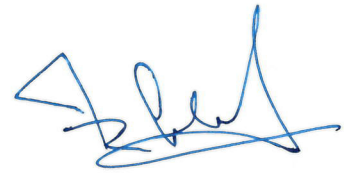


На правах рукописи



Строкин Кирилл Олегович

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, АРМИРОВАННЫХ
УГЛЕРОДНЫМИ ТКАНЯМИ**

Специальность:

05.19.01 – Материаловедение производств текстильной и легкой промышленности

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2018

Работа выполнена на кафедре инженерного материаловедения и метрологии федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна».

Научный руководитель: **Примаченко Борис Макарович**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», профессор кафедры инженерного материаловедения и метрологии.

Официальные оппоненты: **Севостьянов Пётр Алексеевич**, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина», профессор кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления.

Рымкевич Ольга Васильевна, кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение высшего образования «Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского» Министерства обороны Российской Федерации, старший преподаватель кафедры физики.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт высокомолекулярных соединений Российской академии наук.

Защита диссертации состоится 19 июня 2018 г. в 11:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.236.01 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна» по адресу: 191186, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 18, ауд. 241.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна» по адресу: 191186, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 18, <http://sutd.ru>.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2018 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент

Вагнер Виктория Игоревна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Повышение обороноспособности страны, интенсивное освоение космоса, развитие судо-, авиа-, ракетостроения и атомной энергетики требует создания и применения новых конструкционных материалов, превосходящих по своим свойствам традиционные металлические и неметаллические материалы.

В настоящее время широкое применение находят полимерные композиционные материалы (ПКМ), армированные углеродными тканями (УТ). Такие материалы используются в несущих элементах конструкций и сооружений и являются объектами многочисленных теоретических и экспериментальных исследований.

Жесткие условия эксплуатации изделий из ПКМ, армированных УТ – экстремальные статические и динамические режимы нагружения, химически агрессивные среды, радиационные воздействия и т.д., в сочетании с ограничениями по массе и необходимостью обеспечения запаса прочности, предъявляют повышенные требования к эксплуатационным свойствам таких материалов. Широкие возможности варьирования строения и структуры ПКМ, армированных УТ, предоставляет конструкторам эффективный инструмент управления характеристиками эксплуатационных свойств будущих многослойных изделий и открывают путь к созданию рациональных элементов конструкций, наилучшим образом отвечающих всем особенностям режима их эксплуатации.

Использование армированных ПКМ в качестве конструкционных материалов подразумевает прогнозирование и оптимизацию параметров их структуры и характеристик прочностных свойств на этапе синтеза элементов конструкций. Современные подходы к построению аналитических моделей структуры и прочностных свойств ПКМ, армированных тканями, как правило, основаны на представлении таких материалов в виде квазигомогенных структур с аппроксимированными экспериментальными характеристиками свойств в пределах одного слоя. Такие модели не учитывают особенности строения компонентов ПКМ. Развитие существующих и создание новых методов прогнозирования структуры и прочностных свойств, армированных ПКМ, является важной и актуальной задачей.

Цель работы состоит в разработке и экспериментальной проверке методов и методик прогнозирования параметров структуры и характеристик прочностных свойств ПКМ, армированных УТ.

Для достижения цели диссертационной работы были выполнены следующие **задачи**:

- оценка влияния строения и технологии производства УТ на их качество;
- теоретические исследования области контакта нитей основы и утка в УТ;
- экспериментальное определение модуля жесткости и коэффициента Пуассона углеродных нитей при сжатии в радиальном направлении;
- разработка механико-аналитической модели структуры УТ;
- прогнозирование параметров структуры УТ и экспериментальная проверка полученных результатов;
- разработка механико-аналитической модели прочностных свойств УТ;

–прогнозирование характеристик прочностных свойств УТ и экспериментальная проверка полученных результатов;

–разработка модели структуры и механико-аналитической модели прочностных свойств, армированных ПКМ;

–прогнозирование параметров структуры и характеристик прочностных свойств, армированных ПКМ и экспериментальная проверка полученных результатов.

Методы исследования. В работе использованы теоретические и экспериментальные методы исследования. При разработке математических моделей использовались методы теории упругости, теории вязкоупругости, механики деформируемого твердого тела, дифференциального и интегрального исчисления, геометрии и дифференциальной геометрии. Численная реализация математических моделей осуществлялась с применением методов компьютерного моделирования. Программная реализация компьютерных моделей выполнялась в среде PYTHON. Экспериментальные исследования были выполнены, как по стандартным методикам, так и по методикам, разработанным автором. При обработке экспериментальных данных использовались методы теории вероятностей и математической статистики. Экспериментальные исследования проводились в лаборатории механики ориентированных полимеров, лаборатории оптимизации текстильных технологий, лаборатории волокнистых материалов СПбГУПТД.

Научная новизна диссертационной работы.

Разработаны методы и методика прогнозирования прочностных свойств ПКМ, армированного УТ.

Разработаны методы и методики прогнозирования параметров структуры и характеристик прочностных свойств УТ на основе технологических параметров их производства.

Построена достоверная математическая модель прочностных свойств ПКМ, армированного УТ.

