

На правах рукописи



КАРТАШОВА Екатерина Дмитриевна

**ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ДЕФЕКТОВ
НА СОПРОТИВЛЕНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ СЛОИСТЫХ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
ДЕФОРМИРОВАНИЮ И РАЗРУШЕНИЮ**

Специальность 2.6.17. Материаловедение (технические науки)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

ПЕНЗА 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Пензенский государственный университет» на кафедре «Теоретическая и прикладная механика и графика».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Муйземнек Александр Юрьевич

Официальные оппоненты: **Устинова Татьяна Петровна**,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Технология и
оборудование химических, нефтегазовых и
пищевых производств» Энгельсского
технологического института
ФГБОУ ВО «Саратовский государственный
технический университет имени
Гагарина Ю.А.»;

Шайдурова Галина Ивановна,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Механика
композиционных материалов и конструкций»
ФГАОУ ВО «Пермский национальный
исследовательский политехнический
университет»

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Самарский национальный
исследовательский университет
имени академика С. П. Королева»

Защита состоится «03» октября 2024 г. в _____ часов на заседании
диссертационного совета 24.2.357.02, созданного на базе ФГБОУ ВО
«Пензенский государственный университет», по адресу: 440026, г. Пенза,
ул. Красная, 40

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального госу-
дарственного бюджетного образовательного учреждения высшего образова-
ния «Пензенский государственный университет» и на сайте
https://dissov.pnzgu.ru/ecspertiza/Tehnicheskie_nauki/kartashova

Автореферат разослан «__» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Зверовщиков Александр Евгеньевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Увеличение объемов производства композиционных материалов и замена традиционно используемых для изготовления деталей материалов на композиционные, в том числе на полимерные слоистые композиционные материалы (ПСКМ), являются мировыми трендами.

Создание новых компонентов ПСКМ, обладающих более высоким комплексом физических и механических свойств, не всегда обеспечивает ожидаемое повышение качества изделий, особенно имеющих сложную форму. Основными причинами этого являются:

- недостаточная изученность влияния структуры композитов на микро-, мезо- и макроуровнях, а также свойств их компонентов на свойства композита на макроуровне;
- недостаточная изученность влияния технологических процессов на эксплуатационные свойства изделий;
- отсутствие необходимого математического, методического и информационного обеспечения автоматизированного проектирования изделий из композиционных материалов, включая ПСКМ.

Таким образом, актуальность работы заключается в обеспечении повышения качества изделий из ПСКМ за счет устранения перечисленных выше причин.

Степень проработанности темы исследований. В нашей стране наибольший вклад в развитие механики композиционных материалов внесли В. В. Болотин, В. В. Васильев, В. И. Королев, С. Г. Лехницкий, И. Ф. Образцов, Ю. М. Тарнопольский, за рубежом – S.W. Tsai, R.M. Jones и др. Их работы в значительной мере раскрыли механику процессов деформирования слоистых композитов, имеющих симметричную структуру. Методы осреднения периодических сред изложены в работах Н. С. Бахвалова, Г. П. Панасенко и Б. Е. Победри. Установлению связей между свойствами слоистых композитов и их компонентов посвящены работы А. Л. Рабиновича, Н. Хоффа, Г. Д. Шермергора и А. Г. Фокина. Определение матриц упругой податливости ортотропных слоистых композитов с учетом временного фактора было рассмотрено в работах А. М. Скудры, Ф. Я. Булавса и К. А. Роценса.

Современным методам теоретических и экспериментальных исследований сопротивления деформированию и разрушению ПСКМ посвящены работы Ю. И. Димитриенко, А. М. Думанского, С. В. Ломова, С. В. Резника, Е. Ф. Харченко и др.

Влияние производственных дефектов на механические свойства композиционных материалов является предметом обширных исследований. Результаты современных исследований и обзоры публикаций, по данной тематике представлены в работах Б. Н. Федулова, Ф. К. Антонова, А. А. Сафонова, А. Е. Ушакова, М. Мехдихани, Л. Горбрых, И. Верпоеста, С.В. Ломова. Эти исследования выполнялись на кафедре ASPeM Сколковского института науки и технологий (Россия), кафедре инженерии материалов Левенского университета (Бельгия).

Созданию современных технологий производства изделий из ПСКМ, совершенствованию методов их проектирования посвящены работы, выполняемые в НИИ «Графит», Всероссийском научно-исследовательском институте авиационных материалов Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ), Самарском национальном исследовательском университете имени академика С. П. Королева, Тульском государственном университете, Ульяновском государственном техническом университете и др.

Большой вклад в подготовку специалистов в области проектирования, производства и испытания ракет и космических аппаратов внесла научная школа в области композиционных материалов Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана.

Цель диссертационного исследования – установление влияния технологических дефектов на сопротивление деформированию и разрушению полимерных слоистых композиционных материалов для повышения качества изделий из полимерных слоистых композиционных материалов путем учета статистических характеристик технологических дефектов на этапе проектирования.

Задачи исследования:

1. Установление фундаментальных связей структуры полимерных слоистых композиционных материалов, имеющих технологические дефекты, с комплексом физико-механических и эксплуатационных свойств с целью улучшения технических и эксплуатационных характеристик изделий.
2. Создание классификации технологических дефектов полимерных слоистых композиционных материалов, определение их статистических характеристик.
3. Исследования влияния технологических дефектов на сопротивление деформированию и разрушению полимерных слоистых композиционных материалов.
4. Прогнозирование физико-механических свойств полимерных слоистых композиционных материалов с учетом технологических дефектов.
5. Разработка рекомендаций по учету влияния и нормированию технологических дефектов при проектировании изделий из полимерных слоистых композиционных материалов.

Объект исследования: полимерные слоистые композиционные материалы.

Предмет исследования: взаимосвязь характеристик сопротивления деформированию и разрушению ПСКМ, выполненных из угле- и стеклоткани, изготовленных по технологии ручного формования, вакуумного мешка и вакуумной инфузии с характером таких технологических дефектов, как пористость, отклонения от проектных значений толщины и массы, углов ориентации нитей и тканевых слоев, расстояния между нитями в слое и волнистость нитей.

Проблемы и задачи, решенные в диссертации соответствуют области исследования специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки):

п. 1 в части «Теоретические и экспериментальные исследования фундаментальных связей состава и структуры металлических, неметаллических материалов и композитов с комплексом физико-механических и эксплуатационных свойств с целью обеспечения надежности и долговечности деталей, изделий, машин и конструкций (химической, нефтехимической, энергетической, машиностроительной, легкой, текстильной, строительной)»; п. 9 «Компьютерное проектирование композиционных материалов и функциональных покрытий. Компьютерный анализ и оптимизация процессов получения и эксплуатации металлических и неметаллических материалов и функциональных покрытий».

Научная новизна диссертационного исследования:

- определены статистические характеристики технологических дефектов ПСКМ, создана классификация технологических дефектов ПСКМ;
- экспериментально определены характеристики сопротивления деформированию и разрушению достаточно широкой номенклатуры ПСКМ;
- установлены связи характеристик сопротивления деформированию и разрушению ПСКМ с физико-механическими характеристиками компонентов и характеристиками технологических дефектов;
- выполнены сравнительные оценки сопротивления деформированию и разрушению ряда ПСКМ;
- разработаны рекомендации компьютерного моделирования процессов деформирования и разрушения ПСКМ с учетом технологических дефектов в них.

