Для стеклопластика СП-97К происходит

снижение модуля упругости при вымачивании образцов в нефрасе на 13%, в дистиллированной воде на 9%. Для углепластика ПУ-4э/0,1-2м происходит увеличение средних значений модуля упругости при вымачивании образцов в гидравлической жидкости Skydrol и нефрасе на 10%, в топливе РТ на 14,7%, в масле МТЗ19А-2 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%.

5.1.2. Испытания на межслоевой сдвиг (метод изгиба короткой балки) образцов стекло- и углепластиков

Испытания проводились по ОСТ 92-1472-78 и ASTM D 2344 на образцах стекло и углепластиков 6-ти рецептур. Геометрические размеры образцов соответствовали рекомендациям ОСТ 92-1472-78. Группы образцов по 5 образцов для каждого вида материала вымачивались в 5 различных загрязняющих средах: нефрас, масло МТЗ19А, топливо РТ, гидравлическая жидкость Skydrol и дистиллированная вода. Всего на межслоевой сдвиг было испытано 165 образцов. Образцы вымачивались в специальных ваннах в течении одного месяца. Из испытаний определялись значения прочности при межслоевом сдвиге. Испытания проводились с постоянной скоростью перемещения траверсы 1мм/мин.

На рисунке 5.3 представлены образцы стекло и углепластика после испытания. Разрушение образцов происходило по механизму межслоевого сдвига. На рисунке 5.4 представлены типовые диаграммы нагружения образцов при испытаниях на сдвиг короткой балки.



а



б

Рис. 5.3. Характерный вид разрушения образцов стекло- (а) и углепластиков (б) после испытания на межслоевой сдвиг

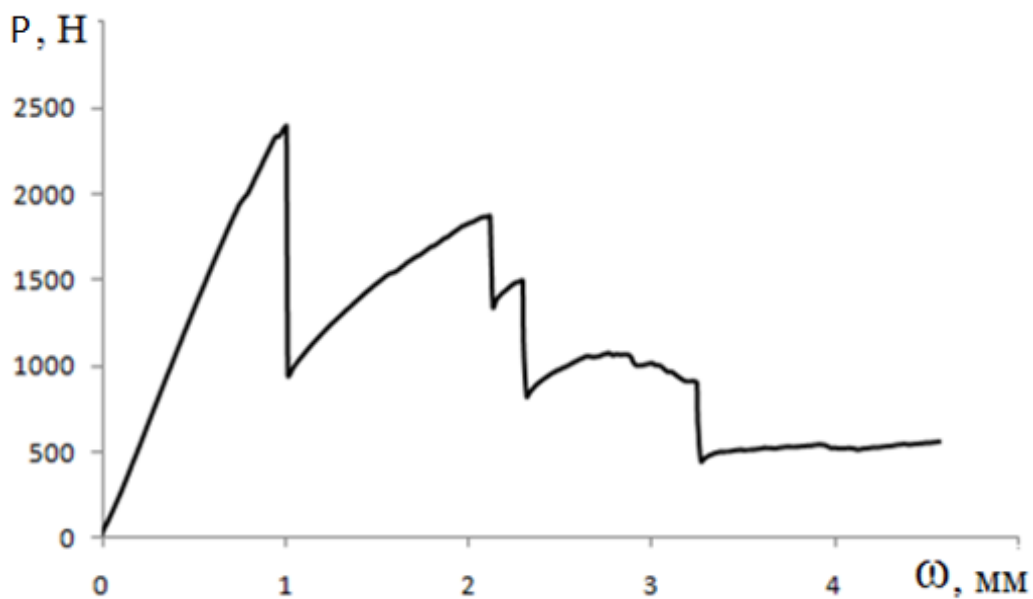


Рис. 5.4. Типовая диаграмма при испытаниях на межслоевой сдвиг короткой балки

В таблице 5.3 представлены результаты испытаний (в условных единицах) для стекло- и углепластиков. Аналогично, как и в результатах испытаний на

трехточечный изгиб, за единицу приняты средние значения (по пяти образцам) механических характеристик стекло- и углепластиков без вымачивания.

Таблица 5.3. Прочность при межслоевом сдвиге в условных единицах

Материал среда	Без вымачивания	Гидравлическая жидкость Skydrol	Нефрас	Вода	Топливо РТ	Масло МТ319А-2
Стеклопластик ВПС-33	1 V=3,54%	0,998 V=1,85%	0,963 V=3,20%	0,985 V=2,41%	0,973 V=3,30%	0,980 V=6,04%
Стеклопластик ВПС-34	1 V=3,23%	0,953 V=3,84%	1,037 V=2,18%	0,995 V=3,78%	0,997 V=6,97%	1,036 V=5,37%
Стеклопластик СП-97К	1 V=5,16%	-	1,122 V=3,03%	0,786 V=8,25%	-	-
Стеклопластик ЭНФБ-Т-10-14	1 V=2,33%	0,936 V=3,14%	0,974 V=2,21%	0,944 V=1,99%	0,920 V=4,71%	0,974 V=2,64%
Углепластик ПУ-4э/0,1-2м	1 V=1,90%	0,923 V=1,48%	0,991 V=5,44%	0,945 V=4,63%	0,970 V=2,61%	0,944 V=3,10%
Углепластик ЭНФБ 4510- НТС-0,2-40	1 V=5,76%	0,991 V=4,33%	1,036 V=2,95%	0,993 V=2,63	1,015 V=2,81%	1,002 V=3,70%

V – коэффициент вариации, %

Из таблицы 5.3 следует, 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 дистиллированной воде – снижение на 22%.

5.2. Влияние загрязняющих эксплуатационных сред на механические свойства полунатурных образцов-панелей

Нередко поведение композиционного материала в конструкции отличается от поведения отдельных компонентов, поэтому для проведения оценочных

исследований необходимо проводить испытания не только на стандартных образцах, но и на конструктивно-подобных элементах. Испытания полунатурных образцов-панелей из композиционных материалов позволяют исследовать поведение материала в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным режимам.

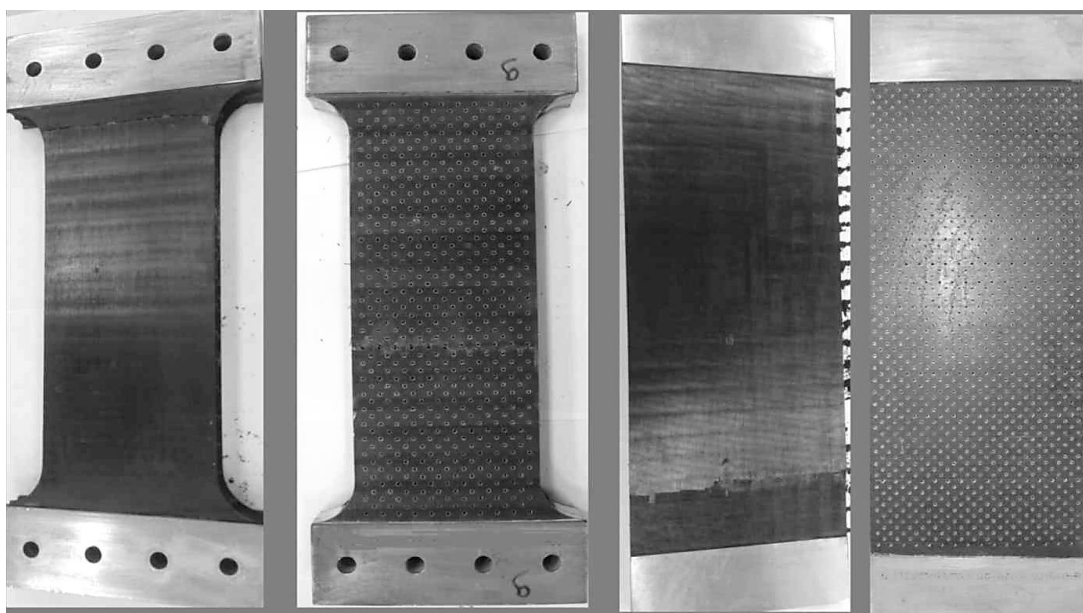
Для оценки влияния загрязняющих сред полунатурные образцы-панели из композиционных материалов в течении одного месяца вымачивались в ваннах со смешанными загрязняющими средами: нефрас, масло МТЗ19А, топливо РТ, гидравлическая жидкость Skydrol и дистиллированная вода. После вымачивания проводились статические испытания на растяжение и сжатие полунатурных образцов – панелей ЗПК.

