



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(национальный исследовательский университет)»

На правах рукописи

НОВИКОВ ГЕННАДИЙ ВИТАЛЬЕВИЧ

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

Специальность 2.6.17 – Материаловедение

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Салиенко Николай Викторович

Москва 2021

Содержание

Введение.....		5
Глава I	Анализ современного состояния исследований элементов авиационных конструкций из слоистых полимерных композиционных материалов с межслоевыми дефектами	14
1.1	Компоненты и технологии формования армированных слоистых ПКМ, применяемых в производстве авиаконструкций.....	14
1.1.1	Применение армированных слоистых ПКМ в авиастроении.....	14
1.1.2	Армирующие компоненты слоистых ПКМ, используемые в авиастроении.....	15
1.1.2.1	Углеродные волокнистые армирующие материалы.....	16
1.1.2.2	Стекловолокнистые армирующие материалы.....	18
1.1.2.3	Органоволокнистые армирующие материалы.....	20
1.1.3	Полимерные матрицы (связующие) армированных слоистых ПКМ, используемые в авиастроении.....	22
1.1.3.1	Отверждающиеся (термореактивные) полимерные связующие	24
1.1.3.2	Термопластичные полимерные матрицы.....	26
1.2	Межслоевая трещиностойкость слоистых ПКМ: показатели и методы оценки.....	30
1.2.1	Дефекты и трещины в элементах авиаконструкций из армированных слоистых ПКМ.....	30
1.2.2	Аналитические методы линейной упругой механики разрушения.....	34
1.2.2.1	Энергетические параметры трещинодвижущих сил и трещиностойкости	35
1.2.2.2	Силовые параметры трещинодвижущих сил и трещиностойкости	38
1.2.2.3	Классические микромеханические модели	40

1.2.3 Численные подходы к оценке трещиностойкости слоистых ПКМ.....	44
1.2.3.1 Метод виртуального закрытия трещины.....	45
1.2.3.2 Метод когезионной зоны	47
Выводы по главе I.....	53
Глава II Объекты и методы исследования	56
2.1 Объекты исследования.....	56
2.2 Методы исследования.....	61
Глава III Методика создания конечно-элементной модели процесса расслоения по моде I образцов типа ДКБ	65
Выводы по главе III.....	85
Глава IV Экспериментальное определение свойств слоистых ПКМ	86
4.1 Определение модуля упругости при растяжении	86
4.2 Определение межслоевой трещиностойкости	87
4.3 Определение локальной межслоевой когезионной прочности	91
Выводы по главе IV.....	93
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.....	95
5.1 Анализ закономерности изменения нагрузки на края трещины образцов в виде ДКБ с использованием экспоненциального закона когезионной зоны.....	96
5.2 Анализ закономерности изменения нагрузки на края трещины для образцов в виде ДКБ с использованием билинейного закона когезионной зоны	101
5.3 Сравнение результатов численного моделирования с использованием экспоненциального и билинейного ЗКЗ и экспериментальными данными	104

5.4 Исследование влияния размеров интерфейсных элементов на точность расчетов в конечно-элементной модели возникновения и развития трещины для слоистых ПКМ на термопластичных и термореактивных матрицах.....	108
Выводы по главе V.....	116
Выводы и заключения по диссертационной работе.....	118
Список литературы.....	121

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

ПКМ – полимерный композиционный материал

ДКБ – двухконсольная балка

МКЭ – метод конечных элементов

МКЗ – модель когезионной зоны

ММЗ – модель мостиковой зоны

ЗКЗ – закон когезионной зоны

ККЭ – конечные когезионные элементы

ИЭ – интерфейсные элементы

ЛУМР – линейная упругая механика разрушения

НУМР – нелинейная упругая механика разрушения

КЗ – когезионная зона

УК-ЭАП – углекомполит на основе эпоксидного связующего

УК-ПЭЭК – углекомполит на основе связующего из полиэфирэфиркетона

СК-ПКА – стеклокомполит на основе поликапроамидного связующего

ОК-ПКА – органокомполит на основе поликапроамидного связующего

Введение

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 терморезистивных 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.

Степень разработанности темы

Проведенный аналитический обзор литературы показал, что все армированные слоистые ПКМ обладают существенным недостатком – низкой межслоевой трещиностойкостью. Одним из традиционных методов оценки трещиностойкости на данный момент является линейная упругая механика разрушения (ЛУМР). Методы ЛУМР лежат в основе аналитических расчетов и экспериментальных методов определения параметров межслоевой трещиностойкости слоистых ПКМ при использовании простой конфигурации образца, чаще всего в виде двойной консольной балки (ДКБ) с краевой трещиной. При использовании сложной конфигурации образцов и дефектов оценка трещиностойкости методами ЛУМР значительно затрудняется или становится невозможной. Важным современным подходом к оценке трещиностойкости слоистых ПКМ являются численные методы моделирования инициирования и роста трещин в рамках ЛУМР и метода конечных элементов (МКЭ). Наибольшее распространение при этом получили метод виртуального закрытия трещин (VCCT), и метод декогезии, известный как модель когезионной зоны (МКЗ). С точки зрения оценки межслоевой трещиностойкости таких материалов, как слоистые ПКМ на основе терморезистивных или термопластичных жестких полимерных матриц, более простым и эффективным является МКЗ, в котором в МКЭ имплантированы разработанные в рамках ЛУМР физические (микромеханические) модели, аналитически описывающие процессы упруго-пластического деформирования и хрупкого или псевдо-хрупкого предразрушения в локальной зоне впереди кончика трещины.

Анализ литературных данных показал, что на сегодня отсутствуют сведения о систематических исследованиях в области оценки трещиностойкости слоистых ПКМ с помощью экспериментально-расчетных методов. В ряде литературных источников приводятся разрозненные данные о применении методов VCCT и МКЗ для оценки трещиностойкости угле- и стеклокомпозитов на основе термопластичных и терморезистивных матриц, однако нет четкой методики, позволяющей оценить трещиностойкость слоистых ПКМ на простых образцах с

последующим использованием полученных данных для элементов, узлов, агрегатов и конструкций в целом.

Цель 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 потребовалось 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 (σ_{IC}) и деформацию (δ_{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/м², для ПКА, армированного непрерывными стеклянными волокнами, в 1,13 раза больше по сравнению с ПКА, армированного органическими волокнами, и составляет 324 Дж/м².

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 стеклокомпозита 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-, углекомпозитов на основе термореактивных 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 0,2 мм – 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.

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-, углекомпозитов на основе термореактивных 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 исследований

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 терморреактивных и термопластичных матриц.

2. Результаты экспериментальных исследований критических параметров когезионной зоны: локальной межслоевой когезионной прочности σ_{IC} , максимальном раскрытии когезионной зоны δ_{max} и рассчитанной по ним и теории Баренблатта длине когезионной зоны $l_{кз}$ для органо-, стекло-, углекомполитов на основе терморреактивных 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 результатов

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.).

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.

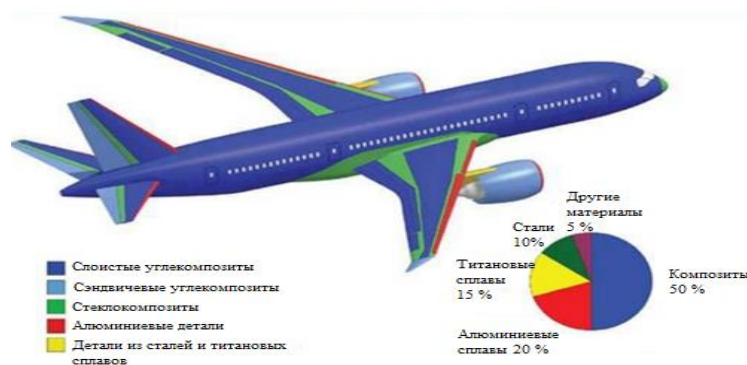
Глава I АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ СЛОИСТЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С МЕЖСЛОЕВЫМИ ДЕФЕКТАМИ

1.1 Компоненты и технологии формования армированных слоистых ПКМ, применяемых в производстве авиаконструкций

1.1.1 Применение армированных слоистых ПКМ в авиационной промышленности

В современном авиационном строительстве происходит интенсивный переход к производству облегченных, крупногабаритных, особо ответственных и высоконагруженных силовых элементов планера самолетов, в том числе фюзеляжа, кессонов крыла, оперения (стабилизатора, киля) и обтекателей, из армированных слоистых полимерных композиционных материалов на основе волокнистых армирующих компонентов (углеродных, стеклянных и органических волокнистых структур) и полимерных отверждающихся (термореактивных) и термопластичных матриц (связующих) по различным технологическим схемам.

На рисунках 1 *а* и *б* показаны примеры использования армированных слоистых ПКМ в конструкциях пассажирского самолета и военного вертолета. На рисунке 2 представлен хвостовой конус вертолета Sikorsky S-75 полученного намоткой углерод-эпоксидного ПКМ [1].



а



б

Рисунок 1 – Использование армированных ПКМ в конструкции пассажирского самолета фирмы Airbus (а) и вертолета Sikorsky S-75 (б)



Рисунок 2 – Фотография подкрепленного хвостового конуса вертолета Sikorsky S-75

1.1.2 Армирующие компоненты слоистых ПКМ, используемые в авиастроении

Армирующими элементами слоистых ПКМ служат жгуты (нити), ленты, ткани различного плетения и нетканые материалы на основе элементарных углеродных, стеклянных и органических волокон или их сочетаний. Природа волокон, их поверхностные свойства и характер распределения (характер армирования) в решающей степени определяют структуру и свойства слоев и ПКМ в целом. На стадиях проектирования и эксплуатации элементов конструкций из

слоистых ПКМ выбор типа и структуры армирования определяет уровень и анизотропию эксплуатационных свойств ПКМ, в первую очередь, несущей способности (прочности, жесткости, устойчивости к возникновению и росту дефектов и трещин, ударной вязкости, усталостной долговечности) и требуемых функциональных свойств. На стадии производства элементов конструкций из слоистых ПКМ выбор армирующей системы определяет технологию формования.

1.1.2.1 Углеродные волокнистые армирующие материалы

Элементарные углеродные волокна или филаменты (УВ), получаемые пиролизом, карбонизацией и графитизацией органических волокон на основе полиакрилонитрила, модифицированной целлюлозы и мезофазных пеков, обладают уникальными физико-механическими свойствами, сочетая высокую жесткость, прочность и термостабильность с малой плотностью и сравнительной дешевизной. При этом они отличаются от других армирующих волокон сравнительно высокой тепло- и электропроводностью

Углеродные волокна по конечному составу и структуре подразделяют на две основные группы: карбонизованные, получаемые при сравнительно низкотемпературной обработке порядка 1600-1800°C (содержат 80-90% преимущественно аморфного углерода) и графитизированные, получаемые при высокотемпературной обработке до 2500°C (содержат не менее 99% углерода преимущественно графитоподобной структуры). По физико-механическим свойствам УВ чаще всего подразделяются по прочности на высокопрочные (<4,5 ГПа) и сверхвысокопрочные (>4,5 ГПа) и по модулю упругости – на низко модульные ($E < 100$ ГПа) и средне модульные (200-350 ГПа), а также на высоко модульные (350-450 ГПа) и ультравысоко модульные ($E > 450$ ГПа) [2]. В таблице 1 приведены максимальные показатели прочности, модуля упругости и плотности известных зарубежных и отечественных марок УВ.

Таблица 1 – Максимальные показатели свойств различных марок углеродных волокон [2]

Марка волокна	Прочность, ГПа	Модуль упругости, ГПа	Плотность, г/см ³
Высокопрочные волокна			
T-300	3,6	235	1,76
T-400H	4,5	255	1,80
T-800H	5,7	300	1,81
T-1000	7,2	300	1,82
Высокомодульные волокна			
M-30	4	300	1,7
M-40	2,8	400	1,81
M-46	2,4	460	1,88
M-50	2,5	500	1,91
M-55J	3,7	550	1,93
HM-50	2,8	500	
HM-55	2,9	550	—
HM-60	3,0	600	
HM-80	3,24	785	—
Универсальные волокна			
M-35	5,1	350	1,75
M-40	4,5	385	1,77
M-46	4,3	445	1,84
Волокна, выпускаемые в России			
ЛУ-П	2,7-3	250-270	1,7
Элур-П	3-3,2	200-250	1,7
УКН-П	3,5	210-230	1,75
Кулон	2,5-3,3	450-500	1,95
Кулон-М	3,0	600	1,95
ВМН-4	2,21	270	1,71
Урал-24	1,7-2,0	70-80	1,5-1,6
УКН-5000	3,0-3,5	180-230	1,75
ЛУ-4	3,0-3,5	250	1,7
Волокна из нефтяного пека			
P-55	2,1	380	2,0
P-75	2,1	520	2,0
P-100	2,4	690	2,2
P-120	2,2	827	2,2

Химический состав поверхности и поверхностная энергия армирующего наполнителя определяют его поверхностную активность – возможность его

совмещения (пропитки и смачивания) конкретным видом связующего и адгезионную связь между ними. Поверхность углеродных волокон отличается сравнительно низкой поверхностной активностью, которая зависит от способа и условий производства волокон и их последующей обработки. Для улучшения совместимости углеродных волокнистых наполнителей со связующим (смачивания и пропитки) и улучшения адгезии их подвергают различной поверхностной обработке, такой как электрохимическая обработка, обработка в коронном разряде, или нанесением тонкого слоя биндера или аппрета с различными функциональными группами.

1.1.2.2 Стекловолоконистые армирующие материалы

Стекланные (минеральные кварцевые и силикатные) волокна (СВ), по сравнению с УВ, обладают существенно более высокой плотностью при более низких значениях прочности, модуля упругости и теплостойкости. Им присуща высокая устойчивость к химическому и биологическому воздействию, сравнительно низкая теплопроводность и высокие диэлектрические свойства. В таблице 2 приведены марки и некоторые свойства элементарных СВ.

Стекловолоконистые армирующие материалы используются в виде непрерывных крученых и некрученых (ровингов) простых и комплексных нитей или жгутов, а также тканых структур различного плетения (лент, двумерных или объемных тканей и сеток) и нетканых материалов (нитепрошивных полотен, матов из рубленых нитей).

Таблица 2 – Свойства стеклянных волокон и стекол различного состава [6]

Показатели	Алюмосиликатное Е	Известково-натриевое А	Магнезиальное алюмосиликатное высокопрочное		Щелочное кислотостойкое		С низкой диэлектрической проницаемостью D	Плавленный кварц
			S-994	BM-1	С	7А		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Плотность, кг/м ³	2580 2540	2490 –	2520	2580	2490	2610	2160	2210
Предел прочности, Мпа	3000– 3500	2400	4650– 4900	4200	2800	2000	2450	6000
Модуль упругости при растяжении, ГПа	73,5	66	88	95	70	74	52,5	73,8
Относительное удлинение при разрыве, %	4,8	4,0	5,4	4,8	–	3,6	4,7	–
Коэффициент теплопроводности стекла, Вт/(м·К)	0,9	–	–	–	1,05	–	–	–
Температура размягчения, °С	845	–	970	–	750	–	770	1670

Как и в случае углеродных волокнистых материалов химический состав поверхности и поверхностная энергия армирующих стекловолокон определяют их поверхностную активность – возможность их совмещения (пропитки и смачивания) конкретным видом связующего и адгезионную связь между ними. Стеклянные волокна имеют высокоактивные поверхности и хорошо смачиваются связующими, однако вместе с этим их поверхность легко загрязняется, и смачивание может ухудшиться. В процессе формования элементарных волокон их поверхность покрывают текстильными замасливателями на основе минеральных масел, жирных кислот, поливинилового спирта для улучшения текстильных свойств волокон (защиты волокна от разрушения при трении в процессах текстильной переработки), для предотвращения склеивания отдельных волокон в

нити и обеспечения межфиламентной пропитки, для снижения адсорбции влаги и других загрязнителей [8,9].

1.1.2.3 Органоволокнистые армирующие материалы

Органокомпозиты на основе высокопрочных и высокомодульных органических волокон (ОВ), в первую очередь, на основе ароматических полиамидов (АПА), так называемые арамидные волокна, обладают уникальными свойствам с точки зрения соотношения плотности, жесткости и прочности и применяются для создания легких слоистых ПКМ конструкционного назначения, сочетающих в условиях эксплуатации сравнительно высокие удельные прочностные характеристики со стабильными свойствами в условиях знакопеременных нагрузок и термоциклирования.

Наиболее известными высокопрочными и высокомодульными органическими волокнами являются арамидные волокна на основе полиамидов (волокна Кевлар, Тварон, Терлон) и их сополимеров (волокна СВМ, Армос, Технора), формируемые из лиотропных ЖК растворов [2]. В зависимости от состава полимера и метода формования получают органические арамидные волокна с плотностью 1400 – 1450 кг/м³, пределом прочности до 5 ГПа и модулем упругости – до 150 ГПа. Такие волокна способны сохранять исходные характеристики до 180 °С. Конкуренцию арамидным волокнам в настоящее время представляют волокна из сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ), при формовании которых из расплава образуется фибриллярная структура из кристаллов с выпрямленными цепями. Такие волокна имеют плотность порядка 970 кг/м³ при соизмеримых с арамидными волокнами прочности и модуле упругости.

В таблице 3 приведены данные о плотности и деформационно-прочностных свойствах основные марок органических волокон.

Таблица 3 – Плотность и деформационно-прочностные свойства основные марки органических волокон

Марка волокна	Плотность, кг/м ³	Прочность, ГПа	Удлинение при разрыве, %	Модуль упругости, ГПа
Арамидные волокна				
Кевлар 29	1440	2,9	3,6	70
Кевлар 129, высокопрочный	1440	3,3	3,6	85
Кевлар 149, сверхвысокомодульный	1470	2,4	1,5	160
Тварон	1440	2,8	3,3	80
Гварон, высокомодульный	1450	2,8	2,0	125
Технора	1390	3,0	4,4	70
Вектран	1400	2,9-3,3	3,7	75-114
СВМ	1430	3,8-4,2	4,0	130
Армос	1450	5,0	3,5	145
Терлон	1450	3,2	2,0-3,5	100-150
Волокна на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена				
Дайнема	970	3,3	3,0-6,0	50-120
Спектра 900	970	2,5	3,0-6,0	50-120

Органические высокомолекулярные и высокопрочные волокна обычно имеют слоистое строение и состоят из ориентированного ствола с высокой степенью кристалличности и слабо связанной с ним аморфной оболочки, на поверхности которой могут быть продольные складки, поры размером 0,15-2,0 нм и трещины размером 10-50 нм, что обуславливает низкую прочность волокон в радиальном направлении. Кроме того, низкомолекулярные компоненты связующих могут

диффундировать в поверхностные слои волокон на определенную глубину, вызывая их набухание, заполняя микродефекты и взаимодействуя с функциональными группами волокнообразующего полимера. Это может приводить не только к дополнительной потере прочности волокон в радиальном направлении, но и размывать и ослаблять границу раздела волокно-матрица, снижая степень реализации прочности волокон в ПКМ и, следовательно, эффект армирования. Однако, при правильном выборе связующего и обеспечения оптимальных условий его взаимодействия с волокнами, можно исключить эти эффекты.

