

На правах рукописи

**БЕЗМЕЛЬНИЦЫН Александр Викторович**

**ОЦЕНКИ ЖЕСТКОСТИ И ПРОЧНОСТИ ВТУЛОК  
ОПОРНЫХ УЗЛОВ ДОРОЖНЫХ МАШИН  
НА ОСНОВЕ МНОГОМАСШТАБНЫХ ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ  
ПОРИСТОГО ТКАНЕВОГО СТЕКЛОПЛАСТИКА**

01.02.04 — Механика деформируемого твердого тела

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Челябинск – 2021

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

**Научный  
руководитель**

**Сапожников Сергей Борисович,**  
доктор технических наук, профессор

**Официальные  
оппоненты:**

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

**Пестренин Валерий Михайлович,**  
кандидат физико-математических наук, доцент кафедры вычислительной и экспериментальной механики ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет»

**Ведущая  
организация**

ФГБОУ ВО «Казанский национальный  
исследовательский технический университет имени  
А.Н. Туполева-КАИ»

Защита состоится «11» июня 2021 года в 14-00 на заседании диссертационного совета Д 999.211.02, созданного на базе Пермского национального исследовательского политехнического университета и Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук по адресу: 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29, ауд. 423 б.

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

Автореферат разослан «      »      2021 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор технических наук, профессор

А.Г. Щербинин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Экономические аспекты производства высоконагруженных опор скольжения (система вал-втулка-корпус) заставляют рассматривать замену дорогостоящей бронзы на стеклопластик, полученный намоткой с последующим отверждением при высокой температуре тканевых полуфабрикатов (препрегов). Это позволяет изготавливать втулки любых размеров с минимальными припусками под механическую обработку. *Объектом исследования* в данной работе является антифрикционная втулка, изготовленная из тканевого стеклопластика методом окружной намотки.

Тканевые композитные материалы с высокой открытой пористостью, полученные намоткой, имеют значительный потенциал применения в подобных конструкциях, поскольку открытые поры являются емкостью для консистентной смазки, делая конструкцию опоры «умной», т.е. самосмазывающейся при начале движения в режиме сухого трения. Эта особенность позволяет отказаться от централизованной системы смазки, имеющей место в подшипниках скольжения с бронзовыми втулками, существенно снизить затраты на эксплуатацию. Кроме того, втулки из тканевых *композитов с открытой пористостью* (КОП) более податливы в трансверсальном направлении по сравнению с беспористыми композитами. Это позволяет обеспечить более развитую площадку контакта с валом под нагрузкой, снизить контактные нормальные и касательные напряжения, и приводит к снижению износа вала и общему росту долговечности опорного узла. Пониженная прочность материала при этом заставляет более внимательно подходить к управлению пористостью, не допуская преждевременного разрушения под нагрузкой.

Опорные узлы рабочих органов дорожных машин работают при малых скоростях скольжения, что снижает требования к теплопроводности материала втулки. На первое место выходят механические характеристики: жесткость и прочность при действии радиальных статических или ударных нагрузок. В этом случае при проектировании втулок из композитов делается анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) и оценка прочности и жесткости в предположении однородности, анизотропии материала и отсутствия начальных напряжений. Однако это в общем случае неверно, так как при намотке препрега на оправку структура композита и физико-механические свойства слоев изменяются по толщине, что приводит к возникновению остаточных напряжений после отверждения полимерной матрицы. При увеличении толщины втулки из КОП растет вероятность появления дефектов типа межслойных трещин, которые, очевидно, недопустимы. *Таким образом, для толстостенных изделий с высокой пористостью, полученных окружной намоткой тканевого препрега, учет изменения физико-механических свойств слоев по толщине является важным условием при анализе НДС и оценке прочности изделий.*

**Степень разработанности темы исследования.** Исследованиям связей между структурой материала (параметрами повторяющейся ячейки) и физико-механическими свойствами *беспористых* конструкционных волокнистых композитов, полученных намоткой, посвящены работы Н.А. Алфутова, А.Н. Аношкина, А.И. Богомолова, В.В. Болотина, И.М. Буланова, В.В. Васильева, Ю. А. Вашукова, В.М. Голощапова, Р.С. Зиновьева, М.А. Комкова, А.Ю. Муйземнека, В.Я. Савицкого, J. Barbero, C.S. Grove, Lomov S.V., P.K. Mallick, M. Pierre, G.H. Raelvim, D.V. Rosato, M.M. Shokrieh и др. В то же время, в литературе практически отсутствуют работы, посвященные исследованию закономерностей упругого деформирования тканевых КОП (проблемы гомогенизации пористых композитов) и оценке прочности изделий из них.

Таким образом, **целью диссертационного исследования** является разработка методов оценки жесткости и прочности деталей из композитов с открытой пористостью, полученных окружной намоткой, на основе многомасштабных численных моделей.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести экспериментальные исследования микроструктуры втулок из тканевых КОП, полученных намоткой, а также их упругих и теплофизических свойств.
2. Разработать и экспериментально верифицировать численные модели, позволяющие на основании данных о микроструктуре втулки из тканевых КОП определять (прогнозировать) упругие и теплофизические свойства слоев.
3. Провести расчетно-экспериментальное исследование остаточных межслойных технологических напряжений и их влияния на трансверсальную прочность втулки из тканевого КОП.
4. Разработать расчетно-экспериментальную методику оценки несущей способности втулок из тканевых КОП в составе высоконагруженных опор скольжения рабочих органов дорожных машин при действии эксплуатационных нагрузок.

**Достоверность результатов** обеспечивается выбором сертифицированных программных пакетов для численного решения краевых задач механики деформируемого твердого тела, сравнением полученных расчетных и экспериментальных данных с результатами, полученными другими авторами. Достоверность также подтверждается корректным использованием поверенного испытательного и измерительного оборудования Лаборатории экспериментальной механики и Научно-образовательного центра «Нанотехнологии» ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)».

**Научная новизна** результатов данной работы, в которой *объектом является втулка*, полученная окружной намоткой слоев тканевого композита с открытой пористостью заключается в следующем:

1. Впервые для определения полного комплекса упругих и теплофизических свойств *открытопористого* слоя как ортотропного упругого гомогенного материала использовано *двухмасштабное* (микро/мезо) моделирование.
2. Получены новые экспериментальные данные о распределении по радиусу втулки пористости, ряда упругих и теплофизических свойств.
3. Разработана расчетно-экспериментальная методика оценки остаточных межслойных технологических напряжений во втулках, возникающих в процессе изготовления *за счет учета неоднородности распределения по радиусу физико-механических свойств слоев*.
4. Предложен метод оценки несущей способности втулок в условиях эксплуатации с учетом фрикционных контактов с валом и непропорционального нагружения радиальной нагрузкой и крутящим моментом на основе численного анализа напряженно-деформированного состояния.

**Практическая значимость работы** состоит в возможности прогнозирования упругих и теплофизических свойств КОП на основе использования комплекса многоуровневых моделей и экспериментальной информации о структуре КОП, а также применении расчетно-экспериментальной методики оценки несущей способности втулок из КОП в составе высоконагруженных малоподвижных опор скольжения. Полученные результаты могут быть использованы в конструкторских бюро, занимающихся разработкой дорожной и строительной техники, на предприятиях, изготавливающих опоры скольжения. Результаты работы были использованы при выполнении гранта Российского научного фонда «Разработка ударостойких композитных материалов и конструкций для плавающих бронеавтомобилей» проект № 14-19-00327 и «Разработка новых полимерных волокнистых композитных материалов с управляемой нелинейностью механического поведения и методов проектирования из них элементов турбовентиляторных двигателей», выполняющегося в ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» (проект № 18-19-00377/РНФ2018150). Получены справки о внедрении результатов научной работы на предприятиях ООО НПП «Полидор», ООО «Сатурн».

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Научная гипотеза о влиянии на величину остаточных технологических напряжений в изделиях, получаемых методом силовой окружной намотки, градиента физико-механических свойств слоев, который определяется неоднородностью мезоструктуры композитного материала по толщине изделия.

2. Результаты экспериментальных исследований изменения по толщине физико-механических свойств и микроструктуры КОП толстостенных втулок, полученных радиальной намоткой;

3. Многоуровневые численные модели для определения физико-механических свойств КОП;

4. Расчетно-экспериментальная методика оценки остаточных технологических напряжений в конструкциях, полученных окружной намоткой;

5. Результаты сравнительных расчетов несущей способности бронзовых втулок и втулок из КОП при действии эксплуатационных нагрузок.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных и региональных конференциях: 19-й Международной конференции по композитным материалам (Монреаль, 28 июля-2 август 2013), 4-й международной конференции «HighMatTech-2013» (Киев, 7-11 октября 2013), 18-й Международной конференции по механике композитных материалов (Рига, 2-6 июня 2014), 20-й Международной конференции по композитным материалам (Копенгаген, 19-24 июля 2015), ежегодных конференциях преподавателей и сотрудников ЮУрГУ (Челябинск 2015-2019).

