

ФОРЕНТАЛЬ Галина Анатольевна

**ТРАНСВЕРСАЛЬНО-СДВИГОВОЕ УПРОЧНЕНИЕ СЛОИСТЫХ
КОМПОЗИТОВ С ПОЛИМЕРНОЙ МАТРИЦЕЙ
С ПОМОЩЬЮ ФЕЛТИНГА**

1.1.8. Механика деформируемого твердого тела

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре «Техническая механика» ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

Научный доктор технических наук, профессор
руководитель: **Сапожников Сергей Борисович**
Южно-Уральский государственный университет

Официальные
оппоненты:

Ведущая
организация:

Автореферат разослан « _____ » _____ 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор

А.Г.Щербинин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы исследования. Создание новых материалов и конструкций из них, обладающих улучшенным комплексом свойств, остается актуальной задачей на протяжении многих десятилетий.

Полимерные композитные материалы (ПКМ) обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными конструкционными материалами, среди которых низкая плотность и высокие модуль упругости и предел прочности при нагружении вдоль волокон. При этом существует и ряд недостатков, определяемых анизотропией слоистых ПКМ, например, низкие трансверсально-сдвиговые характеристики. Одним из самых опасных видов воздействий на слоистые композитные материалы является удар в направлении нормали к плоскости укладки армирующих слоев композита. Ударные воздействия приводят к возникновению расслоений в структуре материала и разрывам волокон. Повышение трансверсально-сдвиговых характеристик является предметом многочисленных исследований (Горбаткина Ю.А., Панин С.В., Халиулин В.И., Fereidoon A., Kausch H.H., Kim J.K., Lomov S., Mouritz A.P., Schulte K., Seyhan A.T., Wang C.H., Wei Zhang и др.) и определяет актуальность темы настоящей работы.

Способы управления механическими характеристиками ПКМ неразрывно связаны с видом ПКМ (матрицы, наполнителя), а также со способом изготовления конструкций – инфузия (пропитывание связующим пакетов из сухих тканей) или использования препрегов.

При использовании препрегов распространенным способом улучшения свойств полимерной матрицы является применение ультрадисперсных (микро- или нано-) наполнителей из частиц, трубок, стержней или пластин. Однако при данном способе снижается массовая эффективность конструкции.

В случае пропитки связующим пакетов из сухих тканей для получения материала с повышенными трансверсально-сдвиговыми свойствами наиболее распространенным способом является применение трехмерно-армированных композитов (3D-армирование). Одним из основных способов, применяемых в настоящее время для изготовления конструкций из ПКМ в авиационной технике, является 3D-ткачество тканевых преформ с последующим формированием детали. К существенным недостаткам 3D-ткачества можно отнести трудоемкость, негибкость, высокую стоимость. При этом получаемая заготовка должна соответствовать конкретной детали, так как полностью размещается в форме, пропитывается полимером и отверждается.

В настоящее время для повышения трансверсально-сдвиговых свойств ПКМ большой интерес вызывает 3D-армирование традиционных 2D-тканых преформ. К таким способам можно отнести размещение по нормали (Z-координата) композитных стержней небольшого диаметра, сквозную прошивку, размещение коротких нитей по толщине композита – тафтинг. Изучению механических свойств 3D-армированных композитов посвящено

большое количество работ. Проблемы 3D-армированных композитов отражены в работах Бухарова С.В., Зарецкой Г.П., Зинина А.В., Altstädt V., Chen X., Mai Y.-W., Partridge I.K., Tong L.Y., и др. К недостаткам подобного Z-армирования можно отнести увеличение массы, искривление основных волокон и снижение прочности композита в плоскости XY, появление смоляных карманов после пропитки связующим в местах прострочки или установки стержней. Кроме того, данные способы достаточно трудоемкие и требуют специального оборудования.

Отмеченных недостатков в определённой степени лишён **фелтинг**. Фелтинг – иглопробивная технология, применяемая при производстве нетканых материалов (войлоков) для организации фрикционных связей в направлении нормали к плоскости войлока за счёт использования специальных игл с зазубринами для вытягивания коротких нитей. При производстве конструкционных композитов этот метод практически не использовался. Фелтинг является наиболее экономичной и гибкой технологией. Определённым недостатком данной технологии является то, что при вытягивании в направлении Z иглами с зазубринами часть нитей повреждается, приводя к снижению прочностных характеристик в плоскости XY. Свойства 3D-армированных ПКМ в значительной степени зависят от количества ударов иглами на единицу площади (плотности фелтинга). Поэтому важно найти компромисс между повышением трансверсально-сдвиговых свойств и снижением свойств в плоскости XY. Поискам этого компромисса посвящена данная работа.

Цель диссертационной работы: провести расчётно-экспериментальную оценку повышения трансверсально-сдвиговых свойств трёхмерно-армированных слоистых ПКМ при использовании технологии фелтинга. Для достижения поставленной цели в работе сформулированы следующие **задачи**:

1. Оценить влияние плотности фелтинга на длину и количество вытягиваемых в процессе фелтинга волокон.
2. Получить экспериментальные данные о влиянии плотности фелтинга на комплекс механических свойств тканевого стеклопластика и величину повреждений при локальном нагружении.
3. Провести экспериментальные исследования влияния фелтинга на межслойную трещиностойкость тканевого стеклопластика.
4. Разработать расчётно-экспериментальную модель ПКМ с искусственными межслойными трещинами для оценки трансверсально-сдвиговых прочностных характеристик ПКМ.

Научная новизна:

1. Показано, что при использованном локальном 3D-упрочнении слоистого ПКМ образуются короткие волокна сверхкритической длины, вытянутые в процессе фелтинга в направлении нормали из типовых тканевых 2D-преформ.

2. Получены новые экспериментальные данные о зависимости трансверсально-сдвиговой прочности и трещиностойкости тканевого стеклопластика (G_{Tc} , G_{IIC}) от плотности фелтинга.

3. Получены новые экспериментальные данные о влиянии плотности фелтинга на площадь повреждений тканевого стеклопластика при низкоскоростном локальном ударе.

4. Предложена малопараметрическая численная модель деформирования и разрушения слоистого ПКМ с трещиной, отличающаяся тем, что трещина рассматривается как концентратор напряжений в рамках нелокальной теории прочности без использования *когезионных алгоритмов*. Эта модель позволяет определять уровень трансверсально-сдвиговой прочности ПКМ после фелтинга.

Теоретическая ценность работы заключается в возможности использования нелокальной теории прочности ПКМ с 3D-армированием для оценки трансверсально-сдвиговой прочности. **Практическая ценность** нового способа 3D-армирования заключается в целесообразности локального 3D-армирования лишь в необходимых зонах при проектировании ответственных авиационных конструкций, подвергаемых случайным ударам. Результаты исследований получили положительную оценку в ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского (г. Жуковский) и в АО «ФОРТ Технология» (г. Москва).