Построены достоверные математические модели структуры и прочностных свойств УТ.

Выведены функциональные зависимости между сжатием нитей, радиусом области контакта, максимальным давлением и силой взаимного давления нитей.

Экспериментально определены модуль жесткости и коэффициент Пуассона углеродных нитей при сжатии в радиальном направлении.

Практическая значимость результатов диссертационной работы.

Разработанная методика прогнозирования характеристик прочностных свойств ПКМ, армированного УТ позволяет получить достаточно точные результаты.

Созданы компьютерные модели в среде PYTHON для прогнозирования параметров структуры и характеристик прочностных свойств УТ и армированных ПКМ.

Разработанная методика, дает возможность на этапе создания элемента конструкций из ПКМ прогнозировать структуру и прочностные свойства материала.

Результаты прогнозирования могут использоваться в качестве исходных данных, характеризующих структуру и прочность слоя, армированного ПКМ, при выполнении прочностных расчетов элементов конструкций в различных САЕ-системах, таких как: ANSYS Composite PrepPost, SolidWorks Simulation, MSC Nastran и т.д.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертационной работе базируются на использовании современных научных теорий, современных средств исследования и информационных технологий, апробации основных положений диссертации на международных, всероссийских отраслевых научно-технических конференциях и в периодической научной печати, а также подтверждается большим количеством результатов выполненных экспериментальных исследований и корректном применении методов статистического анализа.

Апробация результатов работы. Основные положения диссертации обсуждались на расширенных заседаниях кафедры механической технологии волокнистых материалов СПГУТД (2012, 2013, 2014, 2015, 2016 гг.), кафедры инженерного материаловедения и метрологии СПбГУПТД (2017 г.), секции №17 научно-технического совета НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей» (2016 г.). Результаты исследований доложены на международных и всероссийских научно-технических конференциях: «Инновации молодежной науки» - СПбГУПТД (2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017 гг.); «Взгляд в будущее – 2012» - АО «ЦКБ МТ «Рубин» (2012 г.); «Морское подводное оружие. Морские подводные роботы – вопросы проектирования, конструирования и технологий – 2014» - АО «Концерн «Морское подводное оружие – Гидроприбор» (2014 г.); «Современные тенденции развития химии и технологии полимерных материалов» - СПбГУПТД (2015 г.); «Новые материалы и технологии. КМУС-2017» - НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей» (2017 г.); «Развитие производства и применения композиционных материалов и изделий из них» – Комитет по промышленной политике и инновациям Санкт-Петербурга, Санкт-Петербург (2017 г.); секции №5 «Прочность и надежность конструкций объектов морской техники» при ученом совете ФГУП «Крыловский государственный научный центр» (2018 г.).

Публикации. По материалам диссертационного исследования опубликовано 16 работ, из которых 2 статьи в рецензируемых журналах, входящих в «Перечень ВАК РФ», 4 статьи в других научных журналах и сборниках научных трудов, 10 работ выполнены в виде докладов и тезисов докладов на отраслевых, всероссийских и международных научно-технических конференциях.

Структура и объем диссертации. Работа изложена на 182 страницах машинописного текста, состоит из введения, 6 разделов, общих выводов по работе, списка использованных источников из 187 наименований, 9 приложений на 17 страницах, содержит 24 таблицы, 42 рисунка.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** сформулирована актуальность диссертационной работы, цель и задачи исследования, методы исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, апробация результатов работы, а также приведены сведения о публикациях по теме диссертации, о ее структуре и объеме.

В **первом разделе** приводится обзор и анализ научной литературы по теме диссертационной работы. Формулируются известные подходы к изучению и прогнозированию структуры и прочностных свойств композиционных материалов. Результаты многочисленных теоретических и экспериментальных исследований углеродных волокон, подтверждающие актуальность их использования для армирования ПКМ, широко представлены в работах Конкина А.А., Багрова Б.Н., Мелешко А.И., Комаровой Т.В., Островского В.С., Уббелоде А.Р., Симамура С. Вопросами анизотропии конструкционных материалов, анализа и теоретического описания напряженно-деформированного состояния ПКМ занимались известные отечественные и зарубежные ученые, такие как Малмейстер А.К., Работнов Ю.Н., Гольденблат И.И., Скудра А.М., Победря Б.Е., Немировский Ю.В., Черепанов Г.П., Ашкенази Е.К., Фудзи Т., Сталевич А.М., Кринистенсен Р.М., Браутман Л., Крок Р, Мэттьюз Ф., Boisse P, Mallick P.K. Прогнозированию механических свойств ПКМ, армированных различными текстильными материалами, посвящены монографии и научные статьи таких ученых, как Розен Б.В., Перепелкин К.Е., Ломов С.В., Карпонис Д.М., Трофимов Н.Н., Келли А., Саттон В.Х., Хилл Р., Дзакко М., Чу Т.-В., Ко Ф., Цай С.Г., Ву Э.М., Верпуст И, Gibson R.F. Варианты математических моделей прогнозирования структуры и прочностных свойств тканей, основанные на геометрических, механико-геометрических, механико-аналитических методах и методе конечных элементов широко представлены в научных трудах Новикова Н.Г., Peirce'a F.T., Kawabata M., Olofsson'a B., Севостьянова П.А., Примаченко Б.М., Ломова С.В., Николаева С.Д., Степанова С.Г., Дзакко М. Систематизация и классификация подходов к оптимальному проектированию, совместимости компонентов и технологиям производства ПКМ и элементов конструкций из них представлена в работах Тарнопольского Ю.М., Жигуна И.Г., Васильева В.В., Гуняева Г.М., Зиновьева П.А., Смердова А.А., Любина Дж. Изучению комплекса свойств эпоксидных полимеров посвящены труды таких ученых, как Чернин И.З., Мошинский Л.А., Зайцев Ю.С., Троснянская Е.Б., Ли Х., Невилл К., Аскадский А.А., Бартенев Г. М., Нильсен Л. Результаты изучения адгезионного взаимодействия на поверхности раздела фаз ПКМ, армированных текстильными материалами подробно представлены в научных трудах известных специалистов в соответствующих областях, таких как Плюдеман Э., Берлин А.А., Чернин И.З., Горбаткина Ю.А.