Практическая значимость работы:

- разработана классификация технологических дефектов;
- разработаны рекомендации по учету технологических дефектов при проектировании оболочек, учитывающее технологические дефекты в ПСКМ;
- проведена оптимизация конструкции трубчатой направляющей из ПСКМ с использованием разработанных рекомендаций;
- разработаны рекомендации по учету влияния и нормированию технологических дефектов при проектировании изделий из ПСКМ.

Реализация и внедрение результатов работы использованы при выполнении двух госбюджетных научно-исследовательских работ: «Исследование влияния микроструктуры на физико-механические свойства новых полимерных композиционных материалов на основе волокон из стекла и углерода» (2016–2023) и «Формирование механических свойств металлических композиционных материалов, получаемых лазерным спеканием» (2016–2023); трех научно-исследовательских работ, осуществленных в Федеральном научно-производственном центре «Производственное объединение «Старт» им. М. В. Проценко», ООО СКБ «Победит», ИП Широлапов А. Ю., а также выполненных в учебном процессе в ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет». Практическая ценность исследований подтверждается актами о внедрении результатов диссертационного исследования.

Методы исследования: структура ПСКМ изучалась с использованием оптического микроскопа Livenhuk, оснащенного видеокамерой. Исследования сопротивления деформированию и разрушения были проведены на универсальной испытательной машине. При компьютерном моделировании сопротивления деформированию и разрушения ПСКМ использовался метод конечных элементов, при вычислении эффективных характеристик их механических свойств – метод осреднения Мори – Танака.

На защиту выносятся:

1. Результаты исследования морфологии технологических дефектов ПСКМ, их классификация и статистические характеристики.
2. Зависимости, связывающие значения характеристик сопротивления деформированию и разрушению ПСКМ с физико-механическими характеристиками компонентов и характеристиками технологических дефектов.
3. Сравнительные оценки сопротивления деформированию и разрушению ряда ПСКМ.
4. Результаты математического и компьютерного моделирования процессов деформирования и разрушения ПСКМ и изделий из них с учетом технологических дефектов.
5. Результаты прогнозирования физико-механических свойств ПСКМ с учетом технологических дефектов.

Степень достоверности обусловлена применением современных методов теоретического и экспериментального исследования, сходимостью результатов исследований, полученных теоретически и экспериментально, согласованностью с результатами, полученными другими авторами.

Апробация работы. Результаты работы неоднократно докладывались на международных и всероссийских научно-технических конференциях «Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе» (г. Пенза, 2013, 2018), «Инновации технических решений в машиностроении и транспорте» (г. Пенза, 2017–2020, 2023, 2024), «Информационные технологии в науке и образовании. Проблемы и перспективы» (г. Пенза, 2017), «Актуальные проблемы науки и образования», а также на Международном симпозиуме «Надежность и качество» (г. Пенза, 2013, 2023). Результаты работы представлялись на АО ФНПЦ «Производственное объединение «Старт» имени М.В. Проценко», ЗАО НПП «МедИнж», ООО «МедИнтелл», ООО «ЭНДОКАРБОН», ООО «Специальная и медицинская техника».

Публикации. Основные теоретические положения и научно-практические результаты опубликованы в 24 научных статьях, в том числе в 3 статьях в изданиях, включенных в перечень ВАК по специальности 2.6.17, 1 статья в издании, индексируемом базой Scopus, 4 статьи в изданиях, включенных в перечень ВАК по другим группам научных специальностей.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов и рекомендаций, списка литературы из 149 наименований и 2 приложений, содержит 190 страниц основного текста, 65 рисунков и 41 таблицу.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулирована актуальность темы исследования, оценивается степень разработанности проблемы, формулируются цель и задачи диссертационной работы, определяется научная новизна диссертационного исследования, приводятся теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследования, перечисляются основные положения, выносимые на защиту, приводятся сведения о степени достоверности и апробации работы, отмечается личный вклад автора, описывается структура диссертации.

В первой главе содержатся результаты анализа состояния и перспектив развития производства изделий из ПСКМ. Сделан вывод о том, что увеличение объемов производства ПСКМ и замена традиционно используемых для изготовления деталей материалов на композиционные является мировым трендом. Создание новых компонентов полимерных слоистых композиционных материалов, обладающих более высоким комплексом физических и механических свойств, не всегда обеспечивает ожидаемое повышение качества изделий, особенно имеющих сложную форму. Одной из основных причин этого является недостаточная изученность влияния технологических процессов на эксплуатационные свойства изделий.

Под технологическим дефектом ПСКМ понимается любое отклонение характеристик структуры композита от проектных значений. Разработанная классификация технологических дефектов приведена на рисунке 1.

