

На правах рукописи



**НОВИКОВ ГЕННАДИЙ ВИТАЛЬЕВИЧ**

**ОЦЕНКА МЕЖСЛОЕВОЙ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ АРМИРОВАННЫХ  
СЛОИСТЫХ ПКМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ И ЧИСЛЕННЫМИ  
МЕТОДАМИ**

Специальность 2.6.17 – Материаловедение

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2021

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

Научный руководитель: – кандидат технических наук, доцент  
**Салиенко Николай Викторович**

Официальные оппоненты: – **Кондрашов Станислав Владимирович**,  
доктор технических наук,  
ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов», заместитель начальника лаборатории по науке

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

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

Защита диссертации состоится 28 декабря 2021 года в 11<sup>30</sup> 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 skvorcovasv@mai.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Университета и на сайте [https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT\\_ID=160766](https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=160766)

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного Совета



Скворцова С.В.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

Одним из важнейших путей совершенствования современной авиационной и космической техники служит обоснованное применение конструкций из слоистых полимерных композиционных материалов на основе высококачественных термореактивных и термопластичных матриц и армирующих элементов. Слоистые полимерные композиционные материалы (ПКМ) обладают очевидными преимуществами в сравнении с традиционными видами конструкционных материалов по удельному весу и, соответственно, по удельной жесткости и прочности, а также стойкости к коррозии, при возможности направленного регулирования анизотропии их структуры и свойств. Одним из основных недостатков этих материалов является низкая межслоевая прочность и трещиностойкость – потеря когезионной связи между слоями материала вследствие возникновения и развития дефектов в полимерной матрице и на границах раздела фаз (трещин, расщеплений, расслоений и отслоений в местах концентрации напряжений) при воздействии остаточных (внутренних) напряжений, внешних нагрузок и факторов окружающей среды (влаги, термоциклирования) как при производстве элементов конструкций, так и при их эксплуатации. Очевидно, что для обеспечения надежности элементов конструкций летательных аппаратов из слоистых ПКМ, с точки зрения устойчивости к росту существующих и инициированию новых межслоевых дефектов, необходимо правильно оценивать и прогнозировать показатели такой устойчивости. При сложной конфигурации конструкции и дефекта классические методы определения трещиностойкости слоистых ПКМ, не позволяют правильно оценить трещиностойкость материалов. Кроме того, невозможно определить условия зарождения и роста трещины в местах концентрации напряжений при отсутствии свободных поверхностей.

### **Цель настоящей работы**

Оценка трещиностойкости различных по природе и составу непрерывно армированных полимерных композиционных материалов с использованием имплантированного в метод конечных элементов закона когезионной зоны и определенных экспериментально его параметров.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1) Обобщить информацию о типах, составах и технологиях армированных слоистых ПКМ, используемых в авиационной и ракетной технике, их дефектности, трещиностойкости, теоретических и расчетных методах оценки и прогнозирования устойчивости к расслоению, выбрать типы ПКМ для исследований.

2) Разработать методики и экспериментально определить для 4-х типов ПКМ параметры ЗКЗ – интенсивность высвобождения упругой энергии при раскрытии трещины по моде I ( $G_{IC}$ ), равную удвоенной удельной работе разрушения когезионной зоны (КЗ), локальную межслоевую прочность ( $\sigma_{IC}$ ) и деформацию ( $\delta_{max}$ ) при отрыве, соответствующие максимальному напряжению и смещению в ЗКЗ.

3) Разработать 3D конечно-элементную модель образца в виде двухконсольной балки из слоистого ПКМ при нагружении по моде I с имплантированными моделью с билинейным и экспоненциальным законами когезионной зоны (МКЗ и ЗКЗ), а также методики расчета зависимости нагрузки на края трещины от ее раскрытия и распределения локальных напряжений по длине моделируемой когезионной зоны от ее начала при заданных параметрах ЗКЗ и различной длине конечных интерфейсных элементов.

4) Рассчитать для выбранных типов ПКМ, с помощью, разработанной 3D модели и полученных экспериментальных параметров ЗКЗ, кривые зависимости нагрузки на края трещины от ее раскрытия и значения критической интенсивности высвобождения упругой энергии ( $G_{IC}$ ) по максимальной (критической) нагрузке на нее.

5) Для каждого типа ПКМ исследовать влияние типа ЗКЗ, размеров конечно-элементной сетки и, соответственно, числа интерфейсных элементов, приходящихся на длину когезионной зоны, рассчитанной по экспериментально определенным параметрам ЗКЗ, на точность численного предсказания начала расслоения с целью минимизации объема вычислений.

6) Для проверки адекватности модели сравнить результаты компьютерного моделирования с экспериментальными данными о критической межслоевой трещиностойкости исследованных армированных слоистых ПКМ.

## Научная новизна

1. Разработан метод численной оценки трещиностойкости слоистых ПКМ в условиях нагружения по моде I образцов в виде двухконсольной балки, основанный на использовании физической модели Баренблатта.

2. Установлено, что интенсивность выделения упругой энергии  $G_{IC}$  зависит от типа матрицы и армирующего наполнителя в ПКМ. Показано, что трещиностойкость термопластичного углекомполита на основе ПЭЭК в 1,6 раза больше по сравнению с углекомполитом на основе сетчатой эпоксидной матрицы и составляет 352 Дж/м<sup>2</sup>, для ПКА, армированного непрерывными стеклянными волокнами, в 1,13 раза больше по сравнению с ПКА, армированного органическими волокнами, и составляет 324 Дж/м<sup>2</sup>.

3. Обнаружено, что природа полимерной матрицы влияет на длину когезионной зоны для углекомполитов на основе линейных и сетчатых полимеров. Установлено, что длина когезионной зоны для углепластика на основе жесткоцепного линейного ПЭЭК составляет 0,89 мм, а для сетчатого эпоксидного полимера – 3,6 мм. Показано, что нагрузка начала расслоения для линейного полимера в 4 раза больше, чем для сетчатого, и составляет 102 Н.

4. Установлено, что природа армирующего волокнистого наполнителя для стеклокомполитов и органокомполитов на поликапроамидной матрице оказывает меньшее влияние на длину когезионной зоны и трещиностойкость по сравнению с изменением природы полимерной матрицы. Показано, что длина когезионной зоны для стеклокомполита составляет 0,96 мм, а для органопластика – 1,1 мм. При этом нагрузка начала расслоения для стеклопластика всего в 1,2 раза больше, чем для органопластика, и составляет 78 Н.