Полностью диссертация обсуждалась на научных семинарах:

- кафедры «Техническая механика» Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета). Руководитель – кандидат технических наук, доцент П.А. Тараненко;
- Института механики сплошных сред УрО РАН. Руководитель – академик РАН, доктор технических наук, профессор В.П. Матвеевко.
- кафедр «Механика композиционных материалов и конструкций» и «Экспериментальная механика и конструкционное материаловедение» Пермского национального исследовательского политехнического университета. Руководители – доктор технических наук, профессор А.Н. Аношкин и доктор физико-математических наук, профессор В.Э. Вильдеман;
- кафедры «Вычислительная и экспериментальная механика» Пермского государственного национального исследовательского университета. Руководитель - доктор технических наук, профессор В. Н. Терпугов

Результаты диссертационной работы использованы при выполнении научно-исследовательских работ по грантам Российского научного фонда (проект № 14-19-00327), (проект № 18-19-00377/РНФ2018150) и ряда хозяйственных договоров с промышленными предприятиями.

**Публикации.** Результаты исследований по теме диссертационной работы отражены в 6 публикациях, из них 4 статьи в ведущих рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень изданий, индексируемых в SCOPUS/Web of Science или рекомендованных ВАК.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы. Работа содержит 78 рисунков, 6 таблиц. Общий объем диссертационной работы составляет 118 страниц, список литературы включает 162 источника.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и основные задачи исследования. Приведены основные результаты, показана их научная новизна и практическая значимость. Дано краткое описание содержания диссертации по главам.

**В первой главе** проведен обзор отечественной и зарубежной литературы, посвященный применению современных полимерных и композитных материалов в высоконагруженных опорах скольжения, работающих в условиях сухого трения. Отмечено, что заметную нишу в опорных устройствах рабочих органов дорожных машин заняли самосмазывающиеся втулки из тканевых КОП, полученные намоткой. Практика показала, что для снижения динамической составляющей нагрузки при работе дорожных машин необходимо использовать втулки с достаточно большой толщиной стенки. Но с увеличением толщины втулки растет вероятность расслоений из-за высоких технологических трансверсальных (межслойных) растягивающих напряжений, возникающих при охлаждении изделия до комнатной температуры после намотки и отверждении полимерного связующего. В литературе рассмотрен ряд механизмов возникновения таких напряжений, среди которых неоднородные температурные поля при охлаждении, неодновременность процесса полимеризации по толщине и др. Однако переменность физико-механических свойств слоев по радиусу изделия в процессе намотки из-за трансверсальной сжимаемости пористого препрега не рассматривалась. Нет также научно обоснованных методов расчетной оценки прочности втулок из тканевых КОП, работающих в опорных устройствах дорожных машин.

На основании проведенного анализа сформулированы **цель** и **задачи** диссертационного исследования, изложенные выше.

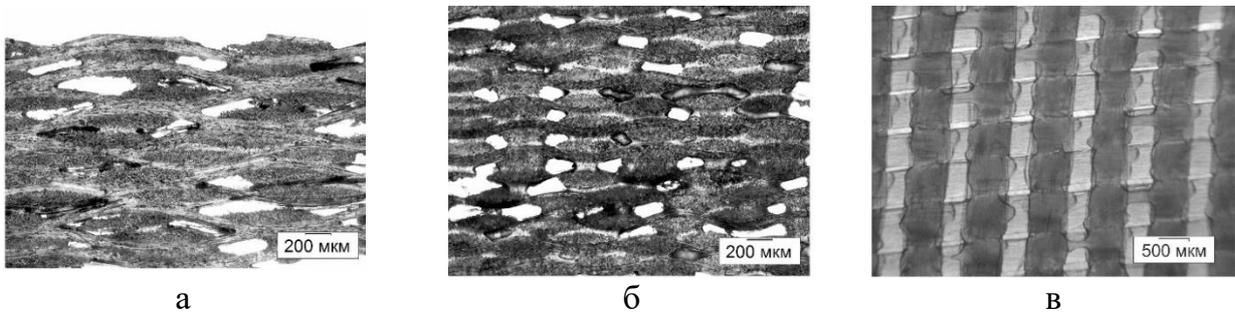
**Вторая глава** посвящена изучению микроструктуры, экспериментальным и расчетным исследованиям физико-механических и триботехнических свойств толстостенных втулок из КОП - стеклопластика с тканевым армированием.

Экспериментальные исследования были проведены на образцах, полученных методом радиальной намотки препрега на металлическую оправку диаметром 75мм, с последующим отверждением по специальному температурному режиму. Препрег представлял собой стеклоленту сатинового переплетения шириной 300 мм, пропитанную эпоксифенольной смолой. После отверждения смолы и охлаждения трубчатая заготовка была снята с оправки и механически обработана на токарном станке (ширина 15мм, наружный диаметр 105 мм (рисунок 1).



Рисунок 1 – Втулка опорного устройства

Изучение микроструктуры КОП было проведено на оптическом микроскопе Olympus BX51 на срезах толщиной 0,2 мм в проходящем свете. Образцы были вырезаны из втулки с помощью водоохлаждаемой низкоскоростной алмазной пилы IsoMet Low Speed фирмы BUEHLER. Срезы получали таким образом, чтобы поверхности срезов были перпендикулярны нитям основы или утка. На рисунках 2, 3 показана структура внешних и внутренних слоев образца.



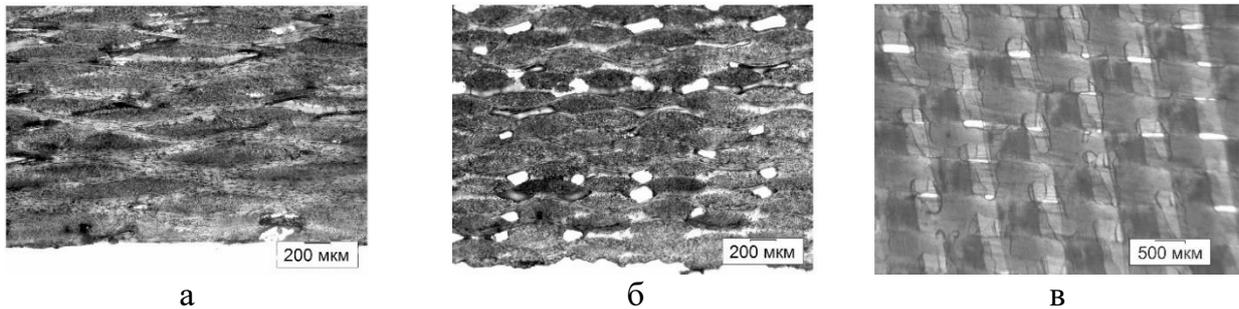
а

б

в

Рисунок 2 – Структура внешних слоев втулки:

нити основы параллельны, а нити утка перпендикулярны плоскости среза (а); нити основы перпендикулярны, а нити утка параллельны плоскости среза (б); нити основы горизонтальны, а нити утка вертикальны (в).



а

б

в

Рисунок 3 – Структура внутренних слоев втулки:

нити основы параллельны, а нити утка перпендикулярны плоскости среза (а); нити основы перпендикулярны, а нити утка параллельны плоскости среза (б); нити основы горизонтальны, а нити утка вертикальны (в).

Анализ десяти изображений поперечного сечения нитей позволил получить оценку объемной доли стекловолокон и смолы  $69 \pm 2\%$  и  $31 \pm 3\%$  соответственно (рисунок 4).

Для определения физико-механических свойств по толщине композита были исследованы пять втулок, изготовленных по единой технологии. Из каждой втулки были вырезаны сегменты с центральным углом  $90^\circ$ , которые далее разделяли на тонкие образцы как показано на рисунке 5. Далее были проведены квазистатические испытания образцов на трехточечный изгиб (рисунок 6а) для определения модуля упругости в окружном направлении по балочной схеме. Везде ниже использована электромеханическая машина INSTRON 5882 с силоизмерителем 100 кН с погрешностью измерения нагрузки  $\sim 1$  Н, а перемещения –  $\sim 1$  мкм. Распределение окружного модуля упругости  $E_y$  по толщине кольца представлено на рисунке 6б. Объемные доли волокон, матрицы и пор в композите были определены методами взвешивания и выжигания.

