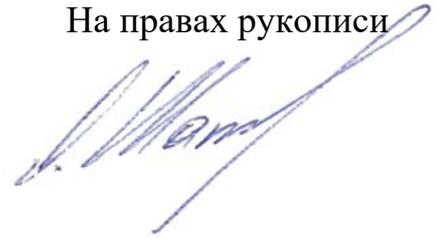


На правах рукописи



ШАТАЛИН АЛЕКСАНДР АНДРЕЕВИЧ

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА И ЧИСЛЕННОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕЖСЛОЕВОЙ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ
ТОНКОСЛОЙНЫХ СЛОИСТЫХ СТЕКЛО- И УГЛЕКОМПОЗИТОВ ИЗ
ВАКУУМ-ФОРМУЕМЫХ КЛЕЕВЫХ ПРЕПРЕГОВ ПРИ
ИНДИВИДУАЛЬНОМ И КОМБИНИРОВАННОМ РАСТЯЖЕНИИ И
СДВИГЕ**

Специальность 2.6.17. Материаловедение (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва 2024

Работа выполнена на кафедре 1103 «Технология композиционных материалов, конструкций и микросистем» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: – доктор технических наук, профессор
Бабаевский Петр Гордеевич

Официальные оппоненты: – **Кондрашов Станислав Владимирович**,
доктор технических наук,
ФГБОУ ВО «Московский государственный
технический университет им. Н.Э. Баумана,
ведущий научный сотрудник

– **Солодилов Виталий Игоревич**,
кандидат технических наук,
ФГБУН Федеральный исследовательский центр
химической физики им. Н.Н. Семенова Российской
академии наук, старший научный сотрудник

Ведущее предприятие: – АО «Обнинское научно-производственное
предприятие «Технология» имени А.Г. Ромашина»

Защита диссертации состоится 19 декабря 2024 года в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 24.2.327.04 (Д 121.125.15) в ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: г. Москва, ул. Оршанская, 3, ауд. 307Б. Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, А-80, ГСП-3, МАИ, ученому секретарю диссертационного совета Скворцовой Светлане Владимировне и по электронной почте skvortsovasv@mai.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Университета

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета



Скворцова С.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В настоящее время слоистые стекло- и углекомпози́ты из вакуум-формуемых клеевых препрегов находят широкое применение в инновационных отраслях промышленности, особенно таких как аэрокосмическая, роботостроение, медицинская, оборонная и т. д. Они легкие и обладают высокими показателями удельной жесткости, прочности и усталостной прочности по сравнению с традиционными конструкционными материалами. Несмотря на свои уникальные характеристики, в процессе эксплуатации композиционные материалы могут подвергаться значительным повреждениям, таким как трещины в матрице, обрывы волокон или расслоение. Эти повреждения приводят к значительному снижению их прочностных характеристик, что может привести к катастрофическому разрушению конструкции.

Важной задачей обеспечения надежной эксплуатации изделий из слоистых композитов является предотвращение возникновения и распространения межслоевых трещин. Расслоение в результате роста таких трещин является наиболее опасным видом разрушения слоистых композитов, возникающим при действии растягивающих и сдвиговых нагрузок. На практике индивидуально эти нагрузки воздействуют на материал конструкции крайне редко, и в основном они действуют совместно в комбинированном (смешанном) режиме. Поэтому при проектировании и расчете на прочность и несущую способность конструкций из слоистых полимерных композиционных материалов (ПКМ) важнейшее значение имеют знания закономерностей инициирования и роста межслоевых трещин и параметров межслоевой трещиностойкости при комбинированных режимах нагружения и возможностей их использования в расчетных методах.

Цель работы

Целью диссертационной работы является научно-методическое обоснование подходов к оценке и определению параметров межслоевой трещиностойкости слоистых стекло- и углекомпози́тов из вакуум-формуемых клеевых препрегов при индивидуальном и комбинированном растяжении и сдвиге экспериментальными и численными методами.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи:

1. Обобщить информацию о компонентном составе, технологии формования и свойствах непрерывно армированных слоистых стекло- и углекомполитов из клеевых препрегов (СК и УК), используемых в авиационной и ракетной технике, аналитических, экспериментальных и численных подходах и методах оценки межслоевой трещиностойкости слоистых ПКМ в рамках линейной упругой механики разрушения (ЛУМР) при индивидуальном и комбинированном нагружении по модам I и II.

2. Экспериментально определить структурные характеристики пластин слоистых СК и УК, отформованных вакуумным методом из клеевых препрегов КМКС и КМКУ, и параметры (критерии) их межслоевой трещиностойкости с использованием стандартных образцов типа ДКБ (DCB) и БКН (ENF), нагружаемых по индивидуальным модам I и II (растяжение и сдвиг при изгибе), и нестандартных образцов типа УПБ (SLB) и НПБ (OLB), нагружаемых при изгибе с комбинированной (смешанной) моде нагрузки на трещину I/II.

3. Разработать методики и экспериментально определить локальную межслоевую прочность и деформативность слоистых СК и УК при растяжении и сдвиге.

4. Разработать в программном комплексе ANSYS конечно-элементные численные модели критического расслоения образцов слоистых СК и УК типа ДКБ и БКН с использованием метода когезионной зоны (МКЗ) и образцов типа УПБ и НПБ с использованием метода виртуального закрытия трещины (МВЗТ).

5. Определить с помощью разработанных моделей простых образцов слоистых ПКМ и с использованием полученных экспериментально параметров межслоевой локальной прочности зависимости нагрузки на образцы от их деформаций и рассчитать значения критической интенсивности высвобождения упругой энергии при индивидуальной и комбинированной нагрузке на трещину (G_{IC} , G_{IIC} и G_C) по максимальной (критической) нагрузке на образцы, инициирующей рост заданной трещины или дефекта.

6. Установить влияние размеров конечно-элементной сетки и, соответственно, числа интерфейсных (в МКЗ) и твердотельных (в МВЗТ) элементов по длине (траектории роста) трещины на точность численного предсказания начала расслоения с целью минимизации объема вычислений при обеспечении их достаточной точности. Проверить адекватность моделей путем сравнения результатов компьютерного моделирования с экспериментальными

данными о критической межслоевой трещиностойкости исследованных армированных слоистых ПКМ.

Научная новизна

1. Впервые разработана методология оценки экспериментальными и численным методами трещиностойкости непрерывно армированных слоистых стекло- и углекомполитов из вакуум-формуемых клеевых препрегов КМКС и КМКУ в условиях нагружения по моде I, моде II и смешанной моде I/II стандартных и нестандартных образцов, основанная на использовании физической модели Баренблатта и критерия Бензегга-Кенана.