Эксплуатационные свойства ПКМ существенным образом определяются свойствами его компонентов. Исходя из того, что, основные напряжения при воздействии внешних нагрузок принимает на себя армирующий компонент, можно констатировать, что механические свойства армирующего компонента значительно отражаются на прочности полимерной композиции. Существующие модели

прогнозирования ПКМ, армированных УТ, не учитывают особенности строения, структуры и прочностные свойства армирующих компонентов.

Во **втором разделе** выполнена оценка влияния строения и технологии производства на качество УТ.

Качество УТ определяется характеристиками эксплуатационных свойств. Эксплуатационные свойства тканей, в свою очередь, определяются: параметрами строения и характеристиками физико-механических свойств углеродных нитей, параметрами строения, структуры и технологией производства тканей. Среди параметров строения и характеристик свойств основных и уточных нитей, наиболее важными являются: линейная плотность, крутка, разрывная нагрузка, разрывное удлинение, модуль упругости. Параметры строения тканей включают в себя плотность ткани по основе и утку, переплетение. Технологию производства УТ можно разделить на две группы. По первой технологии из вискозных или полиакрилонитрильных нитей вырабатываются ткани, которые после предварительной подготовки и сушки подвергаются высокотемпературной термической обработке в инертной среде (процессы карбонизации и графитации). По второй технологии УТ вырабатываются из углеродных нитей непосредственно на ткацких станках.

Для реализации цели раздела были отобраны две различные УТ и проведены экспериментальные исследования. В задачи исследования входило: определение средних значений и неравномерности (коэффициентов вариации) параметров строения основных и уточных нитей; определение средних значений и неравномерности параметров строения, структуры и характеристик физико-механических свойств УТ; введение критериев качества УТ; выполнение сравнительного анализа критериев качества УТ. В разделе описываются методики проведения экспериментальных исследований, а также представлены формулы для расчета параметров структуры и модулей упругости УТ.

Качество УТ оценивалось по трём критериям: первым критерием является совокупность наилучших средних значений параметров строения и структуры, характеристик физико-механических свойств ткани; вторым критерием является единство средних значений параметров и характеристик ткани в направлении основы и в направлении утка; третьим критерием является величина неравномерности параметров и характеристик ткани. Сравнительный анализ критериев качества УТ показал, что вторая ткань обладает более высоким качеством по сравнению с первой тканью. Дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования, представленные в диссертационной работе, связаны с УТ выработанной по второй технологии.

В **третьем разделе** диссертационной работы приведены теоретические и экспериментальные исследования области контакта углеродных нитей в тканой структуре, необходимые для построения механико-аналитической модели структуры УТ.

Сила взаимного давления деформирует основную и уточную нити в области контакта в углеродной тканой структуре и устанавливает их сжатие. Теоретические исследования области контакта углеродных основных и уточных нитей,

представленные в разделе, основываются на существующих методах решения контактных задач теории упругости, которые позволяют вычислять параметры полей распределения деформаций и напряжений в системе твердых тел, имеющих общие участки границ. Задача о соприкосновении углеродных нитей в тканой структуре решалась при условии малости площадки соприкосновения и описания недеформированных поверхностей вблизи площадки соприкосновения уравнениями второго порядка. Если на поверхности нижнего и верхнего цилиндров (рис.1) взять точки M и N на малом расстоянии от начала координат o , то под действием сил Q , направленных навстречу друг другу, точки, лежащие на осях z_1 и z_2 на достаточно больших расстояниях от поверхности контакта, сблизятся на величину ε .