1.1.3 Полимерные матрицы (связующие) армированных слоистых ПКМ, используемые в авиастроении

Матрица (связующее) в армированных слоистых ПКМ определяет и обеспечивает:

- монолитность материала;
- связь между армирующими элементами и слоями ПКМ и их совместную работу при нагружении;
- лимитирование термостойкости (температуры термохимической и термоокислительной деструкции) и теплостойкости (температуры потери деформативной устойчивости) материала;
- аддитивность вклада в эксплуатационные свойства материала;
- важнейшую роль в выборе и реализации метода и условий формования элементов конструкций.

Таким образом, в готовых конструкциях из ПКМ полимерная матрица обеспечивает монолитизацию и сплошность конструкции, адгезионно связывает армирующие элементы между собой и перераспределяет напряжения между ними, защищает их от вредного воздействия окружающей среды, в значительной степени определяя трещиностойкость ПКМ - устойчивость к возникновению и росту дефектов и трещин, особенно межслоевых. С другой стороны, полимерная матрица

в решающей степени определяет технологию формирования ПКМ (сочетания его компонентов) и формообразования (формования) элементов конструкций из них. При этом эксплуатационные и технологические требования, предъявляемые к полимерным матрицам ПКМ и обусловленные их физико-механическими и физико-химическими свойствами в условиях эксплуатации и по стадиям производства, существенно различаются и часто противоположны. К важнейшим эксплуатационным свойствам матрицы, которые обеспечивают работоспособность ПКМ, относятся такие свойства как прочность, жесткость, пластичность, вязкость разрушения, ударная вязкость, поведение при температурных воздействиях (термостойкость, огнестойкость, теплостойкость), коррозионная стойкость,

В качестве полимерных матриц армированных слоистых ПКМ используются оба основных типа полимерных материалов: отверждающиеся или термореактивные (ТР) и термопластичные (ТП) полимеры.

ТР полимерные матрицы формируются непосредственно в ПКМ в результате необратимых химических превращений исходных реакционноспособных пре- или форполимерных (мономер-олигомерных или олигомер-полимерных) композиций на стадиях технологических процессов сочетания с армирующими системами, формования и фиксирования формы изделий. Их дополнительные обработки осуществляются обычно в отвержденном состоянии.

ТП полимерные матрицы представляют собой предварительно синтезированные полимеры и композиции на их основе (сплавы, смеси, блок- или привитые сополимеры) с заданным молекулярным (химическим) строением, способным при нагревании обратимо изменять свое фазовое и реологическое состояние – от жесткого и прочного аморфного или аморфно-кристаллического стеклообразного состояния в условиях эксплуатации до эластического или вязко-текучего состояния при сочетании с армирующими системами и на стадиях технологии формования.

1.1.3.1 Отверждающиеся (термореактивные) полимерные связующие

В производстве ПКМ различного назначения находят применение различные термореактивные матрицы, сравнительные характеристики которых приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Физико-механические характеристики основных типов ТР матриц [2]

Параметр	Тип матрицы				
	Эпоксидная	Фенолформальдегидная	полиэфирная	Полиимидная	Кремнийорганическая
Предел прочности, МПа	35-100	40-70	30-70	90-95	25-50
Модуль упругости, ГПа	2,4-4,2	7-11	2,8-3,8	3,2-5,0	6,8-10
Плотность, г/см ³	1,2-1,3	1,2-1,3	1,2-1,35	1,41-1,43	1,35-1,4
Теплостойкость, °С	130-150	140-180	50-80	250-320	250-280
Относительное удлинение, %	2-9	0,4-0,5	1-5	1,0-2,5	0,3-0,5
Объемная усадка, %	1-5	15-25	5-10	15-20	15-20
Водопоглощение за 1 сут., %	0,01-0,08	0,3-0,4	0,1-0,2	0,28-0,32	0,08-0,12

В производстве авиаконструкций из армированных слоистых ПКМ наиболее широко используются эпоксидные матрицы, обладающих оптимальным сочетанием технологических и эксплуатационных свойств. В таблице 5 приведены типы и характеристики отечественных эпоксидных компонентов связующих для армированных слоистых ПКМ.

Таблица 5 – Состав и свойства некоторых основных отечественных компонентов эпоксидных связующих

Эпоксидный олигомер (смола)		Средний молекулярный вес	Количество эпоксидных групп, %	Температура размягчения, °С	Вязкость при 25 °С, Пас
Марка	Сокращенное химическое название				
ЭД-16	ДГЭ БА	239-269	16-18	-	5-18
ЭД-20	ДГЭ БА	195-216	20-22,5	-	13-20
ЭТФ	ТГЭ ТФ	-	19,5	40-65	-
ДЭГ-1	ДГЭ ДЭГ	-	24	-	-
УП-610	ТГЭ ПАФ	-	48-52	184	-

Ниже дается обобщённая информация по составу и назначению эпоксидным связующих, разработанных ФГУП ВИАМ для армированных ПКМ конструкционного назначения:

ЭДТ-10, ЭДТ-10П, 5-211Б, ЭДТ-69Н, ВС-2526, ВС-2526К, ЭНФБ, УП-2227, УП-2227н, ЭНФБ-2м – эпоксидные связующие, на основе которых разработаны многочисленные стекло-, угле-, органокомпозиаты и гибридные материалы.

Связующее ЭДТ-69Н предназначено для пропитки армирующих наполнителей (стеклотканей, углеродных лент, тканей СВМ, кордной стеклоткани и комбинированных тканей). Технологические свойства препрегов на его основе связующего позволяют производить формирование заготовок изделий методами намотки, ручной и автоматизированной выкладки. Препреги на основе связующего ЭДТ-69Н имеют низкие температуры термообработки (150-160°С) и короткий цикл отверждения. Применение связующего обеспечивает повышение прочности ПКМ на сжатие [10].

Эпоксифенольное связующее ЭНФБ предназначено для пропитки армирующих наполнителей и получения высокопрочных теплостойких композиционных материалов (угле-, стекло-, органопластиков) для изготовления деталей конструкционного назначения, работающих при температуре до 150°С [11].

Связующее УП-2227 предназначено для изготовления препрегов с применением стеклянных, углеродных и органических тканых наполнителей, и получения композиционных материалов на их основе методами прессования, намотки, контактного и вакуум-автоклавного формования. Температура стеклования, отвержденного связующего не менее 190°C.

ВСТ-1211, ВСЭ-1212, ВСП-3М, ВСЭ-22 – эпоксидные связующие для препрегов и получения ПКМ автоклавным и вакуумным формованием. Отличительной особенностью связующих является высокая деформативность, прочность при изгибе – до 155 Мпа, контролируемая текучесть, оптимизированная липкость. Температура стеклования связующих – от 160 до 190°C. Связующие могут быть использованы для изготовления изделий всех категорий – от слабонагруженных деталей до особо ответственных конструкций. Поставки материалов осуществляются в виде препрегов.

1.1.3.2 Термопластичные полимерные матрицы

В настоящее время термопластичные высокотеплостойкие полимеры все более широко используют в качестве матриц слоистых армированных волокнами ПКМ. Как указывалось выше, ТП матрицы представляют собой предварительно синтезированные в условиях химического производства полимеры и полимерные композиции на их основе (сплавы, смеси, блок- или привитые сополимеры), молекулярное (химическое) строение которых сформировано при синтезе. В технологии ПКМ (при сочетании с армирующими системами и формовании изделия) они претерпевают только обратимые физические (температурные) превращения - фазовые переходы (плавление и кристаллизацию или разделение фаз в сплавах, смесях, блок- или привитых сополимерах), а также реологические превращения в аморфном фазовом состоянии (переходы из стеклообразного в высокоэластическое и/или вязко-текучее состояние и обратно). Для них характерно сочетание высокой прочности, ударной вязкости и трещиностойкости с более

высокопроизводительными методами формования изделий и способностью к вторичной переработке.

Применение термопластичных матриц в составе армированных слоистых ПКМ обеспечивает ряд преимуществ по сравнению с терморезактивными связующими:

- неограниченный срок хранения полуфабрикатов;
- способность к релаксации напряжений;
- возможность вторичной переработки;
- отсутствие выделения летучих компонентов;
- взрывобезопасность и нетоксичность.

Главным преимуществом термопластичных матриц ПКМ является отсутствие длительного процесса отверждения при высокой скорости фазовых и реологических превращений, определяющих температурно-временной цикл формования, длительность которого зависит только от продолжительности нагревания заготовок. В связи с кратковременностью нагревания заготовок процесс формования деталей ПКМ на основе термопластичных матриц менее трудоемок, особенно в условиях крупномасштабного производства. Это упрощает получение деталей сложной конфигурации, повышает производительность оборудования, создавая предпосылки для его автоматизации

На практике, применительно к ПКМ конструкционного назначения для авиакосмической техники, наибольшее значение имеют высокотеплостойкие, обычно аморфные стеклообразные, термопластичные полимеры, повторяющиеся звенья полимерных цепей которых состоят преимущественно из ароматических (бензольных) циклов, соединенных мостиковыми группами (связями), представленными на рисунке 3. Высокая теплостойкость таких матриц обеспечивается высокой температурой стеклования.

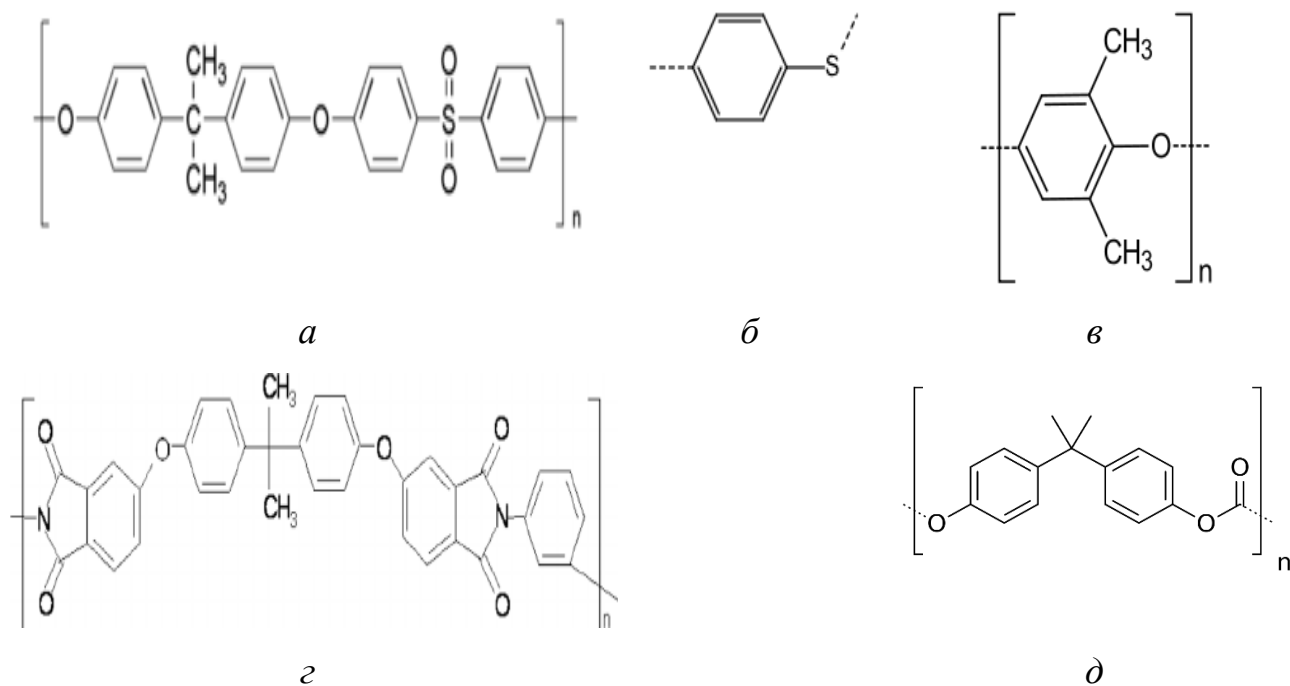


Рисунок 3 – Формулы высокотеплостойких аморфных стеклообразных термопластичных полимеров (*а* - полиэфирсульфон, *б* - полифениленсульфид, *в* – полифениленоксид, *г* - термопластичный полиимид - полиэфиримид, *д* - поликарбонат)

Физико-механические свойства основных типов аморфных стеклообразных термопластичных полимерных матриц представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Физико-механические свойства термопластичных матриц

Матрица	Плотность, кг/м ³	$\sigma_{\text{в}}$	$\sigma_{\text{в.сж}}$	E , ГПа	Относительное удлинение при разрыве, не менее %	Ударная вязкость, Дж/м ²	G_{IC} , кДж/м ²
		МПа	МПа				
Поликарбонат	1200	65	85	–	100	110	–
Полисульфон	1240	70	230	2,3	75	100	2,6–3,2
Полиэфирсульфон	1370	84	240	2,4	45	80	1,9–2,6
Полиэфиримид	1290	105	148	3	3	80	2,0–3,0
Полифениленсульфид	1340	90	148	3,8	9	–	–

В последнее время применительно к производству авиаконструкций из армированных слоистых ПКМ широкое внимание уделяется термопластичным матрицам с высокой степенью кристалличности: поликапроамоидам (ПКА) - алифатическим полимерам, содержащим высокую концентрацию амидных групп, и полиэфирэфиркетонам (ПЭЭК) — ароматическим полимерам, состоящим из фениленовых циклов и мостиковых карбонильных (кетонных) и простых эфирных групп. Их теплостойкость определяется высокими температурами плавления.

В таблице 7 обобщены физико-механические свойства ПЭЭК и ПКА.

Таблица 7 – Физико-механические свойства ПЭЭК и ПКА

Показатель	Значение	
	ПЭЭК	ПКА
Плотность, кг/м ³	1300	1150
Предел прочности, МПа	130	65
Относительное удлинение, %	50	15
Модуль упругости, ГПа	5,1	2,3
Ударная вязкость, Дж/м ²	50	110
Трещиностойкость G_{IC} , кДж/м ²	4,8	-

В связи с развитием волоконной технологии получения полуфабрикатов, армированных высокопрочными волокнами слоистых ПКМ на основе термопластичных матриц важное значение имеют матричные поликапроамидные (капроновые) волокна. Волокнообразующий поликапроамид (полиамид 6) обладает сравнительно невысокой молекулярной массой (до 25 000) с высокой температурой плавления ($T_{пл} = 220$ °С) и степенью кристалличности (до 75%), а также достаточно высокими физико-механическими свойствами (см. табл.7).

1.2 МЕЖСЛОЕВАЯ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ СЛОИСТЫХ ПКМ: ПОКАЗАТЕЛИ И МЕТОДЫ ОЦЕНКИ

1.2.1 Дефекты и трещины в элементах авиаконструкций из армированных слоистых ПКМ

Одним из основных недостатков авиаконструкций из армированных слоистых ПКМ является легкость их локальной статической и усталостной повреждаемости различного масштаба, в первую очередь, отслоений и расслоений элементов конструкций при растяжении, сжатии, продольном или поперечном изгибе как на стадии производства, так и при эксплуатации конструкции под действием аэродинамических сил или локальных ударных нагрузок (рисунки 4-5). Это приводит к значительному снижению усталостной и остаточной прочности, живучести и заданных ресурсных характеристик конструкций.

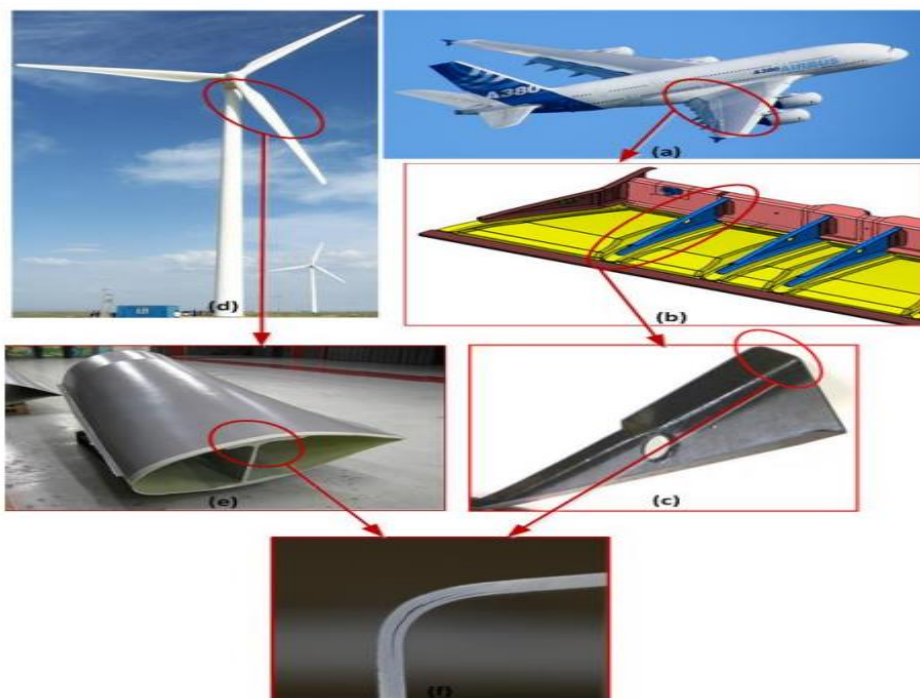
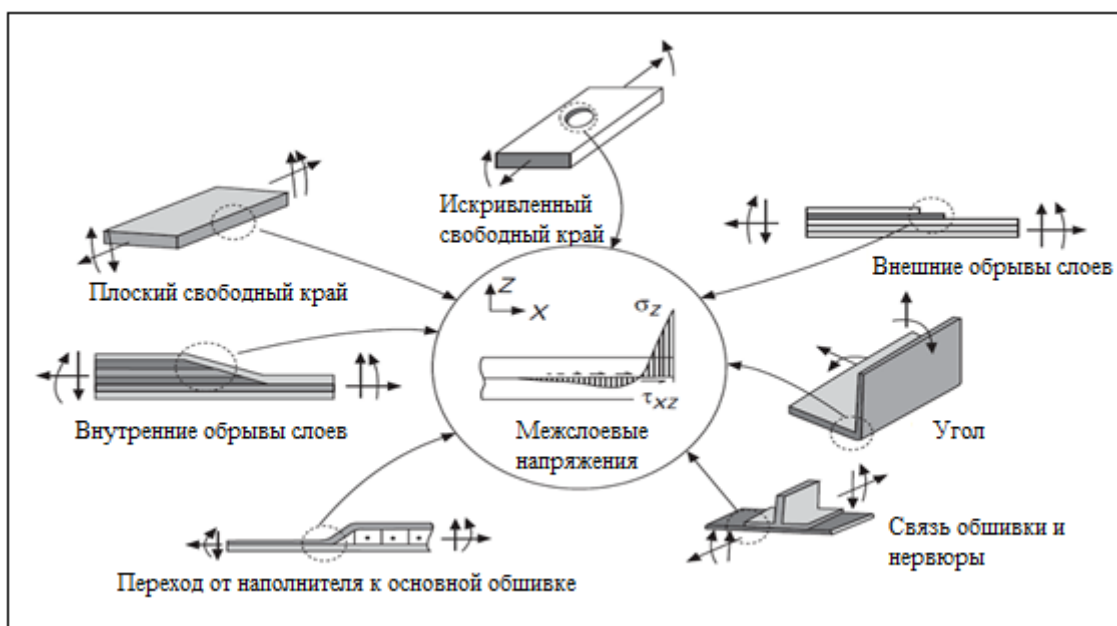


Рисунок 4 – Примеры макроскопического расслоения, армированного ПКМ в угловых элементах конструкций элерона крыла самолета и винта ротора ветроэнергоустановки



а



б

Рисунок 5 – Области инициирования и роста отслоений и расслоений в элементах конструкций из слоистых армированных ПКМ (а) и типы трещин в армированных слоистых ПКМ на трех основных уровнях их структуры: макро-(элементы конструкции или соединения); мезо- (слои ПКМ или адгезионные слои) и микро-(армирующие волокна и матрица) масштабах (б)

К наиболее распространенным и опасным типам повреждений, развивающихся в слоистых армированных ПКМ при квазистатических или динамических, глобальных или локальных нагрузках и приводящих к потере несущей способности или даже полному разрушению элемента конструкции, относятся межслоевые дефекты или трещины (расщепления, расслоения или отслоения). Такие дефекты как концентраторы напряжений часто возникают на стадии производства и эксплуатации элементов конструкций из армированных слоистых ПКМ вследствие термических или химических усадок матрицы, прикладываемых внешних усилий, изменения температуры и влажности окружающей среды, чаще всего в криволинейных участках, обрывах слоев при их выкладке, фазовых границах раздела в клеевых и болтовых соединениях, свободных краях и вырезах.