2. Впервые экспериментальными методами определены параметры когезионной зоны и константы материала в критерии Бензегга-Кенана для отформованные вакуумным методом стекло- и углекомполитов на основе клеевых препрегов КМКС и КМКУ.

3. Впервые разработана и прошла апробацию методика экспериментального определения локальной межслоевой (когезионной) прочности σ_{IIc} и деформации $\delta_{II\max}$ при сдвиге слоистых ПКМ.

4. Экспериментально выявлено влияние природы армирующего наполнителя на критическое значение интенсивности высвобождения упругой энергии при индивидуальных модах нагружения I и II. Показано, что трещиностойкость углекомполита КМКУ при нагружении по моде I в 1,38 раза больше по сравнению со стеклокомполитом КМКС, а при нагружении по моде II в 1,4 раза и составляет 655 Дж/м² и 1025 Дж/м² соответственно.

5. Впервые на основании экспериментальных исследований установлено, что константа материала η в критерии Бензегга-Кенана незначительно зависит от природы армирующего наполнителя и составляет 1,4 для стеклокомполита КМКС и 1,5 для углекомполита КМКУ.

6. Показано, что в конечно-элементной модели МВЗТ слоистых стекло-и углекомполитов при смешанной моде нагружения I/II размер твердотельных конечных элементов (КЭ), располагающихся по траектории роста трещины, влияет на точность расчета усилия возникновения и развития трещины. Установлено, что минимально допустимая длина КЭ составляет 1 мм, что обеспечивает расхождение с экспериментально полученной зависимостью нагрузка-прогиб 5% и 6% соответственно.

7. Показано, что методы когезионной зоны и виртуального закрытия трещины, имплантированные в метод конечных элементов, могут быть

применены с высокой степенью адекватности и точности для оценки межслоевой трещиностойкости и прогнозирования устойчивости к расслоениям не только простых образцов, но и более сложных конструктивно-подобных элементов.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость работы заключается в развитии трехмерных числовых моделей критического роста межслоевых трещин в слоистых армированных ПКМ при индивидуальном и комбинированном нагружении по модам I и II с учетом анизотропии материалов и с использованием экспериментально определенных локальных межслоевых деформационно-прочностных свойств. Для простых плоских образцов с краевой межслоевой трещиной и инициированием ее роста по индивидуальным и комбинированным модам I и II при растяжении и изгибе разработаны обеспечивающие достоверную оценку межслоевой трещиностойкости слоистых композиционных материалов трехмерные модели критического роста трещины, базирующиеся на методе конечных элементов с внедренными в него интерфейсными элементами когезионной зоны (метод МКЗ) и локальными узлами твердотельных элементов по траектории роста (метод МВЗТ) с экспериментально определяемыми характеристиками. Выявлены оптимальные размеры и, соответственно, количество интерфейсных и твердотельных элементов с заданными свойствами, обеспечивающие расхождение расчетных и экспериментально полученных значений не более 5% для слоистых стекло- и углекомполитов из клеевых препрегов при минимально необходимом объеме вычислений.

Полученные результаты имеют практическую значимость для использования полученных экспериментальных и расчетных данных о межслоевой трещиностойкости и локальной прочности исследованных типов слоистых армированных ПКМ и апробированных простых трехмерных моделей при разработке методов численных расчетов устойчивости к зарождению, инициированию и росту трещин на моделях более сложной геометрии при разработке, проектировании и производстве элементов конструкций авиационной техники из полимерных композиционных материалов.

Методология и методы исследований

Проведенные исследования, описанные в настоящей работе, основываются на методологии научных работ ведущих российских и зарубежных ученых и нормативных документах Российской Федерации.

Задачи, поставленные в работе, решаются с помощью современных методов исследований и испытаний, таких как: методы определения компонентного состава СК и УК, электронная сканирующая микроскопия, аналитические, экспериментальные и численные методы определения и моделирования трещиностойкости слоистых ПКМ в рамках линейной упругой механики разрушения, специально разработанные методы определения межслоевой локальной когезионной прочности.

Положения, выносимые на защиту

1. Результаты экспериментальных исследований по определению параметра межслоевой трещиностойкости – интенсивности высвобождения упругой энергии при индивидуальном нагружении по моде I (G_{IC}), а также локальной межслоевой когезионной прочности (σ_{IC}) и максимального раскрытия когезионной зоны ($\delta_{I\max}$) при одноосном растяжении для стекло- и углекомполитов из клеевых препрегов КМКС и КМКУ .

2. Результаты экспериментальных исследований по определению параметра межслоевой трещиностойкости при индивидуальном нагружении по моде II (G_{IIC}), а также локальной межслоевой когезионной прочности (σ_{IIC}) и максимального деформирования когезионной зоны ($\delta_{IIC\max}$) при простом сдвиге для стекло- и углекомполитов из клеевых препрегов КМКС и КМКУ.

3. Результаты экспериментальных исследований по определению критерия межслоевой трещиностойкости при комбинированном нагружении модам I и II $G_{I/IIC}$ для стекло- и углекомполитов из клеевых препрегов КМКС и КМКУ.

4. Построенные в программном комплексе ANSYS численные трехмерные конечно-элементные модели критического роста трещины в образцах типа:

- двухконсольной балки (ДКБ, или DCB) при нагружении трещины по моде I растяжением ее краев;

- балки с концевым надрезом (БКН, или ENF) при нагружении трещины по моде II при трехопорном изгибе образца;

- УПБ, или SLB (изгиб с укороченной полубалкой), и НПБ, или OLB (изгиб над укороченной полубалкой), при нагружении образцов при изгибе, а трещины по комбинированной (смешанной) моде I/II.

5. Полученные с помощью разработанных моделей результаты численного анализа распределения напряжений по длине моделируемой трещины, определения зависимостей нагрузки на образец от величины его деформирования и расчетов применительно к исследуемым слоистым

полимерным композиционным материалам с использованием экспериментальных данных об их локальной межслоевой прочности.

6. Результаты исследования влияния размеров интерфейсных элементов и расстояния между узлами твердотельных элементов, располагающихся по длине траектории роста трещины, на точность численного прогнозирования зарождения и развития трещины в слоистых ПКМ.