Достоверность полученных результатов обеспечена экспериментальными исследованиями, которые были проведены на современном испытательном оборудовании (научно-образовательный центр «Экспериментальная механика» Южно-Уральского государственного университета), а также сравнением полученных результатов с результатами экспериментальных исследований других авторов.

Объект исследования: полимерный композитный материал, изготовленный методом фелтинга на основе пакета сухих стеклотканей полотняного переплетения и эпоксидного связующего.

Методы исследования. В работе использованы экспериментальные статические и динамические методы исследования механических свойств ПКМ. Для создания численных моделей, прогнозирующих трансверсально-сдвиговое разрушение 3D-армированных ПКМ, использованы оригинальные модификации методов механики композитных материалов и метода конечных элементов (пакет ANSYS Workbench).

Положения, выносимые на защиту:

1. Оценка влияния фелтинга на межслойную трещиностойкость (G_{Tc} , G_{IIC}) и трансверсально-сдвиговую прочность ПКМ.
2. Концепция трансверсально-сдвигового упрочнения тканевых композитов за счёт локального 3D-армирования сухих преформ в процессе фелтинга.
3. Предложенная трехпараметрическая численная модель для описания эффектов повышения трансверсально-сдвиговой прочности ПКМ.

4. Выводы о возможности применения нелокальной теории прочности для описания эффектов повышения трансверсально-сдвиговой прочности и возможности рассматривать трещину как концентратор напряжений.

Реализация работы. Результаты диссертационной работы были использованы при выполнении НИР в рамках гранта РФФИ № 19-29-13007 в 2020-2022 г.г. и в рамках Программы создания и развития научного центра мирового уровня «Сверхзвук» на 2020-2025 годы при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение от 17 мая 2022 г. № 075-15-2022-1023).

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 3 всероссийских и 5 международных научных конференциях и семинарах: на 10-й Виртуальной международной конференции EASN по инновациям в авиации и космосе (EASN Virtual international Conference on Innovations in Aviation & Space to the Satisfaction of the European Citizens) (2020, г. Салерно (Salerno), Италия); на II Международной онлайн-конференции «Композитные материалы и конструкции» (2021, г. Москва); на Международной инновационной конференции молодых учёных и студентов по современным проблемам машиноведения МИКМУС-2021 (2021, г. Москва); на 29-м заседании междисциплинарного научного семинара «Композиты: технологии создания, исследование и оптимизация свойств, моделирование, применение» (2023, г. Москва, МГУ, руководитель А.В.Хохлов); на XVIII Международной конференции «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» (2023, г. Екатеринбург); на XIII всероссийском съезде по теоретической и прикладной механике (2023, г. Санкт-Петербург); на конференции «Механика деформируемого твердого тела в проектировании конструкций» (2024, г. Пермь), на Международной конференции “InnovaTech 2025. Beyond Textiles: Materials Engineering for the Modern Age” (2025, г. Лодзь (Lodz), Польша).

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 11 научных работах, в том числе 3 в изданиях, включенных в Перечень ведущих рецензируемых научных изданий и приравненных к ним. 6 публикаций в изданиях, индексируемых в международных базах цитирования MathSciNet, Scopus, WoS(ESCI) и CA(pt); 7 публикаций в изданиях, индексируемых в РИНЦ.

Личный вклад автора. Совместно с научным руководителем осуществлен выбор направления исследования, постановка задач и составлен план работ. В экспериментальной части работы изготовление образцов и проведение экспериментов выполнены диссертантом лично или при его непосредственном участии, анализ полученных результатов выполнен автором лично. В расчетной части исследования автор лично сформулировал допущения, провел расчеты и обработку результатов. Подготовка статей для публикации в научных журналах осуществлялась совместно с соавторами и научным руководителем.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Работа содержит _ страниц, _ рисунков, _ таблиц. Библиографический список включает _ источника.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы, показана актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, а также раскрыта теоретическая и практическая значимость результатов работы. Приведены сведения об апробации работы и краткое содержание всех глав диссертации.

В первой главе рассмотрены вопросы получения трехмерно-армированных полимерных композитных материалов. Сделан вывод о перспективности использования 3D-армированных композитов для получения материалов с повышенными трансверсально-сдвиговыми свойствами. Проанализированы достоинства и недостатки применяемых способов армирования. Рассмотрены современные методы оценки прочности (растяжение, изгиб, сдвиг), методы определения трещиностойкости, методы определения остаточной прочности, методы измерения прочности и дефектности при ударах с разной скоростью нагружения.

Проведен анализ работ, использующих контактные алгоритмы для численного исследования роста межслойных трещин в ПКМ.

Показано, что только комплекс методов может дать наиболее полную картину изменения механических свойств ПКМ после фелтинга и обеспечить соответствующей базой применяемые расчетные подходы.

На основании проведенного обзора литературных источников сформулированы цель и задачи диссертации.

Во второй главе рассмотрены особенности технологии фелтинга, проанализировано влияние плотности фелтинга на длины и количество вытянутых в процессе фелтинга Z-волокон. Сделан вывод о связи плотности фелтинга и степени армирования получаемого 3D-армированного композита. Проведена оценка критической длины вытянутых Z-волокон после пропитки и отверждения полимерной матрицы. Проведены экспериментальные исследования влияния фелтинга на величины пределов прочности при растяжении в плоскости XY и межслойном сдвиге ПКМ.

2.1. Особенности технологии фелтинга.

Процесс фелтинга сухих преформ, выполненных из тканей полотняного переплетения (стекловолокна типа E, толщина слоя 0,2 мм, размер ячейки переплетения 0,5 мм, средний диаметр волокон 9 мкм) проведен с помощью

иглопробивной машины с ЧПУ¹ (рисунок 1). Машина позволяет по заданной программе перемещать преформу (пакет сухих тканей) в плоскости XU , осуществляя при этом пробитие пакета в направлении Z специальной трехгранной иглой. Зазубрины, расположенные на каждой грани иглы, захватывают разорванные волокна и вытягивают их в направлении Z . Машина позволяет варьировать количество ударов иглой на 1 см^2 площади тканевого пакета, так называемую плотность фелтинга f (см^{-2}). После фелтинга с верхней стороны преформы остаются следы ударов иглы, с обратной стороны появляются вытянутые в Z -направлении волокна разной длины (рисунок 2).