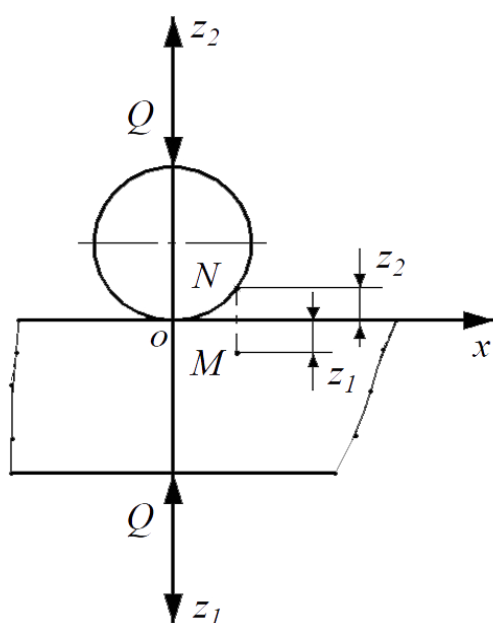


Рисунок 1 – Проекция области контакта при сжатии двух цилиндрических тел силой Q

жесткости и коэффициента Пуассона углеродных нитей при сжатии. В результате исследований были получены экспериментальные значения радиальных деформаций и диаметров областей контакта основных и уточных нитей под действием нагрузки.

Результаты расчётов показывают, что коэффициент Пуассона углеродных нитей при сжатии для всех значений нагрузок оказался равным 0,30, а модуль жесткости при изменении относительной деформации сжатия от 0 до 0,26 увеличивается по экспоненциальному закону. Как правило, УТ, предназначенные в качестве армирующих компонентов для ПКМ должны обладать достаточной жёсткостью. Отсюда сила контактного взаимодействия между основной и уточной нитями не должна быть менее 0,4 Н и, в этом случае, модуль жесткости при сжатии можно принять постоянным и равным 17 МПа.

Если диаметры углеродных нитей основы и утка исследуемой тканой структуры равны, то область контакта представляет собой фигуру по конфигурации близкую к кругу.

Если выделить малый элемент на поверхности контакта, то из решения задачи о силе, действующей на границе полубесконечного тела можно получить выражения для величины сжатия ε и максимального давления q_0 углеродных нитей в области контакта

$$q_0 = \sqrt[3]{\frac{12QE_c^2}{(1-\mu^2)^2 \pi^3 D^2}}, \quad \varepsilon = \sqrt[3]{\frac{18Q^2(1-\mu^2)^2}{DE_c^2}} \quad (1)$$

Здесь μ – коэффициент Пуассона при сжатии; E_c – модуль жесткости при сжатии.

В разделе приведена разработанная автором экспериментальная методика определения характеристик контактных областей основных и контакта уточных нитей, а также представлены формулы для расчета модуля

В результате проведённых исследований были получены функциональные зависимости между радиусом области контакта, сжатием нитей, максимальным давлением и силой взаимного давления, которые являются важными элементами при построении модели деформации структуры и прогнозирования прочностных свойств, армированных ПКМ.

В четвертом разделе на основе теоретических исследований контактного взаимодействия основных и уточных нитей в раппорте ткани построена механико-аналитическая модель и выполнено прогнозирование параметров структуры УТ. Тканая структура является единым целым за счет наличия многочисленных контактов между нитями. В области контактов основных и уточных нити создаются силы взаимного давления, которые скрепляют их между собой. Чем больше силы взаимного давления, тем выше прочность тканой структуры. Сила взаимного давления зависит от деформации изгиба и растяжения основной и уточной нити. Тканая структура становится определенной, если известны следующие параметры: размеры поперечного сечения нитей; расположение нитей в структуре; силы растяжения нитей внутри структуры; силы взаимного давления между основными и уточными нитями в области контактов; длины, прогибы и смятия нитей; фаза строения, толщина структуры; линейное, поверхностное и объемное заполнение нитями; поверхностная и объемная пористость; поверхностная и объемная плотность.

Построение механико-аналитической модели структуры УТ основывается на допущениях о том, что углеродные нити являются сплошной ортотропной средой с различными модулями упругости при осевом растяжении и радиальном сжатии, деформации основных и уточных нитей при растяжении, сжатии и изгибе являются упругими, уравнения равновесия участков нитей рассматриваются при слабом изгибе, линейная плотность основных и уточных нитей равна, сечение нитей – круг с диаметром D .

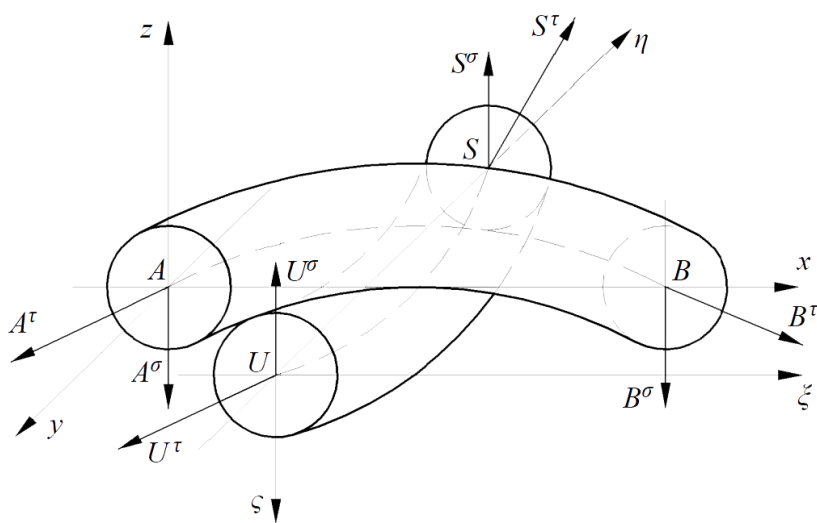


Рисунок 2 – Базовый элемент раппорта ткани

Выделим базовый элемент раппорта УТ, заменив отброшенные части реакциями связи (рисунок 2). Предполагая, что нити основы и утка имеют одинаковое строение и характеристики физико-механических свойств получена система уравнений, позволяющая рассчитать параметры структуры и характеристики прочностных свойств ткани:

$$Q = \frac{D - \sqrt[3]{\frac{18Q^2}{D} \left(\frac{1 - \mu_c^2}{E_c} \right)^2}}{\frac{1}{2A_x} \left(\frac{n}{2} - \frac{th\left(p \frac{n}{2}\right)}{p} \right) + \frac{1}{2U_\eta} \left(\frac{l}{2} - \frac{th\left(q \frac{l}{2}\right)}{q} \right)} \quad (2)$$

$$A_x \approx A^\tau \cos \alpha - \frac{Q}{2} \operatorname{tg} \alpha, \quad U_\eta \approx U^\tau \cos \beta - \frac{Q}{2} \operatorname{tg} \beta \quad (3)$$

$$A^\tau = F_o, \quad (4)$$

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{Q}{2A_x} \left(1 - \frac{1}{ch\left(p \frac{n}{2}\right)} \right), \quad p = \sqrt{\frac{A_x}{EI_{oy}}} \quad (5)$$

$$U^\tau = F_y, \quad (6)$$

$$\beta = \operatorname{arctg} \frac{Q}{2U_\eta} \left(1 - \frac{1}{ch\left(q \frac{l}{2}\right)} \right), \quad q = \sqrt{\frac{U_\eta}{EI_{y\xi}}} \quad (7)$$

где Q – сила взаимного давления между основной и уточной нитью в области контакта; D – диаметр основных и уточных нитей в тканой структуре; E – модуль упругости основных и уточных нитей при растяжении; E_c – модуль жесткости основных и уточных нитей при сжатии; I_{oy} , $I_{y\xi}$ – момент инерции сечения, соответственно, основной нити относительно оси y и уточной нити относительно оси ξ ; μ_c – коэффициент Пуассона основных и уточных нитей при сжатии; n – расстояние между уточными нитями; l – расстояние между основными нитями; F_o – общая сила растяжения основной нити в зоне формирования ткани на ткацком станке; F_y – сила растяжения уточной нити перед прибоем на ткацком станке.

На основе предложенной математической модели и разработанной компьютерной программы, было выполнено прогнозирование следующих параметров структуры УТ: длин, прогибов и сжатия участков нитей; фазы строения и толщины структуры; линейного, поверхностного и объемного заполнения структуры нитями; поверхностной и объемной пористости; поверхностной и объемной плотности.

Численные значения параметров структуры УТ были получены посредством программной реализации компьютерной модели на языке программирования PYTHON. Адекватность использования компьютерной модели подтверждается сравнением значений прогнозируемых параметров со значениями, определенными из эксперимента. Сравнение результатов прогнозирования и экспериментальных исследований параметров структуры тканей показало достаточно хорошее их

совпадение. Относительная разность прогнозируемых и экспериментальных параметров в среднем не превосходит 15 %.

В пятом разделе на основе механико-аналитической модели структуры разработан метод прогнозирования характеристик прочностных свойств УТ. В основе метода прогнозирования разрывных характеристик ткани в направлении основы или утка лежит последовательное увеличение растяжения ткани (пошаговое изменение расстояния между нитями противоположной системы) с одновременным вычислением относительного удлинения нитей основы или утка и сил их растяжения. Относительное удлинение при растяжении ткани, например, в направлении основы на i – ом шаге определяется по формуле

$$\varepsilon_{oi}^f = \frac{n_i - n}{n}, \quad n_i = n + i\Delta n, \quad (8)$$

где n_i - расстояние между нитями утка на i – ом шаге растяжения, i – число шагов, Δn – приращение удлинения при растяжении ткани. Относительное удлинение при растяжении основных нитей определяется по формуле

$$\varepsilon_{oi} = \frac{K_{oi} - K_o}{n} \quad (9)$$

где K_{oi} – длина кривой AB основной нити на i – ом шаге растяжения. Силу растяжения ткани на i – ом шаге, приходящуюся на одну нить основы, можно получить из выражения

$$A_{fxi} = A_{xi} - A_x, \quad (10)$$

где A_{xi} – сила (реакция) A_x на i – ом шаге растяжения.