Степень достоверности результатов

Работа обеспечивается четко сформулированной целью и поставленными задачами, строгостью и последовательностью математических расчетов, применением классических и современных подходов макро- и микромеханики разрушения, применением современных измерительных приборов и использованием программного комплекса ANSYS. Все результаты получены на поверенном оборудовании с использованием лицензионного программного обеспечения. Все испытания проводились в соответствии с требованиями ГОСТ, верификация аналитических и численных методов расчета показала адекватные расхождения полученных результатов с экспериментальными данными.

Апробация результатов

Основные положения диссертационной работы докладывались на 9 конференциях, в том числе на Гагаринских чтениях (г. Москва, 2020, 2021, 2022 гг.), ежегодном международном научном симпозиуме имени А.Г. Горшкова – «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» (г. Вятчи, 2021, 2022, 2023 гг.), Международной конференции «Авиация и космонавтика» (г. Москва, 2020, 2022, 2023 гг.); Международная конференция «Композитные материалы и конструкции» (г. Москва 2021 г.).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 12 работ: из них 1 статья входит в перечень ведущих периодических изданий, рекомендуемых ВАК РФ, 1 статья в зарубежном научном издании, входящим в реферативную базу Scopus.

Личный вклад автора состоит в проведении экспериментального определения параметров межслоевой трещиностойкости и локальной прочности для двух типов композиционных материалов из вакуум-формуемых клеевых препрегов марок КМКС и КМКУ при индивидуальном и комбинированном растяжении и сдвиге, их анализе и обобщении, разработке конечно-элементных моделей критического роста трещины в исследуемых ПКМ при индивидуальном

и комбинированном растяжении и сдвиге, подготовке основных публикаций по выполненной работе.

Объем диссертации и ее структура

Диссертация изложена на 141 страницах машинописного текста, содержит 80 рисунков и 15 таблиц. Работа состоит из введения, 4 глав, общих выводов и списка литературы из 93 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава I Состояние вопроса (степень проработанности проблемы)

Представленный в главе анализ типов слоистых стекло- и углекомполитов на основе клеевых препрегов, используемых в современном авиастроении, их достоинств и недостатков показал, что широкие возможности выбора оптимального сочетания их компонентов, структур и соответствующих методов переработки позволяют максимально реализовать свойства комполитов в конструкциях. Наличие дефектов в полимерной матрице и на границах раздела фаз значительно снижает межфазные характеристики комполитов под нагрузкой, что требует использования надежных методов оценки устойчивости комполитов к росту трещин. Методы ЛУМР лежат в основе аналитических расчетов и экспериментальных методов определения параметров межслоевой трещиностойкости слоистых ПКМ с использованием простых конфигураций образцов с краевой трещиной (надрезом), в частности, энергетических параметров G_{IC} (интенсивности высвобождения упругой энергии) при нормальном отрыве противоположных поверхностей трещины (по моде I) образцов в виде двойной консольной балки, G_{IIC} при межслоевом сдвиге (по моде II) при изгибе и G_{IIIC} при комбинированном нагружении (моде I/II) с изгибом образцов, обеспечивающим одновременный сдвиг и раскрытие трещины. С другой стороны, наибольшее развитие к настоящему времени получили два основных численных метода оценки трещиноподвижных сил и трещиностойкости, имплантированные в метод конечных элементов – метод виртуального закрытия трещины и метод когезионной зоны. В различных зарубежных источниках приводятся данные об экспериментальных методиках и результатах экспериментальной и численной оценки межслоевой трещиностойкости и локальной прочности слоистых ПКМ, однако для отечественных конструкционных комполитов марок КМКС и КМКУ систематические исследования в этой области не проводились и данные о

применимости методик для экспериментальной и численной оценки трещиностойкости этих материалов при индивидуальных и комбинированной модах нагружения отсутствуют.

На основании вышеизложенного была поставлена цель работы и сформулированы задачи исследований.

Глава II Объекты и методы исследования трещиностойкости и локальной межслоевой прочности

В работе исследовались 2 типа слоистых ПКМ:

Однонаправленный углекомпозит, получаемый методом вакуумного формования клеевого препрега марки КМКУ-2м.120 на основе углеродной ленты марки ЭЛУР-П-А из углеродных волокон на основе полиакрилонитриловой нити, полученной по специальной технологии, и эпоксидного клеевого связующего ВСК-14-2м. Содержание связующего в препреге КМКУ-2м.120 38-45% (по массе). Толщина слоя препрега – 0,14 мм.

Ортотропный стеклокомпозит, получаемый методом вакуумного формования клеевого препрега марки КМКС-2м.120 на основе стеклоткани марки Т-10-80 и эпоксидного клеевого связующего ВСК-14-2м. Содержание связующих в препреге КМКС-2м.120 35-37% (по массе). Толщина слоя препрега – 0,10 мм.

Пластины из СК и УК размерами 500х500 мм толщиной 4 и 5,6 мм, соответственно, из 40 слоев препрега изготавливали методом вакуумного формования препрегов.

Из рулона препрегов КМКУ-2м.120 и КМКС-2м.120 вырезались полосы материала с припуском 20 мм и выкладывались друг на друга для получения многослойной заготовки с укладкой слоев препрегов с продольной ориентацией волокон в углеродной ленте и вдоль основы стеклянной ленты соответственно. Каждый слой прикатывался валиком. Каждая заготовка включает в себя 20 слоев препрега.

Для получения предварительно заданных трещин для экспериментальной оценки параметров межслоевой трещиностойкости и локальных межслоевых контактов, имитирующих когезионную зону для оценки межслоевой прочности, в середине пластин (между двумя заготовками по 20 слоев) прокладывали фторопластовую пленку толщиной 0,01 мм. В первом случае пленку закладывали между слоями по всему краю пакета в виде сплошной полосы шириной 40 мм в

направлении роста трещины вдоль продольной укладки ленты препрега КМКУ и вдоль основы ткани КМКС, соответственно. Во втором случае фторопластовую пленку прокладывали по всему слою заготовки, предварительно проделав в пленке с помощью пробойников круглые отверстия диаметром 3 мм.

Внутри вакуумной печи создавался вакуум не менее $0,8 \text{ кгс/см}^2$, температура поднималась до $(125 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$ со скоростью не более $2 \text{ }^\circ\text{C/мин}$. Технологический пакет выдерживался при температуре $(125 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 60 минут. После первичной выдержки температура поднималась до $(180 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$ со скоростью не более $2 \text{ }^\circ\text{C/мин}$, вторичная выдержка при температуре $(180 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 5 часов. Охлаждение до температуры не более $40 \text{ }^\circ\text{C}$ со скоростью не более $1 \text{ }^\circ\text{C/мин}$. После охлаждения вакуумный мешок разбирался.