Для создания безопасных композитных и гибридных металло-композитных и композитно-сотовых ответственных силовых элементов авиаконструкций с точки зрения устойчивости к повреждениям, усталостной и остаточной прочности, живучести и заданных ресурсных характеристик необходима комплексная (многоуровневая) расчетно-экспериментальная методология оценки их сопротивления возникновению (инициированию) отслоений и расслоений (трещин), их критического и докритического роста (трещиностойкости) при статических и усталостных нагрузках с разделением источников получения экспериментальных данных и расчетных методов на уровнях образцов материала, панелей, агрегатов и натурной конструкции, т.е. созданием так называемой «пирамиды» (рисунок 6) расчетно-экспериментальной оценки и прогнозирования устойчивости авиаконструкций к расслоениям и отслоениям.

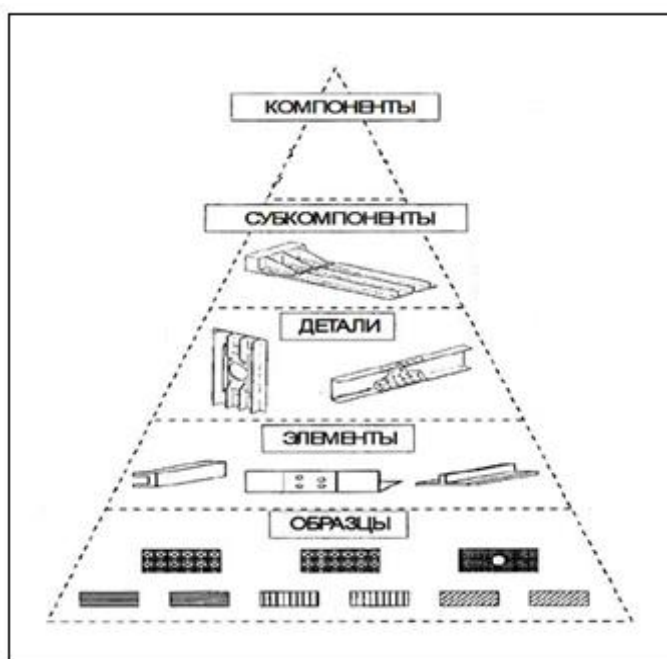


Рисунок 6 - Обобщенная многоуровневая пирамида расчетно-экспериментальной оценки и прогнозирования устойчивости к расслоениям и отслоениям авиационных конструкций из слоистых ПКМ [12]

Основанием такой «пирамиды» служат развитые в механике разрушения расчетные (аналитические и численные) и экспериментальные методы оценки критических параметров межслоевой трещиностойкости образцов слоистых ПКМ при трех видах нагрузок (I, II, III – отрыв, сдвиг в плоскости и сдвиг в антиплоскости соответственно) вблизи вершины трещины или другой области концентрации напряжений, а также кинетики докритического роста трещин в них при монотонных (квазистатических) или циклических (динамических усталостных) нагрузках. Все последующие уровни составляют преимущественно численные методы расчета и экспериментальные испытания образцов, моделирующих отдельные компоненты и интегральные силовые элементы в целом.

1.2.2 Аналитические методы линейной упругой механики разрушения

Оценка устойчивости материалов и конструкций к разрушению базируется на методах критериальной механики разрушения с использованием глобальных (макромеханических) и локальных (микромеханических) критериев разрушения материалов. Наиболее распространенные аналитические методы разработаны в механике повреждений (МП) со статистической оценкой степени повреждения материалов в результате накопления микроповреждений и в линейной упругой механике разрушения (ЛУМР), являющейся, по сути, механикой трещин (МТ), анализирующей условия инициирования и роста возникающего или существующего макроскопического дефекта (трещины) как основного механизма разрушения материала или конструкции при достижении критических условий. Хотя ЛУМР разработана для однородного (изотропного) линейно-упругого твердого тела с заданной равновесной трещиной, в настоящее время она применима к оценке устойчивости к повреждениям типа расслоения или отслоения слоистых армированных ПКМ с резко выраженной гетерогенностью и анизотропией структуры и свойств при межслоевом псевдохрупком росте трещин. [13].

ЛУМР считается физически более обоснованной, чем механика повреждений, вследствие разработки в ее рамках не только глобальных критериев разрушения (роста трещины), но и эффективных микромеханических моделей, описывающих локальные процессы, протекающие вблизи вершины (кончика, края) трещины или в любой области концентрации напряжений.

Макромеханические подходы ЛУМР базируются на анализе баланса энергии и распределения напряжений при нагружении тела с дефектом (трещиной) до начала (инициирования) роста трещины и определении, соответственно, энергетических и силовых параметров нагрузки на трещину (трещиноподвижных сил, ТДС) и устойчивости к ее росту (трещиностойкости, ТС) с учетом геометрии (формы и размеров) тела и трещины и упругих свойств материала.

Основной моделью трещины в ЛУМР служит эллиптическая центральная или полуэллиптическая краевая трещина в упруго-деформируемом теле (рисунок

7а) с тремя типами (модами) нагрузок на нее (рисунок 7б), вызывающими ее инициирование (страгивание) и рост.

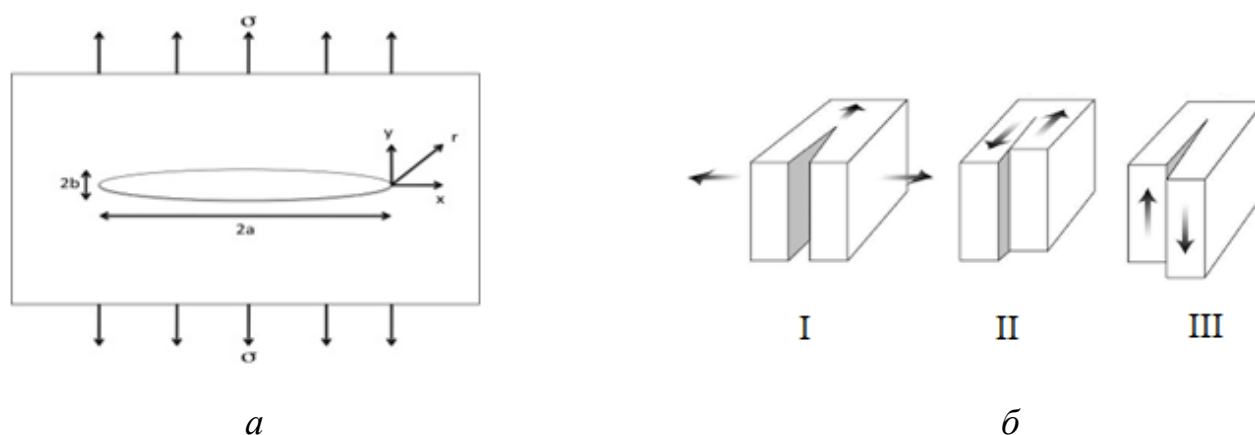


Рисунок 7 – Схема пластины из однородного и изотропного линейно-упругого материала единичной толщины с эллиптической (щелевой) центральной трещиной, растягиваемой глобальным напряжением σ вдали от трещины в направлении, перпендикулярном ее основной оси x – a ; типы (моды) нагрузки на трещину: I – растяжение (раскрытие); II – сдвиг в плоскости; III – сдвиг в антиплоскости (срез) – б.

Поскольку мода нагружения I является наиболее опасной и играет основную роль при межслоевом росте трещины в армированных слоистых ПКМ, то далее в данном обзоре и в работе в целом рассматривается только эта мода [14-16].

1.2.2.1 Энергетические параметры трещиноводвижущих сил и трещиностойкости в ЛУМР

Энергетические параметры трещиноводвижущих сил и трещиностойкости введены в ЛУМР на основе концепции Гриффита, в соответствии с которой обратимый процесс распространения равновесной трещины в идеально упругом теле в изотермических условиях при отсутствии влияния окружающей среды возможен, если энергия, накапливаемая при упругом деформировании твердого

тела, достаточна для компенсации затрат энергии на образование новых поверхностей при распространении трещины. Простейшей моделью служит нагружаемая растяжением бесконечная пластина из гомогенного изотропного линейно-упругого материала единичной толщины с эллиптической центральной трещиной с острыми краями, раскрываемая по моде I. Условие энергетического баланса, рассчитывается по формуле 1 и соответствует равенству уменьшения накопленной энергии упругого деформирования (U) затрачиваемой работе (W) при бесконечно малом увеличении длины трещины (a):

$$dU/da=dW/da \quad (1)$$

Позднее эта величина была названа интенсивностью высвобождения энергии упругой деформации при обратимом развитии равновесной трещины и введена в качестве обобщенной энергетической характеристики трещинодвижущей силы (ТДС) – G -параметра с размерностью в системе СИ – Дж/м². При глобальном нагружении при растяжении пластины с краевой трещиной длиной a напряжением σ трещинодвижущая сила рассчитывается по формуле 2:

$$G_I = Yc\sigma^2 / E , \quad (2)$$

где

Y - геометрический фактор, учитывающий форму и размеры тела;

c - константа, учитывающая эффект Пуассона: при плоском напряженном состоянии образца (в тонких пластинах) она равна 1, а при плоской деформации $1 - \nu^2$ (ν - коэффициент Пуассона); E – модуль упругости.

Для бесконечной пластины с эллиптической трещиной $Y=2/\pi$. Для других конфигураций тел и трещин расчеты геометрического фактора Y значительно усложняются.

Инициирование (начало) роста трещины в однородных и изотропных линейно-упругих материалах происходит, когда трещиноводящая сила (G_I) достигнет или превысит предельное (критическое) значение (G_{IC}), равное сопротивлению материала росту трещины (R) - работе, затрачиваемой на образование единицы площади поверхности при росте трещины (работе разрушения материала). Величина G_{IC} служит параметром трещиностойкости материала, зависящей только от природы материала, т.е. являющейся материальной константой, и критерием разрушения линейно упругого материала с заданной трещиной является неравенство: $G_I \geq G_{IC}$.

В случае линейно-упругих гомогенных и изотропных тел с трещиной при заданном типе нагружения параметр трещиностойкости G_{IC} включает в себя не только энергию, необходимую для преодоления сил сцепления всех атомов и молекул (химических и физических связей), действующих в направлении, перпендикулярном плоскости трещины, т.е. энергию упругого разрыва всех связей в плоскости трещины, равную удвоенной поверхностной энергии материала, но и рассеивание (диссипацию) энергии при образовании единицы площади поверхности по другим механизмам, в первую очередь, затраты энергии на развитие локальных неупругих, например, упруго-пластических деформаций вблизи вершины трещины [17-19]. Это позволяет применять данный подход ЛУМР к описанию так называемого псевдо-хрупкого роста трещины и соответствующего разрушения материала, при котором вблизи кончика трещины развивается локальная зона неупругих деформаций, размеры которой значительно меньше, чем размеры самой трещины, и сохраняются постоянными в процессе ее роста. При этом для материала в целом допускается сохранение линейной упругости и не накладывает существенных ограничений на расчет трещиноводящей силы.

1.2.2.2 Силовые параметры трещинодвижущих сил и трещиностойкости в ЛУМР

Силовые параметры трещинодвижущих сил и трещиностойкости - коэффициент интенсивности напряжений (КИН) при заданной моде нагрузки на трещину и его критического значения (для моды нагружения I K_I и K_{IC} соответственно) введены в ЛУМР на основе анализа напряженно-деформированного состояния материала в окрестностях вершины (кончика) трещины. Напряжения стремятся к бесконечности (сингулярны) в вершине трещины, а по мере удаления от нее убывают пропорционально корню квадратному из расстояния, асимптотически достигая среднего напряжения на пластину [20]. При этом локальные напряжения в окрестностях трещины в линейно-упругом теле при заданной моде нагружения, геометрии образца и трещины подобны и различаются только масштабным фактором K , который и выбран в качестве нагрузки на трещину (движущую силу ее роста). В случае образца с центральной щелевой трещиной длиной $2a$ в бесконечной пластине из однородного и изотропного линейно-упругого материала при нагружении трещины по типу I напряжением σ , КИН, рассчитывается по формуле 3

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a}, \quad (3)$$

Критическое значение коэффициента интенсивности напряжений K_{IC} характеризует силовой параметр сопротивления материала росту трещин (вязкость разрушения) и является мерой его трещиностойкости.

При экспериментальном определении K_{IC} , используют образец в виде плоской двухконсольной балки с заданной трещиной, раскрываемой по моде I, и находят по формуле 4

$$K_{IC}^2 = \frac{12P_C^2 a^2}{b^2 h^3} = \frac{3\Delta_C^2 E^2 h^3}{16a^4}, \quad (4)$$

где a – длина образца, мм;

P – сила, действующая вдали от кончика трещины в направлении, перпендикулярном ее основной оси x , Н;

Δ – раскрытие трещины в точках приложения силы, мм;

E – модуль упругости, МПа;

h – высота образца, мм.

В механике трещин показано, что в случае линейно-упругих материалов силовые K - и энергетические G -параметры связаны между собой через модули упругости и коэффициент Пуассона следующими простыми соотношениями (формула 5) при различных напряженно-деформированных состояниях и модах нагружения трещины

$$K_I^2 = EG_I; K_{II}^2 = E G_{II}; K_{III}^2 = 2\mu G_{III} = G_{III} \frac{E}{1+\nu}, \quad (5)$$

где μ – модуль сдвига, МПа;

ν – коэффициент Пуассона;

E – модуль упругости при плоском напряженном состоянии, МПа.

Силовые K -параметры трещинодвижущих сил и трещиностойкости более широко используются по сравнению с энергетическими G -параметрами при инженерных расчетах элементов и конструкций в целом, так как позволяют с применением сравнительно простых формул оценивать допустимые нагрузки для изделий сложной конфигурации, содержащих дефекты известного размера, или, наоборот, определять допустимые размеры дефектов при заданных условиях нагружения изделий. Однако, их физическая (материаловедческая) интерпретация затруднена по сравнению с энергетическими параметрами, которые являются

скалярными величинами, подчиняющимися закону сохранения энергии, что облегчает их теоретические расчеты с учетом состава и структуры материала. Поэтому далее в работе используются преимущественно энергетические параметры трещиноводвижущих сил и трещиностойкости.

1.2.2.3 Классические микромеханические модели в рамках ЛУМР

Микромеханические модели в рамках ЛУМР были разработаны для учета экспериментально полученных данных о том, что в реальных упругих телах при росте трещин затраты энергии на образование новых поверхностей значительно превышают удвоенную поверхностную энергию ($G_{IC} \gg 2\gamma_T$). Стало очевидным, что трещиностойкость реальных материалов определяется не только затратами энергии на упругий разрыв связей при образовании поверхности, но и, главным образом, на развитие неупругих деформаций при действии нагрузки на тело с трещиной.

Микромеханический анализ процессов, происходящих вблизи кончика трещины в псевдо-хрупких материалах, базируется на том, что при любом удаленном напряжении, действующем на тело с трещиной, локальные напряжения вблизи вершины трещины стремятся к бесконечно большим значениям (сингулярны) и вызывают локальные процессы неупругого деформирования или предразрушения в малом объеме (области, зоне) с сохранением сдерживающих сил до достижения критических значений глобальной нагрузки на трещину (G_{IC}). Развитие неупругих процессов в сравнительно небольшой зоне нарушают сингулярность локальных напряжений, а затраты энергии на разрушение этой зоны при прорастании трещины после достижения критических условий определяют трещиностойкость материала.

Впервые такую модель предложили Ирвин и Орован для упруго-пластичных материалов с пределом текучести σ_y . В таких материалах у вершины трещины образуется близкая к сферической форме пластическая зона. При плоском напряженном состоянии (трещина в тонкой пластине) предельный радиус зоны r_y при критической нагрузке рассчитывается по формуле 6

$$r_y = \left(\frac{K_I^2}{2\pi\sigma_y^2} \right) = \left(\frac{G_I E}{2\pi\sigma_y^2} \right), \quad (6)$$

Наиболее важными микромеханическими моделями роста трещины, развитыми в рамках ЛУМР применительно к псевдопластическим и псевдохрупким материалам, являются, соответственно, модели Дагдейла [14] и Баренблатта [15]. В модели Дагдейла описывается поведение кончика трещины в бесконечной пластине, нагружаемой по моде I удаленным напряжением σ при плоском напряженном состоянии, способном к деформациям с пределом текучести σ_y . При этом мгновенные упругопластические деформации материала локализованы в тонкой зоне вблизи ее кончика (края), которая моделируется увеличением длины исходной трещины на фиктивную величину Δa_y с равномерным распределением сил сцепления (когезионного связывания), равных пределу текучести материала σ_y . Длина пластической зоны при нагрузке до критической рассчитывается по формуле 7

$$\Delta a_y = \frac{\pi K_{IC}^2}{8 \sigma_y^2} = \frac{\pi G_{IC} E}{8 \sigma_y^2}, \quad (7)$$

Другим важным деформационным параметром пластической зоны (фиктивной трещины) кроме длины является ее раскрытие δ в поперечном направлении - перпендикулярном плоскости трещины, зависящее от предела текучести и модуля упругости упруго-пластичного материала, размера трещины и прикладываемого удаленного напряжения, рассчитываемое по формуле 8

$$\delta_a = \frac{K_{IC}^2}{\sigma_y E} = \frac{G_{IC}}{\sigma_y}, \quad (8)$$

Применительно к псевдохрупкому межслоевому разрушению конструкционных слоистых ПКМ на основе стеклообразных полимерных матриц наиболее важное значение имеет модель Баренблатта [15]. Эта модель в самом общем виде описывает равновесное состояние трещины в упругом, идеально хрупком теле с учетом наличия у края трещины зоны предразрушения или когезионной зоны, в которой действуют атомно-молекулярные связи (когезионные силы), притягивающие противоположные стороны (берега) трещин друг к другу (рисунок 8).