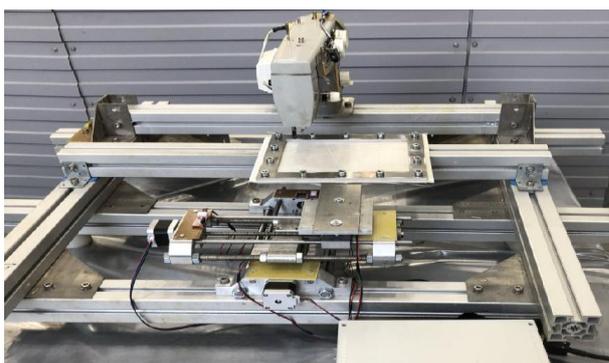
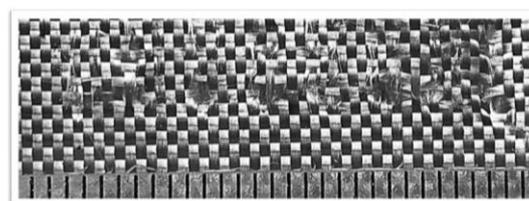
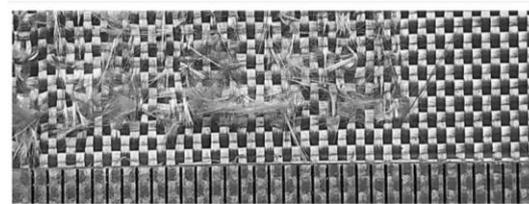


Рисунок 1. Общий вид машины для фелтинга



Вид сверху



Вид снизу

Рисунок 2. Стеклоткань после фелтинга (плотность фелтинга $f = 70 \text{ см}^{-2}$)

Проведены исследования связи количества и длины вытянутых волокон в зависимости от плотности фелтинга $f = 10, 30, 50$ и 70 см^{-2} . Вытянутые после фелтинга волокна были срезаны и выложены на плёнку с клеевым слоем. По фотографиям плёнки с волокнами (рисунок 3) была измерена длина каждого волокна (около 800 шт.). Распределение вытянутых нитей по длинам может быть описано двухпараметрическим логнормальным распределением (рисунок 4).

Срезанные волокна, вытянутые после фелтинга, были взвешены на аналитических весах Sartorius MSE 225S-100DU с точностью измерений $d=0,01$ мг. С помощью интегральных кривых распределения длин была рассчитана объемная доля вытянутых Z -волокон в ПКМ. Количество волокон, вытянутых из ткани, увеличивается с увеличением плотности фелтинга практически по линейной зависимости (рисунок 5), что позволяет считать процессы удара иглой по ткани (и их результаты по количеству вытянутых нитей) независимыми. Варьируя величину плотности фелтинга,

¹ Forental G.A., Kheruvimov A.V., Nikonov A.V., Sapozhnikov S.B. Stack fabric felting to get PCM GIIc improvement and LVI tolerance // IOP Conference Series Materials Science and Engineering: 10th EASN International Conference on Innovation in Aviation and Space to the Satisfaction of the European Citizens. 2021. – Т. 1024(1). – 012001.

можно получить материал с различной степенью армирования и за счет этого управлять трансверсальной прочностью композита.

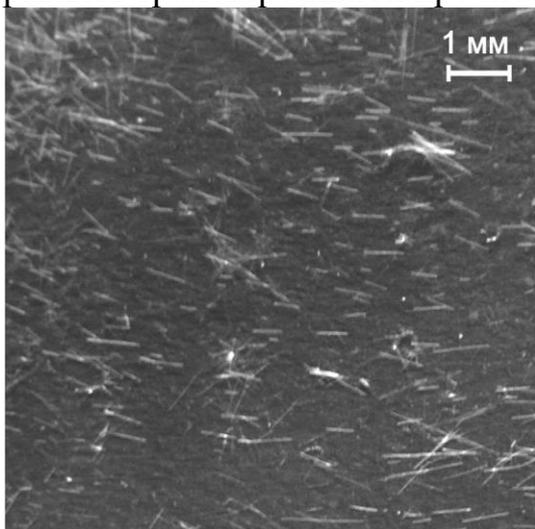


Рисунок 3. Срезанные волокна, вытянутые из стеклоткани после фелтинга

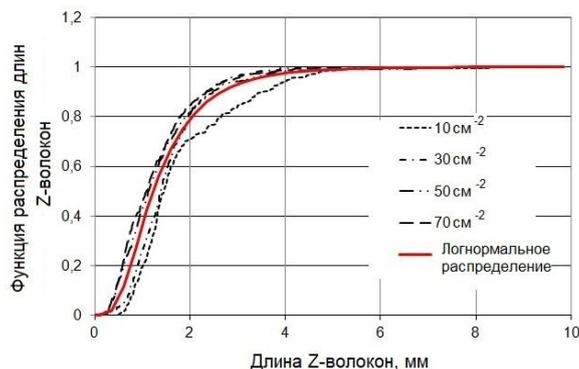


Рисунок 4. Интегральные кривые распределения Z-волокон в функции их длины для разных плотностей фелтинга и функция логнормального распределения

На стеклоткани полотняного переплетения проведена оценка критической длины вытянутых при фелтинге Z-волокон. Тканевые преформы из стеклоткани полотняного переплетения без фелтинга были пропитаны эпоксидной смолой холодного отверждения ЭТАЛ-ИНЖЕКТ-SL (производитель фирма «Эпитал») методом вакуумной инфузии. Режим отверждения, рекомендованный производителем, включал выдержку при комнатной температуре 24 часа и постотверждение при температуре 90°C в течение 4 часов. В пластинах размерами 25x25x3 мм было выполнено отверстие диаметром 7 мм сверлом с заводской заточкой. Скорость резания составила ~1 м/с. Поверхность отверстия была покрыта красным маркером на спиртовой основе. После сушки образцы расслаивали острым ножом, и слои помещали в оптический микроскоп. Поврежденная зона выдернутых при сверлении волокон была окрашена и легко идентифицировалась на снимках (рисунок б). Ширина этой зоны может быть интерпретирована как длина выдернутых волокон (критическая длина L_{cr}).

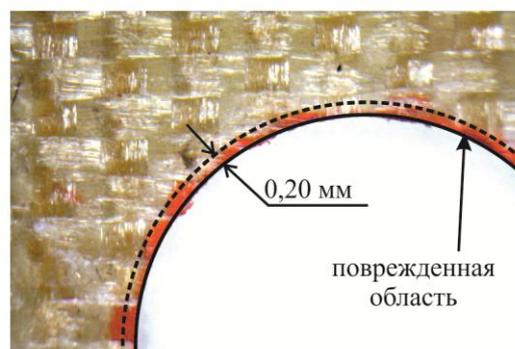
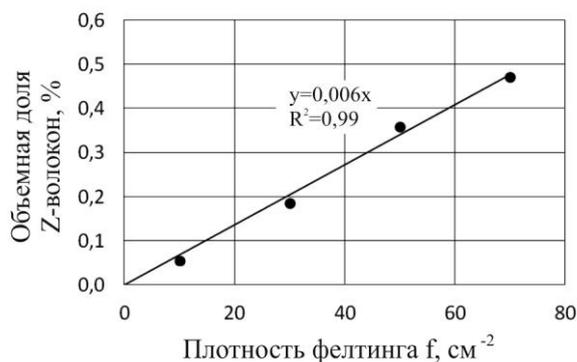


Рисунок 5. Зависимость объемной доли Z-волокон от плотности фелтинга

Рисунок 6. Микрофотография поврежденной зоны (диаметр отверстия 7 мм)

Обработка изображений поврежденной зоны показала, что средняя ширина окрашенной зоны равна $L_{cr} \approx 0,20$ мм. Анализ интегральных кривых распределения длин Z-волокон (рисунок 3) показывает, что их все можно (с вероятностью больше 0,99) считать имеющими длину больше критической.