Анализ процесса растяжения ткани в направлении основы (утка) показал, что этот процесс можно разделить на два этапа. На первом этапе происходит рас-

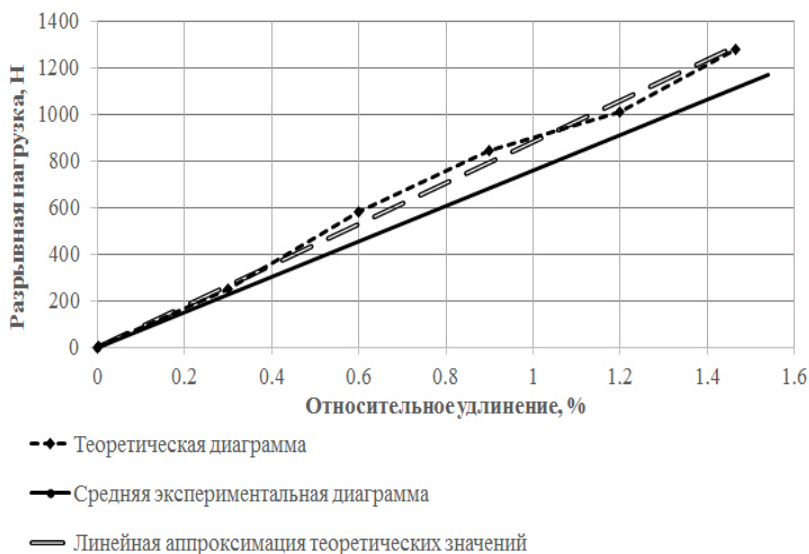


Рисунок 3 – Диаграммы растяжения УТ

формуле

прямление изогнутых нитей основы (утка) и дополнительный изгиб нитей утка (основы). На втором этапе происходит растяжение нитей основы (утка) вплоть до разрыва. Таким образом, приращение удлинения при растяжении ткани продолжается до тех пор, пока на r -ом шаге не будет выполнено условие разрыва основных (уточных) нитей.

Относительное разрывное удлинение ткани в направлении основы определяется по

$$\varepsilon_{or}^f = \frac{n_r - n}{n}, \quad (11)$$

где n_r – расстояние между нитями утка на r – ом шаге растяжения, при котором выполняется условие разрыва. Разрывную нагрузку ткани, приходящуюся на одну нить основы, можно получить из выражения

$$A_{f_{xr}} = A_{xr} - A_x, \quad (12)$$

где A_{xr} – сила A_x на r - ом шаге растяжения.

Численное прогнозирование прочностных свойств УТ осуществлялось при помощи современных методов компьютерного моделирования. Для визуализации построения диаграмм растяжения УТ использовалась математическая библиотека MATPLOTLIB языка программирования PYTHON.

Сравнение результатов прогнозирования и экспериментальных исследований характеристик прочностных свойств тканей показало достаточно высокую точность разработанного метода. Относительная разность прогнозируемых и экспериментальных параметров в среднем не превосходит 10 %. На рис. 3 представлена диаграмма, построенная по результатам прогнозирования, её линейная аппроксимация и диаграмма, построенная по результатам экспериментальных исследований растяжения УТ.

Шестой раздел диссертационной работы посвящена построению модели напряженно-деформированного состояния ПКМ, армированного УТ, прогнозированию его структуры и прочностных свойств, а также экспериментальной проверки полученных результатов.

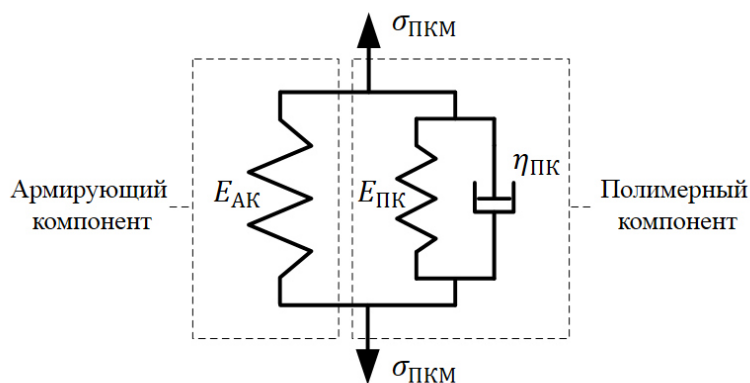


Рисунок 4 – Механическая модель напряженно-деформированного состояния ПКМ, армированного УТ, при растяжении

Построение механико-аналитической модели армированного ПКМ основывается на следующих допущениях: полимерный компонент (ПК) композиционного материала является вязкоупругим телом, которое может быть описано механической моделью Кельвина-Фойгта; УТ является абсолютно упругим телом и может быть описана пружиной с эквивалентной жесткостью;

армирование ПКМ УТ ведет к увеличению общей жесткости композиции. На рис. 4 представлена механическая модель напряженно-деформированного состояния, армированного ПКМ при растяжении.

Существующие математические модели адгезии компонентов позволяют в общем виде оценить стойкость ПКМ к расслаиванию, однако, инженерные методики расчета адгезионных взаимодействий с учетом топологии границы раздела и

физико-химических свойств компонентов ПКМ, армированных УТ, отсутствуют. При прогнозировании прочностных свойств на этапе создания армированных ПКМ, как правило, рассматриваются идеальные модели материалов, в которых обеспечивается равномерная передача усилий от одной фазы к другой, то есть реализуется принцип структурного единства материала. При этом, поля деформаций при растяжении армированного ПКМ считаются однородными. Прочностные свойства компонентов в значительной степени определяются модулями упругости, максимальными деформациями или максимальными напряжениями при растяжении.