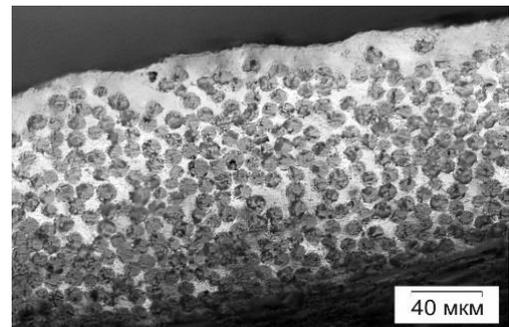


Рисунок 4 – Микроструктура пропитанной нити

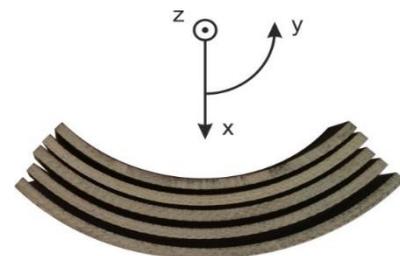


Рисунок 5 – Общий вид образцов

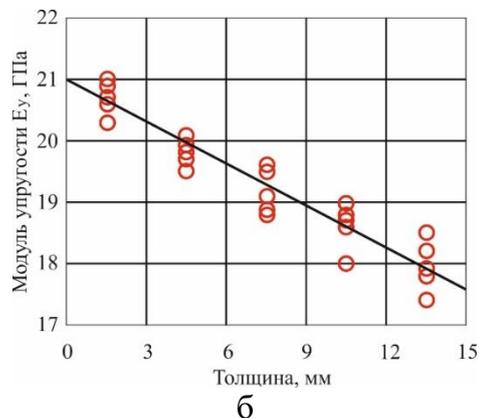


Рисунок 6 – Образец в нагрузочном приспособлении (а) и диаграмма распределения модуля упругости по толщине кольца (б) с указанием диапазона разброса данных

Экспериментальное определение физико-механических свойства матрицы: коэффициента теплового линейного расширения (КТЛР), плотности, модуля упругости и коэффициента Пуассона, - подробно рассмотрено в тексте диссертации.

Распределения плотности, объемной доли стекловолокон, матрицы и пор по толщине колец представлены на рисунке 7.

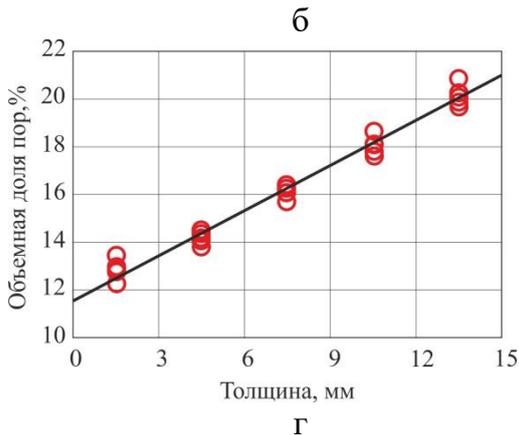
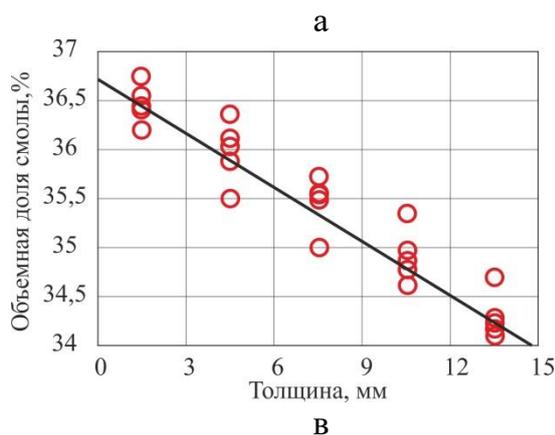
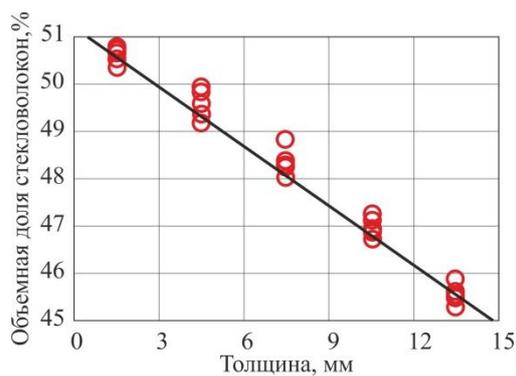
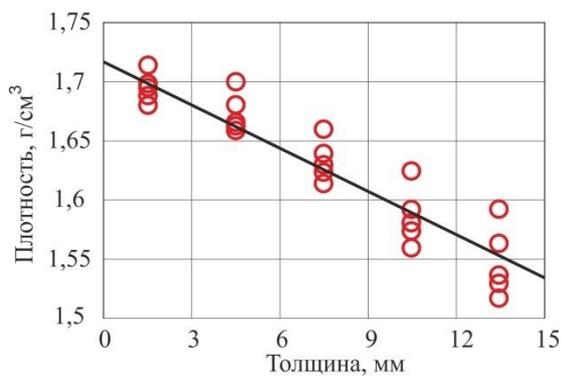


Рисунок 7 – Диаграмма распределения по толщине кольца: плотности (а); объемных долей стекловолокон (б), матрицы (в) и пор (г)

Исходя из предположения, что объемная доля матрицы в нитях неизменна по толщине кольца (задается технологией предварительной пропитки), было найдено распределение по толщине *свободной* смолы, находящейся *между* нитями. Ее объем изменяется по толщине незначительно и составляет  $14,64 \pm 0,13\%$ .

Исследование КТЛР было проведено на образцах, вырезанных по толщине втулки в двух направлениях (рисунок 8).

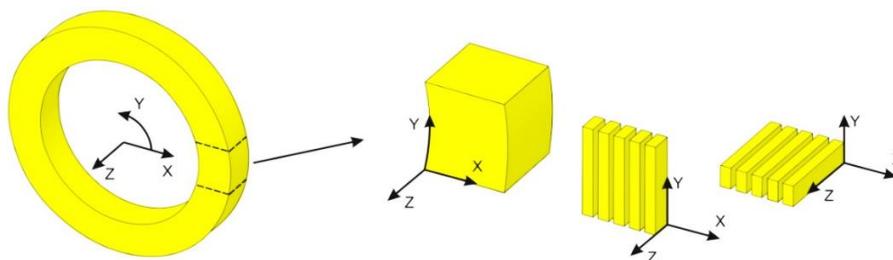


Рисунок 8 – Схема расположения образцов

Определение КТЛР образцов проводилось на dilatометре NETZSCH DIL402C. Во время эксперимента температуру изменяли от 22 до 90°C со скоростью 1 °C/мин.

Распределение КТЛР по толщине для стеклопластиковых втулок представлено на рисунке 9.

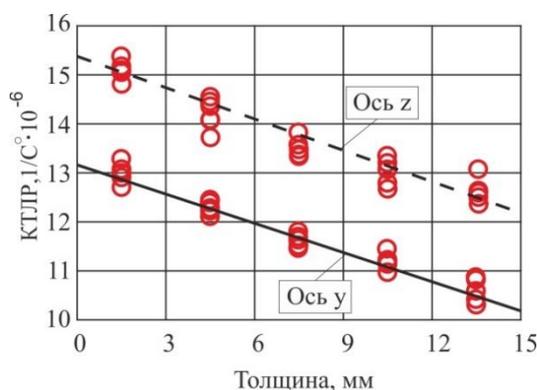


Рисунок 9 – Диаграмма распределения величин КТЛР по толщине втулки в осевом (z) и окружном (y) направлениях

Для исследования трансверсальной (в радиальном направлении) прочности стеклопластиковой втулки и влияния на нее остаточных технологических напряжений было проведено два типа испытаний: растяжение втулки сосредоточенными силами в радиальном направлении (рисунок 10), растяжение образцов с размерами 15×15×12мм, вырезанных из втулки на специальном приспособлении, исключая изгиб (рисунок 11), с помощью технологии клеивания. В обоих случаях было испытано по пять образцов. В первом случае нагрузка расслоения при испытаниях составила 9,01±0,60 кН. Во втором случае нагрузка разрушения составила 2,83±0,05 кН. Сравнение величин трансверсальных пределов прочности, полученных двумя методами, представлено ниже в главе 3.