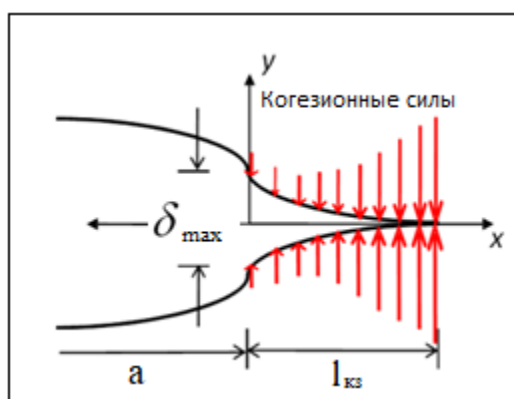


Рисунок 8 – Схема общего вида трещины в хрупком теле с когезионной зоной в модели Баренблатта

При этом трещина рассматривается состоящей из двух областей: центральной длиной a , свободной от когезионных сил, и концевой длиной $l_{кз}$, в которой действуют когезионные силы на расстоянии раскрытия концевой зоны δ_{max} в перпендикулярном росту трещины направлении [21-27]. Математический анализ базируется на двух основных гипотезах:

1. Продольные размеры зоны, где действуют силы сцепления, т.е. длина в направлении роста трещины $l_{кз}$, значительно меньше размеров внутренней области трещины в этом направлении, хотя в принципе эта модель может быть применена и к очень узким начальным трещинам, в которых размеры когезионной зоны соизмеримы с общим размером трещины или равны им. При этом длина

когезионной зоны $l_{кз}$ значительно больше атомно-молекулярных размеров, например, постоянной кристаллической решетки, так что на расстояниях порядка $l_{кз}$ можно пользоваться методами механики сплошных сред, в том числе ЛУМР [28].

2. Форма нормального сечения поверхности трещины в концевой области (сечения плоскостью, нормальной к контуру трещины) и, следовательно, локальное распределение сил сцепления вблизи их максимального действия не зависят от прилагаемых внешних сил и для данного материала при данных условиях (температура, давление, состав) всегда одинакова [29,30].

Модель Баренблатта дает выражения для предельной длины зоны предразрушения (когезионной зоны) l_{cz} ее раскрытия δ_{max} , аналогичные модели Дагдейла, где предел текучести заменяется на максимальное значение силы когезионного сцепления, т.е. локальной прочности материала σ_c , соответствующей максимуму кривой $\sigma(\delta)$ - δ в когезионной зоне. Длина когезионной зоны и ее раскрытие рассчитываются по формулам 9 и 10 соответственно

$$l_{cz} = \frac{\pi}{8} \frac{EG_{IC}}{\sigma_{IC}^2}, \quad (9)$$

$$\delta_{max} = \frac{G_{IC}}{\sigma_{IC}}, \quad (10)$$

где

E –модуль упругости, ГПа;

σ_{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/м².

Теоретически σ_c примерно рассчитывается по формуле 11

$$\sigma_C \approx E \pi \approx E \gamma_s b, \quad (11)$$

где

γ_s – поверхностная энергия материала,

b – межмолекулярное расстояние (величина порядка 10^{-7} мм).

Площадь под кривой, т.е. интеграл кривой ЗКЗ по величине локального раскрытия трещины в ее конце, дает удельную энергию разрушения материала γ_F , удвоенная величина которой соответствует критической величине интенсивности высвобождения упругой энергии при росте трещины и определяется по формуле (12)

С другой стороны, производная параметра экспериментально определенного параметра трещиностойкости по раскрытию когезионной зоны позволяют определять закон когезионной зоны $\sigma(\delta)$ по формуле (13):

$$\sigma(\delta) = \frac{dG_{IC}}{d\delta}$$

1.2.3 Численные подходы к анализу трещиностойкости слоистых ПКМ

Как было показано выше, подходы ЛУМР лежат в основе аналитических расчетов и экспериментальных методов определения параметров межслоевой трещиностойкости слоистых ПКМ, в первую очередь, энергетического параметра G_{IC} при наиболее опасном виде нагружения - нормальном отрыве противоположных поверхностей трещины (моде нагружения I) с использованием простых конфигураций образцов с заданной трещиной, чаще всего в виде двойной консольной балки (ДКБ) [36-39]. Однако, при сложной конфигурации конструкции

и дефекта аналитическая оценка трещиностойкости и прогнозирование условий роста трещин в рамках ЛУМР затруднена или невозможна из-за трудности учета геометрического фактора. Кроме того, методы и параметры ЛУМР, оценивающие устойчивость к началу (инициированию) критического роста существующей трещины, не позволяют определять условия зарождения и роста трещины в местах концентрации напряжений при отсутствии свободных поверхностей. Для решения этих проблем в настоящее время разрабатываются и широко используются численные модели инициирования и роста трещин, имплементированные в метод конечных элементов (МКЭ), являющийся основным способом численного решения различных задач механики материалов и конструкций, с помощью пакетов прикладных программ, в частности, ANSYS® и ABAQUS®. Наибольшее распространение при этом получили метод виртуального закрытия трещин (VCCT - Virtual Crack Closure Technique) и метод или модель когезионной зоны (МКЗ) – Cohesive Zone Model (CZM).

1.2.3.1 Метод VCCT

Метод VCCT позволяет оценивать условия начала роста существующей трещины при сложно-напряженном состоянии после достижения критического значения обобщенного критерия разрушения, учитывающего известные параметры трещиностойкости для всех основных видов нагрузки на края трещины – растяжения (мода I) и сдвига в плоскости (мода II) и в антиплоскости (мода III).

Метод VCCT была разработан еще в 1977 г [40] для расчета критического коэффициента интенсивности напряжений в псевдодохрупких материалах. С тех пор он достаточно широко используется также для расчета критического значения интенсивности высвобождения упругой энергии [41].

Этот метод базируется на основных постулатах ЛУМР:

1) энергия, высвобождающаяся при росте трещины, равна энергии, необходимой для ее закрытия;

- 2) рост трещины не изменяет состояние материала в вершине трещины;
- 3) рост трещины происходит вдоль заранее заданной траектории.

При создании конечно-элементной модели с траекторией роста трещины выполняется стандартная процедура нелинейного решения и генерации конечно-элементной модели с заданием настроек решателя - нагрузок и граничных условий. Траектория предполагаемого роста трещины – это дискретизация пути роста трещины интерфейсными элементами и создание соответствующих компонентов, представленная на рисунке 9.

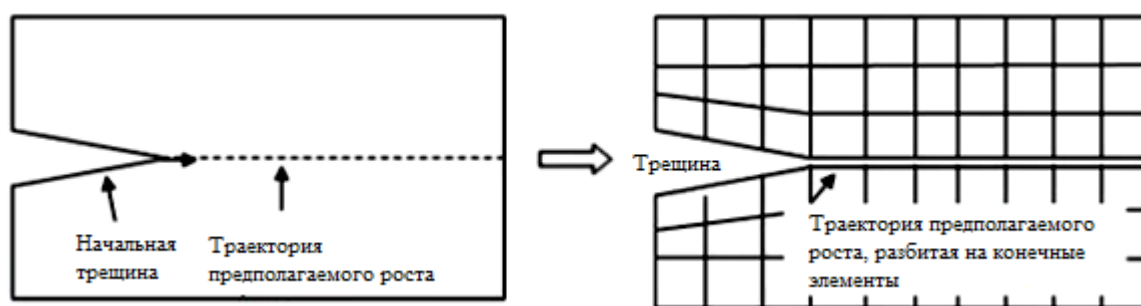


Рисунок 9 – Предпоределяемая траектория роста трещины при моделировании на основе интерфейсных элементов

Точность вычисления по методу VCCT зависит от качества расчетной сетки. Наилучшая точность достигается при использовании размера конечного элемента в окрестности вершины трещины, эквивалентного геометрии дефекта. Размер расчетной сетки влияет на время расчета; однако, полезно проверять сходимость по размеру КЭ до получения конечно-элементного решения. Метод VCCT при вычислении интенсивности высвобождения энергии поддерживает следующие типы линейно-упругих материалов - изотропные, ортотропные и анизотропные. Доступ к расчетным возможностям метода VCCT осуществляется через команду CINT, которая задаёт необходимые параметры вычисления.

1.2.3.2 Метод когезионной зоны (МКЗ)

МКЗ разработан на основе и в развитие микромеханических моделей Баренблатта и Дагдейла, описывающих неупругое поведение кончика трещины – образования зоны псевдохрупкого предразрушения и пластического деформирования, в которой действуют сдерживающие (когезионные) силы сцепления берегов трещины, так называемой когезионной зоны (КЗ). Поведение КЗ, т.е. ее локальные деформационно-прочностные свойства (связь между локальным напряжением и деформацией или раскрытием КЗ) подчиняются определенному закону – закону когезионной зоны (ЗКЗ). Имплементация МКЗ, базирующегося на модели Баренблатта, в метод конечных элементов (МКЭ) в пакетах прикладных программ типа ANSYS® и ABAQUS® позволила получить более физически обоснованный метод численного моделирования и расчета параметров роста трещин при псевдохрупком разрушении материалов как при наличии фактической трещины, так и при возможности ее зарождения в месте концентрации напряжений. Впервые имплантация МКЗ в МКЭ была реализована в работе [42], и в настоящее время этот метод получил очень широкое распространение для численной оценки трещиностойкости различных материалов, в том числе при межслоевом росте трещин в конструкционных армированных слоистых ПКМ [43-46].

Основное отличие между различными ЗКЗ заключается в формулировке этого закона как зависимости когезионного напряжения σ от раскрытия фиктивной трещины δ . ЗКЗ зависит от характера нагружения и механизма локального предразрушения материала в физической КЗ и может иметь различный вид (экспоненциальный, билинейный, трапецеидальный и др.)

На рисунке 10 приведен пример стандартного билинейного ЗКЗ, в котором линейно описывается поведение кончика трещины. Поведение когезионного элемента определяется кривой ЗКЗ, связывающее напряжение от раскрытия трещины (мода I) или напряжение от сдвига трещины (мода II). У билинейного ЗКЗ есть несколько основных параметров:

1) Межслоевая прочность – это начальная область упругой деформации до достижения максимального напряжения.

2) Далее происходит переход в область пластической деформации, где происходит накопление дефектов, вплоть до разрушения элемента [43].

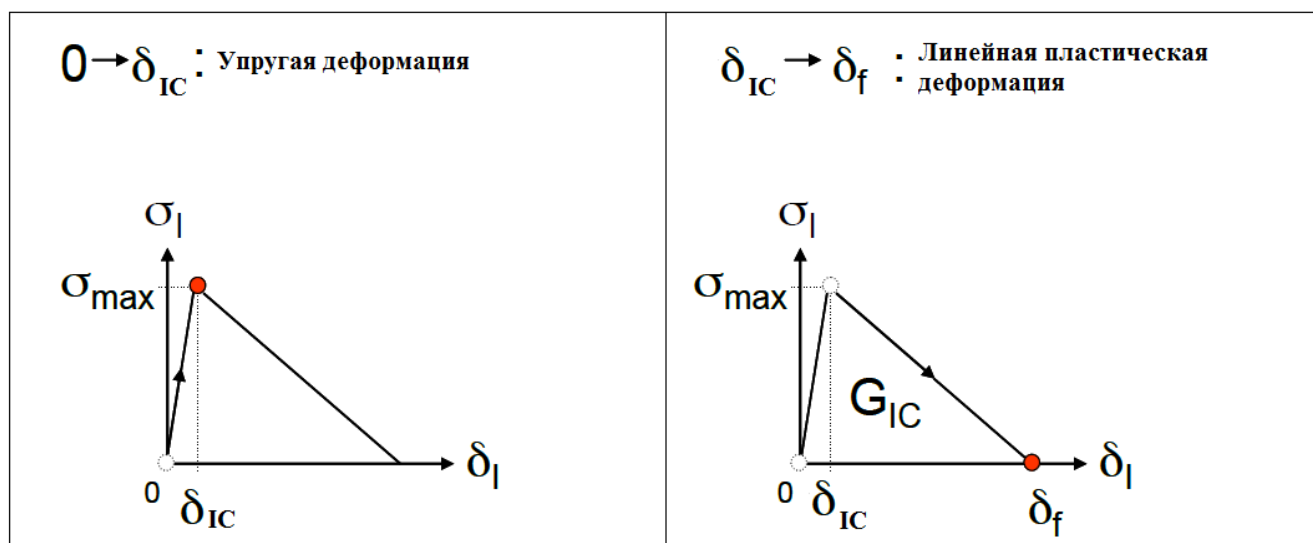


Рисунок 10 – Билинейный ЗКЗ

Интерфейсный элемент – это специальный конечный когезионный элемент (ККЭ), используемый для численного моделирования процесса возникновения и роста трещины. На рисунке 11 представлено развитие числовой когезионной зоны в билинейном ЗКЗ [43,47]. При начале движения вершины трещины, интерфейсный элемент (ИЭ), примыкающий к этой вершине, достигает своей максимальной прочности между поверхностями и перемещается в область 2 ЗКЗ (область неупругой необратимой деформации). При дальнейшем перемещении вершины трещины интерфейсные элементы также подвергаются необратимой деформации, что позволяет определить длину когезионной зоны, при которой напряжения увеличиваются до максимальной межслоевой прочности на некотором расстоянии от вершины трещины. Длина когезионной зоны достигает максимума, в точке где когезионный элемент в вершине кончика трещины полностью разрушается, и трещина начинает распространяться.

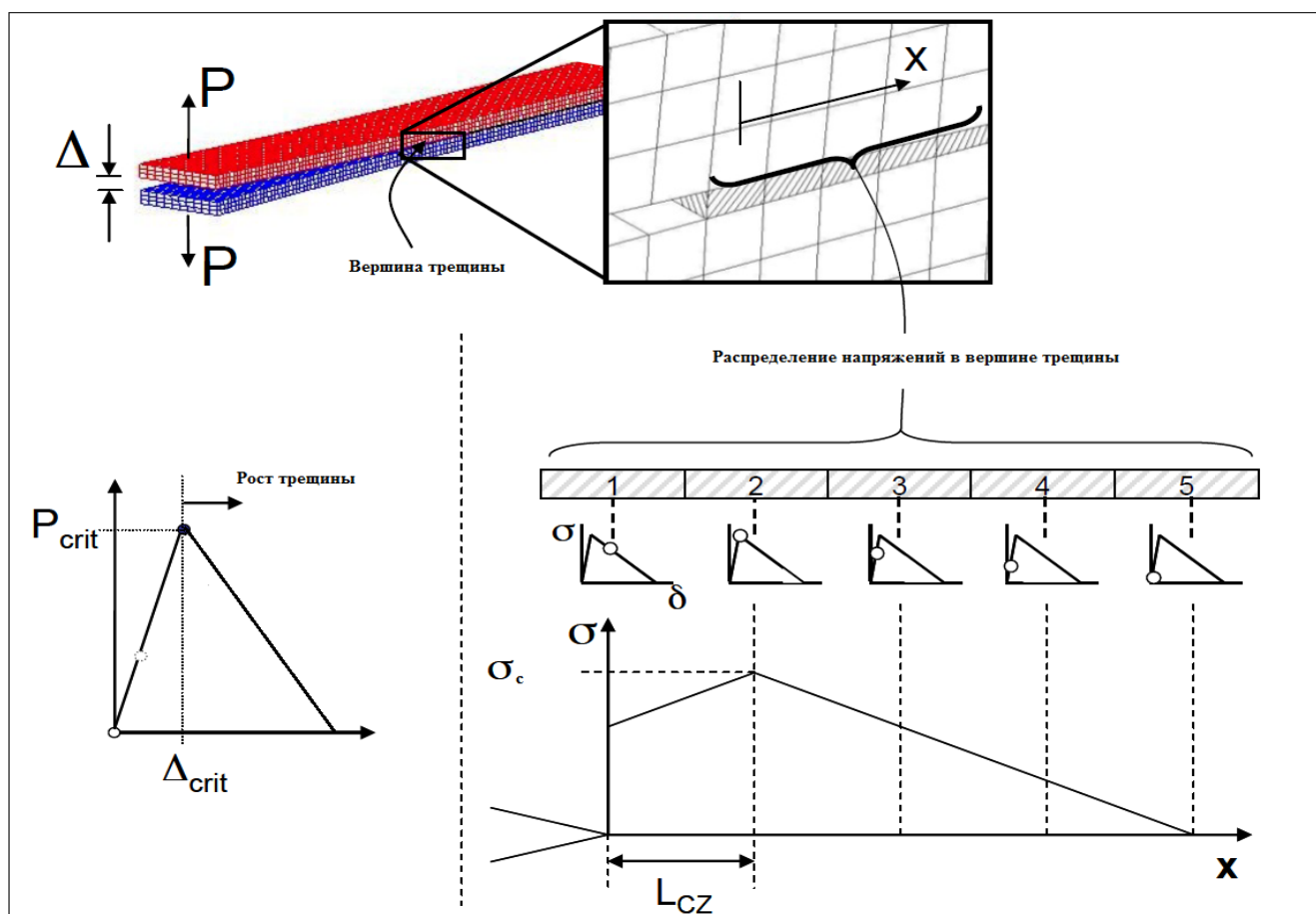


Рисунок 11 – Развитие числовой когезионной зоны в билинейном ЗКЗ

Для точного численного представления физической когезионной зоны форма зависимости ЗКЗ должна отражать распределение напряжений, связанное с механизмом разрушения, возникающим в вершине трещины. Однако, это распределение напряжений очень трудно измерить экспериментально, и это требует глобального анализ зависимости нагрузки от перемещения, вследствие чего результаты не будут зависеть от точной формы ЗКЗ, при условии правильного применения межслоевой прочности и интенсивности высвобождения упругой энергии [48-51]. При использовании билинейного ЗКЗ, при возникновении трещины, значения межслоевой прочности не влияет на ЗКЗ, в расчете используется только значение интенсивности высвобождения упругой энергии G_{IC} .

Из-за трудности прямого экспериментального определения ЗКЗ и его параметров форма ЗКЗ при численном моделировании трещиностойкости хрупких и псевдохрупких материалов в МКЗ задается, исходя из общих представлений о

материале и характере возникновения и роста трещин в нем и возможностей пакета прикладных программ, используемого в МКЭ. При нагружении по моде I ЗКЗ соответствует диаграмме локального растяжения материала $\sigma_1(\delta)$ [43, 52-53]. Для псевдохрупкого предразрушения Баренблаттом предложен экспоненциальный закон (Рисунок 12), который, наряду с билинейным законом, наиболее часто используется при численном моделировании с использованием пакета прикладных программ ANSYS®.

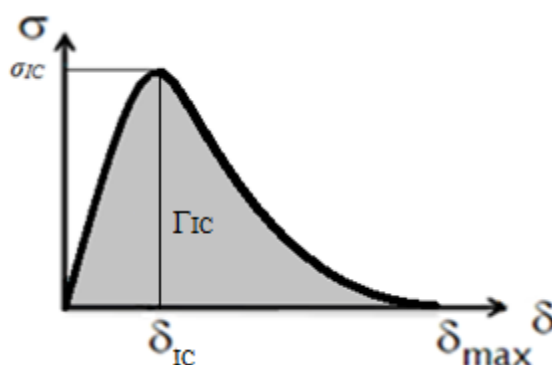


Рисунок 12 – Экспоненциальный тип ЗКЗ

Максимальное значение когезионного напряжения в этих зависимостях соответствует локальному пределу текучести или разрушающему напряжению материала σ_c , а их интеграл (площадь под кривой) - работе разрушения материала Γ_{IC} .