5. Показано, что в конечно-элементной модели для слоистых органо-, стекло-, углекомполитов на основе терморепактивных и термопластичных матриц количество и размер интерфейсных элементов (ИЭ) с экспоненциальным ЗКЗ, располагающихся по длине когезионной зоны, влияет на точность расчета усилия возникновения и развития трещины. Установлено, что для УК-ЭАП при длине ИЭ 0,9 мм минимально

возможное их количество равно 4, для УК-ПЭЭК при длине ИЭ 0,2мм – 4,5, для СК-ПКА при длине ИЭ 0,2 мм – 5 и для ОК-ПКА при длине ИЭ 0,3 мм – 3,6.

6. Показано, что для достижения точности расчета усилия возникновения и развития трещины, соизмеримой с достижимой при применении ИЭ с экспоненциальным ЗКЗ, необходимо использовать большее количество ИЭ с билинейным ЗКЗ. Меньшее или равное их количество приводит к значительному от 6% до 10% расхождению расчётных и экспериментальных данных. Установлено, что для УК-ЭАП при длине ИЭ с билинейным ЗКЗ 0,45 мм минимально возможное их количество равно 8, для УК-ПЭЭК при длине ИЭ 0,1 мм – 8, для СК-ПКА при длине ИЭ 0,1 мм – 9 и для ОК-ПКА при длине ИЭ 0,1 мм – 11.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Разработана 3D конечно-элементная модель критического роста трещины с имплантированным законом когезионной зоны (ЗКЗ) для простого образца в виде двухконсольной балки при нагружении по моде I, позволяющая достоверно оценивать межслоевую трещиностойкость слоистых композиционных материалов. Установленное оптимальное количество интерфейсных элементов обеспечивает расхождение расчетных и экспериментально полученных значений не более 5% для слоистых органо-, стекло-, углекомполитов на основе терморреактивных и термопластичных матриц при допустимом минимальном объеме вычислений. Это дает возможность использовать апробированные в 3D модели интерфейсные элементы для точной оценки зарождения и роста трещин в конструкциях с геометрией любой сложности в научно-исследовательских институтах и конструкторских бюро при проектировании авиационной техники из новых материалов с требуемым комплексом физико-механических свойств.

### **Методология и методы исследования**

Методологической основой проведенных исследований послужили работы ведущих российских и зарубежных ученых и нормативные документы Российской Федерации.

Для решения поставленных задач применены современные методы исследований: метод конечных элементов, методы механики разрушения, метод для расчета интенсивности высвобождения упругой энергии, метод для расчета когезионной прочности, испытания на растяжение.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Результаты экспериментальных исследований по определению параметра интенсивности высвобождения упругой энергии  $G_{IC}$  и модуля упругости при одноосном растяжении для органо-, стекло-, углекомполитов на основе термореактивных и термопластичных матриц.
2. Результаты экспериментальных исследований критических параметров когезионной зоны: локальной межслоевой когезионной прочности  $\sigma_{IC}$ , максимальном раскрытии когезионной зоны  $\delta_{max}$  и рассчитанной по ним и теории Баренблатта длине когезионной зоны  $l_{кз}$  для органо-, стекло-, углекомполитов на основе термореактивных и термопластичных матриц.
3. Построенная в программном комплексе ANSYS численная 3D конечно-элементная модель критического роста трещины в двухконсольной балке, нагруженной по моде I, для вычисления закономерности изменения нагрузки на края трещины от величины её раскрытия и распределения напряжений по длине моделируемой когезионной зоны для исследуемых слоистых ПКМ
4. Результаты численного исследования влияния размеров интерфейсных элементов, расположенных по всей длине когезионной зоны, на точность численного предсказания зарождения и развития трещины в слоистых ПКМ для двух типов ЗКЗ: экспоненциального и билинейного.

### **Степень достоверности результатов**

Работа обеспечивается четко сформулированной целью и поставленными задачами, строгостью и последовательностью математических выкладок, применением классических и современных подходов макро- и микромеханики разрушения, применением современных измерительных приборов и использованием конечно-элементного 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 работы**

Основные положения диссертационной работы докладывались на 12 конференциях, в том числе на Гагаринских чтениях (г. Москва, 2016, 2017, 2018, 2019 гг.), ежегодном международном научном симпозиуме имени А.Г. Горшкова – «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» (г. Вятчи 2017, 2018, 2020 гг.), Международной конференции «Авиация и космонавтика» (г. Москва 2017 г.); Всероссийской научно-технической конференции «Аэрокосмическая техника. Высокие технологии и инновации» (г. Пермь 2017, 2018 гг.), межвузовской научной школе «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине» (г. Москва 2018, 2020 гг.) и одно выступление со стендовым докладом во ФГУП «ВИАМ» (2018 г.).

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 14 работ: из них 2 статьи входят в Перечень ведущих периодических изданий, рекомендуемых ВАК РФ, 1 статья в зарубежном научном издании, входящем в реферативную базу Scopus.

**Личный вклад** автора состоит в проведении экспериментов по определению параметров трещиностойкости и определения параметров когезионной зоны для четырех типов армированных слоистых ПКМ (углекомпозиты на основе термопластичных и термореактивных матриц, стекло- и органокомпозиты на основе термопластичных матриц), их анализе и обобщении, разработке конечно-элементной модели расслоения ДКБ с использованием экспоненциального и билинейного ЗКЗ для каждого типа ПКМ и расчётной методики оценки трещиностойкости армированных слоистых ПКМ, подготовке основных публикаций по выполненной работе.

### **Объем диссертации и ее структура**

Диссертация изложена на 127 страницах машинописного текста, содержит 47 рисунков и 20 таблиц. Работа состоит из введения, 5 глав, общих выводов и списка литературы из 72 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### Глава I Анализ современного состояния исследований элементов авиационных конструкций из слоистых полимерных композиционных материалов с межслоевыми дефектами

В главе проанализированы типы слоистых ПКМ на основе терморезистивных и термопластичных матриц используемые в современном авиационном строении, рассмотрены их достоинства и недостатки. Показана возможность выбора оптимального сочетания из разнообразия компонентов ПКМ, структур и соответствующих методов переработки, что позволяет максимально реализовать свойства композитов в конструкциях. Однако наличие дефектов в конструкциях из ПКМ приводит к снижению физико-механических характеристик и надёжности эксплуатации. Для обеспечения надёжности элементов конструкций летательных аппаратов из слоистых ПКМ с точки зрения устойчивости к росту существующих и инициированию новых межслоевых дефектов необходимо правильно оценивать и прогнозировать показатели такой устойчивости.