Рисунок 10 – Испытания втулки на расслоение при растяжении

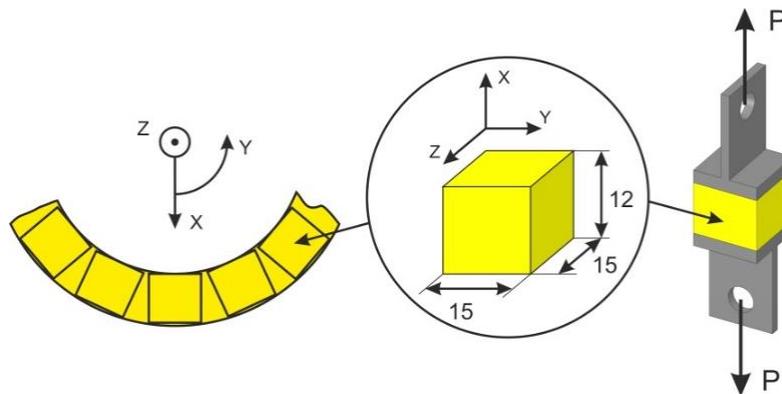


Рисунок 11 – Схема вырезки образцов и их испытания на растяжение

**Третья глава** состоит из трех частей, в которых последовательно, на двух масштабных уровнях (микро- и мезо-) рассмотрено решение проблемы гомогенизации КОП - перехода от физико-механических свойств волокон и матрицы к свойствам однонаправленного композита (нити), составленного из этих компонентов, и к свойствам *пористых* тканевых слоев, составленных из переплетенных нитей. Такая последовательность модельных исследований обусловлена невозможностью чисто экспериментального определения всех физико-механических констант, необходимых для МКЭ-анализа напряженного состояния втулки опорного узла (глава 4) при его нагружении.

Упругие и теплофизические свойства нитей (как однонаправленных композитов с регулярной структурой) были найдены при помощи конечно-элементного анализа с использованием литературных данных о свойствах стекла и данных о свойствах эпоксифенольной матрицы, полученных экспериментально. Для определения модулей упругости и коэффициентов Пуассона ( $E_x$ ,  $E_y$ ,  $E_z$ ,  $\nu_{xy}$ ,  $\nu_{yz}$ ,  $\nu_{zx}$ ) на свободных поверхностях представительного элемента (рисунок 12 а) были заданы условия зеркальной симметрии, а на других поверхностях осуществлялось взаимодействие со вспомогательными жесткими кубическими элементами, за счет контакта типа No Separation (рисунок 12 б). Для определения трех величин модулей сдвига ( $G_{yz}$ ,  $G_{zx}$ ,  $G_{xy}$ ) была использована более сложная самосогласованная модель (представительный элемент, погруженный в гомогенное анизотропное тело), подробно рассмотренная в тексте диссертации.

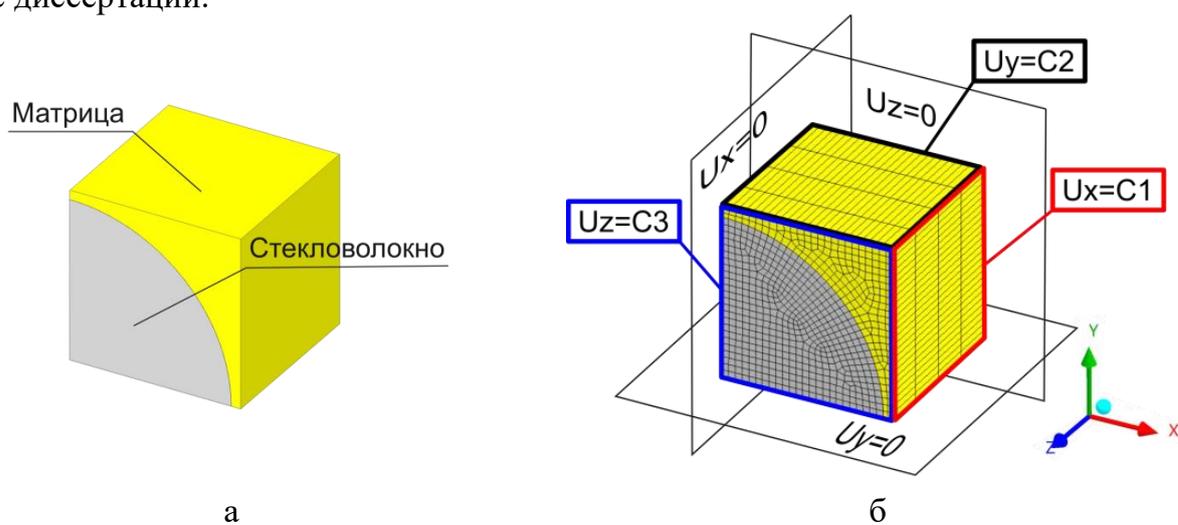


Рисунок 12 – МКЭ-моделирование нити: трехмерная модель (а); граничные условия и сетка конечных элементов (б)

Исходя из допущения, что каждая фаза является однородной, изотропной и линейно упругой, были найдены упругие и теплофизические свойства однонаправленного композита - микропластика.

В таблице 1 приведены характеристики материалов, использованные при микро-моделировании МКЭ.

Таблица 1 – Упругие и теплофизические свойства материалов

Материал	$E$ (ГПа)	$\alpha$ ( $10^{-6}/C^0$ )	Коэффициент Пуассона
Эпоксифенольная матрица	3,5	58,0	0,35
Стекловолокно	72,3	5,5	0,22

Результаты расчета теплофизических и механических свойств, для элементарной ячейки однонаправленного композита показаны в таблице 2.

Таблица 2 – Упругие и теплофизические свойства нити.

$E_z$ (ГПа)	$E_x=E_y$ (ГПа)	$G_{xz}=G_{yz}$ (ГПа)	$G_{xy}$ (ГПа)	$\nu_{xz}=\nu_{yz}$	$\nu_{xy}$	$\alpha_z$ ( $10^{-6}/C^0$ )	$\alpha_x=\alpha_y$ ( $10^{-6}/C^0$ )
51,4	22,6	9,6	5,0	0,25	0,23	6,88	21,0

Полученные результаты были использованы ниже при конечно–элементном ме-зо-моделировании пористого тканевого препрега, состоящего из переплетенных пропитанных нитей.

Кольцо толщиной 15мм, полученное намоткой препрега из стеклоткани толщиной 0,20 мм, состоит из 75 слоев. Учет каждого из этих слоев со своими отдельными свойствами в структуре кольца представляет весьма трудоемкую задачу. Учитывая практически линейное распределение свойств по толщине (рисунки 6б, 7 и 9), можно для целей гомогенизации детально рассмотреть лишь две представительные ячейки (структуры), соответствующие наружному и внутреннему слоям стеклоткани в кольце (рисунок 13, экстраполяция на 0 и на 15 мм). Остальные слои будут иметь промежуточные свойства в зависимости от их положения.

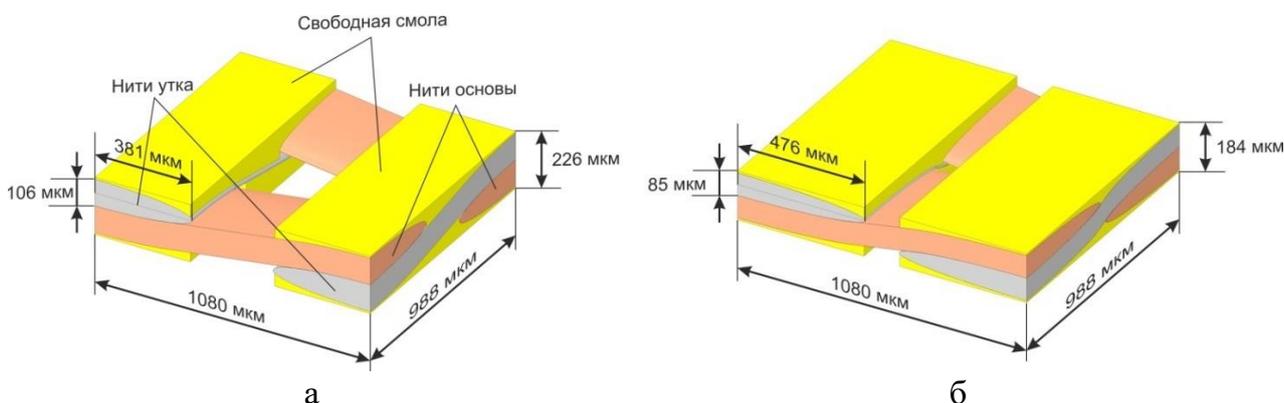


Рисунок 13 – Представительная ячейка: внешнего слоя (а); внутреннего слоя (б)

На свободных краях ячеек заданы условия зеркальной симметрии, а на других поверхностях осуществлялось взаимодействие со вспомогательными абсолютно

жесткими элементами, за счет контакта типа No Separation (рисунок 14 а). Для оценки сдвиговых свойств ячеек использована самосогласованная модель, приведенная в тексте диссертации. Нить (микропластик, состоящий из непрерывных волокон, пропитанных матрицей), имеет трансверсально изотропные в плоскости ХУ механические и теплофизические свойства. По этой причине при моделировании для каждого элемента локальная система координат назначалась таким образом, чтобы ось Z каждого элемента направлялась вдоль волокон нити (рисунок 14 б). На границе соприкосновения волокон использовался тип контакта *Bonded* (склейка).