В других моделях при аналитических расчетах параметров трещинодвижущих сил и трещиностойкости материалов с учетом размеров зоны повреждения и σ_c используется конкретный вид функции $\sigma(\delta)$.

При использовании возникновения и накопления повреждений как процесса, обуславливающего раскрытие по моде I когезионной зоны равновесной трещины в линейно-упругом материале, предполагается, что при действии локального напряжения σ_0 когезионная зона раскрывается упруго с начальной жесткостью до тех пор, пока напряжение не достигнет предельного значения σ_{cz} , при котором начинается инициирование повреждения когезионной зоны с линейным или

экспоненциальным спадом напряжения, представленном на рисунке 12, т.е. когезионная зона состоит из двух частей – упругой зоны и зоны повреждения [43,54,55].

В настоящее время МКЗ широко применяется для исследований устойчивости ПКМ к расслоениям при критических и докритических нагрузках на трещину. В работе [56] с помощью МКЗ проведено численное исследование устойчивости композитных материалов при неоднородных докритических состояниях с последующим разрушением. Описано влияние неоднородности докритического состояния на критическую нагрузку и форму потери устойчивости слоистого ПКМ. Описан анализ для двух видов граничных условий на боковых сторонах расчетной области. Один анализ соответствует условиям симметрии для бесконечной слоистой среды, а второй анализ, описан для случая свободной от напряжений одной из боковых поверхностей образца ПКМ. Анализ разных видов граничных условий позволяет более полно учесть реальные условия эксплуатации композитов, однако не учитывает наличие дефекта в структуре.

Анализ закона когезионной зоны возможен с помощью двух методов: прямого и итерационного. С одной стороны прямой метод, позволяет получить результаты, основанные главным образом на измерении перемещений, без использования численного анализа. Но анализ ЗКЗ с помощью прямого метода может быть ограничен, из-за проблем с определением фронта трещины и измерения перемещения вершины трещины. С другой стороны, итерационный метод, позволяет определить параметры ЗКЗ путем сравнения численных результатов и экспериментально полученных результатов [43, 57]. Для билинейной формы ЗКЗ необходимо определить 3 параметра: прочность, жесткость и ударную вязкость. А для составного ЗКЗ (линейная область с дальнейшим экспоненциальным спадом), представленном на рисунке 13, необходим еще параметр α . В результате, обнаружено, что раскрытие вершины трещины слабо зависит от формы предложенных ЗКЗ [58]. Сравнивались 2 формы ЗКЗ – билинейная и составная с различными значениями α , но постоянными значениями ударной вязкости и прочности. При $\alpha < 5$ получилась большая разница в численных

результатах и экспериментально полученных результатах для перемещения вершины трещины, а при α более пяти, результаты были приблизительно равны. Наилучшая сходимость результатов получена при $\alpha = 5$.

Важной проблемой использования модели когезионной зоны является специфика кривой зависимости локального напряжения от локального раскрытия вершины трещины. В частности, должны быть определены соответствующие параметры когезионной зоны, а также форма закона расслоения. Для закона расслоения в литературных источниках есть множества моделей, которые можно использовать для расчета [58]. Например, закон расслоения может быть представлен в виде экспоненциальной зависимости, трапецевидной зависимости и в виде билинейной зависимости. Поскольку нет доступных стандартных испытаний из-за наличия некоторых трудностей, соответствующих прямому измерению данных параметров, то в большинстве случаев эти параметры когезионной зоны определяются путем сравнения результатов экспериментов с результатами численного моделирования на основе модели когезионной зоны [59].

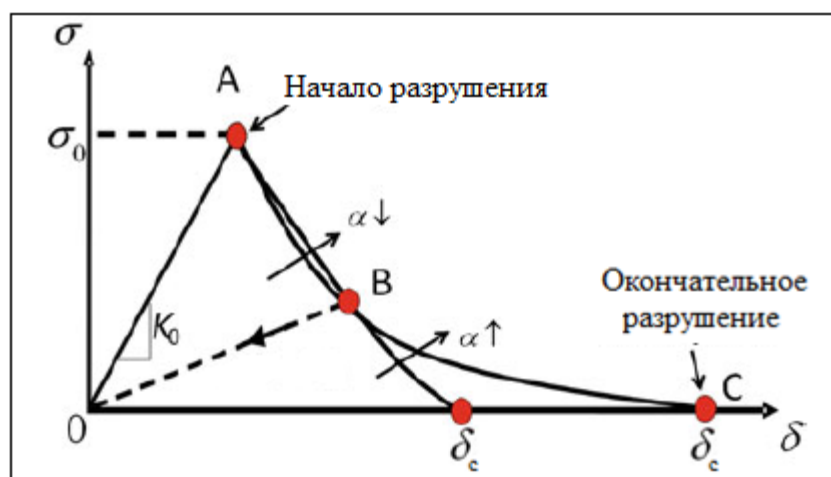


Рисунок 13 – ЗКЗ с областью линейно-упругой деформации и областью экспоненциального спада

Таким образом, использование МКЗ, имплантированного в МКЭ, дает возможность, при известном ЗКЗ, оценивать трещиностойкость материала по

уравнению 12, а по зависимости параметра трещиностойкости от раскрытия когезионной зоны и от локальной прочности материала рассчитывать, соответственно, ЗКЗ по уравнению 13 и его параметр δ_c – по уравнению 11 при различных конфигурациях образцов и модах нагружения.

Выводы по главе I

1. Анализ типов слоистых ПКМ на основе терморезистивных и термопластичных матриц, используемых в современном авиастроении, их достоинств и недостатков показал, что широкие возможности выбора оптимального сочетания из разнообразия компонентов ПКМ, структур и соответствующих методов переработки позволяют максимально реализовать свойства композитов в конструкциях. Однако, наличие дефектов в конструкциях из ПКМ приводит к снижению физико-механических характеристик и надежности эксплуатации. 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.

2. Установлено, 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.

3. Выявлено, что применительно к хрупким и псевдохрупким конструкционным материалам, в том числе к слоистым ПКМ; наиболее эффективным подходом к оценке их устойчивости к росту существующих дефектов (трещин) является линейная упругая механика разрушения (ЛУМР), позволяющая определять глобальные энергетические и силовые 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.

4. 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 нормальном отрыве противоположных поверхностей трещины, как наиболее опасном виде нагружения (моде I) с использованием простой конфигурации образца в виде двойной консольной балки (ДКБ) с краевой трещиной.

5. Установлено, что при сложной конфигурации конструкции и дефекта аналитическая оценка трещиностойкости, прогнозирование условий роста трещин в рамках ЛУМР, затруднена или невозможна. Кроме того, методы и параметры ЛУМР, оценивающие устойчивость к началу (инициированию) критического роста существующей трещины, не позволяют определять условия зарождения и роста трещины в местах концентрации напряжений при отсутствии свободных поверхностей.

6. Выявлено, 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 ABAQUS®. 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.

7. 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 псевдо-хрупкого предразрушения (в модели Баренблатта) в локальной зоне впереди кончика трещины, развитие которых предшествует началу роста трещины и исключает сингулярность напряжения в ее вершине.

Глава II ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Объекты исследования

В работе использовались 4 типа листовых слоистых ПКМ:

- Два типа углекомполитов (УК):

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 эпоксидной матрицы, представляющей собой модельный эпоксид-аминный полимер на основе эпоксидной смолы ЭД-20, отвержденной ароматическим диамином – диаминодифенилметаном в эквимольном соотношении (28 м.ч отвердителя на 100 м.ч. смолы).

УК-ПЭЭК, получаемый прессованием сухого препрега, пропитанного полиэфирэфиркетонотом Tenax®-E TRCL РЕЕК-НТА40 с содержанием углеродных волокон Tenax®-E НТА40 3К (60 об.%).

Основные характеристики компонентов УК представлены в таблицах 8 и 9.

Таблица 8 – Основные характеристики углеродных тканей марки УРАЛ Т-1-22А и Tenax®-E НТА40 3К

Элементы ткани	Характеристика	Tenax®-E НТА40	УРАЛ Т-1-22А
1	2	3	4
Элементарные волокна	Диаметр, мкм	6 - 10	6 – 10
	Плотность, г/см ³	1,45 – 1,6	1,4-1,6
	Содержание золы, %	0,1 – 0,5	0,1 – 1
	Линейная плотность, текс	0,04-0,09	0,05-0,09
	Модуль упругости при растяжении, ГПа	85,0	80,0

Продолжение таблицы 8

1	2	3	4
	Прочность на разрыв, ГПа	1,3-1,55	1.2-1.5
	Удлинение при разрыве, %	2,0 – 2,5	1,8 - 2,5
	Устойчивость в окислительной среде, °С	До 450	до 450
Нити	Линейная плотность, текс	70-800	70 – 800
	Модуль упругости, ГПа	65,0	60,0
	Прочность, ГПа	1,1 – 1,3	1,0 – 1,2
Ткань	Тип переплетения	Саржевое	саржевое
	Число нитей на 5см: - по основе - по утку	100 74	98 70
	Толщина, мм	0,25 – 0,35	0,25 – 0,35

Таблица 9 – Физико-механические свойства полимерных матриц углекомполитов - эпокси-аминного полимера (ЭАП) и полиэфирэфиркетона (ПЭЭК)

Параметр	ЭАП	ПЭЭК
Предел прочности, МПа	100	130
Модуль упругости, ГПа	5	5,1
Плотность, г/см ³	1,25	1,3
Относительное удлинение, %	3	50
Коэффициент Пуассона	0,24	0,33

- Стеклокомпозит (СК-ПКА) и 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.%. На рисунке 14

представлена схема тканого полуфабриката, получаемого по волоконной технологии [70].

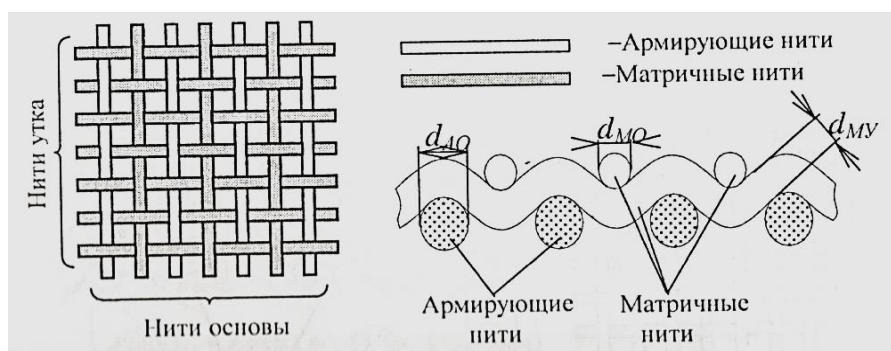


Рисунок 14 – Схема тканого полуфабриката, получаемого по волоконной технологии [70]

В таблицах 10-11 обобщены основные характеристики компонентов СК и ОК.

Таблица 10 – Характеристики стеклянных волокон марки ВМС 6-7,2x1x4 и органических волокон марки Терлон [71].

Параметр	ВМС 6-7,2x1x4	Терлон
Плотность, г/см ³	2,56	1,45
Модуль упругости при растяжении, ГПа	95	100
Предел прочности, ГПа	4,2	3,2
Относительное удлинение при разрыве, %	4,8	2,0

Таблица 11 – Характеристики поликапроамида (ПКА) [71].

Параметр	Значение
Плотность, г/см ³	1,15 - 1,16
Температура плавления, °С	220 – 250
Температура стеклования, °С	50-60
Модуль упругости при растяжении, ГПа	2.4-2,6
Предел прочности при растяжении, МПа	65 - 85
Предел прочности при сжатии, МПа	100 – 110
Относительное удлинение при разрыве, %	15 – 30
Коэффициент Пуассона	0,26

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 (рисунок 15) пакетов-заготовок из 10 слоёв терморезистивного препрега УК-ЭАП, 14 слоёв термопластичного препрега УК-ПЭЭК и из 20 слоёв тканых полуфабрикатов СК и ОК на основе термопластичных матричных волокон (СК-ПКА и ОК-ПКА).



Рисунок 15 – Оснастка для прессования пластин из ПКМ

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 терморезистивной 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.

Пластины для получения образцов для испытаний на растяжение для всех 4-х типов ПКМ размером 260×180×2мм также получали прессованием в закрытых пресс-форме, пакетов-заготовок из 5 слоёв терморезистивного препрега УК-ЭАП, 7 слоев термопластичного препрега УК-ПЭЭК и из 10 слоев тканых полуфабрикатов СК-ПКА и ОК-ПКА на основе термопластичных матричных волокон. Пакеты-заготовки для пластин обоих размеров прессовали по описанным выше режимам для каждого типа слоистого ПКМ. После завершения режима прессования пластины охлаждали под давлением до комнатной температуры. Затем из пластин вырезались образцы размерами 260×20×2 мм.

2.2 Методы исследования

Для определения модуля упругости исследуемых ПКМ проводились испытания на одноосное растяжение по ГОСТ [60] на образцах в виде полос в направлениях по основе (11) и утку (22) армирующей ткани. Эскиз образца представлен на рисунке 16.

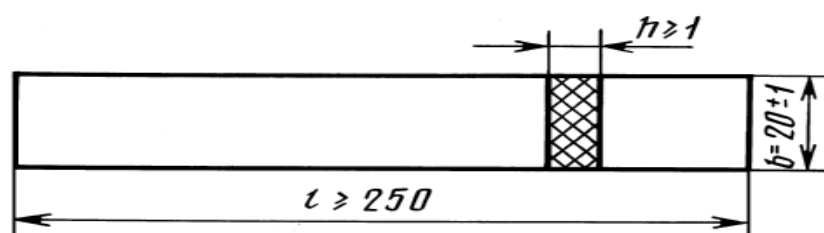


Рисунок 16 – Эскиз образца для испытаний на растяжение

Испытания проводили в помещении при температуре и относительной влажности окружающего воздуха при стандартных атмосферных условиях. Образец в захватах испытательной машины устанавливался так, чтобы горизонтальные оси, совпадали с прямой, соединяющей крепления зажимов в испытательной машине. 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 определялся по тангенсу угла наклона начального участка кривой на диаграмме разрушения.

Экспериментально параметры трещиностойкости G_{IC} при псевдохрупком разрушении в рамках линейной упругой механики разрушения обычно определяют с использованием простых образцов с заданной трещиной [31]. Для моды нагружения I межслоевой трещины в слоистых армированных ПКМ чаще всего используют образцы в виде двухконсольной балки (ДКБ) с полувысотой h , толщиной b и длиной краевой трещины a (рисунок 17).

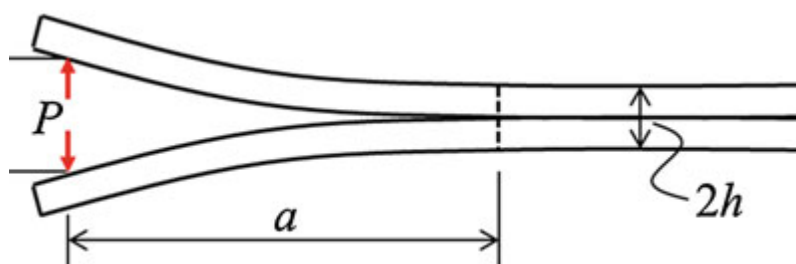


Рисунок 17 - Схематическое изображение образца с трещиной в виде двухконсольной балки (ДКБ)

Энергетическая нагрузка на трещину G_I рассчитывается через податливость образца по формуле 14. Податливость определяют по формуле 15

$$G_I = \frac{P^2}{2b} \frac{dC}{da} = \frac{\Delta^2}{2b} \frac{1}{C^2} \frac{dC}{da}, \quad (14)$$

где b – толщина образца, мм.

C – податливость образца;

P - сила, действующая вдали от кончика трещины в направлении, перпендикулярном ее основной оси x , Н;

Δ – глобальное раскрытие трещины в точках приложения силы, мм.

$$C = \Delta/P, \quad (15)$$

В зависимости от характера и степени изменения локальной прочности материала может наблюдаться ступенчатый или стабильный (с постоянной конечной скоростью) критический рост трещины, что и определяет характер разрушения [32-35].

Для экспериментального определения для четырех типов исследуемых слоистых ПКМ глобального параметра межслоевой трещиностойкости слоистых ПКМ - интенсивности высвобождения упругой энергии при росте трещины по моде

I

(

G

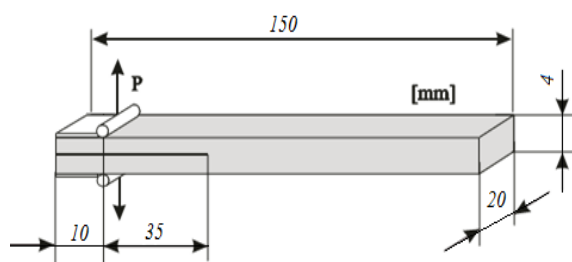


Рисунок 18 – Схема образца ДКБ

Локальную межслоевую когезионную прочность определяли по нестандартной методике. Испытания проводили в помещении при температуре и относительной влажности окружающего воздуха при стандартных атмосферных условиях. 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. Чтобы избежать возникновения сдвиговых напряжений и обеспечить равномерный нормальный отрыв в зоне сцепления слоев, образцы аккуратно балансировали в горизонтальной плоскости. Нормальную локальную когезионную прочность рассчитывали по формуле 16

$$\sigma_{IC} = \frac{P_{\max}}{S}, \quad (16)$$

где S – площадь зоны разрушения, м².

Экспериментальные данные обрабатывали методами математической статистики [72]. Величины абсолютной ошибки опыта по основным методам

исследования, рассчитанные с доверительной вероятностью $\alpha = 0,95$, приведены в таблице 12.