Показано, что одним из основных недостатков ПКМ является низкая межслоевая прочность и трещиностойкость - потеря когезионной связи между слоями материала вследствие возникновения и развития дефектов в полимерной матрице и на границах раздела фаз (трещин, расщеплений, расслоений и отслоений в местах концентрации напряжений) при воздействии остаточных (внутренних) напряжений, внешних нагрузок и факторов окружающей среды как при производстве элементов конструкций, так и при их эксплуатации.

Отмечено, что применительно к хрупким и псевдохрупким конструкционным материалам наиболее эффективным подходом к оценке их устойчивости к росту существующих дефектов (трещин) является линейная упругая механика разрушения (ЛУМР), позволяющая определять энергетические и силовые глобальные параметры нагрузки на трещину при заданном ее положении, конфигурации и типе нагружения. Критические значения этих параметров характеризуют устойчивость материала к инициированию роста трещин – его трещиностойкость. Методы ЛУМР лежат в основе аналитических расчетов и экспериментальных методов определения параметров межслоевой трещиностойкости слоистых ПКМ, в частности, энергетического параметра  $G_{Ic}$  (интенсивности высвобождения упругой энергии. При сложной конфигурации конструкции и дефекта аналитическая оценка

трещиностойкости прогнозирование условий роста трещин в рамках ЛУМР затруднена или невозможна.

Установлено, что в настоящее время разрабатываются и широко используются численные методы моделирования инициирования и роста трещин, в первую очередь, метод конечных элементов (МКЭ), как один из основных способов численного решения различных задач механики материалов и конструкций с помощью разработанных пакетов прикладных программ ANSYS® и др. Наибольшее распространение при этом получили метод виртуального закрытия трещин (VCCT), и метод декогезии, известный как модель когезионной зоны (МКЗ). Метод VCCT позволяет оценивать условия начала роста существующей трещины при сложно-напряженном состоянии после достижения критического значения обобщенного критерия.

С точки зрения оценки межслоевой трещиностойкости таких материалов как слоистые ПКМ на основе терморезистивных или термопластичных жёстких полимерных матриц, установлено, что более простым и эффективным является МКЗ, в котором в МКЭ имплантированы разработанные в рамках ЛУМР физические (микромеханические) модели, аналитически описывающие необратимые процессы упруго-пластического деформирования (в модели Дагдейла) и хрупкого или псевдохрупкого предразрушения (в модели Баренблатта) в локальной зоне впереди кончика трещины, развитие которых предшествует началу роста трещины и исключает сингулярность напряжения в ее вершине.

На основе анализа литературных данных была поставлена цель работы и сформулированы задачи исследований.

## **Глава II Объекты и методы исследования**

В работе использовались 4 типа слоистых ПКМ:

- Два типа углекомполитов (УК): углекомполит на основе эпоксидного связующего (УК-ЭАП), получаемый прессованием препрега на основе углеродной ткани УРАЛ Т-1-22А саржевого переплетения из углеродных волокон на основе вискозной технической нити, полученные по специальной технологии, и эпокси-аминной матрицы, представляющей собой модельный эпокси-аминный полимер на основе эпоксидной смолы ЭД-20, отвержденной ароматическим диамином –

диаминодифенилметаном в эквимольном соотношении (28 м.ч отвердителя на 100 м.ч. смолы) и углекомпозит на основе связующего из полиэфирэфиркетона (УК-ПЭЭК), получаемый прессованием сухого препрега, пропитанного полиэфирэфиркетаном Tenax®-E TRCL РЕЕК-НТА40 с содержанием углеродных волокон Tenax®-E НТА40 ЗК (60 об.%), один стеклокомпозит (СК-ПКА) и один органокомпозит (ОП-ПКА), получаемые по волоконной технологии прессованием тканых полуфабрикатов полотняного переплетения ТОПАС-1 и ТОПАСВМ-7, соответственно, на основе армирующих стеклонитей из высокомодульных стекловолокон ВМС и органических нитей из высокомодульных органических волокон марки Терлон и матричных поликапроамидных (ПКА) нитей с соотношением 65/35 об.%.

Пластины для получения образцов для экспериментальных исследований всех 4-х типов ПКМ размером 260×180×4мм и 80×50×4мм получали прессованием в закрытых пресс-формах пакетов-заготовок из 10 слоёв термореактивного препрега УК-ЭАП, 14 слоев термопластичного препрега УК-ПЭЭК и из 20 слоев тканых полуфабрикатов СК и ОК на основе термопластичных матричных волокон (СК-ПКА и ОК-ПКА).

В пластины большего размера, предназначенные для изготовления образцов типа ДКБ с заданной краевой трещиной для определения межслоевой трещиностойкости ПКМ, в торцевой части закладывали фторопластовую пленку шириной 50 мм и толщиной 10 мкм. Для этого в пакеты-заготовки с торцевой стороны между средними слоями прокладывали пленку: для УК-ЭАП – между 5- и 6-м слоями, для УК-ПЭЭК - между 7-м и 8-м слоями, а для СК-ПКА и ОК-ПКА – между 10-м и 11-м слоями).

Перед прессованием пластин меньшего размера, предназначенных для изготовления образцов для определения локальной межслоевой когезионной прочности армированных слоистых ПКМ, в пакеты-заготовки между средними слоями прокладывали фторопластовую пленку толщиной 10 мкм с вырезанным в центре квадратом размером 10x10 мм. В отпрессованных пластинах квадратный вырез в центре имитирует локальную межслоевую когезионную зону.

Пакеты-заготовки для пластин обоих размеров прессовали по выбранным режимам для каждого типа слоистого ПКМ. Пластины ПКМ на основе терморезактивной матрицы (УК-ЭАП) прессовали с выдержкой под давлением 0,8 МПа при температуре 100°С и 160°С в течение 2-х часов при каждой температуре. Пластины ПКМ на основе термопластичных матриц (УК-ПЭЭК, СК-ПКА и ОК-ПКА) прессовали с выдержкой под давлением 2,5 МПа при температуре 390°С (УК-ПЭЭК) и 240°С (СК-ПКА и ОК-ПКА) в течение 5 минут. После завершения режима прессования пластины охлаждали под давлением до комнатной температуры.

Для получения экспериментальных данных в работе проведены три вида испытаний четырех типов ПКМ: для определения модуля упругости при одноосном растяжении, интенсивности высвобождения упругой энергии при нагружении по моде I и локальной межслоевой когезионной прочности при разрыве.