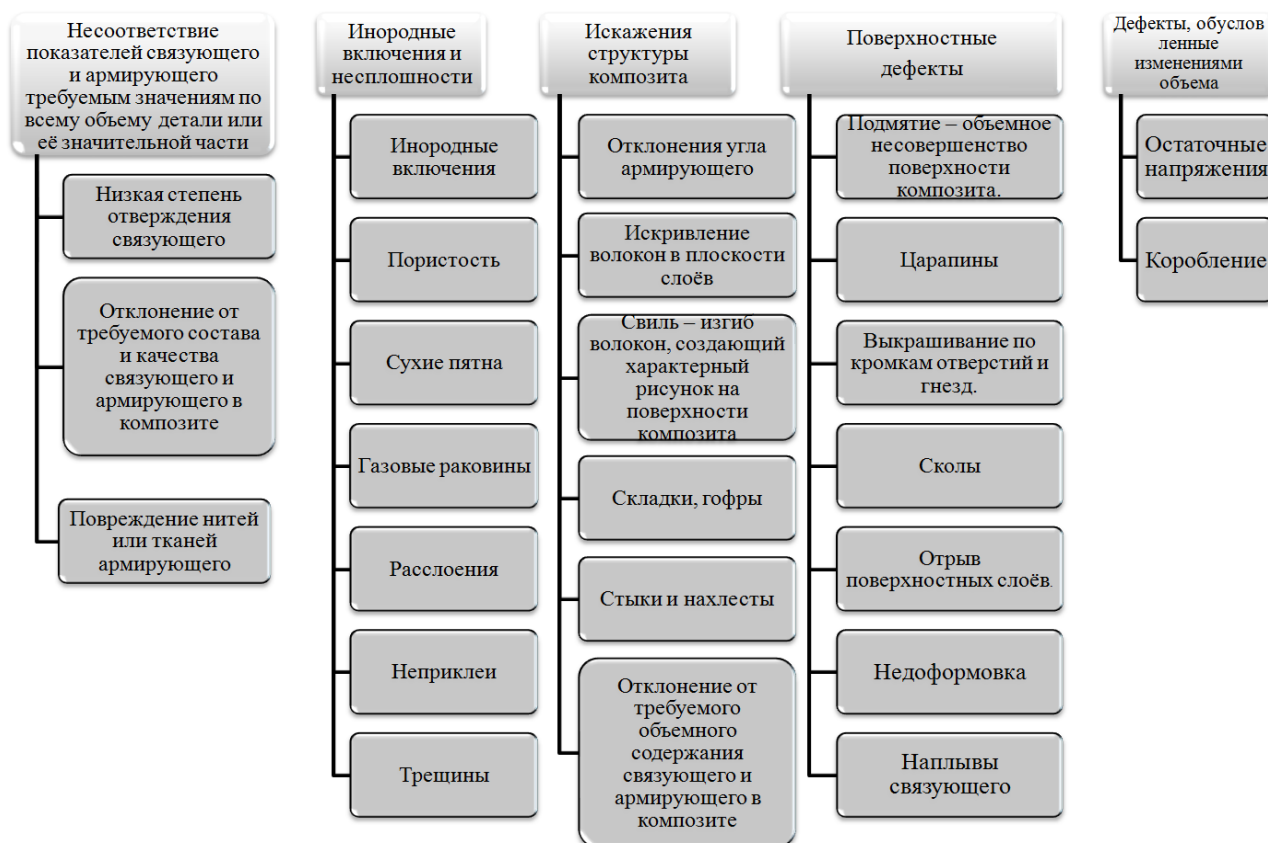


Рисунок 1 – Классификация технологических дефектов

Исследуемыми технологическими дефектами являются отклонения массы и толщины ПСКМ от проектных значений, пористость, отклонения углов ориентации нитей однонаправленных слоев или тканей, отклонения углов укладки слоев, разброс расстояния между нитями в слое ПСКМ, волнистость нитей.

Приводятся результаты анализа аналитических и численных методов вычисления инженерных констант полимерных тканевых слоев. Выполнено сопоставление результатов экспериментального и расчетного определения эффективных характеристик упругих свойств композитов, которые показали, что модели Мори – Танака, двойного включения и Чамиса, а также метод конечных элементов являются предпочтительными. Также отмечено, что эти модели, в отличие от моделей Рейсса, Фойгта, Хашина – Штрикмана, ROM, MROM, Хэльпина – Цая, позволяют вычислить все инженерные константы полимерных тканевых слоев.

Вторая глава посвящена экспериментальным исследованиям технологических дефектов и их влияния на сопротивление ПСКМ деформированию и разрушению.

Представлены методики определения отклонений массы, толщины и пористости ПСКМ.

Результатами экспериментальных исследований являлись:

- характеристики физико-механических свойств исходных компонентов;
- характеристики структуры композитов на микро-, мезо- и макроуровнях, включая статистические характеристики технологических дефектов;
- диаграммы деформирования лабораторных образцов, определенные при стандартных испытаниях на растяжение, а также результаты испытания свободно лежащих тканей при сдвиге.

Результаты определений характеристик отклонения массы, толщины и пористости рассматриваемых ПСКМ приведены в таблице 1. Доверительные интервалы физических величин, значения которых приведены в таблицах 1–4, определены при доверительной вероятности 0,9.

Таблица 1 – Характеристики отклонений массы, толщины и пористости ПСКМ

Характеристика дефектности ПСКМ	Технология получения ПСКМ		
	Ручное формование	Вакуумный мешок	Вакуумная инфузия
1. Математическое ожидание (МО) относительного отклонения массы, %	$71,4 \pm 1,25$	$30,3 \pm 1,17$	$37,2 \pm 0,44$
2. Среднеквадратическое отклонение (СКО) относительной массы, %	5,86	5,4	2,0
3. МО относительного отклонения толщины, %	$72,6 \pm 3,68$	$56,7 \pm 2,64$	$54,0 \pm 0,606$
4. СКО относительной толщины, %	17,2	12,3	2,85
5. МО пористости, %	$3,03 \pm 0,13$	$16,46 \pm 0,73$	$11,03 \pm 0,52$
6. СКО пористости, %	0,97	5,31	3,90

Представлены методики определения отклонений угла ориентации нитей в репрезентативной ячейке и угла ориентации нитей в слое. Результаты определения характеристик угла ориентации нитей и углов ориентации тканевых слоев ПСКМ представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристики отклонений угла ориентации нитей и углов ориентации тканевых слоев ПСКМ

Характеристика дефектности ПСКМ	Технология получения ПСКМ		
	Ручное формование	Вакуумный мешок	Вакуумная инфузия
1. МО угла ориентации нитей от проектных значений, град	$2,9 \pm 0,35$	$2,3 \pm 0,37$	$2,2 \pm 0,34$
2. СКО угла ориентации нитей от проектных значений, град	2,9	3,1	2,8
3. МО отклонения углов ориентации тканевых слоев, град	$1,6 \pm 0,45$	$1,7 \pm 0,45$	$1,6 \pm 0,45$
4. СКО углов ориентации тканевых слоев, град	3,5	3,5	3,4

Характеристики отклонений относительного расстояния между слоями и коэффициента волнистости ПСКМ приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Характеристики отклонений относительного расстояния между слоями и коэффициента волнистости ПСКМ

Характеристика дефектности ПСКМ	Технология получения ПСКМ		
	Ручное формование	Вакуумный мешок	Вакуумная инфузия
1. МО относительного расстояния между нитями в слое, %	$65,0 \pm 0,90$	$30,4 \pm 1,45$	$34,9 \pm 0,37$
2. СКО относительного расстояния между нитями в слое, %	4,2	6,8	1,7
3. МО коэффициента волнистости, %	$15,1 \pm 0,90$	$7,4 \pm 1,45$	$8,9 \pm 0,37$
4. СКО коэффициента волнистости, %	3,3	1,6	1,9

Сравнительные оценки статистических характеристик дефектов ПСКМ позволили установить:

– отклонения массы от проектных значений изменяются от 30,3 до 71,4 %, минимальное значение отклонения массы имеют ПСКМ, изготовленные по технологии вакуумного мешка (37,2 %), максимальное – по технологии ручного формования (71,4 %). Максимальный разброс отклонения массы имеют ПСКМ, изготовленные по технологии ручного формования (СКО составляет 5,86 %);

– отклонения толщины ПСКМ от проектных значений изменяются от 54 до 72,6 %, минимальное отклонение толщины имеют ПСКМ, изготовленные по технологии вакуумной инфузии (54 %), максимальное – по технологии ручного формования (72,6 %). Максимальный разброс отклонения толщины имеют ПСКМ, изготовленные по технологии ручного формования (СКО составляет 17,2 %);

– пористость ПСКМ изменяется от 3,03 до 16,46 %, минимальное значение пористости имеют ПСКМ, изготовленные по технологии ручного формования (3,03 %), максимальное – по технологии вакуумного мешка (16,46 %). Максимальный разброс пористости имеют ПСКМ, изготовленные по технологии вакуумного мешка (СКО составляет 6,78 %);

– отклонения углов ориентации нитей однонаправленных слоев или тканей изменяются от 2,2 до 2,9°, минимальное отклонение углов ориентации нитей имеют ПСКМ, изготовленные по технологии вакуумной инфузии (2,2°), максимальное – по технологии ручного формования (2,9°). Максимальный разброс отклонения углов ориентации нитей имеют ПСКМ, изготовленные по технологии ручного формования и вакуумного мешка (СКО составляет 3,1°);