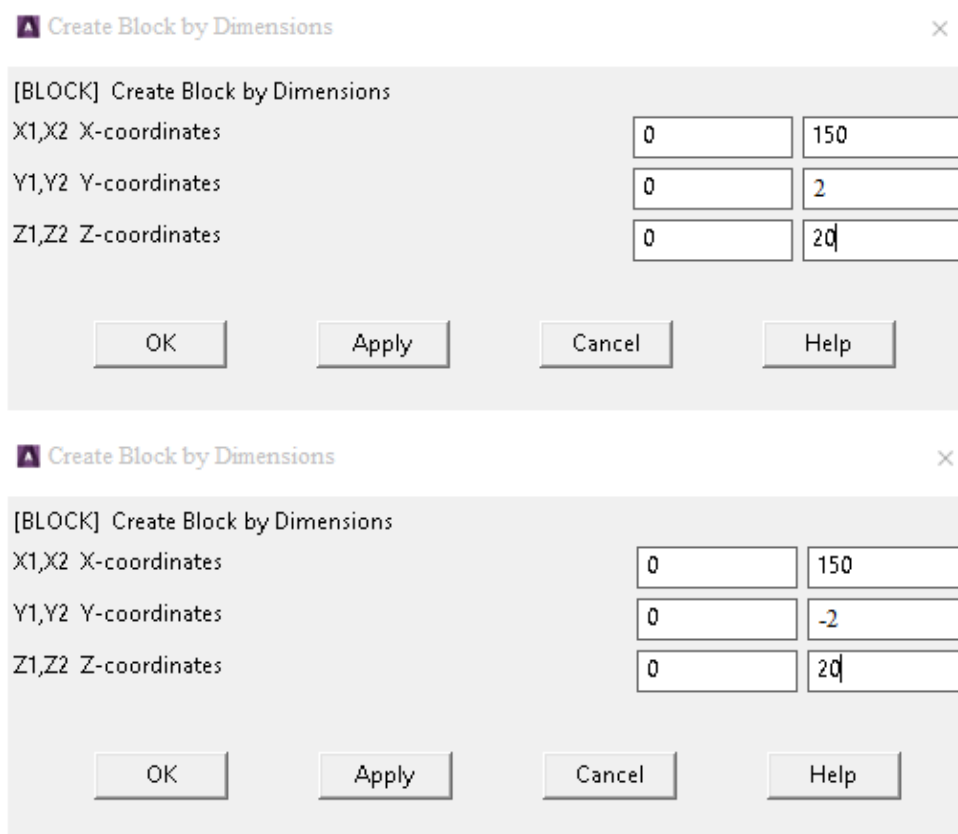
Таблица 12 – Абсолютная ошибка опыта

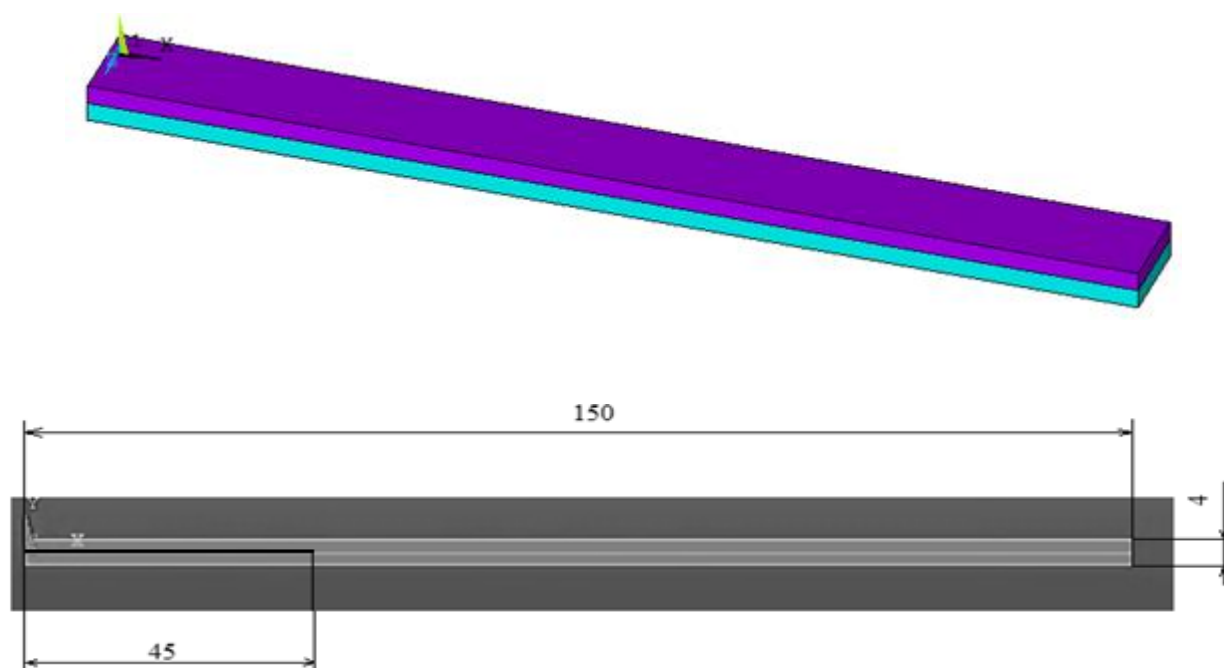
Измеряемая величина	Условное обозначение	Абсолютная ошибка
Модуль упругости	E	0,35 ГПа
Локальная когезионная прочность	σ_{IC}	0,6 МПа
Максимальное раскрытие КЗ	δ_{max}	0,5 мкм
Интенсивность высвобождения упругой энергии	G_{IC} ,	4 Дж/м ²

Глава III МЕТОДИКА СОЗДАНИЯ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА РАССЛОЕНИЯ ПО МОДЕ I ОБРАЗЦОВ ТИПА ДКБ

В настоящее время метод МКЗ/МКЭ может быть реализован в следующих программных пакетах - ANSYS Mechanical, MSCMARC; ABAQUS, MSCPatran и др. [61-64]. Описаны возможности реализации этого метода в пакете ANSYS применительно к решению задач расслоения для ПКМ.

Для численного моделирование процесса расслоения по моде I образца типа ДКБ и расчета параметров трещиностойкости слоистых ПКМ с помощью, имплантированной в метод конечных элементов (МКЭ) модели когезионной зоны (МКЗ) использовали создаваемую в пакете прикладных программ ANSYS® 3D геометрическую модель образца (Рисунок 19 а и б). Задание геометрической модели происходит через препроцессор с помощью функций моделирования и создания элементов.





б

Рисунок 19 – Задание параметров для геометрической модели (*а*) и общий вид в изометрии и в профиль 3D модели образца в виде ДКБ с основными размерами модели и заданной начальной трещиной (*б*)

Для выбранной модели, в препроцессоре программы Ansys, задаются основные элементы и параметры материала. Тип КЭ определяет число степеней свободы, его форму (одномерный, треугольный, четырёхугольный и др.), размерность КЭ (линейный, изопараметрический). Для конечно-элементной модели (КЭМ) структуры ПКМ необходимо выбрать объёмный восьмиугольный 8-узловой твердотельный элемент с функцией формы второго порядка. Для 3D-модели добавляются два элемента из библиотеки элементов: твердотельный (Solid185) и когезионный (Inter205), как представлено на рисунке 20.

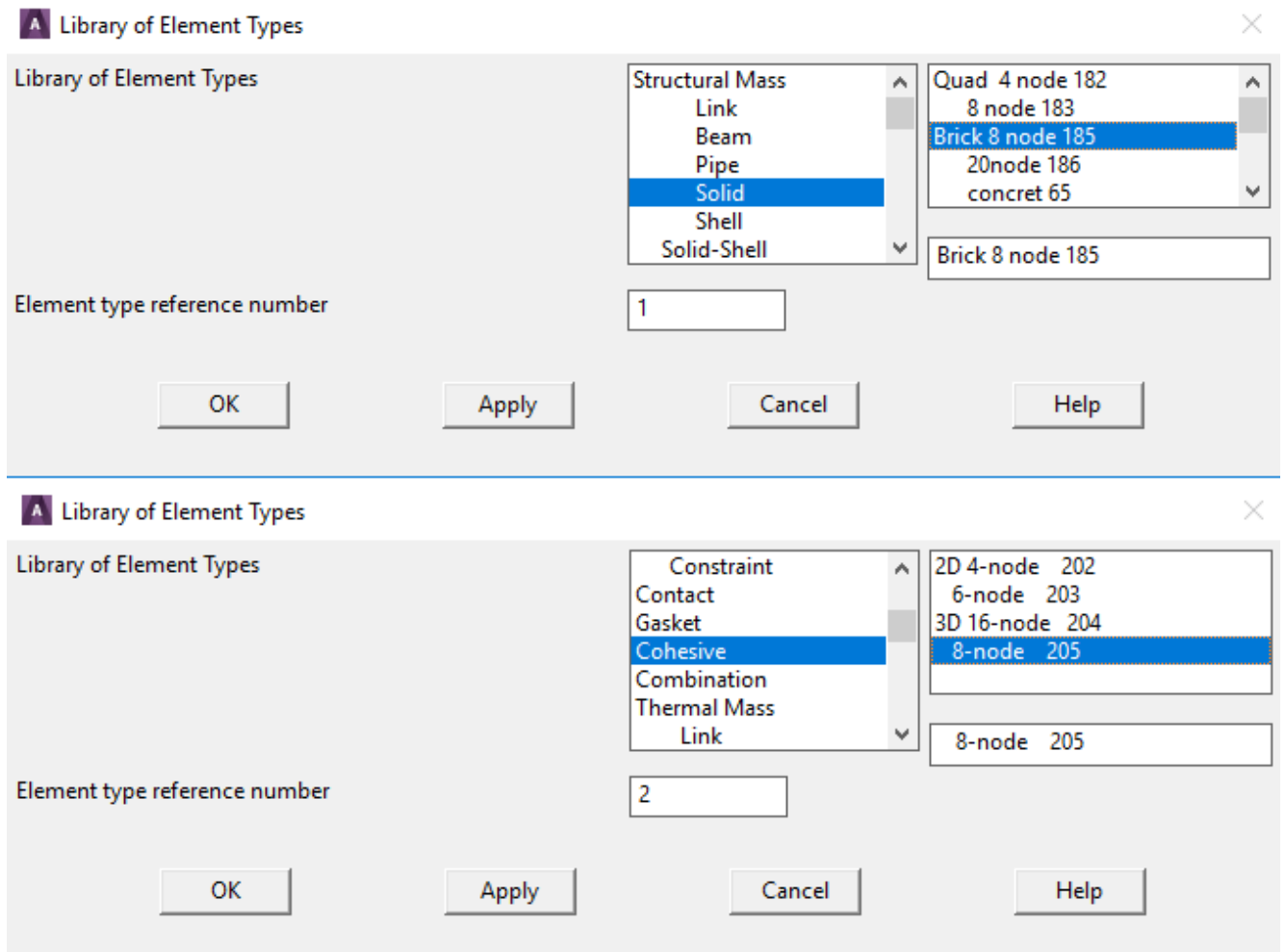


Рисунок 20 – Добавление твердотельных и когезионных элементов

Для решения задачи расслоения применительно к межслоевому росту трещины в слоистых ПКМ используют обычно метод когезионной зоны с использованием специальных элементов интерфейса INTER202-205 (когезионные или интерфейсные элементы – КЭ или ИЭ соответственно), которые располагаются между слоями материала в плоскости роста трещины как показано на рисунке 21.

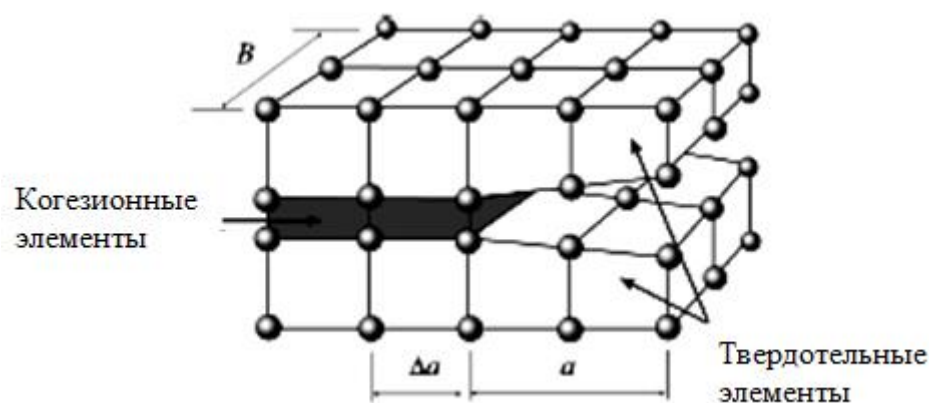


Рисунок 21 - Расположение в плоскости роста трещины когезионных элементов

Между слоями материала располагается слой элементов INTER 20x толщиной в один элемент. Начальная толщина интерфейсного элемента равна нулю (слои материала в начальный момент времени не расслаиваются). Точки интегрирования располагаются на срединной плоскости элементов. Для элементов второго порядка в начальный момент времени при нулевой толщине интерфейсного элемента на серединах ребер нет дополнительных узлов в направлении расслоения.

На рисунке 22 представлены 2D (а, б) и 3D (в, г) конечные интерфейсные элементы в плоско-напряженном состоянии по толщине, осе-симметричные и в плоско-деформированном состоянии. На рисунке 22 (а, б) - 2D 4-х узловой элемент первого порядка INTER202 (а) и 6-ти узловой элемент второго порядка INTER203 (б); (в, г) - 3D 16-ти узловой элемент второго порядка INTER204 (в) и 8-ми узловой элемент первого порядка INTER205 (г).

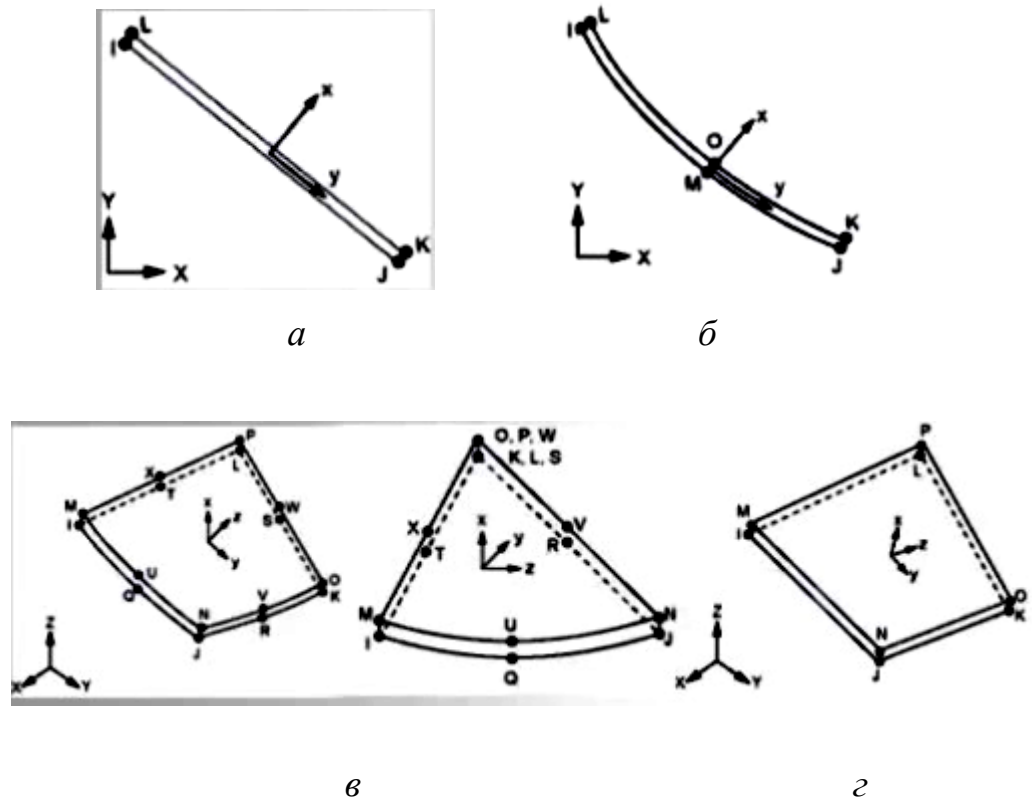


Рисунок 22 - 2D (а, б) и 3D (в, г) интерфейсные элементы

После задания твердотельных и когезионных элементов, вводятся свойства материалов. Свойства материалов также задаются в препроцессоре во вкладке свойства материала => материал модели. Затем выбираются линейные структурные свойства материала и появившейся таблице прописываются необходимые свойства материала, как показано на рисунке 23.

Для проведения моделирования процесса расслоения образца в виде ДКБ и расчетов параметров трещиностойкости в 3D модель с когезионным слоем вводится форма ЗКЗ (экспоненциальная, билинейная и др.), и с помощью командной строки программы задаются экспериментально определенные упругие характеристики материала в различных направлениях по плоскостям (модули Юнга E_{11} , E_{22} , E_{33} , модули сдвига G_{11} , G_{12} , G_{13} и коэффициенты Пуассона ν_{12} , ν_{13} , ν_{23}), параметры ЗКЗ - значения локальной когезионной прочности (σ_{IC}) и локальной деформации (δ_{IC}) (введение данных параметров представлено на рисунке 24) и рассчитанное значение длины когезионной зоны (l_{cz}) как длины когезионного слоя, также являющиеся материальными константами.

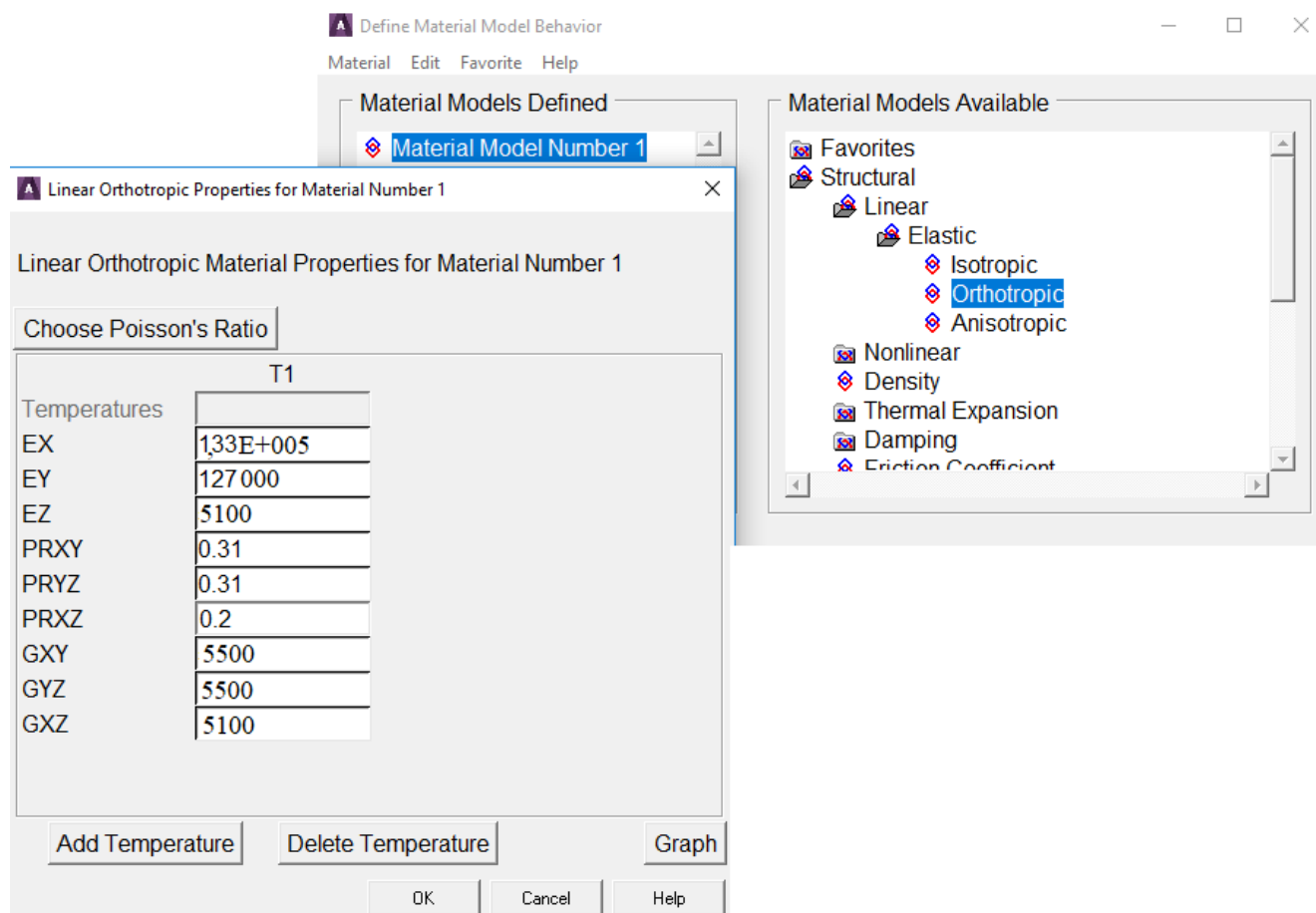


Рисунок 23 – Введение свойств материала

После введения свойств материала, вводится когезионный слой и задаются его свойства. Чтобы разбить когезионный слой на интерфейсные элементы в командной строке прописывается, либо команда E или EGEN, либо команда CZMESH (для удаления элементов команда CZDEL). В работе вводятся два типа ЗКЗ: экспоненциальный и билинейные типы.