Для определения модуля упругости исследуемых ПКМ проводились испытания на одноосное растяжение по ГОСТ 25.601-80 на образцах в виде полос. С помощью разрывной машины WDW-10E для определения модуля упругости при постоянной скорости движения траверсы 5 мм/с образцы нагружали, записывая диаграмму усилие-перемещение. Модули упругости определялись по тангенсу угла наклона начального участка кривой на диаграмме разрушения.

Для определения интенсивности высвобождения упругой энергии по моде нагружения I межслоевой трещины в слоистых армированных ПКМ использовали образцы в виде двухконсольной балки (ДКБ), в соответствии с ASTM D5528-2007.

Локальную межслоевую когезионную прочность определяли по нестандартной методике. Образцы представляют собой пластины размерами 70×40×4 мм с модельной когезионной зоной в центре пластины. К внешним поверхностям образцов с помощью клея ВК-9 приклеивались алюминиевые накладки для крепления в зажимах разрывной машины, и образцы испытывались на прочность при растяжении. Испытания на разрыв проводились при скорости движения траверсы разрывной машины 1 мм/с, записывая усилие с помощью динамометра, а абсолютную деформацию - с помощью датчика LVDP.

### **Глава III Методика создания конечно-элементной модели процесса расслоения по моде I образцов типа ДКБ**

В данной главе описана методика создания конечно-элементной модели ДКБ и описаны основные элементы, применяемые при моделировании процесса расслоения.

Для численного моделирование процесса расслоения по моде I образца типа ДКБ и расчета параметров трещиностойкости слоистых ПКМ с помощью, импантированной в метод конечных элементов (МКЭ) модели когезионной зоны (МКЗ) использовали создаваемую в пакете прикладных программ ANSYS® 3D геометрическую модель образца. 3D модель разбивается на конечные элементы: Из предложенных в пакете прикладных программ ANSYS® типов конечных элементов в модели использовались Solid 185 и Inter 205.

С помощью командной строки программы ANSYS между верхней и нижней частями геометрической модели вводится когезионный слой. Для проведения моделирования процесса расслоения образца в виде ДКБ и расчетов параметров трещиностойкости в 3D модель с когезионным слоем вводится экспоненциальная или билинейная форма ЗКЗ, и с помощью командной строки программы задаются экспериментально определенные упругие характеристики материала в различных направлениях по плоскостям и параметры ЗКЗ (значения когезионной прочности, локальной деформации и рассчитанное значение длины когезионной зоны).

В процессе моделирования виртуального расслоения образца в постпроцессоре программного комплекса анализируются результаты вычислений. При выбранном размере (длине) и, соответственно, количестве конечных интерфейсных элементов, которые располагаются впереди фронта трещины или в зоне концентрации напряжений, строится расчётная кривая в координатах усилие-раскрытие трещины (P-Δ).

Выбор длины и количества конечных когезионных интерфейсных элементов является важным фактором, определяющим эффективность и адекватность моделирования возникновения и роста трещины, т.е. достаточную точность расчетов при минимальном объеме вычислений. Для получения достоверных численных результатов в методе МКЭ/МКЗ сетка конечных когезионных или интерфейсных элементов (ИЭ) должна быть достаточно мелкой, чтобы по длине КС располагались минимальное число конечных ИЭ. С другой стороны, особенно в случае конструкций

больших размеров, мелкая сетка приводит к резкому увеличению объема вычислений и, соответственно, требуемых вычислительных мощностей.

#### Глава IV Экспериментальное определение свойств слоистых ПКМ

В главе 4 представлены полученные экспериментальные результаты для 4-х типов образцов. Образцы для испытаний на интенсивность высвобождения упругой энергии вырезали из полученных пластин размером  $200 \times 180 \times 4$  мм. Краевую трещину задавали расклиниванием с торца, где расположена закладная фторопластовая пленка, извлекая пленку и заостряя кончик трещины клином. К поверхности образцов со стороны, где расположена закладная пленка, приклеивали алюминиевые уголки для закрепления в захватах разрывной машины.

В таблице 1 представлены результаты испытаний по определению параметра интенсивности высвобождения упругой энергии для каждого типа ПКМ. Среднеквадратическая погрешность полученных критических значений интенсивности высвобождения упругой энергии не превышала  $\pm 4$  Дж/м<sup>2</sup>.

Таблица 1 – Экспериментально полученные параметры  $G_{IC}$  для каждого типа ПКМ

Характеристика	УК-ЭАП	УК-ПЭЭК	СК-ПКА	ОК-ПКА
$G_{IC}$ , Дж/м <sup>2</sup>	$210 \pm 3$	$352 \pm 4$	$324 \pm 4$	$286 \pm 4$

Для экспериментального определения локальной межслоевой когезионной прочности при нормальном отрыве слоистых ПКМ ( $\sigma_{IC}$ ) использовали образцы размером  $70 \times 40 \times 4$  мм, вырезанные из пластин меньшего размера с модельной когезионной зоной размером  $10 \times 10$  мм между средними слоями образцов. К внешним поверхностям образцов с помощью клея ВК-9 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  $\sigma_{IC}$ ) для каждого типа ПКМ.

Таблица 2 – Экспериментально полученные параметры  $\sigma_{IC}$  для каждого типа ПКМ

Характеристика	УК-ЭАП	УК-ПЭЭК	СК-ПКА	ОК-ПКА
$\sigma_{IC}$ , МПа	$10,7 \pm 0,3$	$28,1 \pm 0,6$	$21,5 \pm 0,6$	$17,6 \pm 0,4$

На основании полученных экспериментальных данных по формуле 1 рассчитано значение длины когезионной зоны  $l_{cz}$  для каждого типа ПКМ:

$$l_{cz} = \frac{\pi}{8} \frac{EG_{IC}}{\sigma_{IC}^2}, \quad (1)$$

где  $E$  –модуль упругости, ГПа;

$\sigma_{IC}$ – когезионная прочность (в модели Баренблатта) или предел текучести (в модели Дагдейла), МПа;

$G_{IC}$  – и интенсивность высвобождения упругой энергии при развитии этой зоны, Дж/м<sup>2</sup>.