Испытания проводились по предложенным в п. 2.5 и апробированных в п.п. 4.2 и 4.3 методикам, на образцах-панелях с трубчатым наполнителем стекло- и углепластиков 6-ти рецептур. Размеры образцов приведены в главе 4. Испытания проводились с постоянной скоростью перемещения траверсы 5мм/мин при растяжении и 2мм/мин при сжатии. Для каждого вида материала было испытано по 10 полунатурных образцов-панелей. На рисунке 5.5 представлены образцы-панели для испытаний на растяжение и сжатие из стекло- и углепластиков во время испытаний. Всего было испытано 120 образцов-панелей на растяжение и 120 образцов-панелей на сжатие. Типовые диаграммы нагружения полунатурных образцов-панелей при испытаниях на растяжение и сжатие приведены на рисунке 5.6.

Срывы на кривой (рис. 5.6, а) сопровождались характерным треском и объясняются локальным разрушением, отслоением силовой обшивки от трубчатого наполнителя. Разрушение образцов-панелей происходило по местам перехода скруглений в рабочую зону.

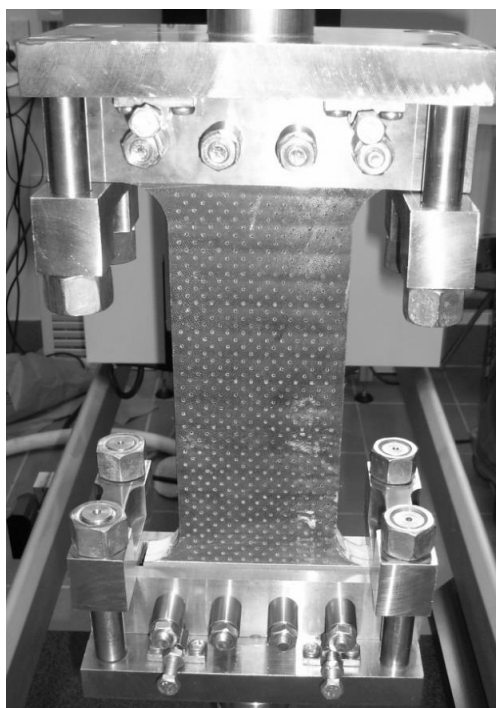
При испытании образцов-панелей на сжатие происходит разрушение клеевого соединения силовых оболочек с наполнителем и последующая за этим локальная потеря устойчивости силовой оболочки. Ниспадающие участки на диаграмме (рис. 5.6, б) объясняются процессами структурного разрушения

композитов. В таблицах 5.4 и 5.5 приведены результаты статических испытаний образцов панелей при растяжении и сжатии соответственно.

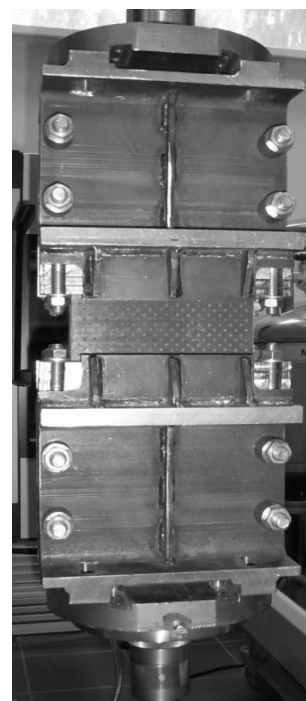


а

б

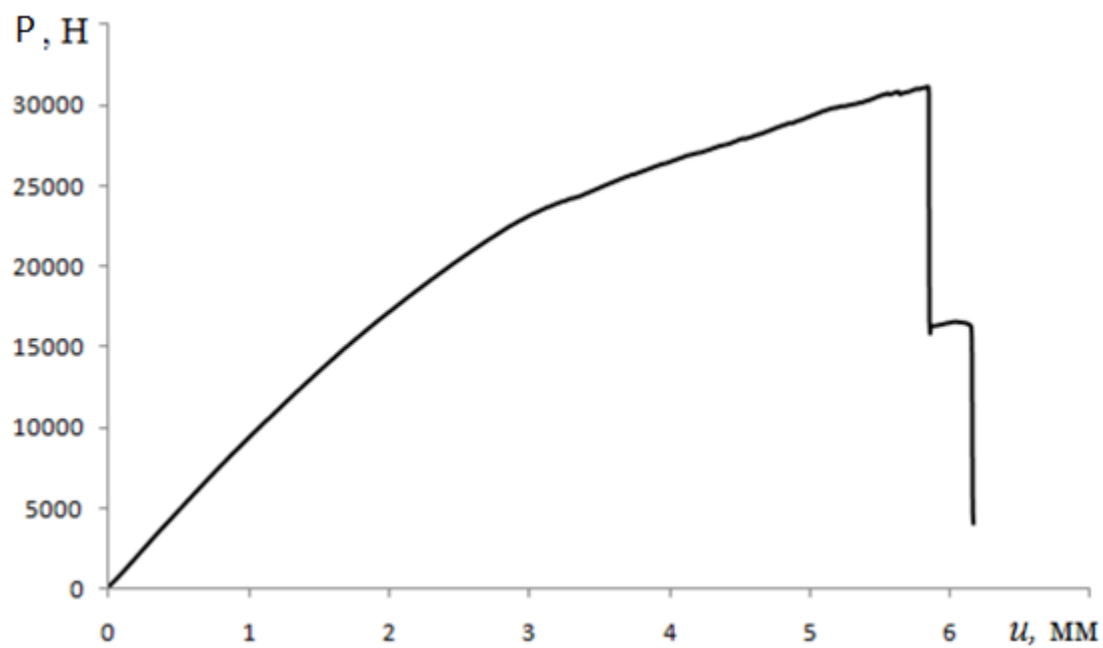


в

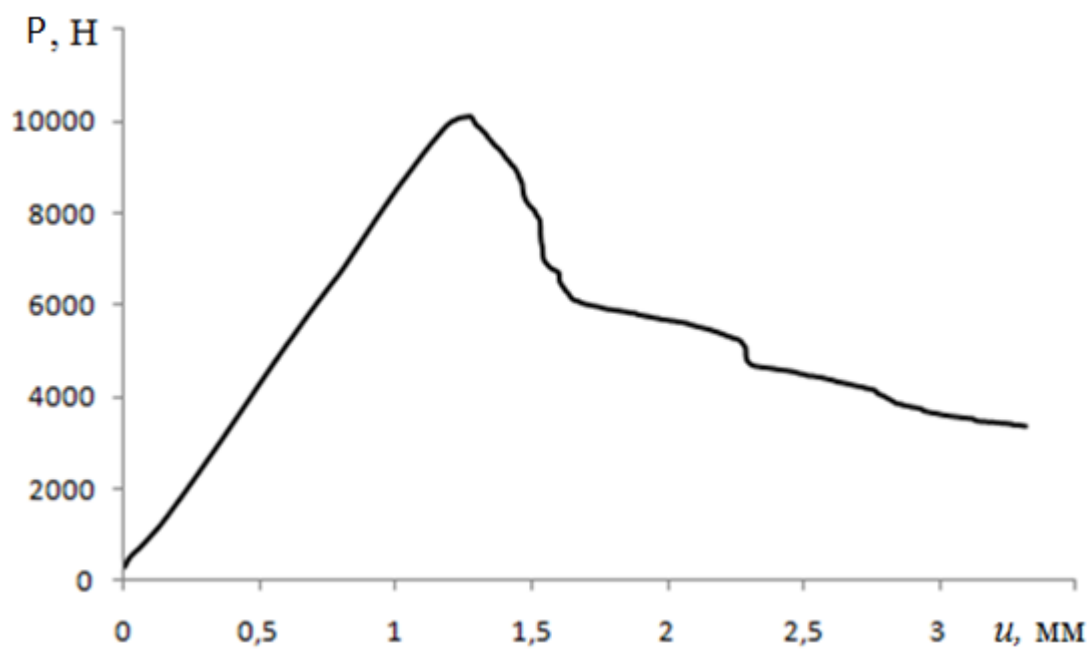


г

Рис. 5.5. Внешний вид образцов-панелей для статических испытаний на одноосное растяжение (а), сжатие (б); образцы-панели, закрепленные в специальной оснастке во время испытаний на растяжение (в), сжатие (г)