Для экспоненциального типа ЗКЗ необходимо вводить команду:

```
>TB,CZM,2,,EXPO>TBDATA,1,TNMAX,GMAX,1000.0)
```

Для билинейного типа ЗКЗ необходимо вводить команду:

```
>TB,CZM,2,,BILI>TBDATA,1,TNMAX,GMAX,C3, C4, C5, C6.
```

Для проверки параметров материала необходимо войти в раздел главного меню препроцессора и во вкладке свойства материалов проверить наличие второго материала, как показано на рисунке 25.

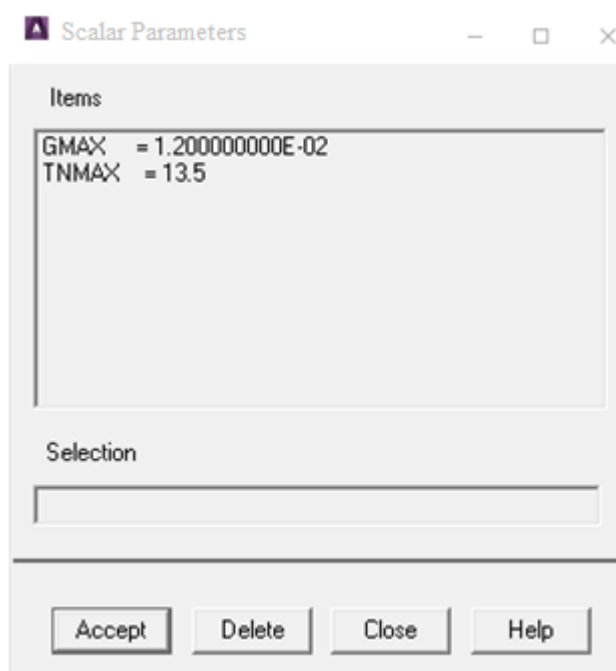


Рисунок 24 – Скалярные параметры ЗКЗ

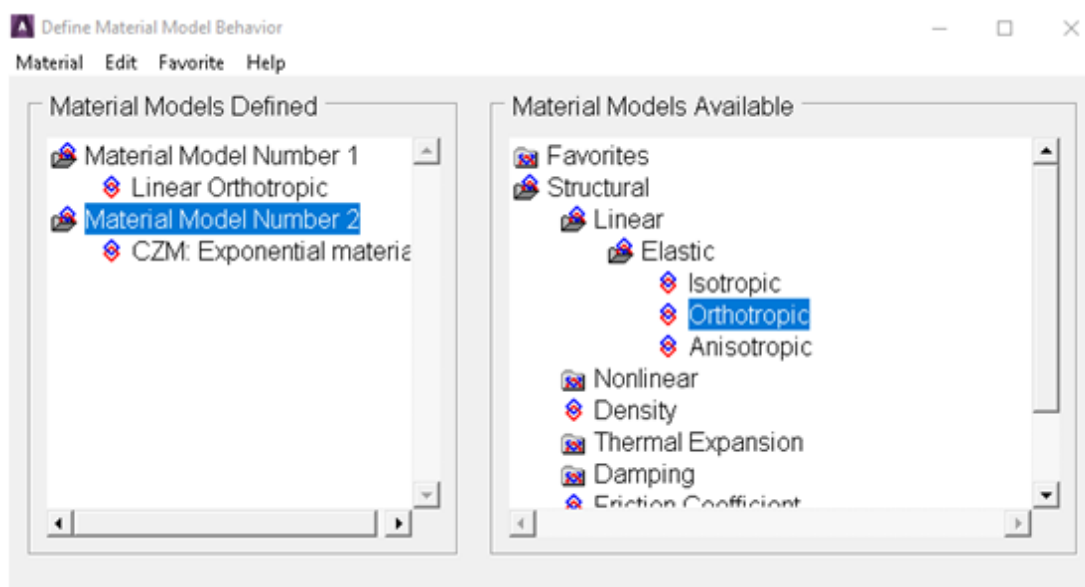


Рисунок 25 – Введение ЗКЗ в численную модель

Команда CZMESH работает с узлами твердотельных элементов, которые моделируют слои основного материала и строит интерфейсные элементы на общих узлах между этими элементами. Для начала необходимо задать два комплекта элементов, моделирующие слои композиционного материала.

Команда CZMESH формирует интерфейсные элементы путем разъединения общих узлов выбранных твердотельных элементов как показано на рисунке 26:

- Тип интерфейсного элемента задается только командой ET;
- Закон расслоения задается набором команд TB,CZM,,,EXPO;
- Команда CZDEL удаляет элементы INTER20x из модели.

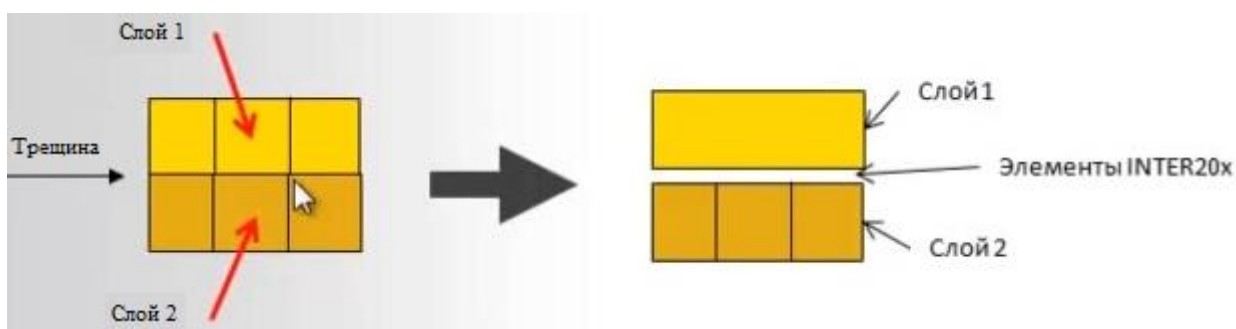


Рисунок 26 - Схема формирования интерфейсных элементов

При моделировании расслоения, т.е. межслоевого роста трещины, в методе МКЗ/МКЭ могут быть применены различные ЗКЗ, чаще всего экспоненциальный и билинейный, причем оба этих метода наиболее физически обоснованы применительно к слоистым ПКМ, поэтому ниже описывается методика расчетов с применением этих ЗКЗ с опцией команды TВОРТ – EXPO и TВОРТ – VIL с общим набором команд TB,CZM,,,EXPO и TB,CZM,2,,,VIL, соответственно.

Вычисление работы раскрытия слоев по нормали ϕ_n осуществляется по формуле 17

$$\phi_n = e\sigma_{\max}\delta_{IC}, \quad (17)$$

где e – основание натурального логарифма.

Метод МКЗ/МКЭ с билинейным и экспоненциальным ЗКЗ применяются совместно с интерфейсными элементами INTER20x. При этом требуется задание параметров для элементов INTER20x (TВОРТ – VIL и TВОРТ – EXPO). Интерфейсные элементы позволяют моделировать зону расслоения, применяя

команду TB,CZM,,,ВОРТ с командой EXPO и BILI для задания экспоненциального и билинейного закона поведения материала и командой TBDATA для задания параметров, приведенных в таблице 13 и 14.

Таблица 13 – Параметры модели с экспоненциальным ЗКЗ

Параметр	Обозначение	Описание
C ₁	σ_{\max}	Нормальное напряжение расслоения, Па
C ₂	δ_{IC}	Величина деформации по нормали к поверхности при напряжении, когда отсутствует сдвиг слоев.

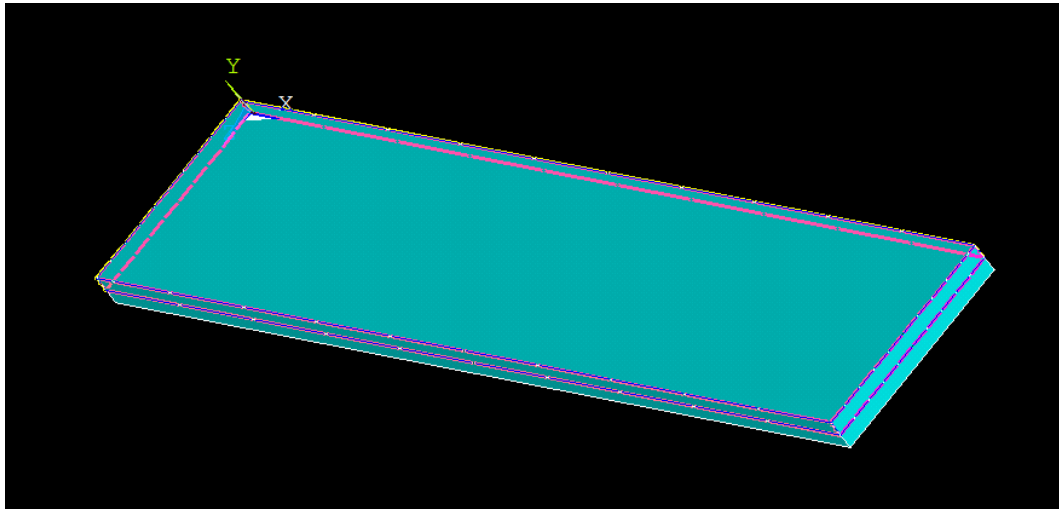
Таблица 14 – Параметры модели с билинейным ЗКЗ

Параметр	Обозначение	Описание
C ₁	σ_{\max}	Максимальное нормальное напряжение расслоения, Па
C ₂	$\delta_{I \max}$	Максимальная величина деформации по нормали к поверхности при напряжении, при отсутствии сдвига слоев.
C ₃	τ_{\max}	Сдвиговые напряжения расслоения, Па
C ₄	$\delta_{II \max}$	Максимальная величина деформации сдвига, при отсутствии нормального разрыв слоев, Па
C ₅	α	Отношение $\delta_{IC} / \delta_{I \max}$ или $\delta_{IIc} / \delta_{II \max}$
C ₆	β	Безразмерный параметр

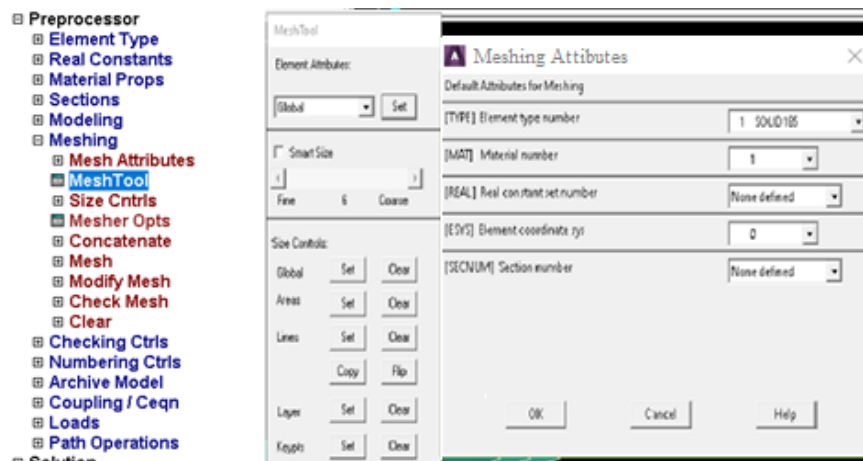
Для расчёта использовались экспериментально определённые параметры ЗКЗ для каждого типа ПКМ приведённые в таблицах 13 и 14 (параметры C1 и C2).

После введения когезионного слоя, необходимо разбить полученную ДКБ и когезионный слой на конечные элементы. Для разбиения ДКБ на необходимое

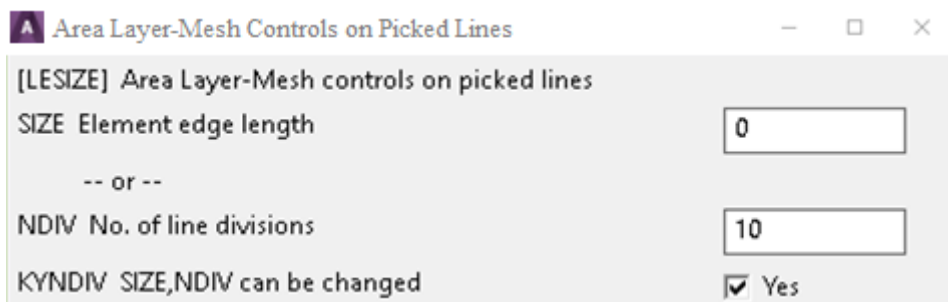
число конечных элементов нужно выделить границы двухконсольной балки с помощью функции Mesh tool в препроцессоре, и с помощью кнопки атрибуты элементов настраиваются параметры конечно элементной сетки. Данный алгоритм строит элементную сетку на самой модели ДКБ, как представлено на рисунке 27 а-2.



а



б



в

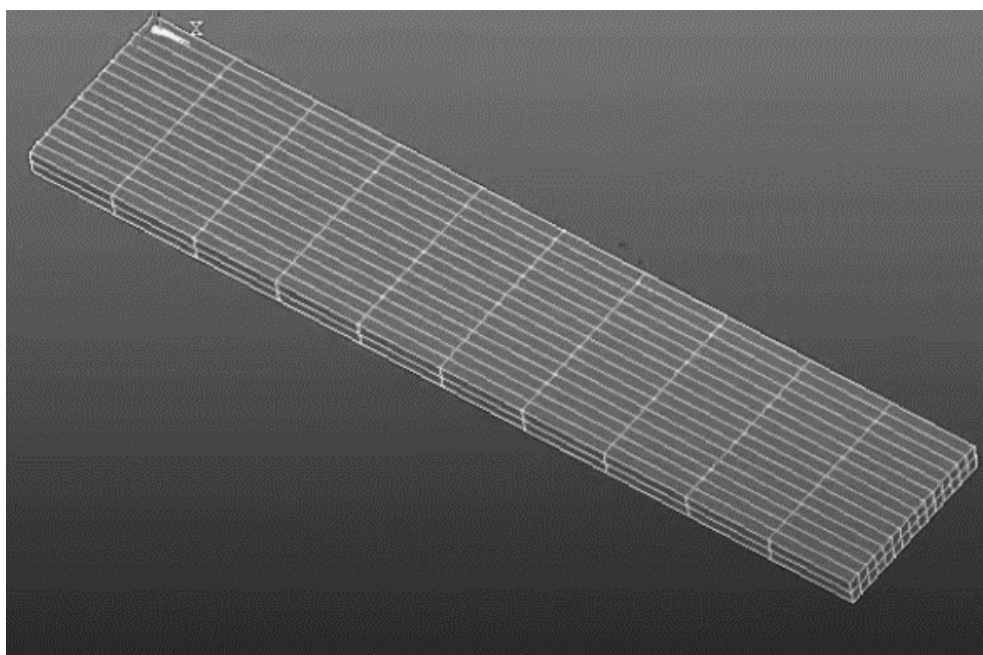
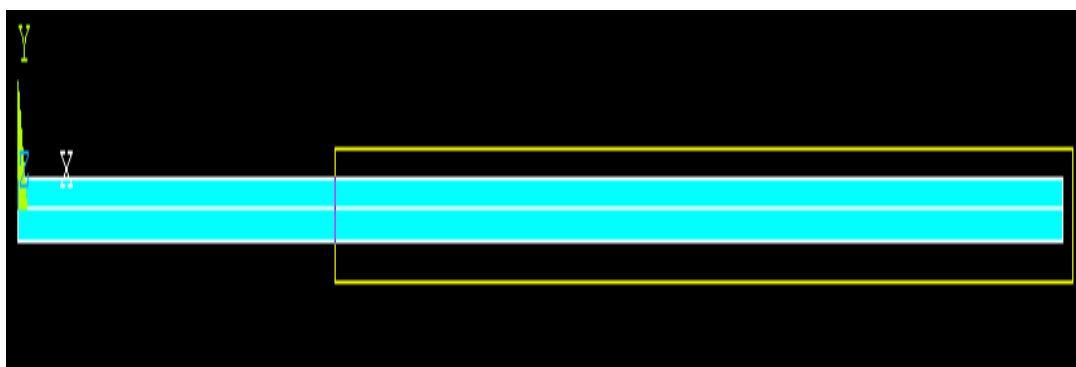
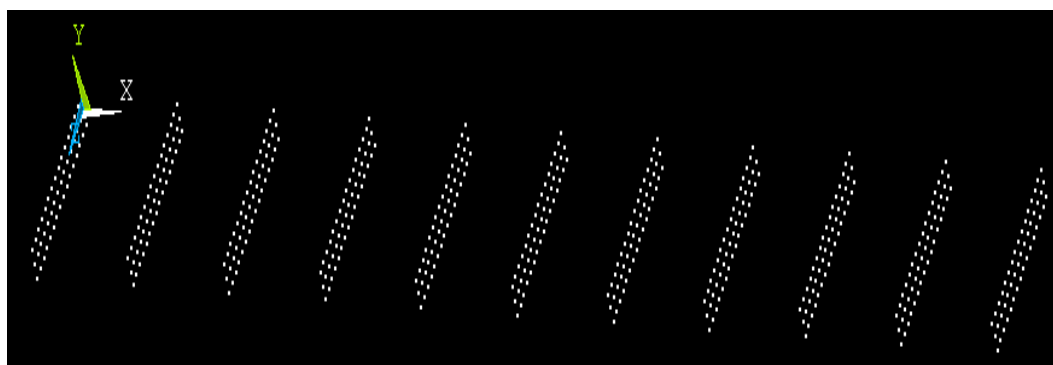
*г*

Рисунок 27 – Этапы разбиение твердотельных элементов ДКБ на КЭ

После разбиения твердотельных элементов Solid 185 на конечные элементы необходимо разбить когезионный слой на конечные элементы. С помощью функции Mess tool выделяем границу контакта верхней и нижней части ДКБ. Следующим этапом является выделение всех узлов на границе двух частей ДКБ, т.е. задается место сцепления двух полубалок, как показано на рисунке 28 *а* и *б*. Теперь модель представляет из себя монолитный конструкт, в зоне сцепления.