В таблице 3 представлены рассчитанные параметры когезионной зоны для каждого типа ПКМ

Таблица 3 – Рассчитанные параметры когезионной зоны для каждого типа ПКМ

Характеристика	УК-ЭАП	УК-ПЭЭК	СК-ПКА	ОК-ПКА
$l_{cz}$ , мм	3,6	0,89	0,96	1,1

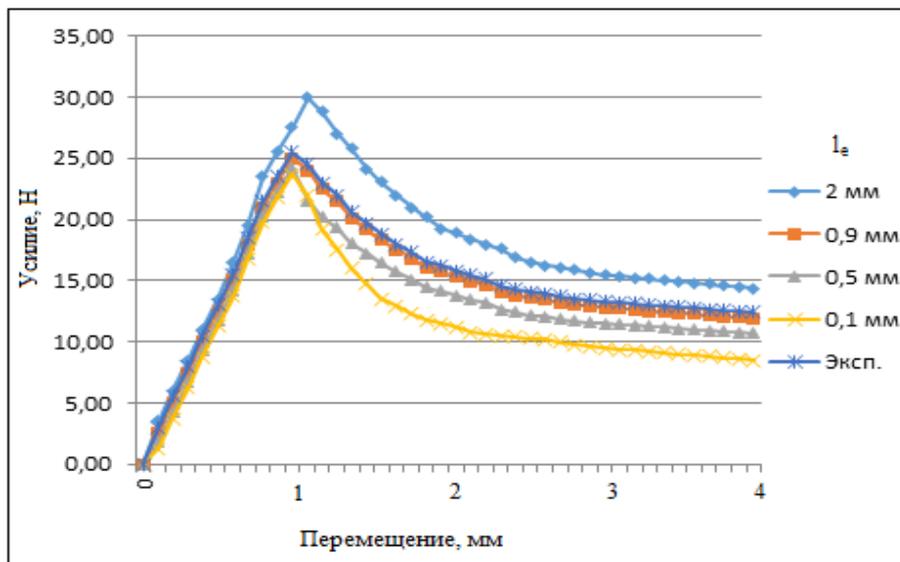
Выбор длины и количества конечных когезионных интерфейсных элементов является важным фактором, определяющим эффективность и адекватность моделирования возникновения и роста трещины, т.е. достаточную точность расчетов при минимальном объеме вычислений. Для получения достоверных численных результатов в методе МКЭ/МКЗ сетка конечных когезионных или интерфейсных элементов (ИЭ) должна быть достаточно мелкой, чтобы по длине КС располагались минимальное число конечных ИЭ. С другой стороны, особенно в случае конструкций больших размеров, мелкая сетка приводит к резкому увеличению объема вычислений и, соответственно, требуемых вычислительных мощностей.

## **Глава V Численная оценка устойчивости к расслоению различных по составу армированных слоистых ПКМ с использованием экспериментально определенных параметров закона когезионной зоны и в сравнении с экспериментальными данными**

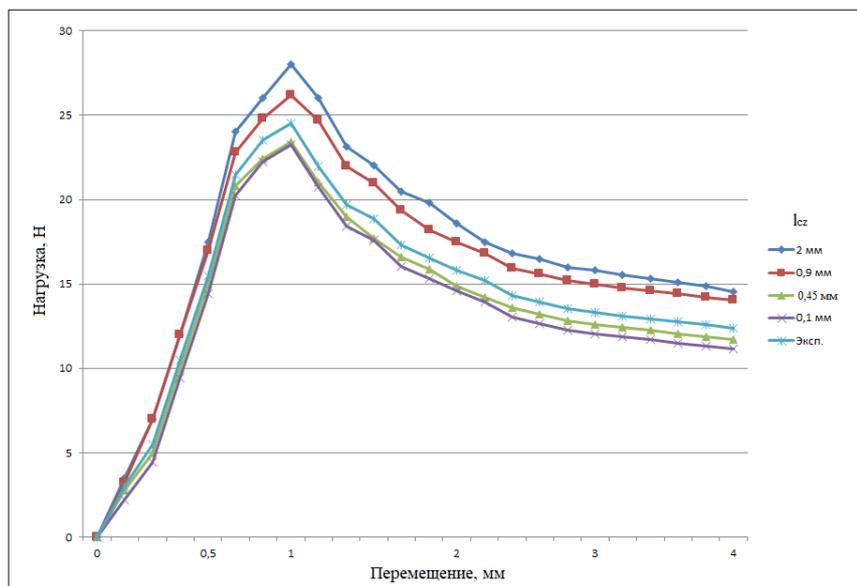
Пятая глава посвящена численной оценке устойчивости к расслоению четырех типов ПКМ и применением экспоненциального и билинейного ЗКЗ.

С использованием данных полученных экспериментальным путем для каждого типа ПКМ проведено 3D моделирование процесса расслоения ДКБ по моде I с

различной длиной и количество интерфейсных элементов по всей длине когезионного слоя с использованием экспоненциального и билинейного ЗКЗ. На рисунке 1 *а,б* представлены, как один из результатов, экспериментально полученные и рассчитанные по 3D модели с экспоненциальным ЗКЗ (рисунок 1*а*) и билинейным ЗКЗ (рисунок 1*б*) с использованием 4-х размеров  $l_e$  конечных ИЭ, кривые усилие-перемещение краев трещины при ее раскрытии (P-Δ) для образцов из УК-ЭАП в виде ДКБ.



*а*



*б*

Рисунок 1 – Экспериментально полученные и рассчитанные по 3D модели с экспоненциальным (*а*) и билинейным (*б*) ЗКЗ с использованием различного количества конечных ИЭ кривые в координатах усилие-перемещение при раскрытии трещины для УК-ЭАП

Количество  $N_e$  рассчитано по формуле 2

$$N_e = l_{cz} / l_e, \quad (2)$$

где

$l_{cz}$  – длина когезионной зоны для данного ПКМ,

$l_e$  – выбранная длина конечного ИЭ.

В таблице 4 представлено количество конечных ИЭ в КЗ и их длина для каждого типа ПКМ при использовании экспоненциального ЗКЗ.

Таблица 4 – Количество конечных ИЭ в КЗ и их длина для каждого типа ПКМ

Тип ПКМ	Длина конечного ИЭ, $l_e$ , мм	Количество ИЭ в КЗ, $N_e$
1	2	3
УК-ЭАП	2	1,8
	0,9	4
	0,5	7,2
	0,1	36
УК-ПЭЭК	0,5	1,8
	0,2	4,5
	0,1	8,9
	0,01	89
СК-ПКА	0,5	2
	0,2	5
	0,1	9,6
	0,01	96
ОК-ПКА	0,5	2,2
	0,2	5,5
	0,1	11
	0,01	110

На рисунке 2 представлены, как один из результатов, четыре экспериментально полученные и рассчитанные по 3D модели с билинейным и экспоненциальным ЗКЗ (с использованием ИЭ одного типа размера) кривые усилие-перемещение краев трещины при ее раскрытии (Р-Δ).