а



б

Рис. 5.6. Типовые диаграммы при испытаниях на растяжение (а) и сжатие (б) образцов-панелей

Таблица 5.4. Средние относительные значения разрушающей нагрузки при растяжении образцов-панелей в условных единицах

Материал среда	Без вымачивания	Коэф. вариации, %	Смешанная жидкость (масло, топливо, нефрас и т.д.)	Коэф. вариации, %
Стеклопластик ВПС-33	1	2,3	1,025	3,4
Стеклопластик ВПС-34	1	4,3	1,015	5,9
Стеклопластик СП-97К	1	8,3	0,967	6,1
Стеклопластик ЭНФБ-Т-10-14	1	6,9	1,058	5,34
Углепластик ПУ-4э/0,1-2м	1	8,4	1,112	10,44
Углепластик ЭНФБ 4510-NTS-0,2-40	1	9,4	1,113	9,31

Таблица 5.5. Средние относительные значения разрушающей нагрузки при сжатии образцов-панелей в условных единицах

Материал среда	Без вымачивания	Коэф. вариации, %	Смешанная жидкость (масло, топливо, нефрас и т.д.)	Коэф. вариации, %
Стеклопластик ВПС-33	1	7,3	1,136	7,9
Стеклопластик ВПС-34	1	8,4	1,054	7,0
Стеклопластик СП-97К	1	7,0	1,064	9,2
Стеклопластик ЭНФБ-Т-10-14	1	9,9	1,216	4,9
Углепластик ПУ-4э/0,1-2м	1	7,9	0,955	8,4
Углепластик ЭНФБ 4510-NTS-0,2-40	1	9,2	1,246	8,1

По результатам испытаний образцов-панелей (табл. 5.4 и 5.5) можно сделать вывод, что вымачивание в смешанной 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-NTS-0,2-40 – на 24,6%. Для

остальных материалов изменение средних значений не выходит за рамки статистического разброса.

Выводы по главе 5

1. Проведены экспериментальные исследования по оценке влияния загрязняющих эксплуатационных сред на механические свойства полимерных волокнистых композиционных материалов и элементов конструкций на основе результатов механических испытаний на трехточечный изгиб, межслоевой сдвиг, растяжения и сжатия. Получены новые данные о деградации механических свойств волокнистых полимерных композиционных материалов и свойств крупноячеистых композитов на основе стекло- и углепластиков при статических испытаниях на трехточечный изгиб, межслоевой сдвиг, растяжение и сжатие после воздействия (вымачивание 30 суток) загрязняющих эксплуатационных сред (топливо, гидравлическая жидкость, масло, нефрас, вода).
2. Экспериментально установлено, что при испытаниях стандартных образцов снижение предела прочности при изгибе после вымачивания в загрязняющих средах не превышает для стеклопластика СП-97К – 12%, для стеклопластика ЭНФБ-Т-10-14 – 7%. Снижение прочности при межслоевом сдвиге для стеклопластиков ВПС-33 и ВПС-34 не превышает 5%, для стеклопластика ЭНФБ-Т-10-14 и углепластика – 8%, для стеклопластика СП-97К – 22%.
3. При испытаниях на растяжение крупноячеистых полунатурных образцов-панелей из углепластиков ПУ-4э/0,1-2м и ЭНФБ 4510-НТС-0,2-40 выявлено увеличение средних значений несущей способности после вымачивания на 11%. При сжатии также отмечается увеличение средних значений несущей способности после вымачивания 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%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 заполнителем (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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адамов А.А. Численная обработка экспериментальных данных, полученных с использованием современных испытательных машин, для идентификации реологических моделей // Вычислительная механика сплошных сред. — 2013. — Т. 6. — № 2. — С. 131-139.
2. Адамов А.А., Лаптев М.Ю., Горшкова Е.Г. Анализ отечественной и зарубежной нормативной базы по механическим испытаниям полимерных композиционных // Конструкции из композиционных материалов. 2012. . — №3. — С. 72-77.
3. Анискевич К.К., Курземниекс А.Х., Янсон Ю.О. Исследование влияния длительного воздействия температуры и влаги на упругие свойства и структуру органопластика // Механика композиционных материалов. — 1985. — №4. — С. 620–623.
4. Аннин Б.Д., Жигалкин В.М. Поведение материалов в условиях сложного нагружения. Новосибирск: Издательство СО РАН, 1999. — 342с.
5. 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.
6. Аношкин А.Н., Захаров А.Г., Шустова Е.Н. Ячеистые наполнители звукопоглощающего контура авиационного двигателя // Научно-технический вестник Поволжья. — 2011. - №3. — С.25-29.
7. Аношкин А.Н., Зуйко В.Ю., Шипунов Г.С., Третьяков А.А. Технологии и задачи механики композиционных материалов для создания лопатки спрямляющего аппарата авиационного двигателя // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. — 2014. — № 4. — С. 5-44.

8. Аношкин А.Н., Ташкинов А.А. Нестационарные процессы накопления повреждений композитных фланцев при циклических нагрузках // Механика композит. материалов. – 1997 – Т. 33, № 5 – С. 636-643.
9. Аношкин А.Н., Ташкинов А.А., Грицевич А.М. Прогнозирование несущей способности композитных фланцев корпусных деталей авиадвигателей // Механика композит. материалов. – 1997 – Т. 33, – № 3 – С. 360-369.
10. Антипов В.В., Старцев О.В., Сенаторова О.Г. Закономерности влагопереноса в СИАЛах // Коррозия: материалы, защита. – 2012. – №3. – С. 13–18.
11. Антюфеева Н.В., Столянков Ю.В., Исходжанова И.В. Исследование и оценка свойств полимерных композиционных материалов по методикам, гармонизированным с международными стандартами // Конструкции из композиционных материалов. — 2013. — №3. — С. 41–45.
12. 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.
13. Бабушкин А.В., Козлова А.В., Лобанов Д.С. Влияние степени наполнения арматурой, предварительного циклического нагружения и температуры на механические характеристики волокнистых полимерных композиционных материалов: учебное пособие — Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. - 51 с. — ISBN 978-5-398-00928-6.
14. 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.
15. Белл Ф.Дж. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел: В 2-х частях. Часть 1. Малые деформации: Пер. с англ./ Под ред. А.П. Филина. – М. Наука, 1984. – 600с.