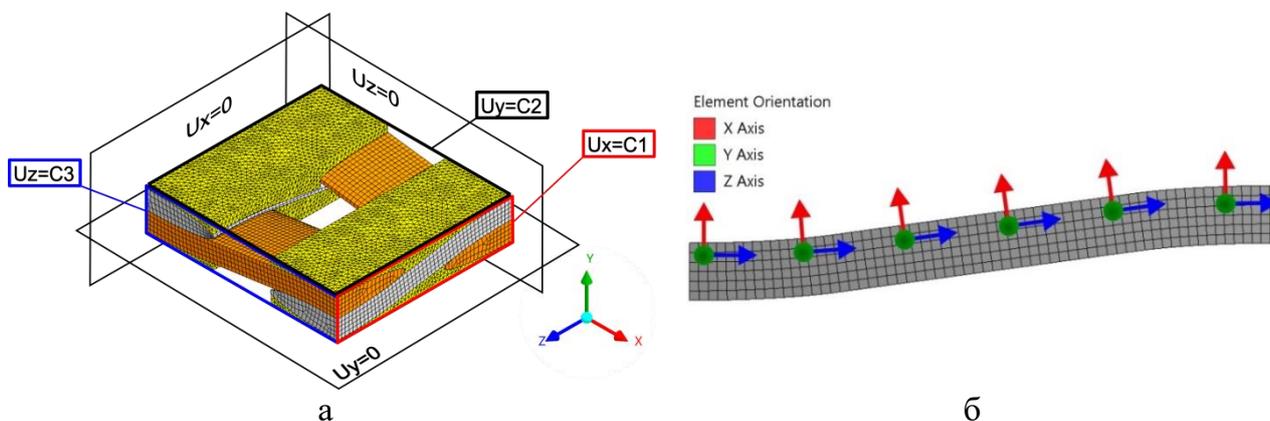


Рисунок 14 – Граничные условия и сетка конечных элементов для представительной ячейки (а), локальная система координат микропластика (б)

Результаты вычислений теплофизических и механических свойств представительных ячеек приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Упругие и теплофизические свойства представительных ячеек

	Представительная ячейка внутреннего слоя	Представительная ячейка наружного слоя
$E_y$ (ГПа)* рисунок 5 б	20,7/21,0	17,5/17,7
$E_z$ (ГПа)	20,3	17,0
$E_x$ (ГПа)	9,50	5,30
$G_{xy}$ (ГПа)	2,50	2,10
$G_{xz}$ (ГПа)	2,60	2,30
$G_{yz}$ (ГПа)	4,50	4,30
$\nu_{yz}$	0,21	0,21
$\nu_{xy}$	0,17	0,15
$\nu_{xz}$	0,20	0,17
$\alpha_y$ ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )* рисунок 8	13,8/13,2	10,7/10,2
$\alpha_z$ ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )* рисунок 8	14,9/15,3	12,7/12,1
$\alpha_x$ ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )	30,7	31,5

\*параметры, по которым были верифицированы мезомодели структуры; в знаменателе – экспериментальные величины.

Полученные значения модулей упругости  $E_y$  и КТЛР  $\alpha_y$  и  $\alpha_z$  согласуются с экспериментально определенными (экстраполированными на 0 и 15 мм) значениями с погрешностью менее 5%, что позволяет использовать полный расчетный комплект (9+3) свойств при создании макромоделей втулки с ортотропными и неоднородно распределенными по толщине свойствами.

В процессе производства втулку нагревали (полимеризация) до температуры  $180^{\circ}\text{C}$  и охлаждали до комнатной температуры, затем снимали с металлической оправки. Такой технологический цикл вызывает появление остаточных технологических напряжений (ОТН) в кольце, вследствие неоднородного распределения КТЛР по толщине (рисунок 9), что вызывает неравномерную температурную усадку. Используя упругие характеристики, полученные при моделировании микроструктуры КОП и распределение по толщине КТЛР, были вычислены радиальные ОТН, образующиеся после отверждения и охлаждения во втулке. При охлаждении, когда температура достигает точки стеклования  $T_g$ , матрица втулки переходит из высокоэластического в стеклообразное состояние, которое сопровождается резким увеличением модуля упругости и снижением скорости протекания релаксационных процессов, возникают ОТН. Для матрицы на основе эпоксифенольной смолы  $T_g \approx 90^{\circ}\text{C}$ . При термоупругом моделировании процесса охлаждения до комнатной температуры  $T_r$  ( $T_r = 20^{\circ}\text{C}$ ) в расчете задавали изменение температуры  $\Delta T = T_r - T_g = -70^{\circ}\text{C}$ .

Далее, для расчетов величин радиальных  $\sigma_x$  остаточных напряжений предложен вариант, в котором слои объединены в группы, в которых свойства неизменны и получены осреднением по группе. Исследование зависимости максимальных межслойных остаточных напряжений от количества групп показало, что изменение с 8 до 10 групп по толщине дает изменение значения  $\sigma_x$  не более 0,5%. В расчете из соображений симметрии была рассмотрена 1/8 кольца. На свободных гранях заданы условия зеркальной симметрии (рисунок 15 а). Результаты МКЭ-анализа напряженного состояния кольца в цилиндрической системе координат приведены на рисунке 15 б (нормальные напряжения  $\sigma_x$ ).

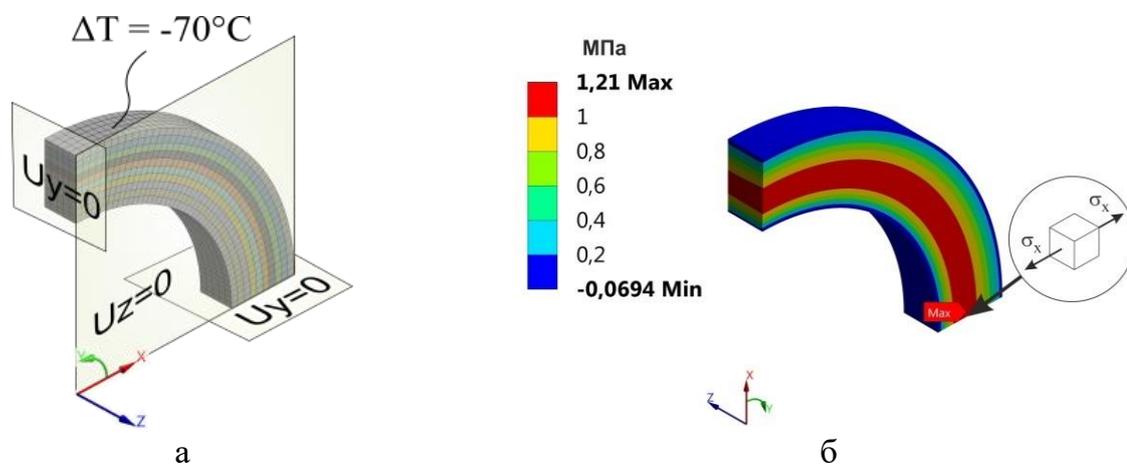


Рисунок 15 – Граничные условия и сетка конечных элементов для кольца (а) и напряжения после охлаждения  $\sigma_x$  (б)

В третьей части для оценки трансверсальной прочности стеклопластика при растяжении в составе кольца был проведен конечно-элементный анализ напряженного состояния. Нагрузка для него была получена из серии экспериментов на растяжение до разрушения колец диаметрально приложенными силами и равнялась 9,01 кН (см. стр. 10). В расчетах также была рассмотрена 1/8 кольца под нагрузкой  $P=2,25$  кН. Сетка конечных элементов и граничные условия приведены на рисунке 16 а. Результаты МКЭ-анализа напряженного состояния кольца в цилиндрической системе координат приведены на рисунке 16 б (нормальные напряжения  $\sigma_x$ ).