При сравнение полученных экспериментальных результатов и результатов при моделировании расслоения ДКБ из 4-х типов ПКМ, установлено, что погрешность на образцах из УК-ЭАП при использовании экспоненциального ЗКЗ с длиной ИЭ 0,9 мм составила 3,14 %, при использовании билинейного ЗКЗ с длиной ИЭ 0,9 мм – 9,91 %,

а при использовании билинейного ЗКЗ с длиной ИЭ 0,45 мм – 4,3 %. Т.е. модель с билинейным ЗКЗ и длиной ИЭ 0,9 мм показала большое расхождение с экспериментальными данными и для более адекватного моделирования необходимо выбирать ИЭ меньшей длины. Оптимальным вариантом для проведения моделирования с применением экспоненциального ЗКЗ для УК-ЭАП является длина ИЭ равная 0,9 мм (4 элемента), а для билинейного ЗКЗ – 0,45 мм (8 элементов). Аналогичные закономерности установлены для всех исследованных типов ПКМ.

На рисунке 3 *а,б* обобщены рассчитанные по методу МКЭ/МКЗ кривые распределения напряжений по длине моделируемой когезионной зоны от ее начала с использованием модели с экспоненциальным (рисунок 3*а*) и билинейным (рисунок 3*б*) ЗКЗ при раскрытии трещины в образцах в виде ДКБ при различной длине конечных когезионных (интерфейсных) элементов для УК-ЭАП (как один из примеров) с указанными пунктирными линиями экспериментально определенными значениями локальной межслоевой прочности ( $\sigma_{IC}$ ) и рассчитанными по модели Баренблатта и экспериментальными значениями длины когезионной зоны ( $l_{cz}$ ).

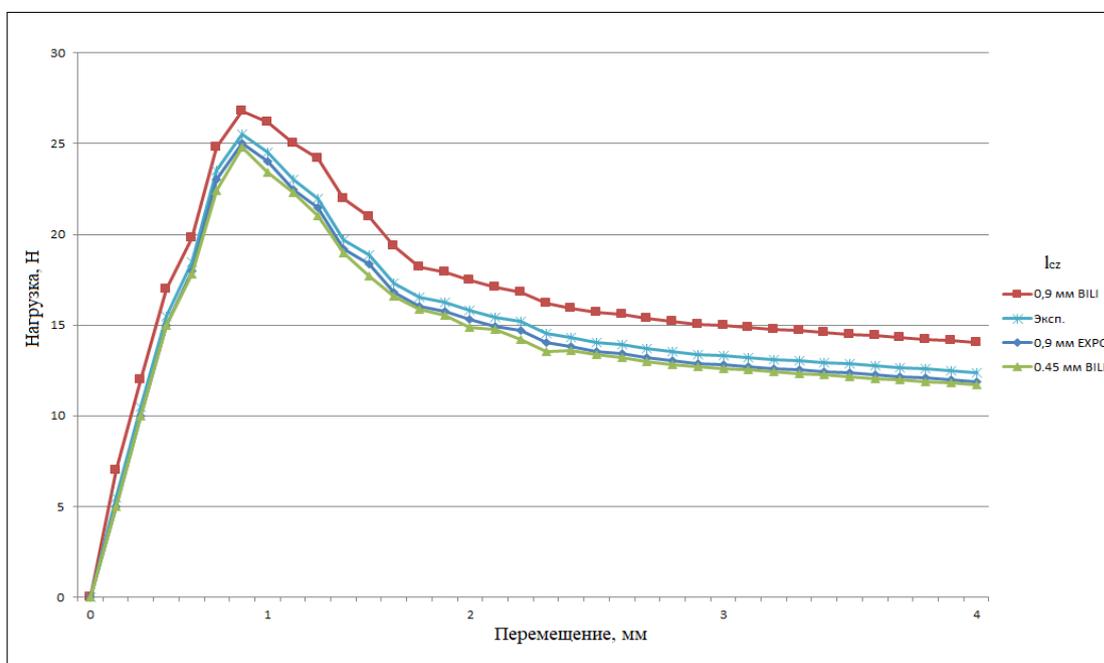
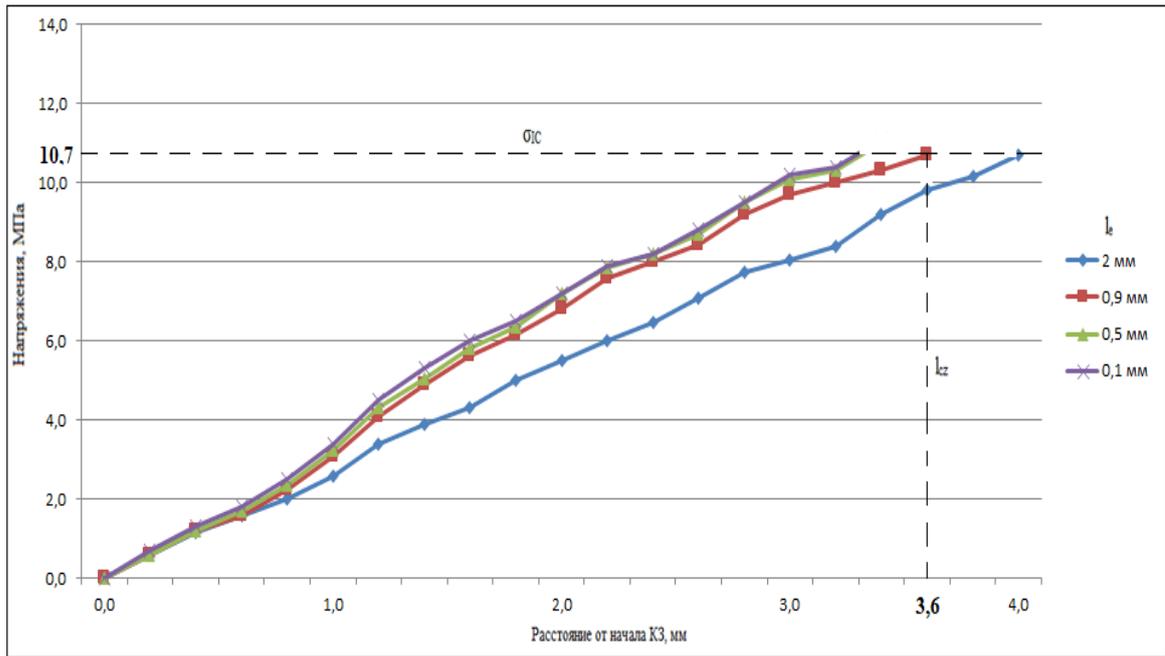
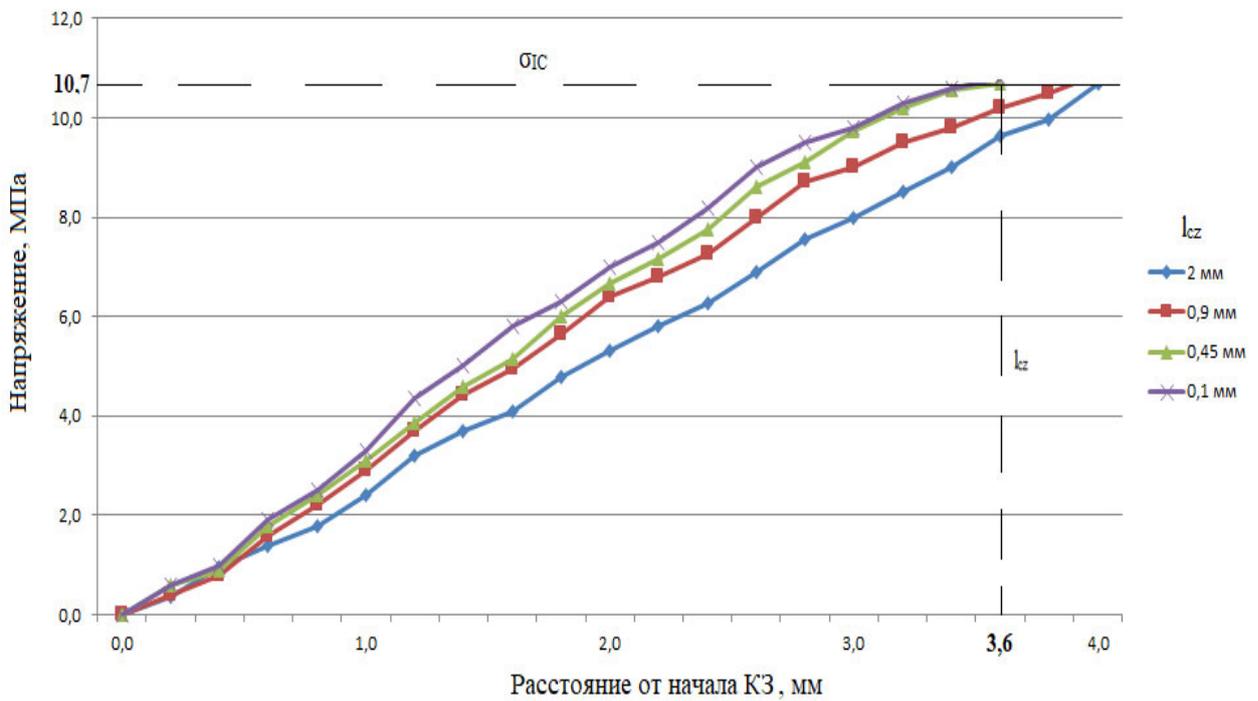