16. Белл Ф.Дж. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел: В 2-х частях. Часть 2. Конечные деформации: Пер. с англ./ Под ред. А.П. Филина. – М. Наука, 1984. – 432с.
17. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. М.: Машиностроение. 1984. – 312 с.
18. Болотин В.В., Ефимов А.Е., Мезенцев Н.С., Шебунин И.В., Щугорев В.Н. Трещиностойкость композитных материалов на полимерных связующих при повышенных температурах // Механика композитных материалов. – 1988. - №5. – С.839-844.
19. Болотин В.В., Мурзаханов Г.Х., Щугорев В.Н. Влияние повышенных температур на удельную работу межслойного разрушения композитных материалов с полимерной матрицей // Механика композитных материалов. – 1990. – №6. – С.1033-1037.
20. Болотин В.В., Новичков Ю.Н. Механика многослойных конструкций. – М.: Машиностроение, 1980. – 375с.
21. Букеткин Б.В., Горбатовский А.А., Кисенко И.Д. Экспериментальная механика. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2004. – 136 с.
22. Булманис В.Н., Ярцев В.А., Кривонос В.В. Работоспособность конструкций из полимерных композитов при воздействии статических нагрузок и климатических факторов // Механика композитных материалов. – 1987. – №5. – С.915-920.
23. Вапиров Ю.М., Кривонос В.В., Старцев О.В. Интерпретация аномального изменения свойств углепластика КМУ-1у при старении в разных климатических зонах//Механика композиционных материалов. – 1994. – Т. 30. – №2. – С. 266–273.
24. Вильдеман В.Э. Закономерности и модели процессов накопления повреждений, закритического деформирования и структурного разрушения композиционных материалов // Вестник Пермского государственного технического университета. Динамика и прочность машин. – 2001. — №2. – С.37-44.

25. Вильдеман В.Э. О решениях упругопластических задач с граничными условиями контактного типа для тел с зонами разупрочнения // Прикладная математика и механика. – 1998. – Т. 62. – № 2. – С. 304–312.
26. 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.
27. 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.
28. Вильдеман В.Э., Соколкин Ю.В., Ташкинов А.А. Краевая задача механики деформирования и разрушения поврежденных тел с зонами разупрочнения // ПМТФ. — 1995. — №6. — С. 122–132.
29. 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.
30. Вильдеман В.Э., Третьяков М.П., Третьякова Т.В., Бульбович Р.В., Словигов С.В., Бабушкин А.В., Ильиных А.В., Лобанов Д.С., Ипатова А.В. Экспериментальные исследования свойств материалов при сложных термомеханических воздействиях / Под ред. В.Э. Вильдемана. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 204с. ISBN 978-5-9221-1374-8.
31. 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.

32. Вильдеман В.Э., Третьякова Т.В., Лобанов Д.С. Учёт жёсткости нагружающей системы при испытаниях полунатурных образцов крупноячеистого композиционного материала // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. — 2012. — № 2. — С.34-49.
33. Вознесенский В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. М.: Статистика. — 1974, 192с.
34. Волков С.Д. Проблема прочности и механика разрушения // Пробл. прочности. — 1978. — № 7. — С. 3–10.
35. Волков С.Д., Ставров В.П. Статистическая механика композитных материалов. – Минск: Изд-во БГУ, 1978. – 206с.
36. Вольмир А.С., Григорьевич Ю.П., Марьин В.А., Станкевич А.И. Сопротивление материалов. Лабораторный практикум: Учеб. Пособие для вузов. – 2-е изд., испр. – М.: Дрофа, 2004. – 352 с.
37. Воронцов А.Н., Мурзаханов Г.Х., Щугорев В.Н. Разрушение конструкций из композитных материалов по типу расслоений// Механика композитных материалов. – 1989. — №6. – С.1007-1023.
38. Голиков Н.И., Кириллов В.Н., Попов В.Н., Ефимов В.А., Барботько С.Л. Проведение натурных испытаний материалов в условиях холодного климата Якутии/В сб. докл. 3-го Евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата. Якутск. — 2006. — С. 57–60.
39. Гольдштейн Р.В., Морозов Н.Ф. Механика деформирования и разрушения наноматериалов и нанотехнологии. //Физическая мезомеханика, — 2007. — С. 17–30.
40. Гуняев Г.М., Кривонос В.В., Румянцев А.Ф., Железина Г.Ф. Полимерные композиционные материалы в конструкциях летательных аппаратов. Конверсия в машиностроении. — 2004. — №4 (65). — С.65-69.
41. Двоеглазов И.В., Халиулин В.И. К вопросу проведения экспериментальных исследований прочности складчатых заполнителей

- типа z-гофра на поперечное сжатие // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). — 2012. — № 5-2 (36). — С. 275-281.
42. Двоеглазов И.В., Халиулин В.И., Хиров П.А., Сунгатуллин Р.Н., Поляев А.В. Разработка технологического процесса изготовления композитной крупногабаритной панели // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. — 2013. — Т. 69. — № 1. — С. 46-49.
 43. Димитриенко Ю.И. Разрушение композитных материалов при высоких температурах и конечных деформациях // Механика композитных материалов. — 1992. — №1. — С.43-54.
 44. Елецкий А.В. Механические свойства углеродных наноструктур и материалов на их основе. //Успехи физических наук. — 2007 — Т.177 — №3 — С. 233–274.
 45. Железина Г.Ф. Особенности разрушения органопластиков при ударных воздействиях. Авиационные материалы и технологии. Юбилейный научно-технический сборник. —2012. — с. 272-277.
 46. Зилова Т.К., Петрухина Н.И., Фридман Я.Б. О закономерностях кинетики деформации в зависимости от податливости нагружения // Докл. АН СССР. — 1959. — Т. 124, № 6. — С. 1236–1239.
 47. Зилова Т.К., Фридман Я.Б. О механических испытаниях с переменной податливостью нагружения // Завод. лаборатория. — 1956. — Т. 22, № 6. — С. 712–717.
 48. Зорин В.А. Опыт применения композиционных материалов в изделиях авиационной и ракетно-космической технике // Конструкции из композиционных материалов. — 2011. — №4. — С. 44-59.
 49. 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 Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. — 2012. — № 2. — С.99-111.
50. Ильиных А.В., Вильдеман В.Э. Моделирование структуры и процессов разрушения зернистых композитов // Вычислительная механика сплошных сред. — 2012. — Т. 5, №4. — С. 443-451.
 51. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. — 2012. — №5. — С. 7–17.
 52. Каблов Е.Н., Кириллов В.Н., Жирнов А.Д., Старцев О.В., Вапиров Ю.М. Центры для климатических испытаний авиационных ПКМ //Авиационная промышленность. — 2009. — №4. — С. 36–46.
 53. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. Ч. I. Механизмы старения// Деформация и разрушение материалов. — 2010. — № 11. — С. 19-26.
 54. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. Ч. III. Значимые факторы старения // Деформация и разрушение материалов. — 2011. — № 1. — С. 34-40.
 55. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. Ч. II. Релаксация исходной структурной неравновесности и градиент свойств по толщине // Деформация и разрушение материалов. — 2010. — №12. — С. 40–46.
 56. Керштейн И.М., Ключников В.Д., Ломакин Е.В., Шестериков С.А. Основы экспериментальной механики разрушения. – М.: Изд-во Моск. Ун-та, 1989. – 140с.
 57. Кириллов В.Н., Ефимов В.А. Проблемы исследования климатической стойкости авиационных неметаллических материалов/В сб.: 75 лет.

- Авиационные материалы. Избранные труды 1932-2007. М.: ВИАМ. 2007. С. 379–388.
58. Кириллов В.Н., Ефимов В.А., Матвеевкова Т.Е., Кривонос В.В., Гребнева Т.В., Болберова Е.В. Климатическая стойкость новых композиционных материалов//Авиационная промышленность. — 2004. — № 4. — С. 44-47.
 59. Кириллов В.Н., Ефимов В.А., Шведкова А.К., Николаев Е.В. Исследование влияния климатических факторов и механического нагружения на структуру и механические свойства ПКМ // Авиационные материалы и технологии. —2011. — №4. — С.41-45.
 60. Кириллов В.Н., Кавун Н.С., Ракитина В.П., Деев И.С, Топунова Т.Э., Ефимов В.А., Мазаев П.Ю. Исследование влияния тепловлажностного воздействия на свойства эпоксидных стеклотекстолитов//Пластические массы. — 2008. — № 9. — С. 14–17.
 61. Кириллов В.Н., Старцев О.В., Ефимов В.А. Климатическая стойкость и повреждаемость полимерных композиционных материалов, проблемы и пути их решения //Авиационные материалы и технологии. — 2012. — №5. — С. 412–423.
 62. Кривободров В.С. Физические аспекты локализации разрушения в волокнистых КМ // Механика композитных материалов. – 1990. – №4. – С.646-653.
 63. Кривцов А.М., Морозов Н.Ф. Аномалии механических характеристик наноразмерных объектов // Докл. АН. — 2001. — Т.381. — №3. — С.825–827.
 64. Крыжановский В.К. Технические свойства полимерных материалов — М: Профессия, 2005. — 280 с.
 65. Кузьмин С.А., Булманис В.Н., Стручков А.С. Экспериментальное исследование прочности и деформативности намоточных стеклопластиков и органопластиков при низких климатических температурах // Механика композитных материалов. – 1989. – № 1. – С. 57–61.