2.2. Анализ влияния плотности фелтинга на прочность ПКМ при растяжении в плоскости XY и межслойном сдвиге.

Испытания проводили на образцах, изготовленных из стеклоткани полотняного переплетения после фелтинга ($f = 10, 30, 50, 70$ и 90 см^{-2}) и пропитанных эпоксидной смолой ЭТАЛ370 с отвердителем ЭТАЛ45 (соотношение 100/45). Также были испытаны контрольные образцы без фелтинга ($f = 0 \text{ см}^{-2}$). Определение максимальной нагрузки при растяжении и межслойном сдвиге ПКМ после фелтинга было проведено на испытательной машине INSTRON 5900R со скоростью движения захватов 5 мм/мин.

Наблюдается снижение прочности композита при растяжении в плоскости при наличии фелтинга. При плотности фелтинга $f = 10 \text{ см}^{-2}$ разрушающая нагрузка при растяжении уменьшается на ~18% (рисунок 7). Дальнейшее увеличение плотности фелтинга приводит к существенному уменьшению прочности в плоскости XY (при $f = 30, 50, 70 \text{ см}^{-2}$ на ~43-44 %, при $f = 90 \text{ см}^{-2}$ на ~50 %).

Прочность при межслойном сдвиге увеличивается с увеличением плотности фелтинга. При $f = 10 \text{ см}^{-2}$ прочность на межслойный сдвиг увеличилась на ~24 %, а при $f = 90 \text{ см}^{-2}$ – на ~42 % (рисунок 8).

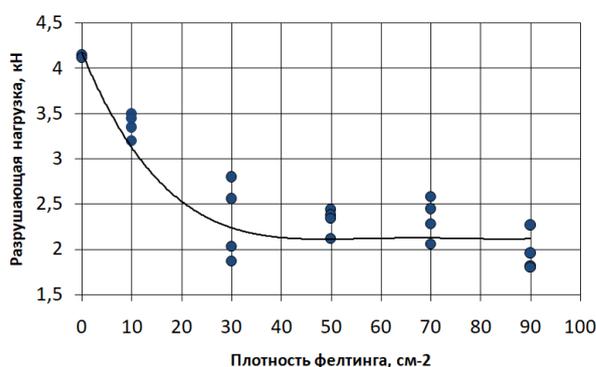


Рисунок 7. Зависимость разрушающей нагрузки при растяжении от плотности фелтинга

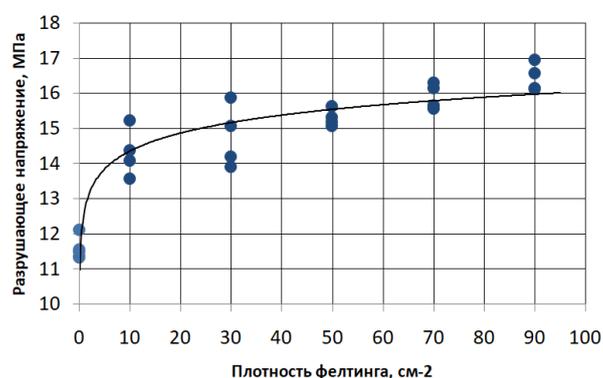


Рисунок 8. Зависимость разрушающего сдвигового напряжения от плотности фелтинга

В третьей главе проведены экспериментальные исследования влияния фелтинга на прочность 3D-армированных ПКМ при низкоскоростном ударе.

Для изготовления 3D-армированных ПКМ (пакет из 15 слоев сухой стеклоткани полотняного переплетения) использован фелтинг с плотностью

$f = 0, 10, 30, 50 \text{ см}^{-2}$. Далее пакет был пропитан методом вакуумной инфузии эпоксидным компаундом ЭТАЛ-ИНЖЕКТ-SL.

3.1. Экспериментальное исследование влияния фелтинга на повреждения ПКМ при низкоскоростном ударе.

Проведено экспериментальное исследование влияния фелтинга на величину площади расслоения ПКМ при низкоскоростном ударе с энергиями 5, 10, 15 Дж. Испытания при низкоскоростном ударе были проведены на вертикальном башенном копре INSTRON CEAST 9350 на кольцевой опоре без дополнительного закрепления с конусным ударником INSTRON 7529.841 (наконечник радиусом 12,7 мм). После проведения испытаний была вычислена площадь дефектов типа расслоения. Картины повреждений образцов после испытаний при энергии удара 15 Дж приведены на рисунке 9 для всех плотностей фелтинга.

Наличие фелтинга уменьшает площадь повреждения образцов при ударе. Наиболее заметное влияние наблюдается при большей энергии удара (рисунок 10). При энергии 5 Дж площадь дефекта в образцах с плотностью фелтинга 10 и 30 см^{-2} уменьшается на 15%, а с плотностью фелтинга 50 см^{-2} – на 25% по сравнению с образцом без фелтинга. При энергии 10 Дж площадь расслоения при плотности фелтинга 10 и 30 см^{-2} уменьшается на 10%, при плотности 50 см^{-2} – на 16% по сравнению с образцом без фелтинга. При энергии 15 Дж площадь расслоения образцов с фелтингом уменьшается примерно на 30% по сравнению с образцом без фелтинга.

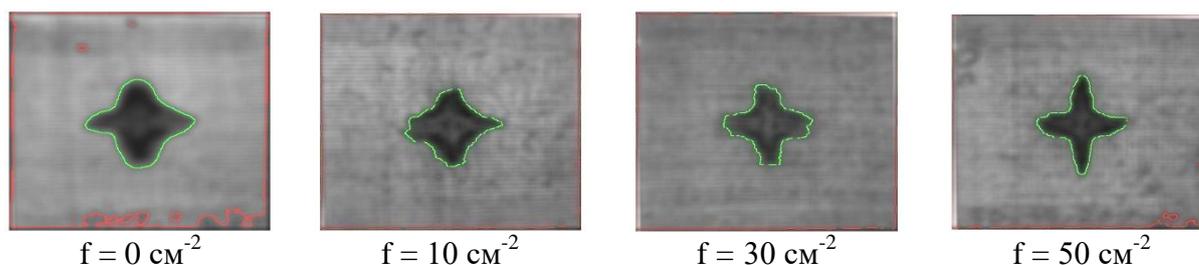


Рисунок 9. Характер повреждений образцов при энергии удара 15 Дж

3.2. Экспериментальное исследование влияния фелтинга на остаточную прочность ПКМ после низкоскоростного удара.