– отклонения углов укладки слоев для всех технологий близки и составляют 1,6–1,7°. Максимальный разброс отклонений углов укладки слоев имеют ПСКМ, изготовленные по технологии вакуумного мешка (СКО составляет 3,5°);

– относительные расстояния между нитями в слое изменяются от 30,4 до 65 %, минимальное относительное расстояние между нитями в слое имеют ПСКМ, изготовленные по технологии вакуумного мешка (30,4°), максимальное – по технологии ручного формования (65°). Максимальный разброс относительного расстояния имеют ПСКМ, изготовленные по технологии вакуумного мешка (СКО составляет 6,8 %);

– волнистость изменяется от 7,4 до 15,1 %, минимальное значение волнистости имеют ПСКМ, изготовленные по технологии вакуумного мешка (7,4 %), максимальное – по технологии ручного формования (15,1 %). Максимальный разброс волнистости имеют ПСКМ, изготовленные по технологии ручного формования (СКО составляет 3,3 %).

Исследования влияния технологических дефектов на сопротивление деформированию и разрушению заключались в проведении стандартных испытаний плоских лабораторных образцов из ПСКМ на растяжение. В процессе испытаний образцы доводились до разрушения.

Лабораторные образцы вырезались из четырехслойных пластин. Ориентация нитей в каждом тканевом слое была одинаковой. Лабораторные образцы вырезались из пластин под углом 0; 11,25; 22,5; 33,75 и 45° к направлению нитей основы. Толщина образцов соответствовала толщине пластины.

Диаграммы деформирования использовались для определения характеристик механических свойств и определения параметров моделей деформирования и разрушения.

Некоторые из этих испытаний были использованы для проверки адекватности компьютерных моделей, материалов, изделий, процессов.

Выполнена сравнительная оценка сопротивления свободно лежащих тканей сдвигу. Сделан вывод о том, что ткани, имеющие плетение плейн, имеют на $>20\%$ меньшие интервалы свободного деформирования сдвигом по сравнению с тканями, имеющими плетение твил.

В третьей главе диссертации приводятся результаты прогнозирования физико-механических свойств ПСКМ с учетом технологических дефектов.

Прогнозирование сопротивления деформированию и разрушению ПСКМ с учетом технологических дефектов требует учета взаимодействия процессов, происходящих на трех структурных уровнях: микро-, мезо- и макроуровне.

Микроуровень – уровень нити, заполненной смолой, состоящей из армирующего – 3К или 6К филаментов и связующего – смолы, наполненной воздухом. Технологический дефект – пористость смолы, заполняющей пространство между филаментами.

Мезоуровень – уровень тканевого слоя, состоящего из ткани, представляющей собой переплетенные нити, пространство между которыми заполнено смолой. Технологические дефекты – пористость заполняющей пространство между нитями смолы, отклонения от проектных значений толщины и массы тканевого слоя, отклонения углов ориентации нитей в ткани, расстояния между нитями в слое и волнистость нитей.

Макроуровень – ламинат, состоящий из тканевых слоев. Технологический дефект – отклонение углов ориентации тканевых слоев от проектных значений.

Для описания сопротивления деформированию филаментов использовалась трансверсально изотропная модель упругости, смолы, пористой смолы – изотропная модель упругости, нити, заполненной пористой смолой, – трансверсально изотропная модель упругости, тканевого слоя – ортотропная модель упругости, ламината – классическая модель ламината, основанная на теории Миндлина – Рейсснера.

Для вычисления эффективных характеристик упругости пористой смолы, нитей, заполненных смолой, использовалась модель Чамиса, тканевых слоев – метод конечных элементов, ламината – классическая модель ламината, основанная на теории Миндлина – Рейсснера. Эффективными характеристиками упругости (инженерными константами) ламината являлись: модули продольной и поперечной упругости (E_1 , E_2), модуль сдвига в плоскости ламината (G_{12}), модули сдвига вне плоскости ламината (G_{23} и G_{13}), модули продольной и поперечной упругости при изгибе E_1^f , E_2^f , модуль сдвига при кручении G_{12}^f .

Зависимости, связывающие значения характеристик сопротивления деформированию и разрушению ПСКМ, с физико-механическими характери-

стиками компонентов и характеристиками технологических дефектов, были разделены на детерминированные и стохастические.

При прогнозировании физико-механических свойств ПСКМ с учетом технологических дефектов, а также установлении данных связей использовались программы ANSYS и MSC/digimat.

Детерминированные зависимости связывают характеристики физико-механических свойств исходных компонентов ПСКМ и действительные характеристики технологических дефектов с соответствующими инженерными константами ламината.

В качестве примера на рисунках 2,а,б приведены графики детерминированных зависимостей упругих модулей E_1 и G_{12} от отклонения массы и отклонения толщины, а на рисунке 2,в – зависимостей упругих модулей E_1 и G_{12} от отклонения угла ориентации нити. Зависимости построены для ПСКМ, изготовленного из углеткани 200 г/м², 3К, и эпоксидной системы Epolam 2017, имеющего плотняное плетение (плейн) и изготовленного с помощью вакуумной инфузии (первый модельный материал).

Зависимости E_1 и G_{12} от отклонения угла ориентации нити могут быть представлены в следующем виде:

$$E_1 = -0,023\gamma^4 + 1,269\gamma^2 + 55,16, \text{ ГПа};$$
$$G_{12} = -4 \cdot 10^{-5}\gamma^4 + 0,037\gamma^2 + 3,191, \text{ ГПа},$$

где γ – отклонения угла ориентации нити, град.

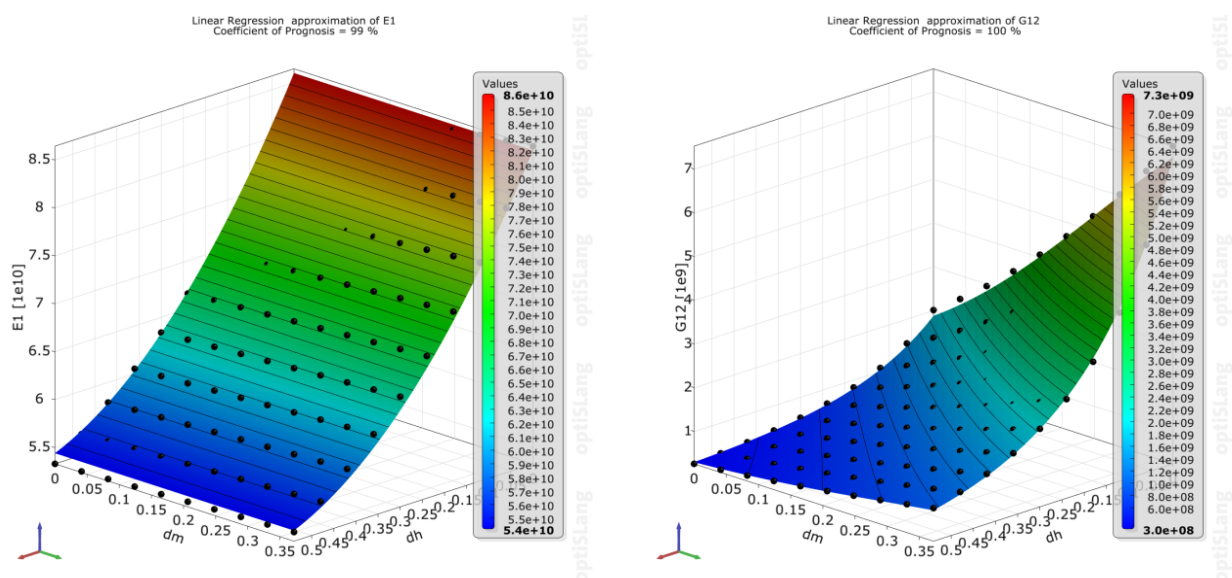
Графики аппроксимирующих зависимостей приведены на рисунке 2,в.