66. Лавров А.В., Смирнова М.К. Некоторые особенности определения прочности при сжатии КМ с однонаправленным армированием // Механика композитных материалов. – 1989. — №4. – С. 631-634.
67. Лебедев А.А., Чаусов Н.Г. Установка для испытания материалов с построением полностью равновесных диаграмм деформирования // Пробл. прочности. — 1981. — № 12. — С. 104–106.
68. Лобанов Д.С. Экспериментальное исследование влияния внешних воздействующих факторов и эксплуатационных загрязнений на работоспособность полимерных волокнистых композиционных материалов // Математическое моделирование в естественных науках. 1-4 октября – 2014. — С. 147-149.
69. Лобанов Д.С., Бабушкин А.В. Методика испытаний на одноосное растяжение однонаправленных композиционных материалов при пониженных температурах // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. — 2012. — № 4. — С.33-41.
70. Лобанов Д.С., Бабушкин А.В. Особенности поведения высоконаполненного однонаправленного стеклопластика при испытании на растяжение вдоль направления армирования // VI Всероссийская конференция Механика микронеоднородных материалов и разрушение. г. Екатеринбург, 24–28 мая 2010 г.: тезисы докладов. — Екатеринбург: ИМАШ УрО РАН, 2010. — С.142.
71. Лобанов Д.С., Бабушкин А.В. Оценка конструкционной прочности модели образца однонаправленного стеклопластика со специальной захватной частью // XVIII Всероссийская школа-конференция молодых ученых и студентов: «Математическое моделирование в естественных науках» Пермь, 7-10 октября 2009г: тезисы докладов. – Пермь: ПГТУ, 2009. – С.53.
72. Лобанов Д.С., Бабушкин А.В., Вильдеман В.Э. Исследование механических характеристик однонаправленных композиционных материалов при термомеханических воздействиях // Математическое

- моделирование в естественных науках: тез. докл. XX Всерос. школы-конф. молодых ученых и студентов. — Пермь, 2011. — С. 55-56.
73. Лобанов Д.С., Бабушкин А.В., Вильдеман В.Э. Поведение армированных пластиков при испытаниях на одноосное растяжение, сжатие и изгиб в условиях термомеханических воздействий // XVII Зимняя школа по механике сплошных сред. г.Пермь, 28 февраля-3марта 2011г.: тезисы докладов. — Пермь: ИМСС УрО РАН, 2011. — С.197.
 74. Лобанов Д.С., Вильдеман В.Э., Бабин А.Д., Гринев М.А. Экспериментальное исследование влияния внешних воздействующих факторов и эксплуатационных загрязнений на работоспособность полимерных волокнистых композиционных материалов // Механика композитных материалов. — 2015. — Т. 51, № 1. — С. 97—108.
 75. Лобанов Д.С., Вильдеман В.Э., Бабушкин А.В. Прочность и механизмы разрушения полимерных волокнистых композиционных материалов при испытаниях на одноосное растяжение, сжатие и изгиб в условиях термомеханических воздействий // VI-я Евразийская научно-практическая конференция Прочность неоднородных структур. г. Москва, 17-19 апреля 2012г.: тезисы докладов. — Москва: НИТУ «МИСиС», 2012. — С.94.
 76. Лобанов Д.С., Темерова М.С. Особенности квазистатических испытаний нитей и тканей // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. — 2013. — № 2. — С. 96-109.
 77. Махоньков А.Ю., Старцев О.В. Влияние градиента температуры в измерительной камере крутильного маятника на точность определения температуры стеклования связующего ПКМ //Материаловедение. — 2013. — №7. — С. 47–52.
 78. Локощенко А.М. Моделирование процесса ползучести и длительной прочности металлов: Монография. — М.: МГИУ, 2007. — 264с.
 79. Нанокompозиты: исследования, производство и применение / Под ред. А.А. Берлина, И.Г. Ассовского. — М.: Торус Пресс, 2004. — 224 с.

80. Нанотехнологии, метрология, стандартизация и сертификация в терминах и определениях /Под редакцией М.В. Ковальчука, П.А. Тодуа. — М.: Техносфера, 2009. — 136 с.
81. Николаев Е.В., Кириллов В.Н., Скирта А.А., Гращенков Д.В. Исследование закономерностей влагопереноса и разработка стандарта по определению коэффициента диффузии и предельного влагосодержания для оценки механических свойств углепластиков //Авиационные материалы и технологии. — 2013. — № 3. — С. 44–48.
82. Овчинский А.С. Процессы разрушения композиционных материалов: имитация микро- и макромеханизмов на ЭВМ. — М.: Наука, 1988 — 278 с.
83. Панин В.Ф., Гладков Ю.А. Конструкции с заполнителем: Справочник. — М.: Машиностроение, 1991.
84. Панин С.В., Старцев О.В., Кротов А.С. Диагностика начальной стадии климатического старения ПКМ по изменению коэффициента диффузии влаги //Труды ВИАМ. — 2014. — №7. —С.1.
85. Парцевский В.В. Расслоение композитных пластин при изгибе // Механика композитных материалов. — 1990. —№6. — С.1047-1050.
86. Перов Ю.Ю. Исследование механических свойств гибридных композитов, склонных к кромочному расслоению // Механика композитных материалов. — 1990. —№1. — С.61-68.
87. Перов Ю.Ю. Прочность пластиков, склонных к кромочному расслоению // Механика композитных материалов. — 1989. —№3. — С.448-454.
88. Перов Ю.Ю., Локшин В.А., Ляпина Н.В. Исследование эффективных упруго-прочностных характеристик слоистых пластиков при сдвиге // Механика композитных материалов. — 1989. — №4. — С.710-717.
89. Победря Б.Е. Механика композиционных материалов. — М.: МГТУ, 1984. — 336с.
90. Победря Б.Е. Теория течения анизотропной среды // Прочность, пластичность и вязкоупругость материалов и конструкций. Свердловск. — 1986. — С.101-108.

91. Поляков В.А. Перов Ю.Ю. Экспериментальные методы оценки кромочного эффекта // Механика композитных материалов. – 1989. – №2. – С. 318-331.
92. Прочность и разрушение композитных материалов // Труды второго советско-американского симпозиума. / Под ред.: Дж. К. Си, В.П. Тамуж. – Рига: Зинатне, 1983. – 320 с.
93. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. – М.: Наука, - 1979. – 744с.
94. Раков Э.Г. Нанотрубки и фуллерены. М.: Логос, — с. 2006.
95. Рубцов С.М., Аношкин А.Н., Ташкинов А.А., Шавшуков В.Е. Эксплуатационный ресурс стеклопластикового кожуха сопла авиационного газотурбинного двигателя// Конструкции из композиционных материалов. — 2007. — № 3. — С. 11.
96. Рычков Д.А., Скрипняк В.А., Янюшкин А.С., Лобанов Д.В. Формирование режущей кромки фрезерного инструмента для обработки слоистых композиционных материалов, армированных стеклянными волокнами // Системы. Методы. Технологии. — 2014. — № 2 (22). — С. 42-46.
97. Савин В. Ф., Луговой А. Н., Волков Ю. П. Методика определения термомеханических характеристик полимерных композиционных материалов // Заводская лаборатория. — 2003. – № 6. – С. 40-43.
98. Савицкий Ф.С., Вандышев Б.А. Жёсткость испытательных машин и ее влияние на ниспадающий участок диаграммы растяжения и изгиба // Завод. лаборатория. — 1956. — Т. 22, № 6. — С. 717–721.
99. Сапожников С.Б. Дефекты и прочность армированных пластиков. – Челябинск: ЧГТУ. — 1994. – 162с.
100. Сапожников С.Б., Абдрахимов Р.Р., Шакиров А.А. Конструкционная прочность полимерных композитов на основе коротких стеклянных волокон // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математика. Механика. Физика. — 2014. — Т. 6. — № 1. — С. 50-54.