После низкоскоростного удара были проведены испытания образцов на трехточечный изгиб до разрушения для определения остаточной прочности. Испытания были проведены на универсальной испытательной машине INSTRON 5900R со скоростью нагружения 5 мм/мин. Для определения относительной остаточной прочности были проведены испытания образцов без фелтинга и без расслоений.

Образцы с фелтингом показывают уменьшение остаточной прочности в плоскости XY, что связано с повреждением волокон ткани в плоскости при пробивке сухой ткани иглой в процессе фелтинга (рисунок 11). Однако, при минимальной плотности фелтинга $f = 10 \text{ см}^{-2}$ относительная остаточная прочность при энергиях 5 и 10 Дж практически не отличается от

относительной остаточной прочности образцов без фелтинга, а при энергии 15 Дж уменьшается на ~ 11%.



Рисунок 10. Общая площадь повреждения в зависимости от плотности фелтинга

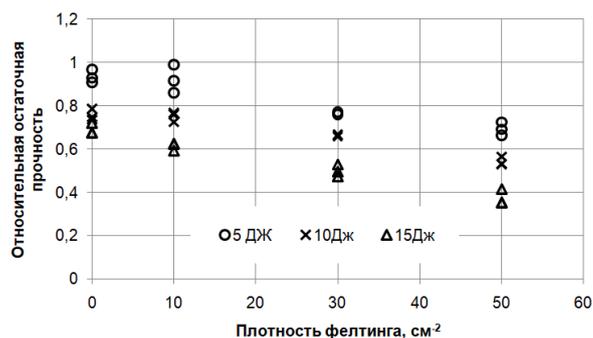


Рисунок 11. Относительная остаточная прочность на изгиб в зависимости от плотности фелтинга

Анализ результатов, проведенных в данной главе экспериментов, показал, что минимальное повреждение в плоскости XY и существенное снижение дефектности наблюдается уже при плотности фелтинга $f = 10 \text{ см}^{-2}$. Поэтому далее проведены экспериментальные и расчетные исследования ПКМ после фелтинга с плотностью $f = 10 \text{ см}^{-2}$.

В четвертой главе проведены экспериментальные исследования влияния фелтинга на трансверсально-сдвиговые характеристики 3D-армированных ПКМ в широком диапазоне скоростей нагружения на кольцевой опоре и межслойную трещиностойкость ПКМ с фелтингом. Образцы были изготовлены по технологии, описанной **в третьей главе**.

4.1. Экспериментальное исследование трансверсально-сдвиговых характеристик ПКМ после фелтинга в широком диапазоне скоростей нагружения на кольцевой опоре.

Проведены испытания ПКМ после фелтинга (плотность $f = 0$ и 10 см^{-2}) в зависимости от скорости нагружения: квазистатические нагружения и испытания при низкоскоростном ударе на сопротивление изгибу на кольцевой опоре. Статические испытания проведены на универсальной испытательной машине INSTRON 5900R. Образец был помещен на цилиндр диаметром 20 мм с конусным углублением диаметром 19 мм и углом конусности 12° . Нагружение было проведено стальными полусферами диаметрами 10 и 20 мм. После проведения испытаний была вычислена площадь дефектов, появившихся на образцах. Видимая площадь дефектов образцов с фелтингом уменьшается по сравнению с образцом без фелтинга. В испытаниях с полусферой диаметром 10 мм уменьшение видимой площади дефектов составило 19,9%, при испытаниях с полусферой диаметром 20 мм – 19,4 %.

Испытания на изгиб на кольцевой опоре при низкоскоростном ударе были проведены на вертикальном башенном копре INSTRON CEAST 9350 по

аналогии со статическим нагружением. В испытаниях был использован ударник INSTRON 7529.841 со сферическим наконечником диаметром 10 и 20 мм. Испытания проведены при трех различных скоростях ударника – 2,4 м/с (энергия 6 Дж), 1,93 м/с (энергия 4 Дж), 1,4 м/с (энергия 2 Дж) для каждого диаметра наконечника. На рисунке 12 представлены зависимости общей площади повреждения для трех энергий удара и двух диаметров ударника. Площадь дефектов увеличивается с возрастанием энергии удара.

Для диаметра ударника 10 мм (рисунок 12а) при скорости 1,4 м/с площадь дефекта в образцах с фелтингом практически не изменяется по сравнению с образцом без фелтинга (изменение менее 1%). При скорости 1,93 м/с площадь дефекта уменьшается в среднем на 9%, при скорости 2,4 м/с – на 15%. Площадь дефектов изменяется от скорости удара по линейной зависимости, при этом для образцов без фелтинга при скорости меньше 1 м/с дефекты не появляются. Для образцов с фелтингом пороговая скорость равна 0,9 м/с.

Для диаметра ударника 20 мм (рисунок 12б) при скорости 1,42 м/с площадь дефекта в образцах с фелтингом уменьшается на 11% по сравнению с образцом без фелтинга, при скорости 1,98 м/с – на 22%, при скорости 2,42 м/с – на 34%. Дефекты у образцов без фелтинга не появляются при скорости меньше, чем 1,1 м/с; для образцов с фелтингом – 0,97 м/с.

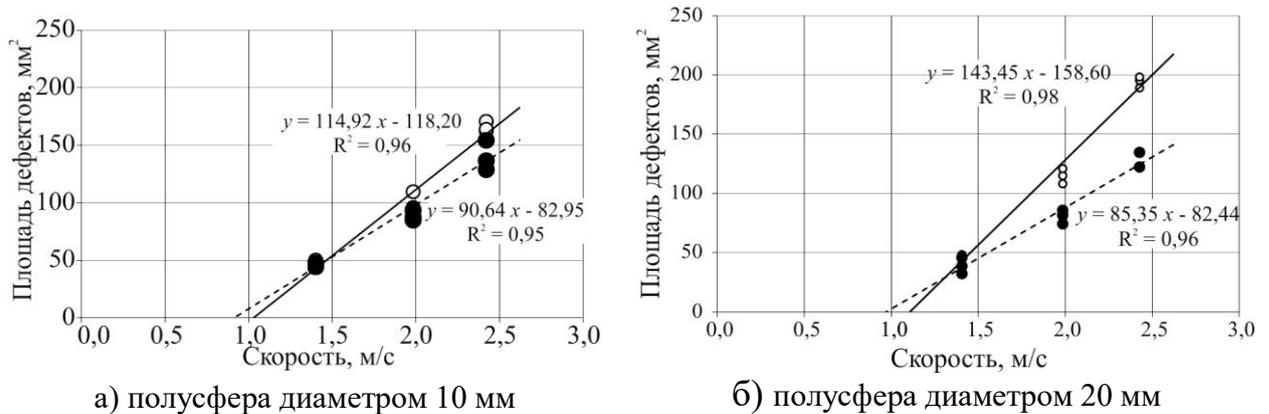


Рисунок 12. Зависимость общей площади повреждения от скорости удара:

○ – без фелтинга $f = 0 \text{ см}^{-2}$, ● – плотность фелтинга $f = 10 \text{ см}^{-2}$

4.2. Экспериментальное исследование межслойной трещиностойкости ПКМ с фелтингом (G_{Ic} и G_{IIc}).