Для экспериментального определения критического значения интенсивности высвобождения упругой энергии G_{IC} при индивидуальной нагрузке нормальным отрывом использовали образцы типа ДКБ (DCB), представляющие собой вырезанную из отформованных пластин полосу размером 150×20 мм с заданной начальной межслоевой трещиной. К поверхности образцов со стороны, где расположена закладная пленка, приклеивали алюминиевые уголки с подслоем клея ВК-25 на клей ВК-27 для закрепления в захватах разрывной машины. Использовали стандартную методику по ГОСТ Р 56815-2015 раскрытием трещины при монотонном растяжении за ее края с заданной скоростью, фиксируя усилие растяжения P и раскрытие трещины Δ и контролируя начало роста трещины. Испытания проводили с помощью разрывной машины WDW-10E, обеспечивающей нагружение образца с заданной постоянной скоростью перемещения активного захвата (траверсы) и позволяющей проводить измерение нагрузки с точностью $\pm 1\%$ измеряемой величины. При испытании использовали автоматическую систему записи, регистрирующую зависимость раскрытия трещины от усилия растяжения.

Образцы для определения G_{IC} при индивидуальной сдвиговой нагрузке на трещину называют балкой с концевым надрезом (БКН или ENF). Они представляют собой вырезанную из отформованных пластин полосу, аналогичную образцу ДКБ размером 150×20 мм с заданной начальной межслоевой трещиной, но подвергаемую трехточечному изгибу. Испытания проводили по стандартной методике ASTM D7905M-14. Образец, свободно лежащий на двух опорах, изгибается по центру с заданной скоростью

нагрузки с фиксацией усилия P и прогиба образца Δ и контролем начала роста трещины. Для испытаний использовали разрывную машину WDW-10E с приспособлением для трех-опорного изгиба. Радиус закругления краев опор и пуансона составляет $(5,0 \pm 0,2)$ мм. Опоры закреплены неподвижно и позволяют точно центрировать образец (продольная ось образца параллельна боковой плоскости траверсы, а центр симметрии образца совпадает с осью приложения нагрузки). Отклонения от параллельности поверхностей опор и пуансона в горизонтальной плоскости составляет не более 0,005 мм по всей длине. Для измерения прогиба применялся датчик перемещения, обеспечивающий измерение деформации с точностью $\pm 1\%$ от базы датчика деформации. При испытании использовали автоматическую систему записи, регистрирующую зависимость прогиба от нагрузки или деформации изгиба (деформации растяжения на внешней поверхности образца) от напряжения изгиба.

Для экспериментального определения параметров трещиностойкости при смешанной моде нагружения $G_{I/II}$ использовали методы изгиба аналогичных ДКБ и БКН образцов, но с укороченной нижней полубалкой и приложением изгибающей нагрузки вне трещины и над трещиной (методы УПБ, или SLB и НПБ, или OLB соответственно) при заданной начальной длине трещины «а», равной 43 и 66 мм. В образцах размером 150x20 мм, вырезанных из отформованных пластин, нижняя половина укорочена (обрезана) у края трещины. Изгибающую нагрузку на образцы типа SLB прикладывали в середине образца между опорами, а на образцы типа OLB – у края с обрезанной полубалки на заданном расстоянии от опоры. Для измерения прогиба применяется датчик перемещения, обеспечивающий измерение деформации с точностью $\pm 1\%$ от базы датчика деформации. Испытания проводили при монотонном нагружении с заданной скоростью (1 мм/мин) с фиксацией прикладываемого усилия P и прогиба образца Δ и контролем начала роста трещины. Для испытаний использовали разрывную машину WDW-10E с приспособлением для трех-опорного изгиба, аналогичным испытанию по моде II, но с изменяемым положением точки приложения усилия изгиба.

Для экспериментального определения локальной межслоевой прочности при нормальном отрыве использовали образцы размером 30x25 мм, вырезанные из отформованных пластин с проложенной фторопластовой пленкой с круглым отверстием в центре, обеспечивающем образование локального межслоевого контакта в слоистом ПКМ. На образцы с двух сторон для закрепления в узле

разрывной машины наклеены Т-образные алюминиевые профили с помощью подслоя клея ВК-25 и клея ВК-27. Образцы испытывали на растяжение до разрушения при скорости движения траверсы разрывной машины 1 мм/мин, записывая усилие F с помощью динамометра, а абсолютную деформацию (смещение когезионной зоны) Δh – с помощью датчика LVDP.

Для экспериментального определения локальной межслоевой прочности при сдвиге разработали собственную методику с использованием образцов с размерами 150x20 мм, вырезанные из отформованных пластин с проложенной фторопластовой пленкой с круглым отверстием в центре диаметром 3 мм, обеспечивающем образование локального межслоевого контакта пластин с модельной когезионной зоной между средними слоями образцов. Для испытания на сдвиг внахлест в образцах с противоположных сторон сделаны два надреза алмазным кругом на расстоянии «s» строго до фторопластовой пленки на глубину полуслоев.

Численное моделирование процессов расслоения по индивидуальным модам I и II образцов типа ДКБ и БКН и расчет параметров трещиностойкости слоистых ПКМ осуществляли с помощью, имплантированной в метод конечных элементов модели когезионной зоны (МКЗ) на основе твердотельной геометрической модели. Геометрическая модель строится в препроцессоре программного комплекса ANSYS с помощью инструментов создания твердотельных геометрических объектов. Для решения задач расслоения при растяжении и сдвиге применительно к межслоевому росту трещины в слоистых ПКМ использовали специальные интерфейсные когезионные элементы INTER202-205, которые располагаются между слоями твердотельной модели в плоскости роста трещины. Для расчета использовались экспериментально определенные параметры ЗКЗ для каждого типа ПКМ. Заключительным этапом создания конечно-элементной модели является задание параметров расчета: количество шагов моделирования, частота сохранения результатов и варианты анализа.

После введения всех необходимых параметров запускается процесс расчета модели расслоением при растяжении и сдвиге когезионного слоя. Объем расчетов и скорость моделирования зависят от количества твердотельных КЭ и ИЭ, заложенных в модель. Соответственно, чем большее количество элементов используется в модели, тем точнее результаты и больше время счета. Поэтому

необходимо найти оптимальное количество элементов в модели, достаточное для адекватного результата.