101. Сапожников С.Б., Безмельницын А.В. Неоднородность локальной жесткости и прочности композита на основе стекломата // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. — 2012. — № 2. — С.167-176.
102. Сапожников С.Б., Щербакова А.О. Влияние влаги на напряженное состояние границы раздела волокно-матрица армированного пластика // Известия Челябинского научного центра УрО РАН. — 2001. — № 3. — С. 81-90.
103. Скрипняк В.А., Козулин А.А. Влияние технологических микродефектов структуры на долговечность полимерных материалов // Известия высших учебных заведений. Физика. — 2007. — Т. 50. — № 7. — С. 3-6.
104. Скудра А.А. Микроструктурный метод прогнозирования температурной зависимости упругих свойств армированных пластиков // Механика композитных материалов. — 1990. — №4. — С.594-598
105. Скудра А.М. Бертулис Д.Р. Зависимость упругих характеристик армированных пластиков от температуры и влаги // Механика композитных материалов. — 1993. — №1. — С.105-109.
106. Скудра А.М. Бертулис Д.Р. Зависимость упругих характеристик армированных пластиков от температуры и влаги // Механика композитных материалов. — 1993. — №2. — С.222-226.
107. Советова Ю.В., Сидоренко Ю.Н., Скрипняк В.А. Многоуровневый подход к определению эффективных свойств композита с учетом повреждаемости // Физическая мезомеханика. — 2013. — Т. 16. — № 5. — С. 59-65.
108. Советова Ю.В., Сидоренко Ю.Н., Скрипняк В.А. Оценка влияния механических свойств межфазного слоя на особенности разрушения композита // Математическое моделирование в естественных науках. — 2014. — Т. 1. — С. 233-236.
109. Современные методы испытаний композиционных материалов. науч.-метод. сборник / под ред. А.П. Гусенкова, сост. А.Н. Полилов — Москва: изд-во ИМАШ им. А.А. Благодатова, 1992. — 247с.

110. Соколов И.И., Раскутин А.Е. Углепластики и стеклопластики нового поколения //Труды ВИАМ. 2013. №4 (viam-works.ru).
111. Староверов О.А., Лобанов Д.С., Вильдеман В.Э. Экспериментальное исследование поведения материалов при ударном нагружении // XVIII Зимняя школа по механике сплошных сред, Пермь, 18-22 февраля 2013 г. Тезисы докладов. Пермь-Екатеринбург, 2013. — 2013. — С. 327.
112. Старцев О.В. Старение полимерных авиационных материалов в теплом влажном климате: Автореф. дис. доктора техн. наук. М. 1990. — 80 с.
113. Старцев О.В., Аниховская Л.И., Литвинов А.А., Кротов А.С. Повышение достоверности прогнозирования свойств полимерных композитных материалов при термовлажностном старении //ДАН. —2009. —Т. 428. — №1. — С. 56–60.
114. Старцев О.В., Каблов Е.Н., Махоньков А.Ю. Закономерности α -перехода эпоксидных связующих композиционных материалов по данным динамического механического анализа //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». — 2011. —№2. —С. 104–113.
115. Старцев О.В., Кротов А.С. Сорбция и диффузия влаги в стеклопластиковых стержнях круглого сечения //Материаловедение. 2012. — №6. — С. 24–28.
116. Старцев О.В., Кротов А.С., Сенаторова О.Г., Аниховская Л.И., Антипов В.В., Гращенков Д.В. Сорбция и диффузия влаги в слоистых металлополимерных композиционных материалах типа «СИАЛ» //Материаловедение. — 2011. — №12. — С. 38–44.
117. Старцев О.В., Кузнецов А.А., Кротов А.С., Аниховская Л.И., Сенаторова О.Г. Моделирование влагопереноса в слоистых пластиках и стеклопластиках //Физическая мезомеханика. — 2002. — Т. 5. — №2. —С. 109–114.
118. Старцев О.В., Медведев И.М., Курс М.Г. Твердость как индикатор коррозии алюминиевых сплавов в морских условиях //Авиационные материалы и технологии. — 2012. — №3. — С. 16–19.

119. Старцев О.В., Прокопенко К.О., Литвинов А.А., Кротов А.С., Аниховская Л.И., Дементьева Л.А. Исследование термовлажностного старения авиационного стеклопластика // Герметики. Клеи. Технологии. — 2009. — №8. — С. 18–22.
120. Старцев О.В., Филистович Д.В., Кузнецов А.А., Кротов А.С., Аниховская Л.И., Дементьева Л.А. Деформируемость листовых стеклопластиков на основе клеевых препрегов при сдвиговых нагрузках во влажной среде //Перспективные материалы. — 2004. — №1. — С. 20–26.
121. Степнов М.Н. Вероятностные методы оценки характеристик механических свойств материалов и несущей способности элементов конструкций. — Новосибирск: Наука, 2005. — 242 с.
122. Субботин В.В., Гринев М.А. Опыт применения материалов производства ФГУП «ВИАМ» и PORCHER в конструкциях узлов и деталей авиационных силовых установок из полимерных композиционных материалов // Научный электронный журнал «Новости материаловедения. Наука и техника.» — 2013. — №5.
123. Тамуж В.П., Куксенко В.С. Микромеханика разрушения полимерных материалов. — Рига: Зинатне, 1978. — 294с.
124. Тамуж В.П., Протасов В.Д. Разрушение конструкций из композитных материалов. — Рига: Зинатне, 1986. — 264с.
125. Тарнопольский Ю. М., Жигун И. Г., Поляков В. А. Анализ распределения касательных напряжений при трехточечном изгибе балок из композитов // Механика полимеров, — 1977. — № 1. — С. 56-62.
126. Тарнопольский Ю.М., Кинцис Т.Я. Методы статических испытаний армированных пластиков. — М.: Химия, 1981. — 272 с.
127. Ташкинов М.А., Зуйко В.Ю., Лобанов Д.С. Исследование влияния технологических и эксплуатационных дефектов на характеристики полимерных текстильных композитов при деформировании // Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций. Тезисы VIII Российской

- научно-технической конференции, 26-30 мая 2014. — Екатеринбург, 2014. — С. 128.
128. Темерова М.С., Вильдеман В. Э., Лобанов Д. С. Особенности экспериментального исследования механических свойств нитей и тканей как армирующих элементов композиционных материалов // Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций. Тезисы VIII Российской научно-технической конференции, 26-30 мая 2014. — Екатеринбург, 2014. — С. 104.
 129. Филистович Д.В., Старцев О.В., Суранов А.Я. Автоматизированная установка для динамического механического анализа // Приборы и техника эксперимента. — 2003. — №4. — С. 163–164.
 130. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. Ч.2. Механические испытания. Конструкционная прочность. — М.: Машиностроение. — 1974. — 368 с.
 131. Фридман Я.Б. Оценка опасности разрушения машиностроительных материалов // Теоретические основы конструирования машин. — М.: Гос. научн.-тех. изд-во машиностр. лит-ры, 1957. — С. 257–281.
 132. Халиулин В.И., Двоеглазов И.В., Ковалев В.В. Методика испытаний складчатых заполнителей на поперечное сжатие // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. — 2012. — № 4-2. — С. 85-88.
 133. Халиулин В.И., Константинов Д.Ю. Разработка и анализ технологических схем интегрирования композитных кронштейнов с элементами планера // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. — 2013. — Т. 69. — № 1. — С. 54-60.
 134. Чернозатонский Л.А., Михеева Е.Э. Механические свойства углеродных нанотрубок и композитов. // Нанокompозиты: исследования, производство и применение / Под ред. А.А. Берлина, И.Г. Ассовского. — М.: Торус Пресс, 2004. — С.167–168.