Математическая модель структуры, представленная в разделе, позволяет прогнозировать поверхностную и объемную плотности ПКМ, армированного УТ. Прогнозирование прочностных свойств осуществляется при помощи модели напряженно-деформированного состояния ПКМ при растяжении, которая имеет вид

$$\sigma_{ПКМ} = E_{ПКМ} \varepsilon_{ПКМ} + \eta_{ПКМ} \frac{d\varepsilon_{ПКМ}}{dt}, \quad (13)$$

где $\sigma_{ПКМ}$, $E_{ПКМ}$, $\varepsilon_{ПКМ}$ - соответственно, напряжение, модуль релаксации и относительное удлинение, возникающие при растяжении ПКМ, а $\eta_{ПКМ}$ - коэффициент вязкого трения ПКМ.

Учитывая допущения принятые при построении модели армированного ПКМ и предполагая, что полимерный компонент имеет низкие вязкоупругие свойства, напряжение ПКМ при растяжении может быть представлено в виде

$$\sigma_{ПКМ} = \sigma_{АК} \gamma + \sigma_{ПК} (1 - \gamma), \quad (14)$$

где γ - коэффициент, определяющий отношение площадей поперечного сечения АК и ПКМ образца композиционного материала. После определения значений компонентов выражения (14), может быть выполнено прогнозирование характеристик прочностных свойств ПКМ.

Наиболее проблемной характеристикой ПКМ является разрушение его по межфазной границе, которое препятствует реализации свойств компонентов. При построении моделей ПКМ, как правило, основываются на результатах экспериментальных исследованиях адгезионного взаимодействия компонентов. Определение критериев разрушения ПКМ, осуществляется с учетом экспериментальных значений адгезионной прочности.

Исследования номенклатуры и свойств связующих материалов позволили определить тип составляющих ПК. В качестве ПК композиционного материала использовалась эпоксидно-диановая смола марки ЭД-20 отверженная отвердителем полиэтиленполиаминного типа.

Экспериментальные исследования компонентов ПКМ показали, что разрушение образцов отверженного ПК при растяжении наступает при значениях напряжений значительно ниже разрывного напряжения для УТ. При этом значение относительного разрывного удлинения примерно равно значению для УТ. Ис-

следования релаксационных свойств отвержденного ПК показали, что после снятия нагрузки релаксация напряжений составляет менее 5 %.

В качестве теоретического критерия предельного состояния образца ПКМ было выбрано достижение минимального значения относительного удлинения при растяжении ПК. Данные значения определялись исходя из статистического условия.

Для численного прогнозирования параметров структуры и характеристик прочностных свойств ПКМ математические модели были реализованы в виде компьютерных моделей в среде программирования PYTHON. Реализация компьютерных моделей позволяет получить следующие параметры структуры и характеристики прочностных свойств ПКМ: поверхностную и объемную плотность, нагрузку и напряжение во всем интервале удлинения, модуль упругости.

Для проверки результатов прогнозирования были изготовлены и экспериментально исследованы образцы изделий из ПКМ. Сравнение результатов прогнозирования и экспериментальных исследований параметров и характеристик ПКМ, показало достаточно высокую точность разработанных моделей. Относительная разность прогнозируемых и средних экспериментальных значений не превышает статистических погрешностей результатов экспериментов.

ВЫВОДЫ

1. Строение и технология производства УТ оказывают существенное влияние на их качество и должны учитываться при разработке армированных ПКМ.
2. На основе теоретических исследований контактных областей основных и уточных нитей в УТ получены функциональные зависимости между сжатием нитей и силой их взаимного давления.
3. На основе экспериментальных исследований контактных областей основных и уточных нитей в УТ получены значения модуля жесткости и коэффициента Пуассона углеродных нитей при сжатии в радиальном направлении.
4. Разработана механико-аналитическая модель структуры УТ. Модель позволяет рассчитать параметры структуры УТ в зависимости от параметров строения, технологических параметров производства и механических характеристик углеродных нитей.
5. Разработана механико-аналитическая модель прочностных свойств УТ. Модель позволяет рассчитать характеристики прочностных свойств УТ при растяжении.
6. Разработана механико-аналитическая модель прочностных свойств ПКМ, армированного УТ. Модель позволяет определить напряженно-деформированное состояние ПКМ и характеристики прочностных свойств при растяжении.
7. Достоверность результатов прогнозирования параметров структуры и характеристик прочностных свойств УТ и ПКМ подтверждается использованием

современных научных теорий, средств исследований и большим количеством выполненных экспериментальных исследований.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах

Статьи в рецензируемых журналах, входящих в «Перечень ВАК РФ»:

1. Primachenko, B. M. Influence of structure and production technology on quality of carbon fabrics / B.M. Primachenko, K.O. Strokin, E.P. Andreeva // *Fibre Chemistry*, 2014, Vol.45, №5. - P.274-279.