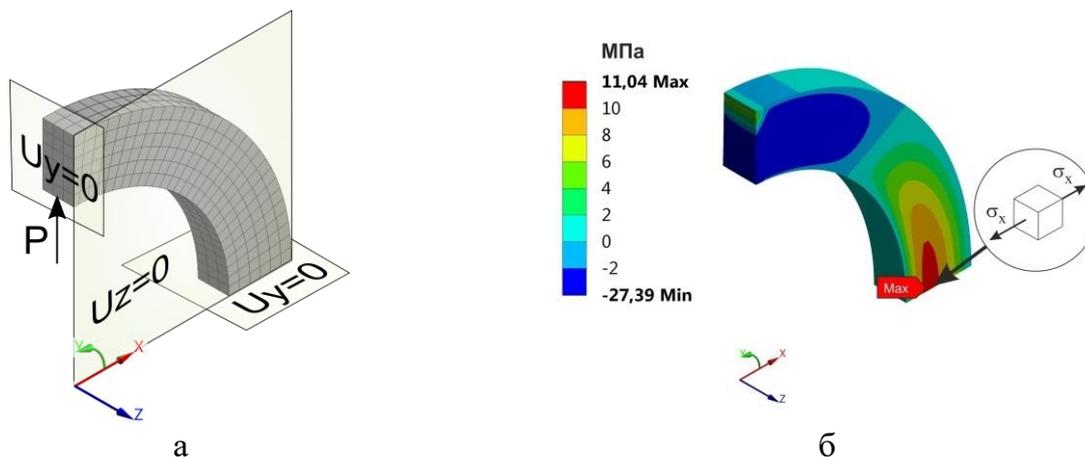


Рисунок 16 – Граничные условия и сетка конечных элементов для кольца (а) и напряжения при растяжении кольца  $\sigma_x$  (б)

Численное моделирование показало, что при нагрузке 9,01 кН максимальное значение трансверсальных напряжений равно  $\sigma_x \approx 11,04$  МПа. Следует отметить, что результаты измерения предела прочности, экспериментально полученные при радиальном одноосном растяжении колец (рисунок 10), не согласуются с данными, которые были получены при трансверсальном растяжении параллелепипедов (рисунок 11) на 1,39 МПа. Это, очевидно, связано с тем, что в целых втулках присутствуют остаточные технологические напряжения (ОТН), которые снимаются в процессе вырезки образцов.

Максимальное значение трансверсальных ОТН после охлаждения и снятия с оправки составляют  $\sigma_x = 1,26$  МПа. Это значение хорошо согласуется с отмеченным выше значением 1,39 МПа с учетом сложности задачи.

Из расчета получено, что ОТН невелики, но могут заметно снизить прочность, если в процессе намотки толстостенных колец будет получена большая разность коэффициентов линейного расширения, чем в рассмотренных кольцах.

**В четвертой главе** рассмотрена расчетно-экспериментальная методика оценки несущей способности втулок опорного катка гусеничного движителя трубоукладчика ТР-20 из КОП, полученных намоткой в сравнении с типовой втулкой из бронзы БрО10Ц2. Максимальная эксплуатационная нагрузка на каток составляет 165кН.

Для проведения исследований была изготовлена втулка из КОП с габаритами, необходимыми для установки в опорный каток (внутренний диаметр 70 мм, длина 70 мм, наружный диаметр 76 мм).

Триботехнические испытания по определению коэффициента трения проводились на машине трения ИИ 5018. Перед испытаниями втулки пропитывались консистентным смазочным материалом Литол 24. Среднее давление на поверхность вала составляло 4,5 МПа. Значение коэффициента трения покоя составило  $0,12 \pm 0,01$ . Оно необходимо для определения величины касательного напряжения на поверхности контакта вал-втулка по известной величине давления перед началом скольжения.

Для оценки модуля упругости и предела прочности при радиальном сжатии из втулки были вырезаны образцы с размерами  $10 \times 10 \times 3$  мм (пять образцов) и испытаны на специальном нагрузочном приспособлении (рисунок 17). Оно позволяет прикладывать практически однородное сжатие к фрагменту стеклопластикового кольца, используя цилиндрические поверхности, совпадающие по кривизне с верхней и нижней поверхностью фрагмента.

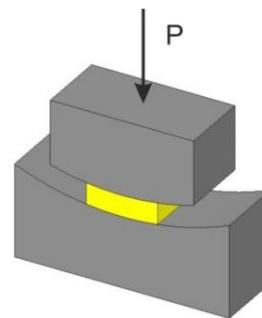


Рисунок 17 – Схема нагрузочного приспособления

Полученные значения трансверсального модуля упругости и предела прочности при сжатии равны  $E_x = 5,53 \pm 0,20$  ГПа и  $F_{xc} = 208 \pm 27$  МПа соответственно.

Также из втулки было вырезано шесть образцов (сегментов) шириной 20 мм и центральным углом  $60^\circ$  (рисунок 18) для определения предела прочности при межслойном сдвиге (трехточечный изгиб короткой балки, рисунок 19 а).

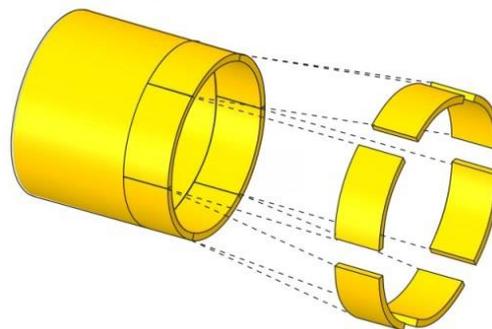


Рисунок 18 – Схема расположения образцов



а



б

Рисунок 19 – Вид образца: в нагрузочном приспособлении (а); после разрушения (б)

Разрушение образцов происходило от межслойного сдвига (рисунок 19 б), нагрузка разрушения составила  $P = 1,28 \pm 0,5$  кН (шесть образцов).

Также был проведен конечно-элементный анализ напряженного состояния образцов (сегментов) при трехточечном изгибе. На свободных гранях заданы условия зеркальной симметрии (рисунок 20 а). Результаты МКЭ-анализа распределения, в цилиндрической системе координат, межслойных сдвиговых напряжений  $\tau_{xy}$  по толщине приведены на рисунке 20 б.

При расчете были использованы упругие характеристики, полученные по методике, разработанной и представленной в расчетно-экспериментальной части работы. При нагрузке 1,28 кН максимальное значение межслойных сдвиговых напряжений составило  $\tau_{xy} \approx 19,6$  МПа.

Изгиб сегмента кольца сопровождается разгибом (уменьшением кривизны), что создает условия для появления трансверсальных растягивающих напряжений  $\sigma_x$  (рисунок 20 в), и, как следствие, приводит к заниженной оценке межслойной сдвиговой прочности.

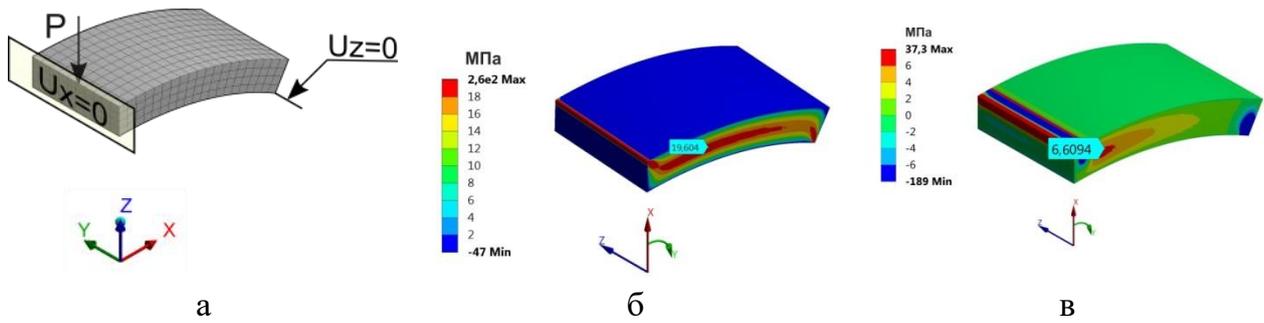


Рисунок 20 – Конечно-элементная сетка (а); картины распределения межслойных сдвиговых напряжений  $\tau_{xy}$  (б) и трансверсальных напряжений  $\sigma_x$

Достоверность расчета на прочность слоистых пластиков определяется корректным выбором критерия прочности при трехмерном напряженном состоянии с учетом эффекта изменения межслойной сдвиговой прочности при поперечном растяжении или сжатии. Далее использован известный критерий Дэниэла (I.M. Daniel, Northwestern university, USA), который (по литературным источникам) показал хорошее согласие с экспериментами:

Разрушение от сжатия:

$$\left(\frac{\sigma_x}{F_{xc}}\right)^2 + \alpha^2 \left(\frac{\tau_{xy}}{F_{xc}}\right)^2 \leq 1,$$

Разрушение от растяжения:

$$\frac{\sigma_x}{F_{xp}} + \left(\frac{\alpha}{2}\right)^2 \left(\frac{\tau_{xy}}{F_{xp}}\right)^2 \leq 1, \quad (1)$$

Разрушение от межслойного сдвига:

$$\left(\frac{\tau_{xy}}{F_{xy}}\right)^2 + \frac{2 \cdot \sigma_x}{\alpha \cdot F_{xy}} \leq 1,$$

где –  $F_{xc}$ ,  $F_{xp}$ ,  $F_{xy}$  – предел прочности при трансверсальном растяжении, сжатии и межслойном сдвиге,  $\sigma_x$ ,  $\tau_{xy}$  – трансверсальные, межслойные сдвиговые напряжения,  $\alpha$  – отношение трансверсального модуля упругости к межслойному модулю сдвига  $E_x/G_{xy}$ .