135. Шилова А. И., Вильдеман В. Э., Лобанов Д. С. Исследование кинетики разрушения углеродных композитов на основе механических испытаний с регистрацией сигналов акустической эмиссии // Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций. Тезисы VIII Российской научно-технической конференции, 26-30 мая 2014. — Екатеринбург, 2014. — С. 41.
136. 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 Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. — 2013. — № 4. — С. 169-179.
137. Шилова А.И., Вильдеман В.Э., Лобанов Д.С. Изучение особенностей деформирования углеродных композитов с помощью метода акустической эмиссии // XIX Зимняя школа по механике сплошных сред: тез. докл. всерос. конф., Пермь, 24-27 февраля 2015 г. — Пермь, 2015. — С. 351
138. Шилова А.И., Вильдеман В.Э., Лобанов Д.С. Применение метода акустической эмиссии к изучению механизмов разрушения углеродного композиционного материала // Математическое моделирование в естественных науках. 1-4 октября – 2014. С. 317-320.
139. 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 Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2014. – № 4. – С. 221–239.
140. Шлянников В.Н. Решение задач нелинейного деформирования и разрушения материалов при сложном напряженном состоянии // Физическая мезомеханика. — 2012. — Т. 15. — № 1. — С. 57-67.
141. Шлянников В.Н., Захаров А.П. Образцы для испытаний при двухосном циклическом нагружении // Труды Академэнерго. — 2013. — № 3. — С. 70-79.

142. Шлянников В.Н., Иштыряков И.С., Яруллин Р.Р. Характеристики деформирования сплава Д16Т при совместном нагружении растяжением, сжатием, кручением и внутренним давлением // Труды Академэнерго. — 2014. — № 3. — С. 78-90.
143. Шлянников В.Н., Спиваковская А.Н., Бурмистров В.Б., Ильченко Б.В. Разработка и создание многофункционального электрогидравлического стенда для исследования проблем прочности, долговечности и разрушения при многоосном нагружении // отчет о НИР № 94-01-00784 (Российский фонд фундаментальных исследований).
144. Щербакова А.О., Сапожников С.Б. Влияние радиуса закругления опор на точность определения межслойного модуля сдвига армированных пластиков из испытаний коротких балок на изгиб // Известия Челябинского научного центра УрО РАН. — 2001. — № 2. — С. 101-110.
145. Экспериментальная механика: В 2-х книгах: Книга 1. Пер. с англ./Под ред. А Кобояси. — М.Мир, 1990. — 552с.
146. Adams D. S., Herakovich C.T. Influence of damage on the thermal response of graphite-epoxy laminates // J. Thermal Stresses. — 1984. — Vol. 7, №7. — pp.91-103.
147. Adams D.F. Current Status of Compression Testing of Composite Materials // Proceedings of the 40th International SAMPE Symposium. — Anaheim, California, May 1995, — pp. 1831-1843.
148. Adams D.F. Open Hole Compression Testing // High Performance Composites. — March 2005, —pp. 12-13.
149. Adams D.F., Odom E.M. Influence of Test Fixture Configuration on the Measured Compressive Strength of a Composite Material // Journal of Composites Technology and Research. — Vol. 13, No. 1, Spring 1991, — pp. 36-40.
150. Adams, D. O., Moriarty, J. M., Gallegos, A. M., Adams, D. F. The V-Notched Rail Shear Test // Journal of Composite Materials. — Vol. 41, No. 3, February 2007, — pp. 281-297.

151. Adams, D.O., Gallegos, A.M, Moriarty, J.M., Adams, D.F. A V-Notched Rail Shear Test for Composite Laminates // Proceedings of the 2002 SEM Annual Conference. — Milwaukee, WI, June 2002.
152. Adams, D.O., Moriarty, J.M., Gallegos, A.M., Adams, D.F. // Development and Evaluation of a V-Notched “Rail Shear Test” // Proceedings of the 2002 SAMPE Technical Conference. — Baltimore, MD, November 2002.
153. 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. — DOI 10.1007/s11029-014-9416-0.
154. 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.
155. Berg J.S., Adams D.F. An Evaluation of Composite Material Compression Test Methods // Journal of Composites Technology and Research. 1989— Vol. 11. — No 2. — pp. 41-46.
156. Cao J., Cheng H.S., Lee W., Padvoiskis J., Peng X.Q., Akkerman R., Graaf E.F.De., Boisse P., Hivet G., Launay J., Luycker E.De., Morestin F., Chen J., Gorczyca J.L., Liu L., Sherwood J., Harrison P., Long A., Wiggers J., Lomov S.V. et al. Characterization of mechanical behavior of woven fabrics: Experimental methods and Benchmark results // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. — 2008. — T. 39. — № 6. — P. 1037-1053.
157. Crank J. The mathematics of diffusion. Second edition. Clarendon press. Oxford. — 1975. — 414 p.
158. Dixit A., Harlal Singh Mali. Modeling techniques for predicting the mechanical properties of woven-fabric textile composites: a Review // Mechanics of Composite Materials. — 2013. — Vol.49. — № 1. — P. 1-20.
159. Edward R., Long Jr. Moisture Diffusion Parameter Characteristics for Epoxy Composites and Neat Resins /In.: NASA Technical Paper 1474. 1979. 31 p.

160. Godara A., Mezzo L., Luizi F., Warriier A., Lomov S.V., Van Vuure A.W., Gorbatiikh L., Moldenaers P., Verpoest I. Influence of carbon nanotube reinforcement on the processing and the mechanical behavior of carbon fiber/epoxy composites // Carbon. — 2009. — T. 47. — P. 2914.
161. Godara A., Rochez O., Mezzo L., Luizi F., Gorbatiikh L., Warriier A., van Vuure A.W., Lomov S.V., Verpoest I., Kalinka G. Interfacial shear strength of a glass fiber/epoxy bonding in composites modified with carbon nanotubes // Composites Science and Technology. — 2010. — T. 70. — № 9. — P. 1346-1352.
162. Helbling C., Karbhari V.M., Durability Assesment of Combined Enviromental Eposur and Bending /In.: Proc. of 7-th Int. Symp. on Fiber Reinforced Polym. Reinf. Concrete Structures (FRPRCS-7). New Orlean, Loisiaana, USA. — 2005. — P. 1379-1418.
163. Hussain, A.K., Adams, D.F. Analytical Evaluation of the Two-Rail Shear Test Method for Composite Materials // Composites Science and Technology. 2004, — Vol. 64. — pp. 221-238.
164. Hussain, A.K., Adams, D.F. Experimental Evaluation of the Wyoming-Modified Two-Rail Shear Test Method for Composite Materials // Experimental Mechanics. — 2004. — Vol. 44, No. 4. — pp. 354-364.
165. Hussain, A.K., Adams, D.F. The Wyoming-Modified Two-Rail Shear Test Fixture for Composite Materials // Journal of Composites Technology and Research.— 1999. — Vol. 21, — No. 4, — pp. 215-223.
166. Kim R.H., Broutman L.J. Effect of Moisture and Stress on the Degradation of Graphite Fiber Reinforced Epoxies /In.: Deform. Yield and Fract. Polym., 4-th Int. Conf., Cambridge. London. — 1979. — P. 231-235.
167. Korokhin R. A., Solodilov V. I., Gorbatkina Yu. A., Kuperman A. M. Carbon nanotubes as modifiers in epoxypolysulfone matrices for wound organic-fiber-reinforced plastics // Mechanics of Composite Materials. — 2013. — Vol. 49. — № 1. — P. 51-58