Рисунок 2 – Экспериментально полученные и рассчитанные по 3D модели с билинейным и экспоненциальным ЗКЗ с использованием ИЭ одного размера кривые в координатах усилие-перемещение при раскрытии трещины для УК-ЭАП



*a*



*б*

Рисунок 3 – Распределение локальных напряжений по длине моделируемой когезионной зоны с экспоненциальным (а) и билинейным (б) ЗКЗ, от начала КЗ при различной длине конечных интерфейсных элементов для УК-ЭАП

Проанализировав обобщенные зависимости, рассчитанные по методу МКЭ/МКЗ напряжений по длине моделируемой когезионной зоны от ее начала при раскрытии трещины в образцах в виде ДКБ при различной длине конечных интерфейсных элементов для углекомполита на основе ЭАП можно сделать выводы, что адекватные результаты, при использовании билинейного ЗКЗ получаются при восьми элементах, а при использовании экспоненциального ЗКЗ – четырёх элементах, расположенных в КЗ. Аналогичные закономерности установлены для всех исследованных типов ПКМ и выбраны минимально возможные без потери точности вычислений значения длины и количества ИЭ в КЗ.

В таблице 5 представлены минимальные значения длины и количества ИЭ в когезионном слое, обеспечивающие наилучшее совпадение экспериментальных и расчетных данных по трещиностойкости исследованных ПКМ.

Таблица 5 – Минимальные значения длины и количества ИЭ в когезионном слое

Тип ПКМ	Длина конечного ИЭ экспоненциальный ЗКЗ / билинейный ЗКЗ, $l_e$ , мм	Количество ИЭ в когезионном слое экспоненциальный ЗКЗ / билинейный ЗКЗ, $N_e$	Погрешность определения $P_{max}$ , %
УК-ЭАП	0,9/0,45	4/8	5,65/4,0
УК-ПЭЭК	0,2/0,1	4,5/8,6	0,5/2,0
СК-ПКА	0,2/0,1	5/9	2,34/3,68
ОК-ПКА	0,3/0,1	3,6/11	0,5/0,96

### Выводы по работе

В диссертационной работе решена задача, связанная с оценкой трещиностойкости различных по природе и составу армированных слоистых полимерных композиционных материалов с использованием имплантированного в метод конечных элементов закона когезионной зоны и получены следующие выводы:

1. Разработана методика численного расчета, базирующаяся на экспериментальных методах определения параметров когезионной зоны, закономерности изменения нагрузки по моде I на края трещины от величины ее раскрытия для 3D конечно-элементной модели критического роста трещины в двухконсольной балке с имплантированным экспоненциальным законом и билинейным законом когезионной зоны.

2. Выполнен цикл экспериментальных исследований по определению параметра интенсивности высвобождения упругой энергии для четырех типов образцов. Выявлено, что трещиностойкость термопластичного углекомпозиата больше в 1,6 раза, по сравнению с углекомпозиатом на основе сетчатой эпоксидной матрицы, и составляет 352 Дж/м<sup>2</sup>. Трещиностойкость для ПКА, армированного непрерывными стеклянными волокнами, больше в 1,13 раза, по сравнению с ПКА, армированного органическими волокнами, и составляет 324 Дж/м<sup>2</sup>.