После завершения моделирования виртуального расслоения и сдвига в постпроцессоре программного комплекса анализируются результаты вычислений.

Различие в численном моделировании процессов расслоения и сдвига по индивидуальным модам I и II отличается заданием граничных условий и приложением нагрузки.

Для численного моделирования процесса расслоения при комбинированном нагружении по модам I/II образцов типа УПБ (SLB) и НПБ (OLB) и расчета параметров трещиностойкости слоистых ПКМ с помощью имплантированной в метод конечных элементов модели виртуального закрытия трещины MB3T или VCCT, использовали геометрическую модель подобную экспериментальному образцу. Создание геометрической модели осуществлялось в препроцессоре программного комплекса ANSYS с помощью инструментов геометрического моделирования.

В отличие от моделей МКЗ с индивидуальными модами нагружения в данном случае используется только один твердотельный Solid185 элемент из библиотеки элементов. В модели виртуального закрытия трещины скалярные параметры относятся не к отдельной когезионной зоне, как в МКЗ, а к основному материалу и включают в себя показатели его TC по моде I (G_{IC}) II (G_{IIC}) и материальную константу в уравнении критерия разрушения. В ANSYS доступны несколько критериев разрушения, в том числе критерий Бензег-Кеннана (Б-К). Материальной константой в этом критерии служит показатель степени в уравнении Б-К η .

После завершения моделирования виртуального расслоения образца в постпроцессоре программного комплекса анализируются результаты вычислений.

Глава III Экспериментальное определение трещиностойкости и локальной межслоевой прочности УК и СК из клеевых препрегов при индивидуальном и комбинированном нагружении

Глава посвящена анализу результатов систематических экспериментальных исследований межслоевой трещиностойкости и локальной прочности тонколистовых пластин слоистых УК и СК, полученных методом

вакуумного формования из клеевых препрегов КМКУ и КМКС на основе связующего ВСК-14-2м, однонаправленной углеродной ленты и стеклянной ткани полотняного плетения соответственно при индивидуальном и комбинированном растяжении (нормальном отрыве) и сдвиге.

Образцы для испытаний при нагружении по моде I размером 150×20 мм и толщиной 5,6 мм в случае КМКУ и 4 мм в случае КМКС вырезали из полученных пластин. Краевая трещина задавалась заложённой фторопластовой пленкой. К поверхности образцов со стороны, где расположена закладная пленка, приклеивали алюминиевые уголки для закрепления в захватах разрывной машины, свободная часть образца оставалась в свободном состоянии.

В таблице 1 представлены результаты испытаний по определению параметра трещиностойкости при нагружении по моде I для обоих типов ПКМ.

Таблица 1 – Экспериментально полученные значения параметра трещиностойкости G_{IC} для каждого типа ПКМ при нагружении по индивидуальной моде I.

Характеристика	КМКС	КМКУ
G_{IC} , Дж/м ²	468±6%	655±7%

Для экспериментального определения локальной межслоевой прочности при нормальном отрыве слоистых ПКМ (σ_{IC}) использовали образцы размером 30×25 мм и толщиной 5,6 мм в случае КМКУ и 4 мм в случае КМКС, вырезанные из пластин с модельной когезионной зоной диаметром 3 мм между средними слоями образцов. К внешним поверхностям образцов с помощью клея ВК-27 приклеивались алюминиевые накладки для крепления в зажимах разрывной машины, и образцы испытывались на прочность при растяжении.

В таблице 2 приведены результаты испытаний при локальном межслоевом разрушении (максимальное напряжение σ_{IC} , деформация при максимальной нагрузке δ_{IC} , максимальное раскрытие δ_{max} для обоих типов ПКМ.

Таблица 2 – Экспериментально полученные значения локальной межслоевой прочности для каждого типа ПКМ при нагружении по моде I.

Характеристика	КМКС	КМКУ
σ_{IC} , МПа	13,5±4%	17,4±5%
δ_{IC} , мкм	12,4±3%	13,4±6%
$\delta_{I_{max}}$, мкм	34,7±5%	37,6±4%

Образцы для испытаний при нагружении по моде II размером 150×20 мм и толщиной 5,6 мм в случае КМКУ и 4 мм в случае КМКС вырезали из полученных пластин. Краевая трещина задавалась заложённой фторопластовой пленкой.

В таблице 3 представлены результаты испытаний по определению параметра интенсивности высвобождения упругой энергии при росте трещины по индивидуальной моде II для обоих типов ПКМ.

Таблица 3 – Экспериментально полученные значения параметра трещиностойкости G_{IIc} для каждого типа ПКМ при нагружении по моде II.

Характеристика	КМКС	КМКУ
G_{IIc} , Дж/м ²	732±6%	1025±7%

Для экспериментального определения локальной межслоевой когезионной прочности при нормальном сдвиге слоистых ПКМ (σ_{IIc}) использовали образцы размером 150×20 мм и толщиной 5,6 мм в случае КМКУ и 4 мм в случае КМКС, вырезанные из пластин с модельной когезионной зоной диаметром 3 мм между средними слоями образцов.

В таблице 4 приведены результаты испытаний при локальном межслоевом разрушении (максимальные напряжение σ_{IIc} , деформация при максимальной нагрузке δ_{IIc} , максимальное раскрытие $\delta_{II\max}$ для обоих типов ПКМ.

Таблица 4 – Экспериментально полученные значения локальной межслоевой прочности для каждого типа ПКМ при нагружении по моде II.

Характеристика	КМКС	КМКУ
σ_{IIc} , МПа	17,3±4%	22,8±5%
δ_{IIc} , мкм	15,1±3%	16,1±6%
$\delta_{II\max}$, мкм	42,3±5%	45±4%

Для экспериментального определения трещиноводвижущих сил при комбинированном нагружении (G_I и G_{II}) использовали нестандартные методы испытаний образцов типа УПБ (SLB) и НПБ (OLB), вырезанных из отформованных пластин на основе препрегов КМКС и КМКУ.

В таблице 5 обобщены экспериментально определенные значения предельных нагрузок на образцы $P_{кр}$, при которых начинается рост трещин с заданной длиной a , и рассчитанные по этим данным критические значения интенсивностей высвобождения упругой энергии по модам нагружения I и II в

общую нагрузку на трещину ($G^{крТ}$), а также доли вклада в эти параметры сдвиговой моды II (β).