Используя этот критерий, максимальное значение разрушающих межслойных сдвиговых напряжений составило  $\tau_{xy} \approx 22,9$  МПа.

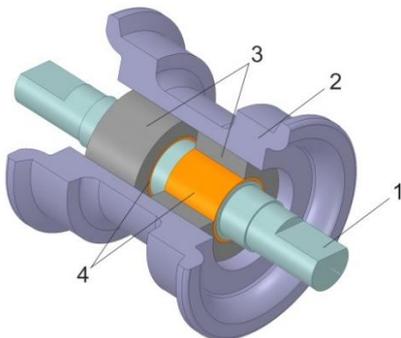


Рисунок 21 – Общий вид опорного катка:  
ось катка 1; каток 2; букса 3; втулка 4

Для оценки прочности втулки подшипника скольжения в составе однобортного опорного катка трактора Т170 использована трехмерная модель, построенная с помощью пакета SpaceClaim (рисунок 21).

В расчете из соображения симметрии закрепления катка и его нагружения была рассмотрена работа лишь одной втулки (рисунок 22 а).

Оценка нагруженности элементов опорного катка была выполнена в упругой постановке в пакете конечно-элементного анализа ANSYS Workbench (схема расчета Static Structural). Нагружение в расчете осуществлялось пошагово. На первом шаге

в зоне соприкосновения беговой поверхности катка с гусеничным тракком была приложена статическая следящая нагрузка  $P = 81,6$  кН. На втором шаге, нагружение было дополнено угловым перемещением поверхностных точек беговой поверхности вокруг неподвижного вала, имитируя качение катка под нагрузкой.

Между валом и втулкой был задан контакт типа *Frictional* с коэффициентом трения 0,13. Сопряжение остальных элементов модели было выполнено за счет введения общих узлов.

При создании сетки конечных элементов использовали квадратичные элементы типа SOLID186-187 из библиотеки элементов ANSYS. Размер элементов катка, вала и буксы  $\sim 10$  мм. Для выбора размера конечного элемента в зоне контакта «вал–втулка» было проведено сравнение максимального контактного давления, полученного решением задачи в плоской постановке с решением задачи Герца, о контакте цилиндра с внутренней цилиндрической поверхностью. Таким образом, средний размер элемента составил 1,5 мм. Количество элементов в модели  $\sim 250$  тысяч (рисунок 22 б).

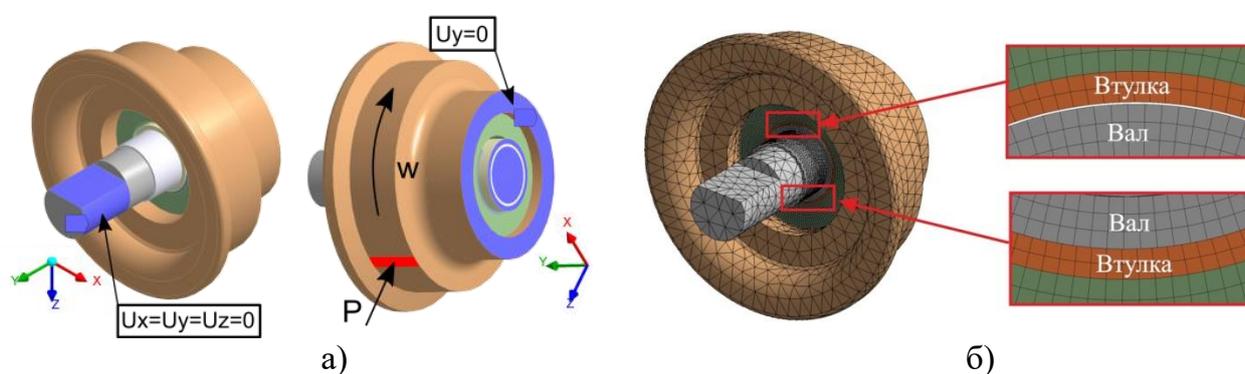


Рисунок 22 – Граничные условия (а) и конечно-элементная модель (б)

При оценке несущей способности подшипника скольжения из бронзы и стеклопластика использованы разные критерии прочности.

Оценка несущей способности подшипникового узла из бронзы была проведена по критерию допускаемых нормальных напряжений:

$$\sigma_{max} \leq \sigma_{0,2}, \quad (2)$$

где  $\sigma_{max}$  – максимальное контактное радиальное напряжение на поверхности втулки,  $\sigma_{0,2}$  - условный предел текучести.

С помощью численной модели были получены картины распределения эквивалентных напряжений по Мизесу и контактных давлений для втулки из бронзы (рисунок 23) с типовым радиальным зазором с валом 0,1 мм.

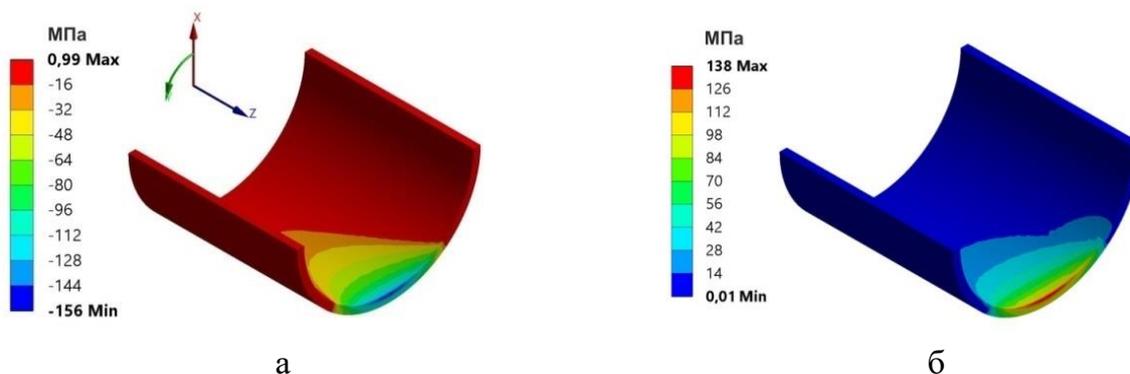


Рисунок 23 – Картина распределения: сжимающих напряжений (а); эквивалентных напряжений (б)

Несимметрия распределения напряжений по образующей обусловлена изгибом вала под нагрузкой.

В процессе работы из-за естественного износа рабочие зазоры постепенно возрастают, что приводит к уменьшению площадки контакта между валом и втулкой. Используя разработанную КЭ модель, были получены зависимости значений максимального эквивалентного напряжения и максимального контактного давления от величины изменяющегося радиального зазора (рисунок 26 а).

Размер конечного элемента для втулки из КОП был равен размеру представительной ячейки (рисунок 13).

Распределение межслойных сдвиговых и радиальных напряжений для втулки из стеклопластика показано на рисунке 24.