Экспериментальные исследования межслойной трещиностойкости проведены на испытательной машине INSTRON 5900R, используя два метода – метод трехточечного изгиба (ENF) и метод двухконсольной балки (DCB).

Для определения значения межслоевой вязкости разрушения G_{Ic} по моде I (нагружение отрывом) использован образец в виде двухконсольной балки, усилие приложено к образцу через приклеенные блоки. Начальная длина трещины a_0 составляла 40...48 мм. Испытания проведены на испытательной машине INSTRON 5900R со скоростью движения активного захвата 5 мм/мин. Результаты измерений были обработаны в соответствии со

стандартом ASTM D5528-14. Значения G_{IC} для образцов с плотностью фелтинга 10 см^{-2} при начале расслоения выше на 40%, чем у образцов без фелтинга. При развитии трещины значение G_{IC} было рассчитано путем усреднения значений G_{IC} в области R-кривых, когда значения G_{IC} приближаются к некоторому постоянному значению. При наличии фелтинга значения G_{IC} повышаются примерно на 32% по сравнению с образцами без фелтинга. Следует заметить, что фелтинг стабилизирует процесс расслоения, приводя к резкому снижению разбросов значения G_{IC} по сравнению с образцами без фелтинга, когда на межслойном интерфейсе находится лишь хрупкая полимерная матрица.

Метод трехточечного изгиба позволяет определить межслоевую вязкость разрушения G_{IIC} при нагружении образца по моде II (сдвиг). Испытания проведены на испытательной машине INSTRON 5900R со скоростью нагружения 10 мм/мин, расстояние между опорами $2L = 100$ мм. Начальная длина трещины у всех образцов составляла $a_0 = 25$ мм. Обработка данных результатов испытаний проведена в соответствии со стандартами ASTM D7905M-14 и ГОСТ 33685–2015. Образцы с фелтингом показали увеличение межслоевой вязкости разрушения G_{IIC} на ~33 % по сравнению с образцами без фелтинга.

В пятой главе предложена малопараметрическая численная модель для описания наблюдаемых при испытаниях эффектов трансверсально-сдвигового упрочнения ПКМ.

Поскольку величины межслойной трещиностойкости G_{IC} и G_{IIC} не используются при проведении типовых расчетов на прочность конструкций, целесообразно провести оценку напряженного состояния у трещиноподобного дефекта (как концентратора напряжений) с позиции *нелокального* подхода, используя напряжения, осреднённые на некоторой базе λ , которая является параметром материала².

Оценка напряженного состояния у конца трещины проведена в предположении линейной упругости материала вплоть до разрушения. Основной гипотезой здесь является то, что за развитие трещиноподобного концентратора ответственен критерий прочности композита³, включающий все компоненты осреднённых на базе λ напряжений:

$$\left(\frac{\max \sigma_{z\lambda}}{Z_t} \right)^2 + \left(\frac{\max \sigma_{x\lambda}}{X_t} \right)^2 + \left(\frac{\max \tau_{xz\lambda}}{S} \right)^2 - \frac{\max \sigma_{z\lambda} \cdot \max \sigma_{x\lambda}}{Z_t \cdot X_t} \leq 1 \quad (1)$$

Здесь Z_t – предел прочности на растяжение композита в направлении Z , X_t – предел прочности на растяжение композита в направлении X , S – предел прочности на сдвиг композита в плоскости XZ .

² Новожилов В.В. О необходимом и достаточном критерии хрупкой прочности // Прикладная математика и механика. – 1969. – Т.33 – Вып. 2. – С. 212–222.

³ Васильев В. В. Механика конструкций из композиционных материалов. – М.: Машиностроение, 1988. – 272 с.

Выполнение условия (1) важно для оценки нагрузки, при достижении которой происходит скачкообразное увеличение длины трещины на величину λ . Расчет НДС был проведен с использованием программы ANSYS Workbench (Static Structural). В связи с наличием плоскостей симметрии для ENF-нагружения была построена трехмерная модель $\frac{1}{2}$ образца с трещиной (рисунок 13), для DCB-испытаний – $\frac{1}{4}$ образца с трещиной (рисунок 14). При создании сетки конечных элементов для сеточного генератора задан параметр $\lambda_x = 0,75$ мм по ширине образца и параметр $\lambda_z = 0,2$ мм – по толщине образца, что соответствует толщине слоя (layerwise mesh). Примеры распределения напряжений у вершины трещины представлены на рисунках 15–16 при длине трещины $a_0 = 30$ мм.

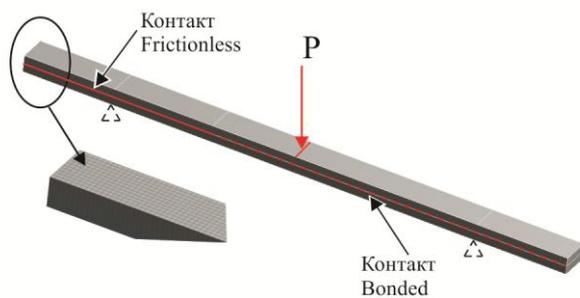


Рисунок 13. Конечно-элементная модель $\frac{1}{2}$ образца и фрагмент сетки для ENF-испытаний