Стохастические зависимости связывают статистические характеристики физико-механических свойств исходных компонентов ПСКМ и статистические характеристики технологических дефектов с соответствующими статистическими характеристиками инженерных констант ламината.

Физико-механические свойства исходных компонентов ПСКМ заимствовались из технических условий и литературных источников. Статистические характеристики технологических дефектов были определены экспериментально (см. таблицы 1–3).

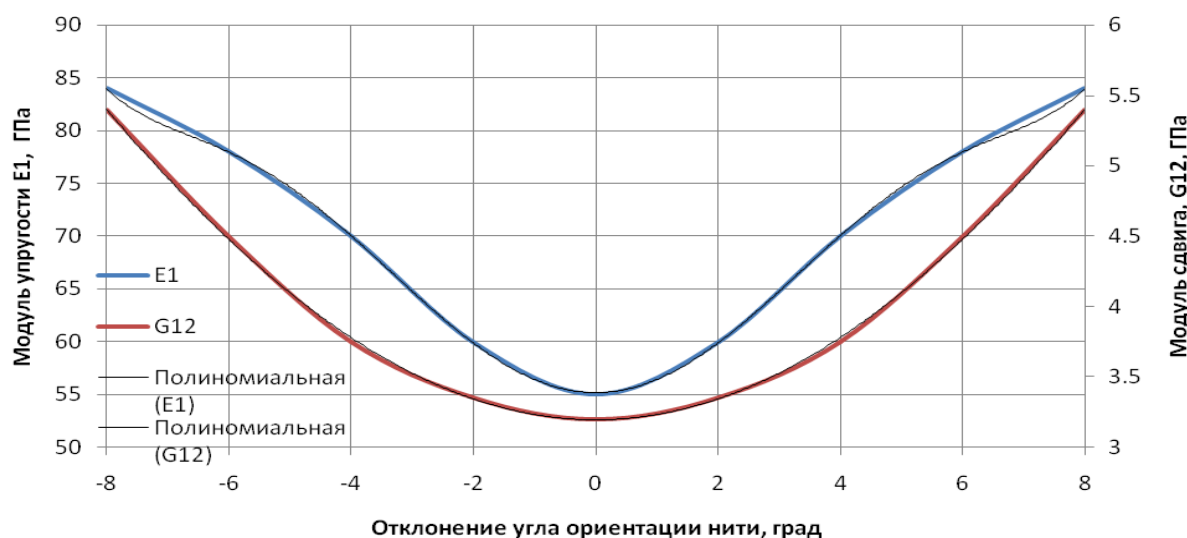
В качестве примера на рисунках 3,а,б приведены гистограммы распределения, построенные по ним законы распределения и статистические характеристики упругих модулей E_1 и G_{12} тканевого слоя с учетом случайного распределения отклонения массы и отклонения толщины. На рисунках 3,в,г приведены гистограммы распределения, построенные по ним законы распределения и статистические характеристики упругих модулей E_1 и G_{12} с учетом случайного распределения отклонения угла ориентации нитей.

В качестве примера на рисунке 4 приведена гистограмма распределения, построенный по ней закон распределения предела прочности S_1 с учетом случайного распределения отклонения массы и отклонения толщины. Распределения и характеристики, приведенные на рисунках 3 и 4, получены для первого модельного материала.



а)

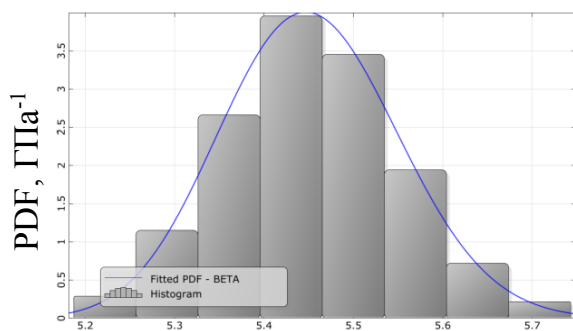
б)



в)

Рисунок 2 – Графики зависимости упругих модулей E_1 и G_{12} от отклонения массы (dm) и отклонения толщины (dh) (а и б), зависимости упругих модулей E_1 и G_{12} от отклонения угла ориентации нити (в)

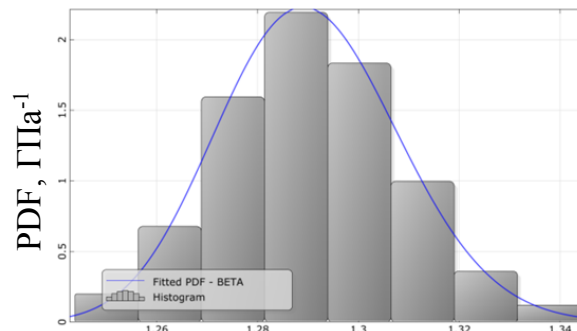
Для проверки адекватности компьютерных моделей использовались результаты испытаний лабораторных образцов на растяжение. В частности, использовались результаты испытаний лабораторных образцов, вырезанных из пластин угле- и стеклопластика. Из каждой пластины вырезали по 10 образцов. Для каждой пластины были определены модуль упругости и предел прочности. Средние значения сопоставлялись по критерию Стьюдента, а стандартные отклонения – по критерию Фишера. Сопоставление табличных значений критериев с вычисленными свидетельствует об адекватности предложенных в работе компьютерных моделей.