3. Выполнен цикл экспериментальных исследований по определению параметров когезионной зоны, исследуемых ПКМ. Впервые экспериментально получены данные о значениях критических параметров когезионной зоны: локальной межслоевой когезионной прочности  $\sigma_c$ , максимальном раскрытии когезионной зоны  $\delta_{max}$  и длине когезионной зоны  $l_{кз}$  для органо-, стекло-, углекомпозиатов на основе эпоксидной, ПЭЭК и ПКА матриц. Выявлены закономерности изменения этих параметров в зависимости от природы входящих в ПКМ компонентов.

4. Разработана и исследована 3D конечно-элементная модель критического роста трещины в двухконсольной балке. Установлены закономерности изменения нагрузки на края трещины от величины ее раскрытия и распределения напряжений по длине моделируемой когезионной зоны для исследуемых слоистых ПКМ

5. Выявлено влияние природы полимерной матрицы на длину когезионной зоны для углекомпозиатов на основе линейных и сетчатых полимеров. Установлено, что нагрузка начала расслоения для углепластика на основе жесткоцепного линейного ПЭЭК с длиной когезионной зоны равной 0,89 мм, в 4 раза больше, чем для сетчатого эпоксидного с длиной когезионной зоны 3,6 мм, и составляет 102 Н. Экспериментально и численно выявлена общая закономерность повышения трещиностойкости с уменьшением длины когезионной зоны.

6. Выявлено влияние природы армирующего волокнистого наполнителя для стеклокомпозиатов и органокомпозиатов на поликапроамидной матрице на длину когезионной зоны. Установлено, что нагрузка начала расслоения для стеклопластика на основе линейного ПКА с длиной когезионной зоны, равной 0,96 мм, в 1,2 раза больше, чем для органопластика на той же матрице и длиной когезионной зоны,

равной 1,1 мм, и составляет 78 Н. Природа армирующего наполнителя в меньшей степени влияет на длину когезионной зоны ПКМ, при сохранении общая закономерность повышения трещиностойкости с уменьшением длины зоны.

7. Выявлено влияние размеров интерфейсных элементов, располагающихся по длине когезионной зоны, на точность расчетов в конечно-элементной модели возникновения и развития трещины для слоистых органо-, стекло-, углекомполитов на основе терморективных и термопластичных матриц. Установлено минимально возможное без ущерба для точности вычислений количество ИЭ с экспоненциальным ЗКЗ по длине когезионной зоны для УК-ЭАП, равное 4-м при длине ИЭ 0,9 мм и для УК-ПЭЭК - 4.5 при длине ИЭ 0,2мм. Соответственно, минимально возможное количество ИЭ по длине когезионной зоны для СК-ПКА равно 5-и при длине ИЭ 0,2 мм и для ОК-ПКА -3,6 при длине ИЭ 0,3 мм.

8. Установлено, что для достижения точности расчета усилия возникновения и развития трещины, соизмеримой с достижимой при применении ИЭ с экспоненциальным ЗКЗ, необходимо использовать большее количество ИЭ с билинейным ЗКЗ. Меньшее или равное их количество приводит к значительному от 6% до 10% расхождению расчетных и экспериментальных данных. Установлено, что для УК-ЭАП, при длине ИЭ с билинейным ЗКЗ 0,45 мм, минимально возможное их количество равно 8, для УК-ПЭЭК при длине ИЭ 0,1 мм – 8, для СК-ПКА при длине ИЭ 0,1 мм – 9 и для ОК-ПКА при длине ИЭ 0,1 мм – 11.

9. Проведено сравнение результатов численного решения и эксперимента по определению нагрузки начала расслоения для исследуемых случаев. Установлено, что средняя погрешность для численного определения нагрузки, приводящей к началу роста трещины в ПКМ на основе термопластичных матриц при использовании модели с экспоненциальным и билинейным ЗКЗ, составляет 2,0 % и 3,28 % соответственно.

10. Установлена правомерность практического использования разработанного подхода для анализа конструкций в научно-исследовательских институтах и конструкторских бюро при проектировании авиационной техники, заключающегося в определении специфических параметров композиционного материала относительно

простыми методиками, настройке с помощью полученных параметров под данный конкретный материал ИЭ и размещении элементов по границам раздела монослоёв по всему объёму конструкции. Размеры ИЭ достаточно малы, чтобы заполнить самые геометрически сложные участки конструкции. Это даёт возможность исследовать на предмет зарождения и роста трещин весь, без исключения, объём конструкции с геометрией любой сложности. Достоверность результатов обеспечивается совершенством геометрической модели объекта и использованием, для построения конечно элементной сетки, оптимального количества ИЭ с реальными усредненными характеристиками конкретного полимерного композита. Анализ состояний, изменения в геометрии и структуре виртуальной модели конструкции могут осуществляться многократно вплоть до получения необходимого качества конструкции.

**Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:**

1. Бабаевский, П.Г. Использование экспериментально определенных параметров когезионной зоны при численной оценке устойчивости к расслоению полимерных композитов / Бабаевский П.Г., Салиенко Н.В., Новиков Г.В. // Перспективные материалы. 2019, №3. С. 74-81.

2. Новиков Г.В. Численная оценка устойчивости к межслоевому росту трещин термопластичных армированных полимерных композиционных материалов с использованием экспериментально определенных параметров когезионной зоны / Новиков Г.В., Бабаевский П.Г., Салиенко Н.В. // Ученые записки физического факультета Московского университета. 2020, №2. С. (2020102-1)-(2020102-6).

3. Babayevsky P. Use of experimentally determined parameters of the cohesive zone in the numerical evaluation of the resistance to delamination of polymer composites materials / Babayevsky P., Saliyenko N., Novikov G. // Inorganic Materials: Applied Research, volume 10, number 5. 2019, P. 1259-1264.

4. Бабаевский П.Г. Сочетание подходов механики трещин и метода конечных элементов для оценки и прогнозирования квазистатической межслоевой трещиностойкости слоистых полимерных композиционных материалов и клеевых соединений / Бабаевский П.Г., Салиенко Н.В., Новиков Г.В. // Материалы XVII Всероссийской научно-технической конференции. АКТТИ-2016, Пермь: Изд-во ПНИПУ. 2016. С.107-112.

5. Бабаевский П.Г. Определение оптимального количества интерфейсных элементов при конечно-элементном моделировании возникновения и развития межслоевой трещины в углепластике с помощью экспериментально определенных параметров длины когезионной зоны / Бабаевский П.Г., Салиенко Н.В., Новиков Г.В. // Труды XIX Межвузовской научной школы "Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине" М: "КДУ", 2018. – С. 61-64.