Таблица 5 – Предельная нагрузка $P_{кр}$, критические значения интенсивностей высвобождения упругой энергии по модам нагружения I и II, общая критическая нагрузка на трещину $G^{крТ} = G^{крI} + G^{крII}$ и доли вклада в эти параметры сдвиговой моды II ($\beta = G^{крII} / G^{крТ}$) для различных типов образцов СК и УК при заданных длинах начальной трещины.

Материал	Тип образца	Длина начальной трещины а, м	Предельная нагрузка $P_{кр}$, Н	Критические значения $G^{кр}$, Дж/м ² (в скобках коэффициент вариации, %)			Доля вклада моды II (β)
				$G^{крI}$	$G^{крII}$	$G^{крТ}$	
СК	УПБ	0,043	113,5±5,7	317,3(5)	214,9(5)	532,2(5)	0,39
		0,066	75,5±3,8	316,6(5)	221,9(5)	538,5(5)	0,41
	НПБ	0,043	171,5±8,6	259,9(7)	311,5(7)	571,4 (7)	0,54
		0,066	218,5±10,1	263,7(7)	312,5(7)	576,2(7)	0,56
	ДКБ	0,045	28,0±1,4	468,0(6)	-	-	0
	БКН	0,045	149,0±7,5	-	732,0(6)	-	1
УК	УПБ	0,043	243,0±12,2	462,3(6)	287,8(6)	750,1(6)	0,38
		0,066	163,5±8,2	456,0(6)	301,8(6)	757,8(6)	0,4
	НПБ	0,043	376±18,8	373,8(8)	431,6(8)	804,4(8)	0,54
		0,066	480,5±24,0	386,1(8)	436,8(8)	822,9(8)	0,53
	ДКБ	0,045	38,0±1,9	655,0(7)	-	-	0
	БКН	0,045	209,0±10,5		1025(7)		1

Для образцов типа ДКБ и БКН, в которых реализуются индивидуальные моды нагружения трещины при растяжении и сдвиге, значения $G^{крI}$ и $G^{крII}$ непосредственно равны критериям роста трещин G_{IC} и G_{IIC} при доле моды II, равной 0 и 1 соответственно, а для образцов типа УПБ и НПБ такой критерий (G_C) при различной заданной длине трещины в зависимости от вклада моды II рассчитывали по критериальным уравнениям Бензегга-Кенана (Б-К): $G_{крТ} = G_C = G_{IC} + (G_{IIC} - G_{IC})\beta^\eta$, где $\beta = \frac{G^{крII}}{G^{крТ}}$. При этом показатель степени при доле моды II, являющийся материальной константой (η), определяли аппроксимацией уравнения по экспериментальным данным о $G^{крТ}$, обобщенным в таблице 5. Аппроксимированные графические зависимости критических значений интенсивности высвобождения упругой энергии (критерия межслоевого роста

трещины G_C) от соотношений мод I/II при комбинированном нагружении для образцов СК и УК представлены на рисунке 1 (а, б).

Полученные значения η равны 1,4 для СК и 1,5 для УК.

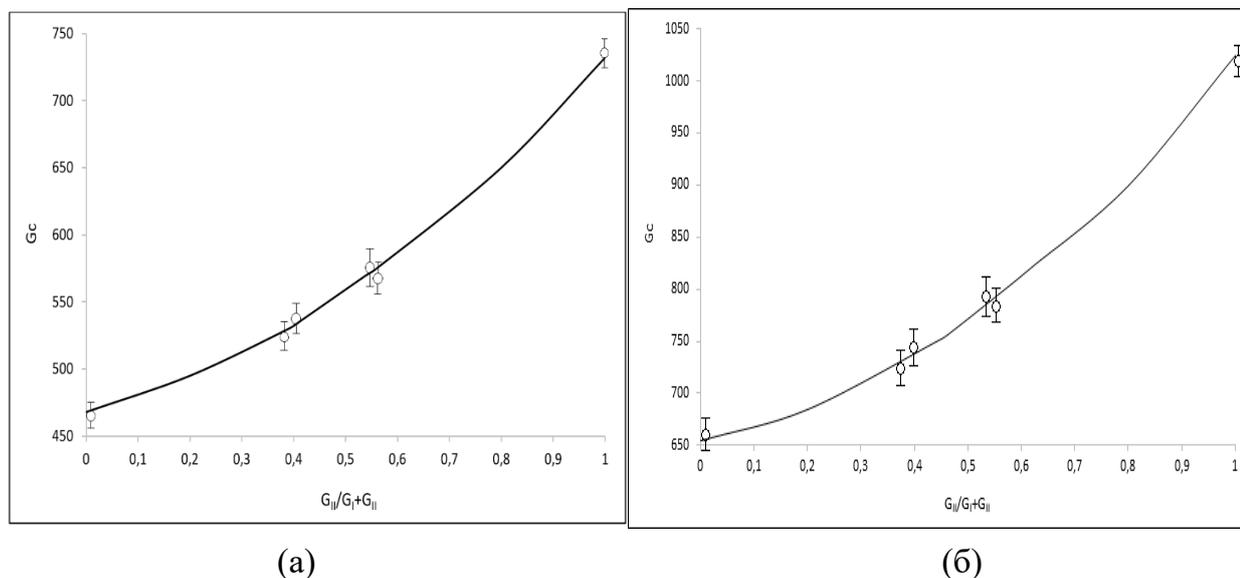


Рисунок 1 – Обобщенные зависимости критического значения интенсивности высвобождения упругой энергии G_C от вклада моды II при комбинированном нагружении для СК (а) и для УК (б).

Глава IV Численная оценка трещиностойкости слоистых стекло- и углекомполитов с использованием экспериментально определенных параметров при индивидуальном и комбинированном нагружении

Четвертая глава посвящена численной оценке трещиностойкости двух типов ПКМ при индивидуальном и комбинированном нагружении.

На рис. 2 приведены рассчитанные при различной длине ИЭ и экспериментально полученные при испытаниях образцов УК на глобальную трещиностойкость графические зависимости нагрузки на края трещины от величины раскрытия или смещения ее краев при моде I и II соответственно, пиковые значения которых характеризуют устойчивость образцов к инициированию и росту трещины.

Близость расчетных кривых к экспериментально определенным также служит характеристикой точности расчетов.