Модуль упругости E_1 , ГПа

МО – 54,5 ГПа; СКО – 988 МПа;
beta-распределение

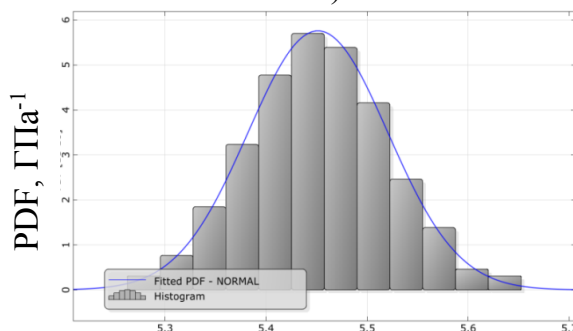
а)



Модуль упругости G_{12} , ГПа

МО – 1,29 ГПа; СКО – 17,7 МПа;
beta-распределение

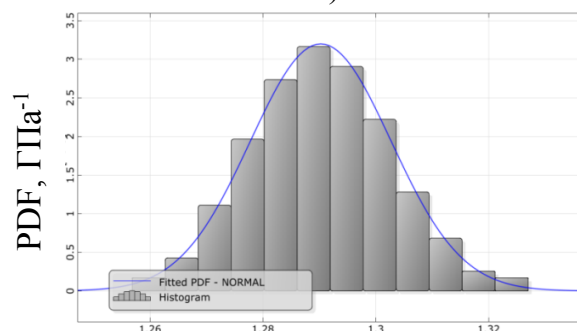
б)



Модуль упругости E_1 , ГПа

МО – 52,5 ГПа; СКО – 83,8 МПа;
нормальное распределение

в)

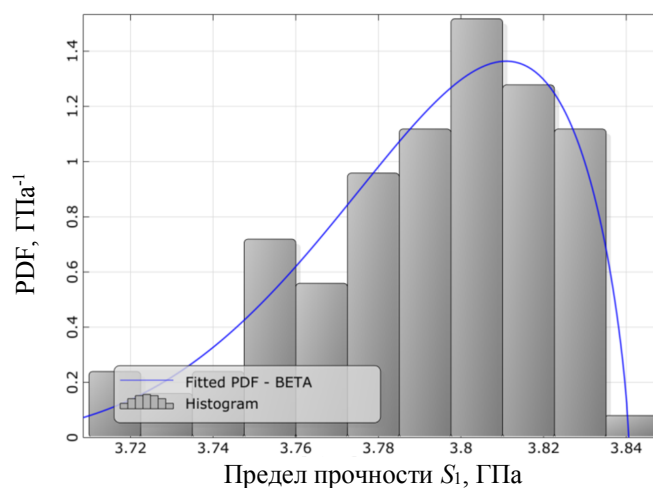


Модуль сдвига G_{12} , ГПа

МО – 1,29 ГПа; СКО – 13,6 МПа;
нормальное распределение

г)

Рисунок 3 – Распределения упругих модулей E_1 и G_{12} при случайных значениях отклонения массы и толщины (а и б), распределения упругих модулей E_1 и G_{12} при случайных значениях отклонения угла ориентации нитей (в и г)



Предел прочности S_1 , ГПа

МО – 379 МПа; СКО – 3 МПа;
beta-распределение

Рисунок 4 – Распределение предела прочности при случайных значениях отклонения массы и толщины

Разработанные компьютерные модели позволили определить инженерные константы модельных материалов с учетом экспериментально определенных статистических характеристик технологических дефектов.

В качестве примера на рисунке 5 приведены результаты сопоставления проектного значения (ПЗ) модуля упругости E_1 первого модельного материала с МО модулей упругости, вычисленных с учетом статистического распределения рассматриваемых технологических дефектов.

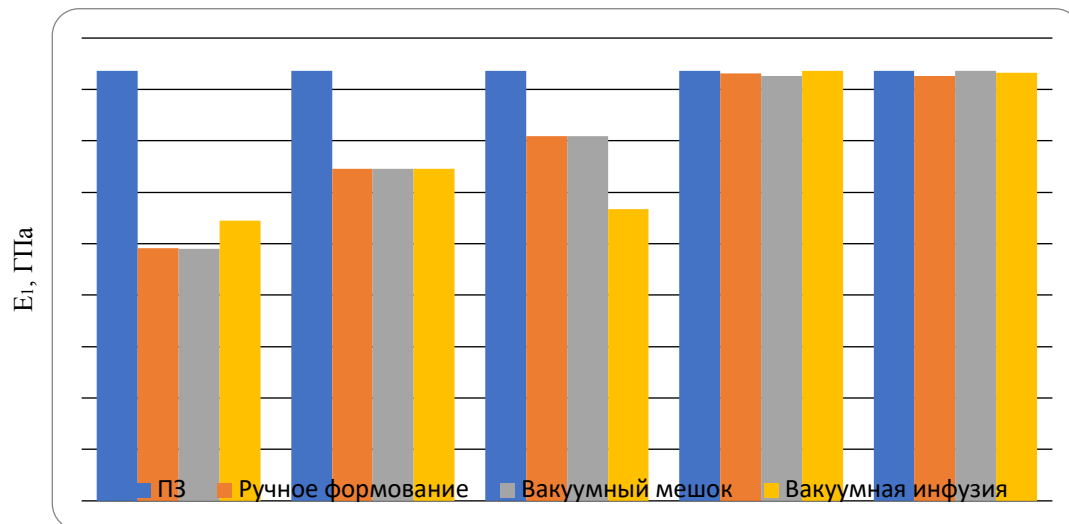


Рисунок 5 – Оценка влияния технологии изготовления и технологических дефектов на модуль упругости в плоскости слоя E_1 , ГПа

В качестве примера на рисунке 6 приведены результаты сопоставления ПЗ предела прочности S_1 первого модельного материала с МО пределов прочности, вычисленных с учетом статистического распределения рассматриваемых технологических дефектов. Сопоставление значений выполнено для всех рассматриваемых технологий получения ПСКМ.

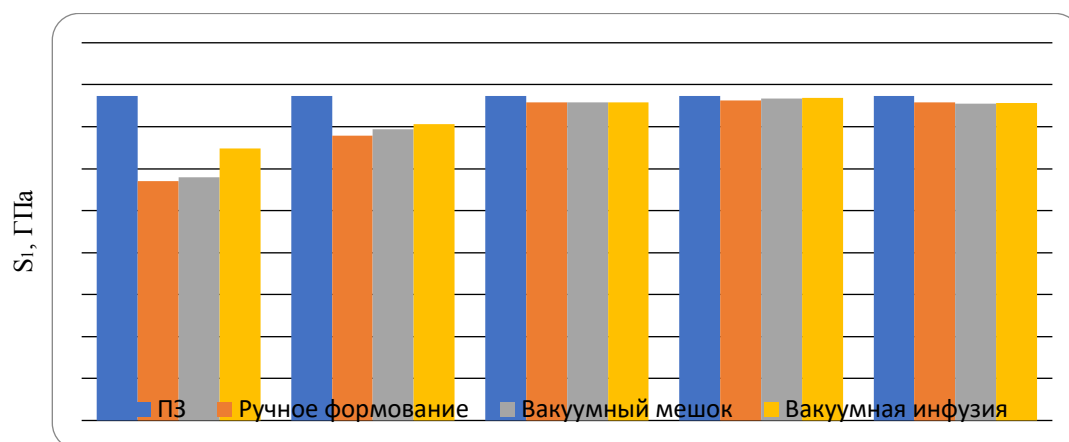


Рисунок 6 – Оценка влияния технологии изготовления и технологических дефектов на предел прочности в плоскости слоя S_1 , МПа

В результате компьютерного моделирования процессов сопротивления деформированию ПСКМ установлено:

- распределение модулей упругости в зависимости от вида технологического дефекта подчиняется нормальному закону, или β -распределению;
- максимальными значениями модулей обладает ПСКМ, изготовленный с использованием технологии вакуумной инфузии, минимальными – изготовленный с использованием технологии ручного формования (использовались модули продольной и поперечной упругости E_1 и E_2);
- максимальный разброс модулей упругости наблюдается у ПСКМ, который изготовлен с использованием технологии ручного формования, минимальный – у ПСКМ, который изготовлен с использованием технологии вакуумной инфузии;
- нижнее значение интервала распределения модуля продольной упругости E_1 составляет 95 % от его номинального значения, а нижнее значение интервала распределения модуля поперечной упругости E_2 составляет 93 % его номинального значения.