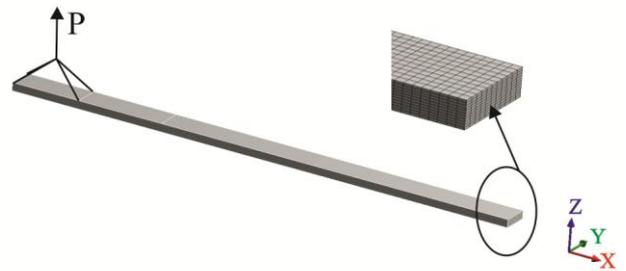
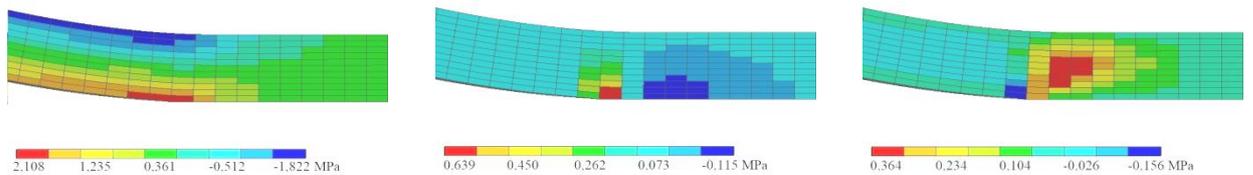
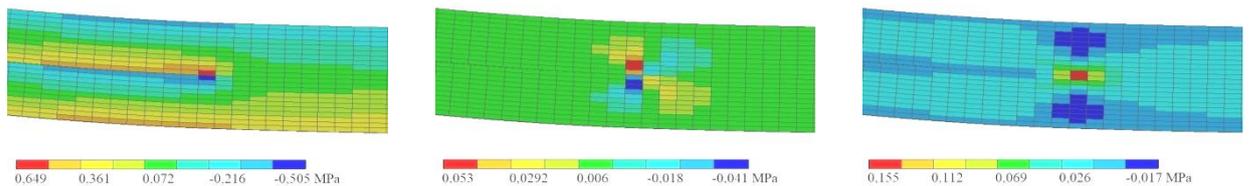


Рисунок 14. Конечно-элементная модель $\frac{1}{4}$ образца и фрагмент сетки для DCB-испытаний



нормальные напряжения $\sigma_{x\lambda}$ нормальные напряжения $\sigma_{z\lambda}$ касательные напряжения $\tau_{xz\lambda}$

Рисунок 15. Примеры распределения напряжений у вершины трещины при DCB-нагружении (длина трещины $a_0 = 30$ мм)



нормальные напряжения $\sigma_{x\lambda}$ нормальные напряжения $\sigma_{z\lambda}$ касательные напряжения $\tau_{xz\lambda}$

Рисунок 16. Примеры распределения напряжений у вершины трещины при ENF-нагружении (длина трещины $a_0 = 30$ мм)

Расчет зависимости «нагрузка – перемещение» $P(\delta)$ был проведен в соответствии со следующей последовательностью:

1) проведение МКЭ-расчета максимальных напряжений $\max \sigma_{z\lambda}$, $\max \sigma_{x\lambda}$ и $\max \tau_{xz\lambda}$ и перемещений δ точки приложения нагрузки $P=1$ Н для трещин с заданными длинами в диапазоне $a = 20 \dots 90$ мм (DCB) и $a = 25 \dots 40$ мм (ENF);

2) построение аппроксимационных зависимостей $\sigma_{i\lambda}(a, P)$ и $\delta(a, P)$;

3) определение нагрузки $P_{cr}(a_0)$ и перемещения δ_{cr} , при которых начальная длина трещины a_0 увеличится скачкообразно на величину $\lambda_x=0,75$ мм при нарушении критерия (1);

4) определение нагрузок $P(a_0+n\lambda)$ и перемещений $\delta(n)$ для всех длин трещины $a_0+n\lambda$ при $n>0$.

Для получения расчётных зависимостей «нагрузка – перемещение» $P(\delta)$ с помощью МКЭ необходимы характеристики прочности композита в главных направлениях (критерий (1)). Прямое получение трансверсально-сдвиговых констант крайне затруднено, поэтому был применен обратный метод, в котором эти константы варьируются и отыскивается их наилучшее сочетание, при котором расчётные и экспериментальные диаграммы нагружения хорошо согласуются (среднеквадратичное отклонение перемещений при заданных нагрузках минимальное).

При нагружении по схеме DCB при расчете зависимости $P(\delta)$ для образцов без фелтинга были найдены и округлены до целых значений следующие величины пределов прочности: $Z_t = 39$ МПа, $X_t = 360$ МПа, $S = 82$ МПа. Для образцов с фелтингом в расчетах получены значения $X_t^*=270$ Па, $Z_t^*=46$ МПа и $S^*=97$ МПа. Таким образом, использование фелтинга позволило увеличить предел прочности на растяжение в направлении Z с 39 до 46 МПа (на ~18%).

Так как при нагружении по схеме DCB пределы прочности на сдвиг в плоскости XZ S и S^* вносят небольшой вклад в критерий (1), то полученные в расчетах по схеме DCB значения $S=82$ МПа и $S^*=97$ МПа необходимо уточнить в расчете по схеме нагружения ENF. При этом нормальные напряжения в направлениях X и Z оказывают незначительное влияние по сравнению с касательными напряжениями при нагружении по схеме ENF. Поэтому в расчетах при поиске значений S и S^* были использованы найденные при нагружении по схеме DCB величины Z_t , X_t , Z_t^* и X_t^* .

Из условия наилучшего согласия экспериментальных и расчетных кривых $P(\delta)$ были определены значения $S = 77$ МПа (без фелтинга) и $S^* = 89$ МПа (с фелтингом). Таким образом, применение фелтинга позволило увеличить предел прочности на сдвиг в плоскости XZ на ~16%.

Расчетные зависимости $P(\delta)$ для образцов без фелтинга и для образцов с фелтингом при значениях $Z_t = 39$ МПа, $X_t = 360$ МПа, $S = 77$ МПа и $Z_t^*=46$ МПа, $X_t^*=270$ Па, $S^*=89$ МПа, а также экспериментальные диаграммы «нагрузка-перемещение» приведены на рисунке 17.

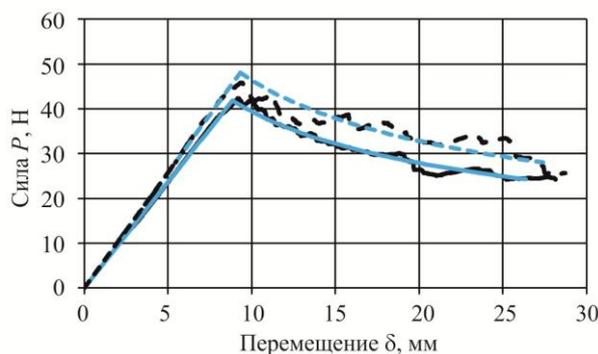


Схема нагружения DCB

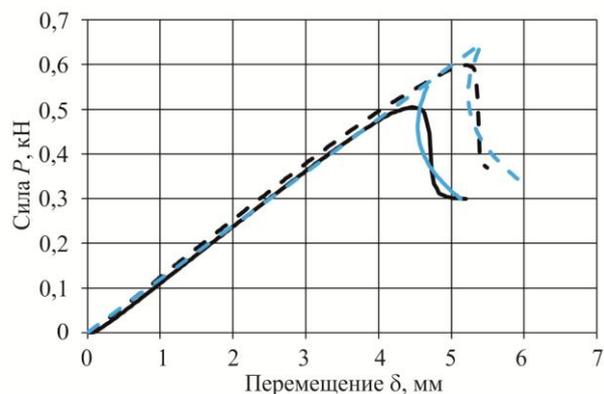


Схема нагружения ENF

Рисунок 17. Экспериментальные и расчетные диаграммы «нагрузка-перемещение»:

- испытания для образцов без фелтинга, — расчет для образцов без фелтинга,
- испытания для образцов с фелтингом, --- расчет для образцов с фелтингом

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты проведенных в работе теоретических и экспериментальных исследований состоят в следующем:

1. Разработана технология локального трёхмерного армирования (фелтинг) слоистых ПКМ, позволяющая управлять трансверсально-сдвиговыми свойствами.
2. Определены длина и количество вытянутых при фелтинге волокон. Выявлена зависимость объемной доли волокон от плотности фелтинга. Экспериментальные исследования на стеклоткани полотняного переплетения показали, что длина вытянутых при фелтинге Z-волокон больше критической даже при использовании эпоксидного связующего холодного отверждения.
3. Показано, что при увеличении плотности фелтинга до $f = 90 \text{ см}^{-2}$ происходит увеличение предела прочности на межслойный сдвиг на $\sim 42\%$ и уменьшение предела прочности при растяжении в плоскости на $\sim 60\%$.
4. Наиболее рациональным является значение фелтинга $f = 10 \text{ см}^{-2}$, при котором увеличение предела прочности на межслойный сдвиг составило $\sim 24\%$ и уменьшение предела прочности при растяжении на $\sim 27\%$.
5. Обнаружено, что наличие фелтинга приводит к уменьшению площади повреждения образцов при ударе, при этом наиболее заметное влияние наблюдается при большей энергии удара.
6. Фелтинг плотностью 10 см^{-2} приводит к увеличению значений вязкости межслойного разрушения G_{Ic} на $\sim 40\%$ и G_{IIc} на $\sim 33\%$.
7. Разработаны малопараметрические численные модели (ENF- и DCB-испытания) для описания эффектов повышения трансверсально-сдвиговой прочности, в которой скачкообразное развитие трещины рассматривается как следствие разрушения ПКМ у концентратора

напряжений в рамках нелокальной теории прочности без использования когезионных алгоритмов.

8. С помощью МКЭ-моделирования ENF и DCB-испытаний показано, что использование фелтинга $f = 10 \text{ см}^2$ увеличивает предел прочности на растяжение композита в направлении Z на $\sim 18 \%$, а предел прочности на сдвиг в плоскости XZ на $\sim 16 \%$.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Форенталь Г.А., Сапожников С.Б., Игнатова А.В., Буслаева О.С., Херувимов А.В.** Деформирование и разрушение слоистого тканевого стеклопластика при изгибе на кольцевой опоре: влияние трёхмерного армирования и скорости нагружения // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2024. – № 91. – С. 141–152. (**ВАК, MathSciNet, Scopus, WoS(ESCI)**). **Статья РИНЦ**
2. **Форенталь Г.А., Сапожников С.Б.** Повышение межслойной трещиностойкости полимерных тканевых композитов с помощью локального трехмерного армирования (фелтинга) // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). – 2024. – 24(3). – С. 215-226. (**ВАК, Scopus**) **Статья РИНЦ**
3. **Форенталь Г.А., Сапожников С.Б.** Перспективы технологии фелтинга для локального трёхмерного армирования полимерных тканевых композитов // Композиты и наноструктуры. – 2022. – №14(56) – С.233–245. (**ВАК, CA(pt)**) **Статья РИНЦ**

Статьи в других изданиях и материалах конференций

4. Sapozhnikov S.B., Buslaeva O.S., **Forental G.A.** Felting as a new method for Z-reinforcement of fabric-layered composite materials // AIP Conference Proceedings: the 14th International Conference on Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures (MRDMS-2020). – 2020. – Т. 2315(1). – 050022. (**Scopus**) **Труды конференции**
5. **Forental G.A., Kheruvimov A.V., Nikonov A.V., Sapozhnikov S.B.** Stack fabric felting to get PCM GIIC improvement and LVI tolerance // IOP Conference Series Materials Science and Engineering: 10th EASN International Conference on Innovation in Aviation and Space to the Satisfaction of the European Citizens. 2021. – Т. 1024(1). – 012001. (**Scopus**) **Статья РИНЦ**
6. **Forental G., Bezmelnitsyn A., Ignatova A., Nikonov A., Sapozhnikov S.** The Influence of Felting on Low-Velocity Impact Damage and Residual Flexural Strength of Polymer Composite Material: Experimental Study // AIP Conference Proceedings. Conference: PROCEEDINGS OF INTERNATIONAL CONFERENCE OF YOUNG SCIENTISTS AND STUDENTS “TOPICAL PROBLEMS OF MECHANICAL ENGINEERING” TOPME 2021: Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IMASH RAN). – 2023. – 2697(1):030002. (**Scopus**) **Труды конференции**

7. **Форенталь Г.А.**, Безмельницын А.В., Игнатова А.В., Никонов А.В., Сапожников С.Б. Экспериментальное исследование влияния фелтинга на расслоение и остаточную прочность ПКМ при низкоскоростном ударе // В сборнике: XXXIII Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения (МИКМУС - 2021): труды конференции. – Москва, 2021. – С. 195-200. **Статья РИНЦ**
8. **Форенталь Г.А.**, Бушлаева О.С., Сапожников С.Б. Трехмерное армирование полимерных тканевых композитов с помощью фелтинга для управления межслойной трещиностойкостью // Сборник тезисов докладов в книге: II-я Международная конференция «Композитные материалы и конструкции». – Москва, 2021. – С. 57-58. **РИНЦ**
9. Сапожников С.Б., **Форенталь Г.А.** Перспективы технологии фелтинга для локального трёхмерного армирования полимерных тканевых композитов // Сборник тезисов докладов XIII всероссийского съезд по теоретической и прикладной механике: сб. тезисов докладов. В 4-х томах. – Санкт-Петербург, 2023. – С-Пб, Изд-во: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. – С. 257-259. **РИНЦ**
10. **Форенталь, Г.А.** Расчет напряжённого состояния у вершины трещины полимерных тканевых композитов с помощью локального трёхмерного армирования (фелтинга) / Форенталь Г. А., Сапожников С. Б. // XVIII Международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций»: сб. материалов. – Екатеринбург, 2024 г. – С. 91.
11. **Форенталь Г.А.**, Сапожников С.Б.. Трёхмерное армирование слоистых тканевых композитов с помощью фелтинга // Тезисы докладов конференции «Механика деформируемого твердого тела в проектировании материалов и конструкций», Пермь, 2024 г. – С. 45-46.