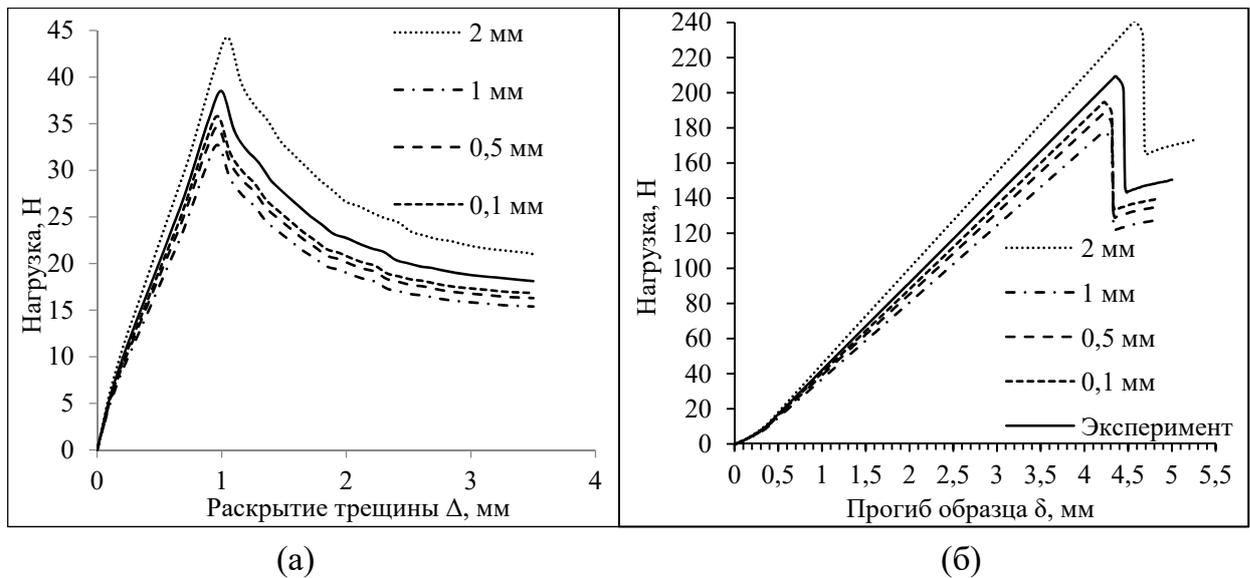


Рисунок 2 – Расчетные (при различной длине ИЭ) и экспериментально полученные зависимости нагрузки от раскрытия краев трещины для образцов УК типа ДКБ (а) и БКН (б).

Для используемой конечно-элементной модели критического разрушения при комбинированном нагружении по модам I/II необходимы следующие параметры: G_I , G_{II} и константа материала η .

Данные, полученные в главе 3, вводились в численные модели образцов УПБ (SLB) и НПБ (OLB) соответствующих образцам ПКМ, нагружаемым комбинированно по модам I/II. Геометрические размеры твердотельных моделей соответствуют размерам экспериментально испытываемых образцов, описанных в главе 2.

На рис. 3 приведены графики нагрузка-прогиб при различной длине твердотельных конечных элементов по траектории роста трещины, полученные численным моделированием методом МВЗТ и экспериментально определенные при испытаниях образцов СК УПБ (а) и НПБ (б) при длине начальной трещины 66 мм.

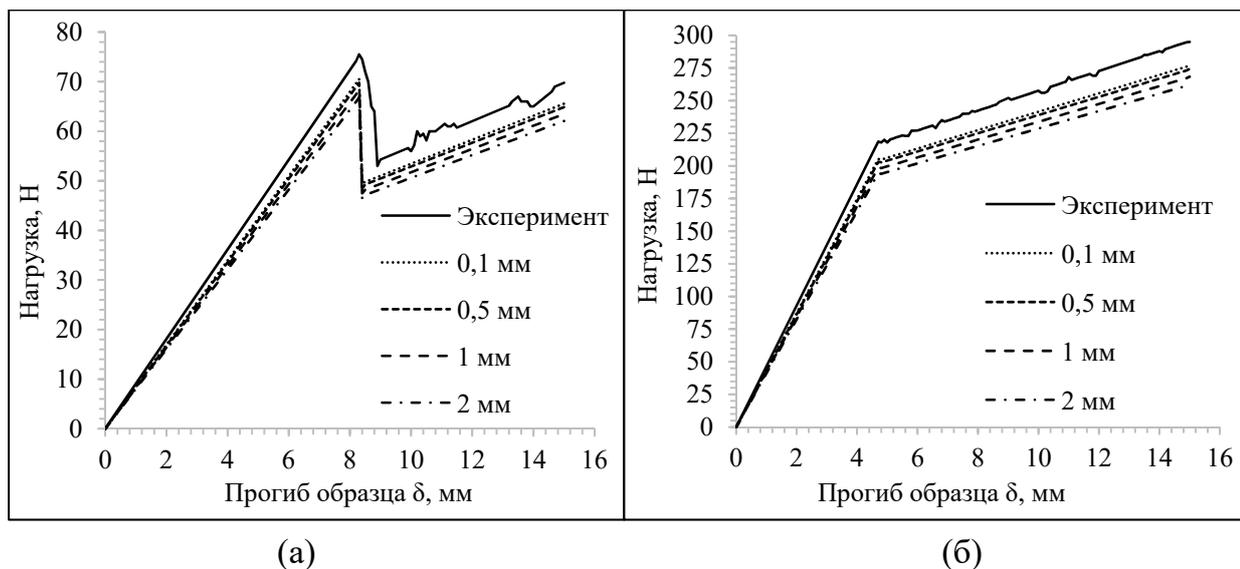


Рисунок 3 – Расчетные и экспериментально полученные графики нагрузка-прогиб для образцов СК УПБ (а) и НПБ (б) при длине начальной трещины 66 мм.

Начало роста трещины четко проявляется в изменении характера графиков: уменьшением скачком нагрузки (в случае УПБ) и уменьшением наклона графика (в случае НПБ) при заданном прогибе образца.

На рис. 4 проведено сравнение расчетных и экспериментально полученных данных о прорастании трещины в зависимости от прогиба образца после достижения критической нагрузки, что также подтверждает адекватность моделирования. Расхождение составляет для СК SLB не более 3,5% при длине начальной трещины 43 мм.