В результате компьютерного моделирования процессов сопротивления разрушению ПСКМ установлено:

- распределение пределов прочности подчиняется β -распределению, максимальными значениями модулей обладает ПСКМ, изготовленный с использованием технологии вакуумной инфузии, минимальной – изготовленный с использованием технологии ручного формования. При этом максимальный разброс предела прочности наблюдается у ПСКМ, который изготовлен с использованием технологии ручного формования, минимальный – у ПСКМ, который изготовлен с использованием технологии вакуумной инфузии;
- нижнее значение интервала распределения пределов прочности составляет 95 % от его номинального значения.

Четвертая глава посвящена разработке последовательности и формулировкам частных задач проектирования изделий из ПСКМ с учетом технологических дефектов. В качестве примера выбрана стальная трубчатая направляющая массой 17,1 кг, проектируемая для внедрения на ФНПЦ «ПО «Старт» им. М. В. Проценко». Основными задачами, решаемыми в рамках методики оптимального проектирования трубчатых направляющих из ПСКМ, являются анализ чувствительности, многокритериальная оптимизация и оценка робастности. В работе независимо решались две оптимизационные задачи. Критериями оптимизации являлись масса направляющей и значение обратного коэффициента запаса прочности. Анализ чувствительности позволил выделить основные факторы, влияющие на напряженно-деформированное состояние трубчатой направляющей и отбросить второстепенные. Оптимизация конструкции трубчатой направляющей позволила определить оптимальную структуру ламината, что привело к сокращению массы направляющей до 2,931 кг. Анализ робастности позволил выделить параметры, оказывающие наибольшее влияние на прочность трубчатой направляющей, установить, что распределение обратного коэффициента запаса прочности

подчиняется нормальному закону, в также определить вероятностные характеристики этого распределения.

Кроме этого, разработаны рекомендации по учету влияния технологических дефектов при проектировании изделий из ПСКМ и рекомендации по нормированию технологических дефектов в изделиях из ПСКМ.

В приложении представлены четыре акта внедрения результатов диссертационной работы, а также результаты экспериментальных исследований.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Создана классификация технологических дефектов по этапу возникновения дефекта на основе особенностей их строения, являющемуся общим для каждой группы дефектов.

2. В результате анализа аналитических и численных методов вычисления инженерных констант полимерных тканевых слоев, а также выполненного сопоставления результатов экспериментального и расчетного определения эффективных характеристик упругих свойств композитов установлено, что модели Мори – Танака, двойного включения и Чамиса, а также метод конечных элементов являются предпочтительными. Эти модели, в отличие от моделей Рейсса, Фойгта, Хашина – Штрикмана, ROM, MROM и модели Хэллипа – Цая, позволили вычислить все инженерные константы полимерных тканевых слоев.

3. Определены статистические характеристики дефектов ПСКМ, выполнена их сравнительная оценка.

Установлено, что технологии вакуумного мешка и вакуумной инфузии обеспечивают меньший и близкий по величине разброс отклонений массы, толщины и пористости ПСКМ.

4. Сравнительные оценки сопротивления деформированию и разрушению ПСКМ, полученных по технологиям формования ручного, мешка вакуумного и инфузии вакуумной, свидетельствуют о более высоком сопротивлении деформированию ПСКМ, изготовленных по технологии вакуумной инфузии.

5. На основе на результатов экспериментальных исследований установлено, что максимальной пористостью обладает ПСКМ, изготовленный с использованием технологии ручного формования, минимальной – изготовленный с использованием технологии вакуумного мешка. При этом максимальный разброс пористости наблюдается у ПСКМ, который изготовлен с использованием технологии ручного формования, минимальный – у ПСКМ, который изготовлен с использованием технологии вакуумной инфузии.

6. С помощью численного моделирования были определены инженерные константы модельных материалов, исследовано влияние на них отклонения углов ориентации нитей от проектных значений, построены зависимости, связывающие значения характеристик сопротивления деформированию

и разрушению ПСКМ с физико-механическими характеристиками компонентов и характеристиками технологических дефектов.

7. С помощью компьютерного моделирования были определены пределы прочности модельных материалов, а также исследовано влияние на них отклонения углов ориентации слоев от проектных значений.

8. Оптимизация конструкции трубчатой направляющей из ПСКМ позволила определить оптимальную структуру ламината, что привело к сокращению массы направляющей с 17,1 кг (прототип трубчатой направляющей, изготовленный из конструкционной легированной высококачественной стали) до 2,931 кг (прототип из ПСКМ после оптимизации). Анализ робастности позволил выделить параметры, оказывающие наибольшее влияние на прочность трубчатой направляющей, установить, что распределение обратного коэффициента запаса прочности подчиняется нормальному закону, а также определить вероятностные характеристики этого распределения.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России по специальности 2.6.17

1. Муйземнек, А. Ю. Оценка ударостойкости безопасных многослойных стекол легковых автомобилей / А. Ю. Муйземнек, **Е. Д. Карташова**, И. И. Воячек // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 3. – С. 218–234.

2. **Карташова, Е. Д.** Технологические дефекты полимерных слоистых композиционных материалов / Е. Д. Карташова, А. Ю. Муйземнек // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2017. – № 2. – С. 79–89.

3. **Карташова, Е. Д.** Влияние технологических отклонений расположения армирующего в полимерном слоистом композиционном материале на сопротивление деформированию и разрушению / Е. Д. Карташова, А. Ю. Муйземнек // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2017. – № 3. – С. 134–145.

Публикации в изданиях, рекомендуемых ВАК при Минобрнауки России по другим группам научных специальностей

4. Богомолов, А. И. Модели сопротивления деформированию и разрушению дискретно-тканевых преград при ударном нагружении / А. И. Богомолов, А. Ю. Муйземнек, **Е. Д. Карташова** / Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2018. – № 2 – С. 154–167.

5. **Карташова, Е. Д.** Влияние технологических отклонений параметров репрезентативных ячеек на сопротивление деформированию и разрушению

полимерных слоистых композиционных материалов / Е. Д. Карташова, А. Ю. Муйземнек / Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2020. – № 2. – С. 97–108.

6. Иванова, Т. Н. Оптимизация конструкции трубчатой направляющей из полимерного слоистого композиционного материала / Т. Н. Иванова, **Е. Д. Карташова**, А. Ю. Муйземнек / Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2022. – № 3 – С. 109–128.

7. **Карташова, Е. Д.** Исследование влияния технологических дефектов на формирование статистических полей напряжений в композиционных материалах лопастей квадрокоптера / Е. Д. Карташова / Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2023. – № 3 – С. 173–185.