2. Primachenko, B. M. Study of quality of carbon fabric reinforced composite / B.M. Primachenko, K.O. Strokin, A.M. Kiselev // *Fibre Chemistry*, 2015, Vol.47, №4. - P.303-307.

Статьи в других научных журналах

3. Строкин, К. О. Анализ параметров строения и характеристик эксплуатационных свойств углеродных армирующих компонентов композиционных материалов / К. О. Строкин, Б. М. Примаченко // X Молодежная научно-техническая конференция «Взгляд в будущее – 2012». Материалы конференции. Санкт-Петербург, 30-31 мая 2012. - СПб.: ОАО «ЦКБ МТ «Рубин», 2012. - С.719-726.

4. Примаченко, Б. М. Метод решения контактной задачи в тканой структуре армирующего компонента композиционного материала / Б. М. Примаченко, К. О. Строкин // XXXIII Отраслевая научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов «Морское подводное оружие. Морские подводные роботы: вопросы проектирования, конструирования и технологий». Труды конференции. Санкт-Петербург, 21-22 мая 2014. - СПб.: АО «Концерн «МПО-Гидроприбор», 2014. - С.159-167.

5. Примаченко, Б. М. Теоретические и экспериментальные исследования композиционных материалов, армированных углеродными тканями. Часть 1. Исследования области контакта углеродных нитей в тканой структуре / Б. М. Примаченко, К. О. Строкин // *Вопросы материаловедения*, 2015, №4. - С.109-117.

6. Примаченко, Б. М. Теоретические и экспериментальные исследования композиционных материалов, армированных углеродными тканями. Часть 2. Механико-аналитическая модель структуры углеродной ткани / Б. М. Примаченко, К. О. Строкин // *Вопросы материаловедения*, 2017, №3. - С.157-168.

Прочие публикации

7. Строкин, К. О. Оценка качества углеродной ткани, используемой для армирующих компонентов композиционных материалов / К. О. Строкин, Е. П. Андреева // *Инновации молодежной науки. Тезисы докладов Всероссийской научной конференции молодых ученых*. - СПб.: СПГУТД, 2012. - С.100-101.

8. Строкин, К. О. Оценка качества ткани из углеродных нитей для композитов / К. О. Строкин, Е. П. Андреева // *Инновации молодежной науки. Тезисы докладов Всероссийской научной конференции молодых ученых*. - СПб.: СПГУТД, 2013. - С.188-189.

9. Строкин, К. О. Разработка метода определения деформационных характеристик углеродных основных и уточных нитей в контактных областях тканой структуры / К. О. Строкин // Инновации молодежной науки. Тезисы докладов Всероссийской научной конференции молодых ученых. - СПб.: СПГУТД, 2014. - С.227.

10. Строкин, К. О. Проектирование и разработка технологии формования композиционных материалов / К. О. Строкин, И. А. Барсукова // Инновации молодежной науки. Тезисы докладов Всероссийской научной конференции молодых ученых. - СПб.: СПГУТД, 2015. - С.124.

11. Примаченко, Б. М. Исследование армированных композиционных материалов / Б. М. Примаченко, К. О. Строкин, А. М. Киселев, [и др.] // III Международная научная конференция «Современные тенденции развития химии и технологии полимерных материалов» - СПб.: СПГУТД, 2015. - С.58-60.

12. Строкин, К. О. Прогнозирование структуры углеродных армирующих компонентов / К. О. Строкин // Инновации молодежной науки. Тезисы докладов Всероссийской научной конференции молодых ученых. - СПб.: СПГУТД, 2016. - С.108-109.

13. Строкин, К. О. Метод прогнозирования прочностных характеристик углеродных тканей / К. О. Строкин // Инновации молодежной науки. Тезисы докладов Всероссийской научной конференции молодых ученых. - СПб.: СПбГУПТД, 2017. - С.244-245.

14. Строкин, К. О. Статистический анализ и оценка действительных значений разрывных характеристик углеродных нитей / К. О. Строкин, А. Ю. Шевченко, Е. А. Переслегина // Инновации молодежной науки. Тезисы докладов Всероссийской научной конференции молодых ученых. - СПб.: СПбГУПТД, 2017. - С.245-246.

15. Строкин, К. О. Разработка технологии производства и исследование композиционных материалов с различной структурой и степенью армирования углеродными тканями / К. О. Строкин, А. Р. Матросова, А. Т. Ксениди // Инновации молодежной науки. Тезисы докладов Всероссийской научной конференции молодых ученых. - СПб.: СПбГУПТД, 2017. - С.246-247.

16. Строкин, К.О. Прогнозирование прочностных свойств композиционного материала, армированного углеродной тканью / К. О. Строкин, Б. М. Примаченко // Шестнадцатая конференция молодых ученых и специалистов «Новые материалы и технологии». Тезисы докладов. Санкт-Петербург, 20-21 июня 2017. - СПб.: НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей», 2017. - С.32-33.

Подписано в печать . 2018. Печать трафаретная.
Усл. печ. л. 1,0. Формат 60 × 84 1/16. Тираж 100 экз. Заказ №
Отпечатано в типографии СПбГУПТД
191028, Санкт-Петербург, ул. Моховая, д.26