168. 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
169. Lee S., Knaebel K.S. Effects of mechanical and chemical properties on transport in fluoropolymers. I. Transient sorption // *Journal of Applied Polymer Science*. 1997. — V. 64. — P. 455–476.
170. Lobanov D. Babushkin A. About features testing of highly fibrous composites along the direction of reinforcement in a wide temperature range // *ICEM 2010 (The International conference on experimental mechanics 2010)*. Kuala Lumpur (Legend Hotel), 29 Nov. – 01 Dec. 2010. Programme and Abstract. – P.158.
171. Lobanov D. S., Vildeman V. E., Babin A. D., 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.
172. Lobanov D., Babushkin A. Experimental research of fibrous polymer composites in thermo-mechanical impact conditions // *10th World congress on computational mechanics: Book of abstracts*, San Paulo, Brazil, 8-13 july 2012. — San Paulo, Brazil, 2012 — P. 60.
173. Lobanov D., Vildeman V., Babin A., Grinev M. Impact estimation of external actuating factors and operational contamination on operational capability of polymer fibrous composite materials // *Seventeenth international conference «Mechanics of composite materials»: book of abstracts*, Riga, 28 may-01 june 2012. — Riga, Latvia, 2012. — P. 139.
174. 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.

175. Lomov S.V., Gorbatiikh L., Verpoest I. Compression behavior of a fibre bundle with grafted carbon nanotubes // *Carbon*. — 2011. — T. 49. — № 13. — P. 4458-4465.
176. Lomov S.V., Ivanov D.S., Truong T.C., Verpoest I., Baudry F., Vanden Bosche K., Xie H. Experimental methodology of study of damage initiation and development in textile composites in uniaxial tensile test // *Composites Science and Technology*. — 2008. — T. 68. — № 12. — P. 2340-2349.
177. Lomov S.V., Willems A., Verpoest I., Zhu Y., Barburski M., Stoilova Tz. Picture frame test of woven composite reinforcements with a full-field strain registration // *Textile Research Journal*. — 2006. — T. 76. — №3. — P. 243-252.
178. Portnov G. G., Kulakov V. L., Arnautov A. K. Grips for the transmission of tensile loads to a FRP strip // *Mechanics of Composite Materials*. — 2013. — Vol. 49. — №5. — P. 457-474.
179. Prodromou A.G., Lomov S.V., Verpoest I. The method of cells and the mechanical properties of textile composites // *Composite Structures*. — 2011. — T. 93. — № 4. — P. 1290-1299.
180. Reynolds T.G. Accelerated Tests of Environmental Degradation in Composite Materials // M.S. Thesis: Univ. of Bristol. — 1998. — 177 p.
181. Roylance D., Roylance M. Weathering of Fiber-Reinforced Epoxy Composites // *Polym. Eng. and Sci.* — 1978. — V. 18. — №4. — P. 249–254.
182. Sapozhnikov S. B., Ignatova A. V. Experimental and theoretical investigation of deformation and fracture of subcutaneous fat under compression // *Mechanics of Composite Materials*. — 2013. — Vol. 48. — № 6. — P. 649-654
183. Shilova A.I., Wildemann V.E., Lobanov D.S. Application of acoustic emission to monitor damage mechanisms of carbon composite material // XLII Summer School – Conference «Advanced Problems in Mechanics», 30 June – 5 July. – St. Petersburg (Repino), Russia. – P.113
184. 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. — pp. 62-63.

185. Startsev O.V., Krotov A.S., Startseva L.T. Interlayer Shear Strength of Polymer Composite Materials During Long Term Climatic Ageing //Polym. Degrad. and Stab. — 1999. — V. 63. — P. 183–186.
186. Vallons K., Adolphs G., Lucas P., Lomov S.V., Verpoest I. The influence of the stitching pattern on the internal geometry, quasi-static and fatigue mechanical properties of glass fibre non-crimp fabric composites // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. — 2014. — Volume 56. — P. 272-279.
187. Welsh J.S., Adams D.F. Current Status of Compression Test Methods for Composite Materials // SAMPE Journal, — Vol. 33, —No. 1, January 1997, — pp. 35-43.

Приложение 1

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 директор ОАО «Уральский научно-исследовательский институт композиционных материалов» Чунаев В.Ю., составили настоящий акт о том, что в результате научных исследований, выполненных в Центре экспериментальной механики Пермского национального исследовательского политехнического университета (ЦЭМ ПНИПУ) в 2013 – 2014 г. в рамках договора № 2013/336 по теме «Механические испытания композиционных материалов. Оценка повреждений композиционных материалов на ранней стадии деформации с использованием регистрации сигнала акустической эмиссии» (руководитель работ профессор Вильдеман В.Э., ответственный исполнитель Лобанов Д. С.) с использованием результатов работ по гранту Правительства Российской Федерации (Постановление № 220 от 9 апреля 2010 г., договор № 14.В25.310006 от 24 июня 2013 года), проведены серии экспериментальных исследований образцов композиционных материалов на основе углеродных волокон на разных стадиях технологического передела в условиях квазистатического нагружения при растяжении и сжатии, построены диаграммы деформирования, получены новые данные о прочностных и деформационных свойствах материалов, проведен анализ возникновения повреждений композиционных материалов при деформировании с использованием регистрации сигналов акустической эмиссии.

Результаты исследований используются на предприятии ОАО «УНИИКМ» при оценке свойств композиционных материалов на различных технологических переделах и для определения влияния технологических переделов на прочностные и деформационные свойства материалов.

От ИСПОЛНИТЕЛЯ:

От ЗАКАЗЧИКА:

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

 В.Н. Коротаев

Руководитель работ
директор ЦЭМ ПНИПУ
профессор, д.ф.м.н.

 В.Э. Вильдеман

Ответственный исполнитель работы,
м.н.с ЦЭМ ПНИПУ

 Д.С. Лобанов

Исполнитель работы
Инженер ЦЭМ ПНИПУ

 А.И. Шилова

Генеральный директор
ОАО «УНИИКМ»

 В.Ю. Чунаев

Начальник отдела 603

 Ю.Б. Лямин

Ответственный исполнитель работы
инженер отдела 603

 В.А. Бояршинов

АКТ

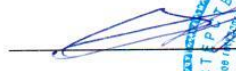
использования результатов НИР

Мы, нижеподписавшиеся, от лица ИСПОЛНИТЕЛЯ проректор по науке и инновациям Пермского национального исследовательского политехнического университета Коротаев В.Н. и от лица ЗАКАЗЧИКА генеральный конструктор ОАО «НПО САТУРН» Шмотин Ю.Н, составили настоящий акт о том, что в результате научных исследований, выполненных в Центре экспериментальной механики Пермского национального исследовательского политехнического университета (ЦЭМ ПНИПУ) в 2012 – 2013 г. в рамках договора № 2012/208 по теме «Проведение испытаний материалов композитной части гибридного корпуса КНД» (руководитель работ профессор Вильдеман В.Э., ответственный исполнитель Лобанов Д. С.), и работ по гранту Правительства Российской Федерации (Постановление № 220 от 9 апреля 2010 г., договор № 14.B25310006 от 24 июня 2013г), проведены серии экспериментальных исследований образцов армирующих элементов и композиционных материалов на основе арамидных волокон при нормальной и повышенных температурах. Получены новые данные о прочностных и деформационных свойствах волокнистых полимерных композиционных материалов.

Результаты исследований используются на предприятии ОАО «НПО «САТУРН» при отборе материалов на стадии проектирования ответственных конструкций и узлов из композиционных материалов и при проведении прочностных расчетов.

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
Ответственный исполнитель работы,
м.н.с ЦЭМ ПНИПУ


Д.С. Лобанов

От ЗАКАЗЧИКА:


Генеральный конструктор,
ОАО «НПО «САТУРН»
Ю.Н Шмотин
Зам. генерального конструктора по НИР-
начальник расчетно-исследовательского
управления


Д. В. Карелин

Начальник инженерного
центра (г. Пермь)


А.Н Душко