Публикации в изданиях, индексируемых базой Scopus

8. Муйземнек, А. Ю. Сопоставление результатов экспериментального и расчетного определения эффективных характеристик упругих свойств полимерных слоистых композитов из угле- и стеклотканей / А. Ю. Муйземнек, Т. Н. Иванова, **Е. Д. Карташова** // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2021. – № 2. – С. 88–105.

Публикации в других изданиях

9. Муйземнек, А. Ю. Совершенствование систем обеспечения пассивной безопасности легковых автомобилей на основе компьютерного моделирования конструктивных элементов из тканых материалов / А. Ю. Муйземнек, Ю. А. Будникова, **Е. Д. Карташова**, Е. А. Елескина // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2013. – Т. 1. – С. 164–167.

10. **Карташова, Е. Д.** Расчет межслойных напряжений в композиционных оболочках с двоякой положительной кривизной / Е. Д. Карташова, М. А. Косова, А. А. Желудкова, А. Ю. Муйземнек // Актуальные проблемы науки и образования. – 2017. – № 2. – С. 105–111.

11. **Карташова, Е. Д.** Компьютерное моделирование драпировки ткани в процессе производства слоистых композитов / Е. Д. Карташова, М. А. Косова, А. А. Желудкова, А. Ю. Муйземнек // Информационные технологии в науке и образовании. Проблемы и перспективы. – Пенза, 2017. – С. 325–327.

12. **Карташова, Е. Д.** Расчет балки противотаранного устройства / Е. Д. Карташова, М. А. Косова, А. А. Желудкова, А. Ю. Муйземнек // Инновации технических решений в машиностроении и транспорте : материалы II Всероссийской научно-технической конференции. – Пенза, 2017. – С. 270–274.

13. **Карташова, Е. Д.** Компьютерное моделирование укладки ткани в процессе производства полимерных слоистых композиционных материалов / Е. Д. Карташова, М. А. Косова, А. А. Желудкова, А. Ю. Муйземнек // Иннова-

ции технических решений в машиностроении и транспорте : материалы II Всероссийской научно-технической конференции. – Пенза, 2017. – С. 274–277.

14. **Карташова, Е. Д.** Техничко-экономический анализ балки противотаранного устройства из полимерного слоистого композиционного материала / Е. Д. Карташова, М. А. Косова, А. А. Желудкова, А. Ю. Муйземнек // Системы проектирования, моделирования, подготовки производства и управления проектами CAD/CAM/CAE/PDM : сборник статей XI Международной научно-практической конференции. – Пенза, 2017. – С. 79–82.

15. **Карташова, Е. Д.** Оптимизация конструкции балки противотаранного устройства из полимерного слоистого композиционного материала / Е. Д. Карташова, М. А. Косова, А. А. Желудкова, А. Ю. Муйземнек // Системы проектирования, моделирования, подготовки производства и управление проектами CAD/CAM/CAE/PDM : сборник статей XI Международной научно-практической конференции. – Пенза, 2017. – С. 72–74.

16. **Карташова, Е. Д.** Исследование пористости полимерных слоистых композиционных материалов, полученных методом вакуумной инфузии / Е. Д. Карташова, М. А. Косова, А. А. Желудкова, А. Ю. Муйземнек // Инновации технических решений в машиностроении и транспорте : материалы III Всероссийской научно-технической конференции. – Пенза, 2018. – С. 185–188.

17. **Карташова, Е. Д.** Влияние технологии изготовления на уровень дефектности полимерных слоистых композиционных материалов / Е. Д. Карташова, М. А. Косова, А. А. Желудкова, А. Ю. Муйземнек // Инновации технических решений в машиностроении и транспорте : материалы III Всероссийской научно-технической конференции. – Пенза, 2018. – С. 189–192.

18. **Карташова, Е. Д.** Построение поверхности разрушения полимерных слоистых композиционных материалов / Е. Д. Карташова, А. А. Желудкова, Д. Н. Абаренчева, А. Ю. Муйземнек // Инновации технических решений в машиностроении и транспорте : материалы V Всероссийской научно-технической конференции. – Пенза, 2019. – С. 143–147.

19. **Карташова, Е. Д.** Выбор критерия прочности полимерных слоистых композиционных материалов по результатам лабораторных испытаний / Е. Д. Карташова, М. А. Демина, А. А. Желудкова, А. Ю. Муйземнек // Инновации технических решений в машиностроении и транспорте : материалы V Всероссийской научно-технической конференции. – Пенза, 2019. – С. 148–151.

20. **Карташова, Е. Д.** Использование модели гарсона при моделировании напряженно-деформированного состояния лабораторных образцов из полимеров / Е. Д. Карташова, Д. В. Межевова, А. В. Круду, А. Ю. Муйземнек // Инновации технических решений в машиностроении и транспорте : сборник статей VI Всероссийской научно-технической конференции для молодых ученых и студентов с международным участием / под общей редакцией В. В. Салмина. – Пенза, 2020. – С. 207–210.

21. **Карташова, Е. Д.** Разработка рекомендаций по учету технологических дефектов при проектировании изделий из полимерных слоистых компо-

зиционных материалов // Инновации технических решений в машиностроении и транспорте : сборник статей VI Всероссийской научно-технической конференции для молодых ученых и студентов с международным участием / под общей редакцией В. В. Салмина. – Пенза, 2023. – С. 211–214.

22. **Карташова, Е. Д.** Учет технологических дефектов при проектировании изделий из полимерных слоистых композиционных материалов / Е. Д. Карташова, А. Ю. Муйземнек // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2023. – Т. 1. – С. 212–216.

23. Истомина, В. Е. Технологии переработки изделий из карбона и их отходы производства / В. Е. Истомина, **Е. Д. Карташова**, А. Ю. Муйземнек // Инновации технических решений в машиностроении и транспорте : сборник статей X Всероссийской научно-технической конференции для молодых ученых и студентов с международным участием. – Пенза, 2024. – С. 127–130.

24. Кириенко, Г. А. Применение переработанного углеродного волокна в производстве изделий из карбона / Г. А. Кириенко, **Е. Д. Карташова**, А. Ю. Муйземнек // Инновации технических решений в машиностроении и транспорте : сборник статей X Всероссийской научно-технической конференции для молодых ученых и студентов с международным участием. – Пенза, 2024. – С. 151–154.

Научное издание

Карташова Екатерина Дмитриевна

**ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ДЕФЕКТОВ
НА СОПРОТИВЛЕНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ СЛОИСТЫХ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
ДЕФОРМИРОВАНИЮ И РАЗРУШЕНИЮ**

Специальность 2.6.17. Материаловедение (технические науки)

Редактор *А. Г. Темникова*
Технический редактор *М. Б. Жучкова*
Компьютерная верстка *М. Б. Жучковой*

Подписано в печать 04.07.2024.
Формат 60×84¹/₁₆. Усл. печ. л. 1,16.
Тираж 100. Заказ № 242.

Издательство ПГУ.
440026, г. Пенза, ул. Красная, 40.
Тел.: (8412) 66-60-49, 66-67-77; e-mail: iic@pnzgu.ru