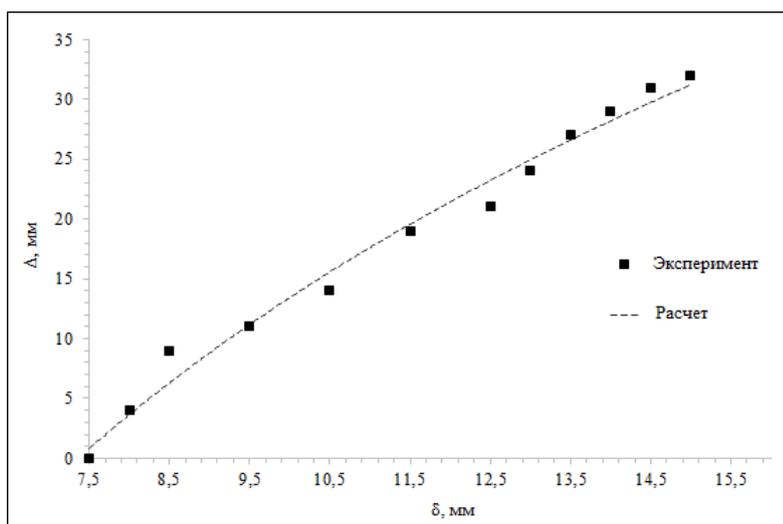


Рисунок 4 – Экспериментально и численно полученные зависимости увеличения длины трещины (δ) от прогиба (Δ) образцов СК УПБ от длины начальной трещины 43 мм.

Во всех случаях с уменьшением размера КЭ и, соответственно, с увеличением их количества точность моделирования возрастает. Так, при длине ИЭ, равной 2 мм, расхождения с экспериментальными данными составляет 15-18%. Применение твердотельных КЭ длиной 1 мм значительно снижает погрешность численных расчетов. В этом случае расхождение с экспериментально полученной зависимостью составляет 5-6,3%, что является достаточной точностью для большинства практических применений. Дальнейшее уменьшение длины КЭ снижает расхождение всего на 1-1,5%, но значительно увеличивает трудоемкость вычислений.

ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

В диссертационной работе решены задачи, связанные с экспериментальным определением и численной оценкой параметров межслоевой трещиностойкости слоистых стекло- и углекомполитов (СК и УК соответственно из вакуум-формуемых клеевых препрегов КМКС и КМКУ при индивидуальном и комбинированном растяжении и сдвиге, и получены следующие выводы:

1. Обобщены экспериментально полученные значения критической интенсивности высвобождения упругой энергии (G_{IC} , G_{IIC}), локальной когезионной прочности (σ_{IC} , σ_{IIC}) и локальной деформации ($\delta_{I\max}$, $\delta_{II\max}$) для 2-х типов армированных слоистых ПКМ (СК и УК) при индивидуальном нагружении растяжением и сдвигом.

2. Разработаны и исследованы трехмерные конечно-элементные модели критического роста трещины в образцах с межслоевыми трещинами (концевыми надрезами) тип ДКБ, БКН, УПБ и НПБ методами когезионной зоны и виртуального закрытия трещины с учетом анизотропии упругих констант и с использованием экспериментально определенных параметров локальной межслоевой прочности для 2-х типов ПКМ.

3. Установлены закономерности изменения нагрузки на края трещины от величины ее раскрытия для моделей ДКБ, изменения нагрузки от прогиба для моделей БКН, УПБ и НПБ и распределения напряжений по длине моделируемой трещины применительно к исследуемым слоистым ПКМ при длинах начальной трещины в интервале от 43 мм до 66 мм.

4. Выявлено влияние размеров конечных элементов, располагающихся по длине (траектории роста) трещин, на точность расчетов в конечно-элементных

моделях возникновения и развития трещины для слоистых стекло- и углекомполитов на основе клеевых препрегов КМКС и КМКУ.

5. Установлены оптимальные длины интерфейсных элементов для билинейного ЗКЗ в модели когезионной зоны, их количество по длине когезионной зоны, обеспечивающее низкую погрешность расчета диаграмм роста трещины в моделируемых образцах в координатах нагрузка-деформация при допустимом объеме вычислений.

6. Проведено сравнение результатов численного решения и экспериментального определения нагрузки начала расслоения для исследуемых образцов и видов нагружения. Применение КЭ длиной 1 мм и менее значительно снижает погрешность численных расчетов. При длине КЭ 1 мм диапазон расхождений с экспериментально полученной зависимостью для двух типов исследуемых образцов с различными начальными длинами трещин составляет от 5,0 до 6,3%, что является достаточной точностью для большинства практических применений. Дальнейшее уменьшение длины КЭ снижает расхождение всего на 1-1,5% при значительном увеличении трудоемкости вычислений.

7. Показано, что методы когезионной зоны и виртуального закрытия трещины, имплантированные в метод конечных элементов, апробированные на простых образцах с применением необходимых экспериментальных данных, могут быть использованы с высокой степенью адекватности и точности для оценки межслоевой трещиностойкости и прогнозирования устойчивости к расслоениям более сложных конструктивно-подобных элементов конструкций.

Список основных публикаций по теме работы в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК и Scopus

1. P. G. Babaevsky, N. V. Salienko, and A. A. Shatalin, Evaluating the local strength and crack resistance of an glass fiber epoxy composite in the interlayer tension and shear using a finite-element model and experimentally determined parameters of the cohesive zone // *Mechanics of Composite Materials*, Vol. 59, No. 4, September, 2023 pp. 713-724.

2. П. Г. Бабаевский, Н. В. Салиенко, А. А. Шаталин, Экспериментальная оценка адекватности численного моделирования межслоевой трещиностойкости слоистого стеклоэпоксикомполита при комбинированной моде нагружения I/II // *Журнал «Перспективные материалы»* 2024 № 1, г. Москва, С. 77-84.

3. П. Г. Бабаевский, Н. В. Салиенко, А. А. Шаталин, Экспериментальное и численное определение параметров межслоевой трещиностойкости слоистых стекло-эпоксикомпозитов при комбинированном нагружении // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред. Материалы XXIX Международного симпозиума им. А.Г. Горшкова. Москва, 2023. С. 28-30.

4. П. Г. Бабаевский, Н. В. Салиенко, А. А. Шаталин, Экспериментальная и численная оценка трещиностойкости слоистых полимерных композитов при нагружении индивидуальными и комбинированными модами // 22-я Международная конференция «Авиация и космонавтика». Тезисы. Москва, 2023. С. 310-311.

5. П. Г. Бабаевский, Н. В. Салиенко, А. А. Шаталин, Экспериментальное определение локальной прочности при сдвиге слоистых полимерных композиционных материалов для оптимизации численной оценки их трещиностойкости методом когезионной зоны при нагружении по моде II // II-я Международная конференция «Композитные материалы и конструкции». Тезисы. Москва, 2021. С. 93-94.