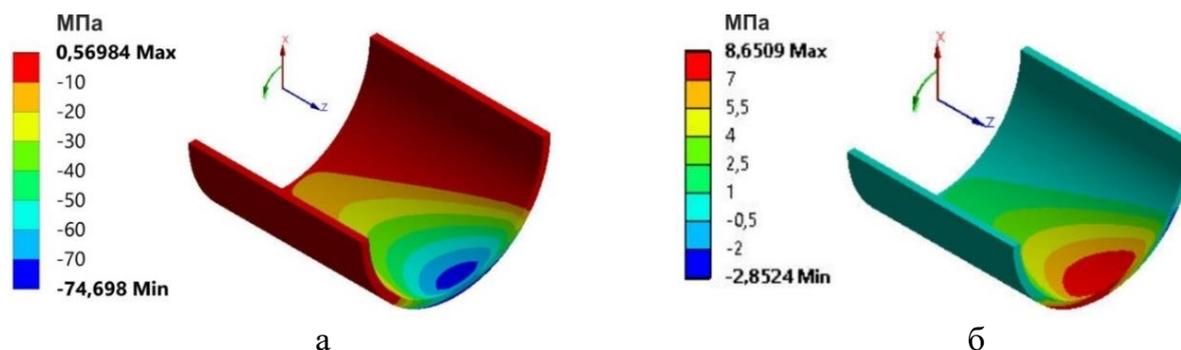


Рисунок 24 – Картина распределения:

а) сжимающих напряжений; б) межслойных сдвиговых напряжений

Из рисунка 24 видно, что втулка из стеклопластика имеет более развитую площадку контакта с валом (из-за существенно меньшей жесткости), чем у втулки из бронзы, а величина максимального давления в два раза ниже.

Для втулки из КОП были получены зависимости значений максимального сдвигового межслойного напряжения и максимального контактного давления от величины радиального зазора (рисунок 26 б).

Для оценки несущей способности втулки из КОП был использован критерий Дэниэла.

Картины распределения значений критерия по двум модам показаны на рисунке 25.

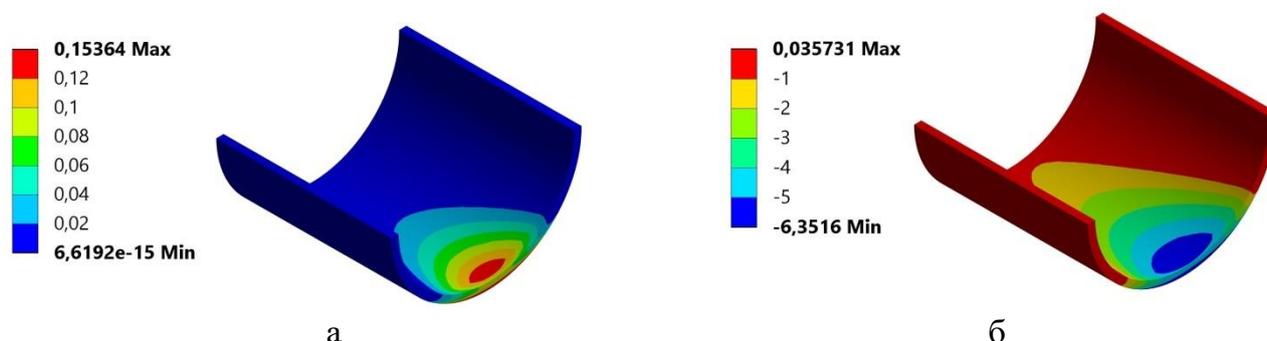


Рисунок 25 – Распределение значений критерия Дэниэла при:

а) сжатии; б) межслойном сдвиге

Из рисунка 25 видно, что критерий Дэниэла для втулки из стеклопластика выполняется. Разрушение от растяжения не рассматривалось, так как растягивающие напряжения, в процессе эксплуатации не возникают (рисунок 24а).

Зависимости максимальных значений полученных по критерию Дэниэла при радиальном сжатии и межслойном сдвиге от величины радиального зазора представлены на рисунке 26 в.

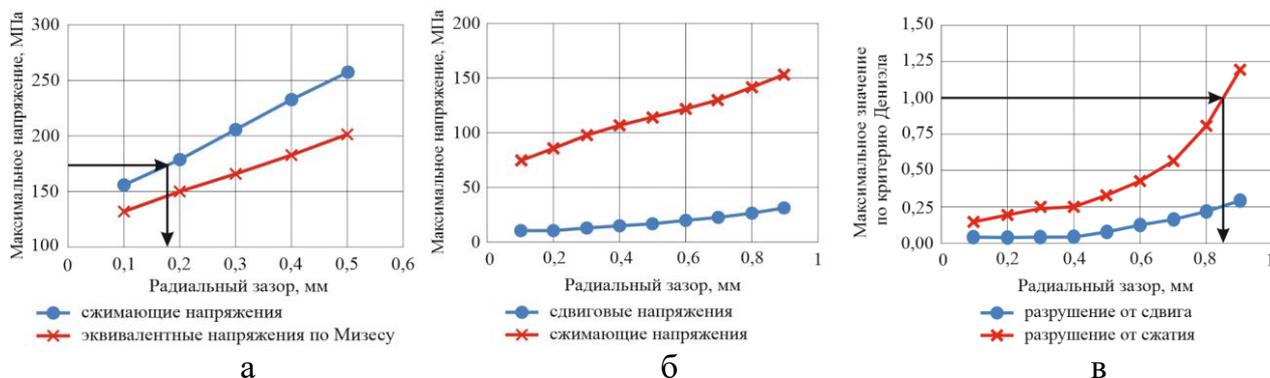


Рисунок 26 – Зависимость от величины радиального зазора между валом и втулкой: из бронзы - эквивалентного и нормального напряжения (а); из КОП - максимальных радиального сжимающего напряжения и межслойного сдвигового напряжения (б); из КОП - максимальных значений критерия Дэниэла (в)

Анализ результатов расчетов (рисунок 26в) показывает, что обеспечение прочности по критерию Дэниэла возможно при величине радиального зазора не более 0,82 мм.

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

1. Разработана и верифицирована оригинальная конечно-элементная модель мезоструктуры тканевого стеклопластика, отличающейся явным учетом открытой пористости. Модель позволяет определить полный набор физико-механических характеристик эквивалентного ортотропного упругого гомогенного материала для последующих расчетов напряженного состояния элементов конструкций.

2. Получены новые экспериментальные данные о распределении механических и теплофизических свойств композитов с открытой пористостью по радиусу втулки, полученной намоткой тканевого препрега с постоянным натяжением, иллюстрирующие существенную неоднородность распределения этих свойств. Установлено, что объемная доля пор, механические и теплофизические свойства меняются от внутреннего слоя к внешнему по соответствующим линейным законам.

3. Выявлен новый механизм образования остаточных технологических напряжений во втулках из композита с открытой пористостью, связанных в процессе намотки с изменением по радиусу его микроструктуры, упругих и теплофизических свойств; предложен расчетно-экспериментальный метод оценки величины этих напряжений.

4. Предложен новый расчетно-экспериментальный метод оценки несущей способности втулок из композитов с открытой пористостью, полученных намоткой, и работающих в составе высоконагруженных опор скольжения при действии эксплуатационных нагрузок.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. **Зиновьев, Р.С.** Оценка прочности и жесткости вкладышей подшипников скольжения из стеклопластика / Р.С. Зиновьев, С.Б. Сапожников, А.В. Безмельницын // Композиты и наноструктуры. – 2012. – № 3(15) – С. 10-18. (RSCI, ВАК)
2. **Sapozhnikov, S.B.** Microstructure and mechanical behaviors of thick-walled journal bearing GFRP rings / S.B. Sapozhnikov, A.V. Bezmelnitsyn, R.S. Zinoviev// Journal «The 19th international conference on composite materials – 2013», volume number 6 (July 28–August 2 Montreal, Canada). 2013. – P. 9258-9261. (Scopus)
3. **Bezmelnitsyn, A.V.** Elastic moduli of GFRP layers of sliding bearing made with tension winding / A.V. Bezmelnitsyn, S.B Sapozhnikov // Proceedings of the 4-th international conference «HighMatTech – 2013» (October 7-11, 2013, Kiev, Ukraine). – 2013. – P.291.
4. **Bezmelnitsyn, A.V.** Assessment of residual stresses in thick-walled GFRP sliding bearing after winding and curing / A.V. Bezmelnitsyn, S.B Sapozhnikov // 20th International Conference on Composite Materials. Copenhagen, 19-24th July 2015 P. 1-10. (Scopus)
5. **Безмельницын, А.В.** Многомасштабное моделирование и анализ механизма возникновения технологических межслойных напряжений в толстостенных кольцах из стеклопластика / А.В. Безмельницын, С.Б. Сапожников // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2017. – № 2. – С. 5-22. (Scopus, ВАК)
6. **Безмельницын, А.В.** Расчетная оценка возможности применения подшипников скольжения из пористого стеклопластика в составе опорного катка гусеничного движителя / А.В. Безмельницын // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия Машиностроение. – 2018. – № 1. – С. 68-78. (ВАК)