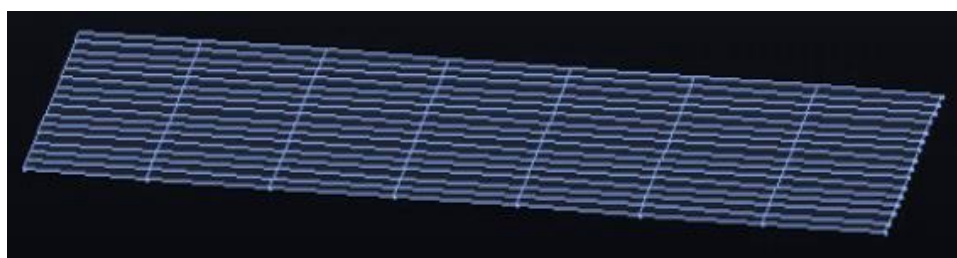
*а*



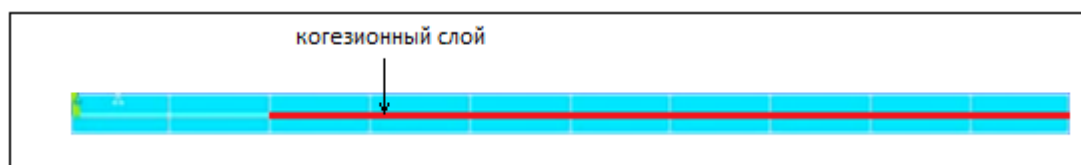
б

Рисунок 28 – Этапы выделения узлов в модели ДКБ

Следующим этапом является связывание этих узлов с когезионным слоем с помощью функции `Numbering ctrl's => Merge items`. После связывания узлов и элементов с помощью командной строки задается функция `CZMESH,,1,Y,0`, которая позволяет разбить когезионный слой на конечные элементы. В результате, задается взаимодействие между внутренними поверхностями геометрической модели и расположенным между ними когезионным слоем с разбивкой слоя на конечные интерфейсные (когезионные) элементы (ИЭ), как показано на рисунке 29 а и б.



а



б

Рисунок 29 – Разбивка на конечные интерфейсные (когезионные) элементы (ИЭ) когезионного слоя (а) и его общий вид в модели образца типа ДКБ (б)

Следующим этапом является задания граничных условий и приложение нагрузок. Все эти функции реализованы с помощью вкладки Solution. В разделе Solution выбирается функция Define loads и выбираются части ДКБ к которым прикладывается нагрузка и те части которые фиксируются, чтобы уменьшить вероятность ошибки при проведении моделирования и смоделировать процесс испытаний на разрывной машине. Поэтапный процесс приложения нагрузок и фиксации конца ДКБ представлен на рисунке 30.

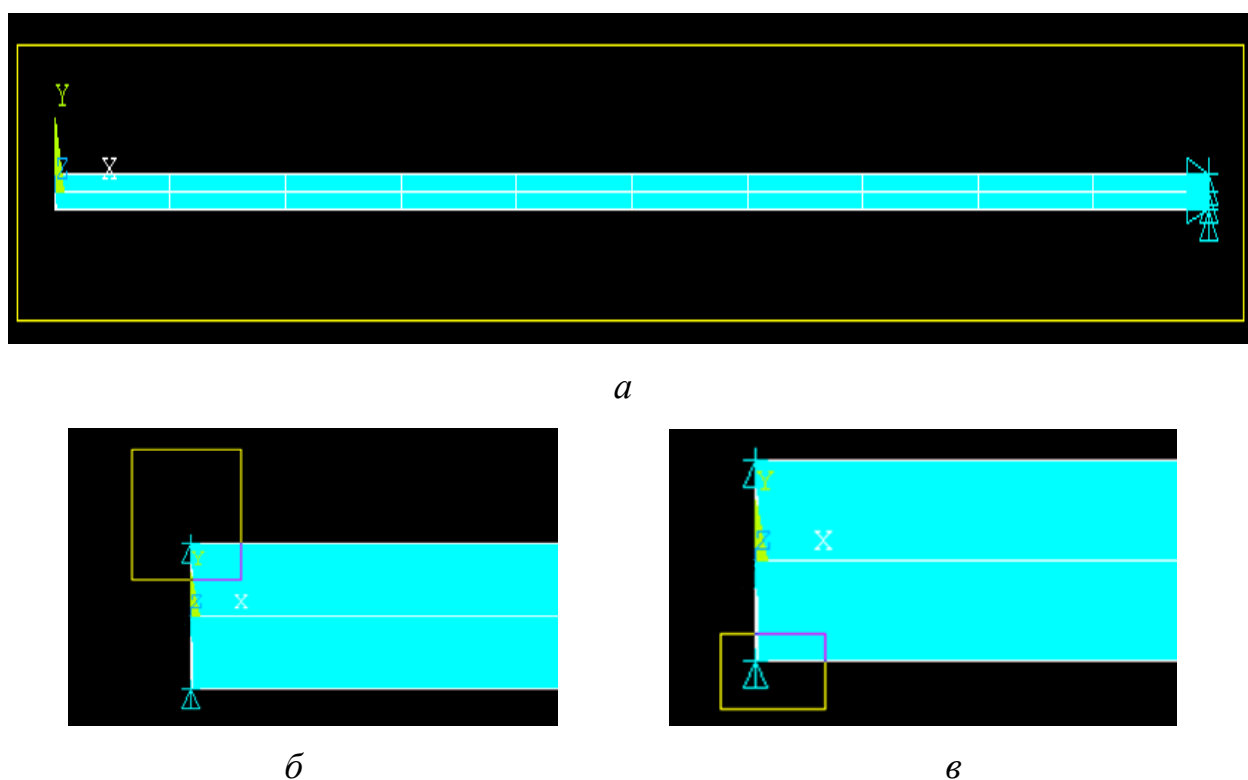


Рисунок 30 – Фиксация конца ДКБ (а) и приложение нагрузок к верхней (б) и нижней части (в) ДКБ

Заключительным этапом создание конечно-элементной модели является задания параметров моделирования: количество шагов моделирования, частота сохранения результатов и варианты анализа, как представлено на рисунке 31.

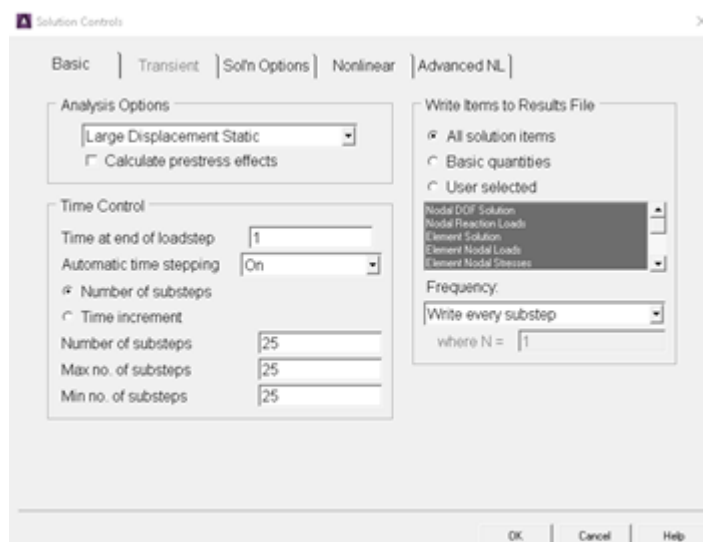


Рисунок 31 – Параметры условий проведения моделирования расслоения ДКБ

Затем после введения всех необходимых параметров запускается процесс моделирования расслоения ДКБ с когезионным слоем. Объем расчетов и скорость моделирования зависят от количества КЭ и ИЭ заложенных в модель. Соответственно, чем больше элементов заложено, тем более длительным и массивным получится результат, но в данном варианте необходимо найти оптимальное решение, т.е. соотношение количества элементов в модели и результатами моделирования. В процессе моделирования отображается окно контроля сходимости результатов, как показано на рисунке 32.

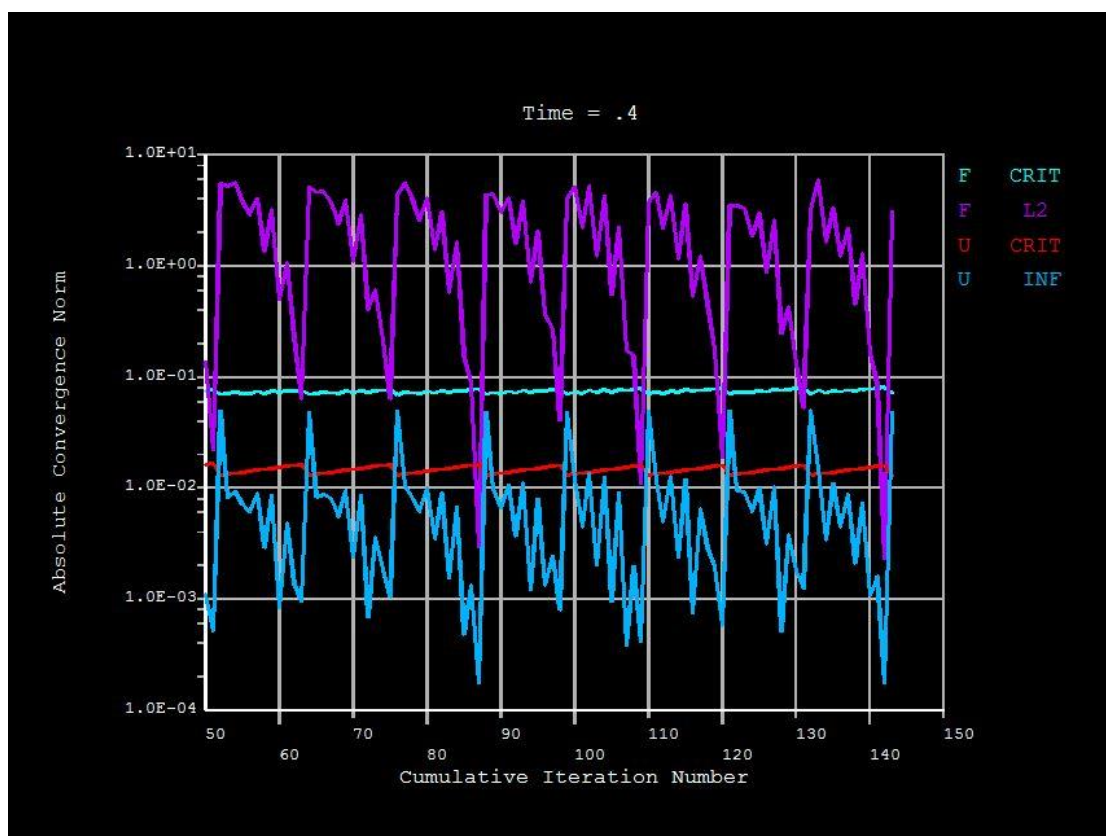
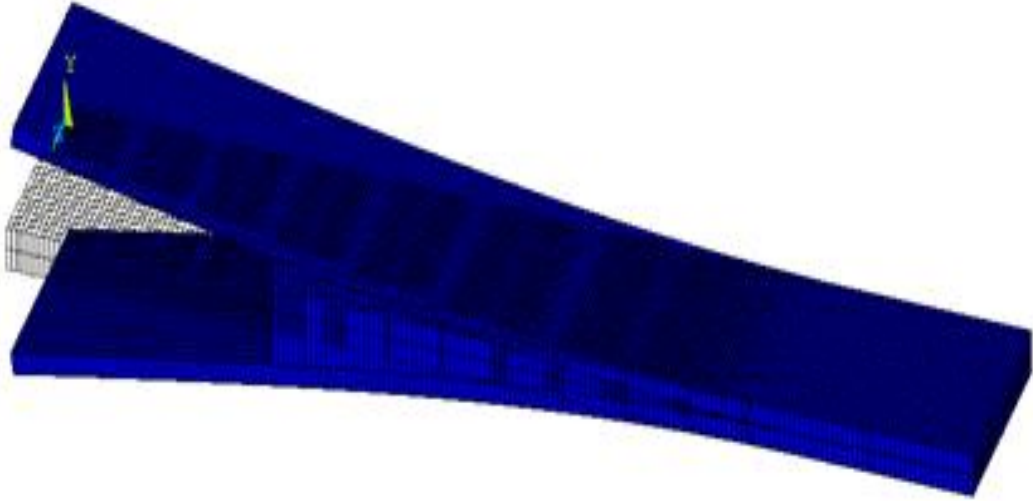


Рисунок 32 – Окно сходимости результатов в процессе моделирования

После завершения моделирования виртуального расслоения ДКБ (рисунок 33 а) в постпроцессоре программного комплекса анализируются результаты вычислений. После того, как модель снова собрана в изначальное не раскрытое состояние, необходимо построить график зависимости нагрузки на края трещины от величины раскрытия трещины (рисунок 33 б). 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) рисунок 33 в, г.

DISPLACEMENT
 STEP=1
 SUB=25
 TIME=1



a

The screenshot displays the ANSYS software interface with several windows open:

- Results Viewer - file.rst**: Shows the 'Y-Component of force' result.
- Time History Variables - file.rst**: Contains a 'Variable List' table and a 'Calculator' window.
- Multiple Entities**: A dialog box indicating 'There are 2 Nodes at this location. Picked Node is 805. Continue picking or select OK, PREV or NEXT'.
- Node for Data**: A dialog box for selecting data options, showing 'Count = 1', 'Maximum = 1', 'Minimum = 1', and 'Node No. = 805'.

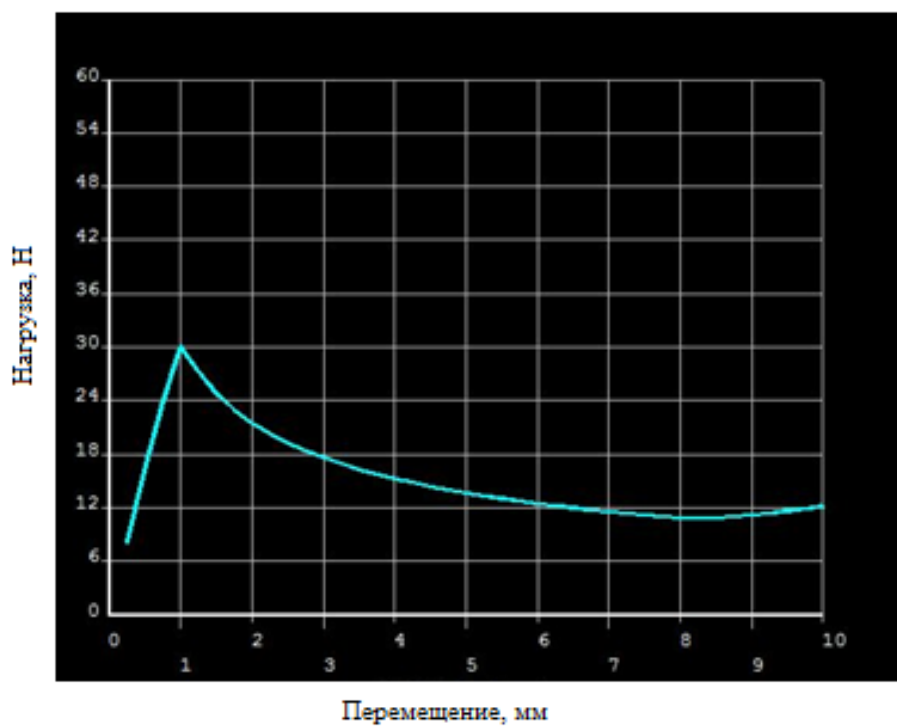
The 'Variable List' table in the Time History Variables window is as follows:

Name	Element	Node	Result Item
TIME			Time

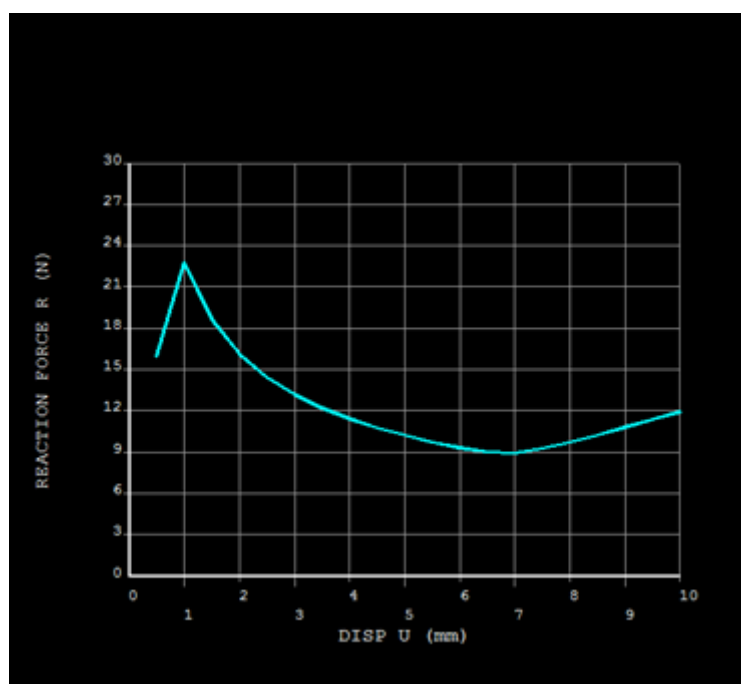
The Calculator window shows the following table of mathematical functions:

()			
MIN	CONJ	e ^x		
MAX	a+ib	LN	7	8
RCL		LOG	4	5
INS MEM		SQRT		
ABS	ATAN	x ²	1	2
	INT1	IMAG		
INV	DERIV	REAL	0	

b



6

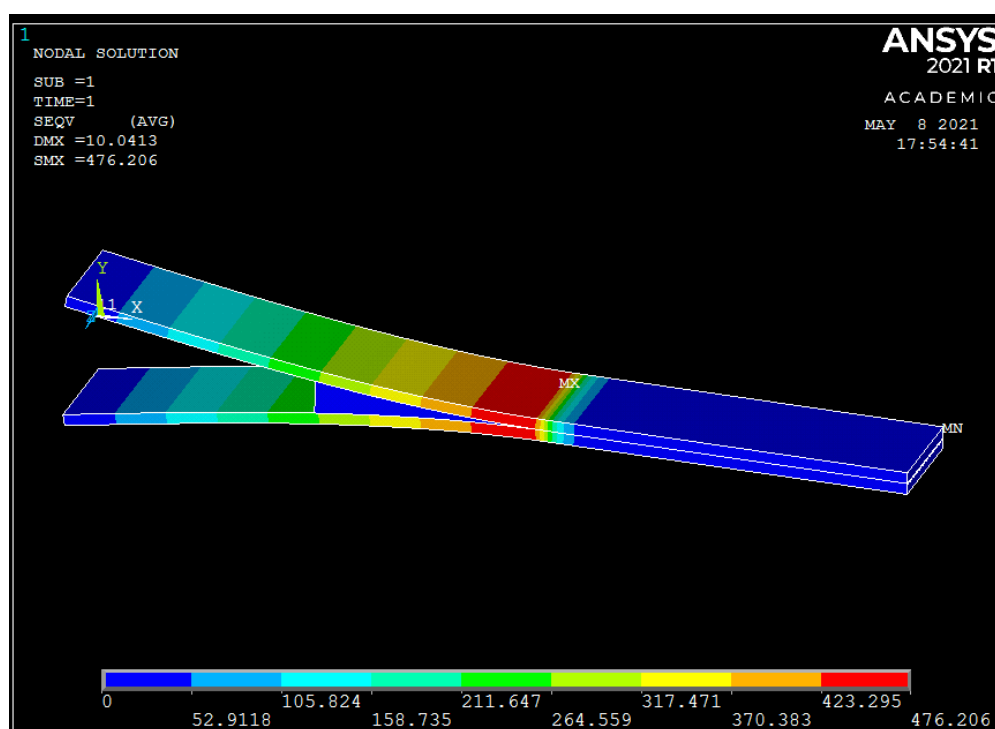


2

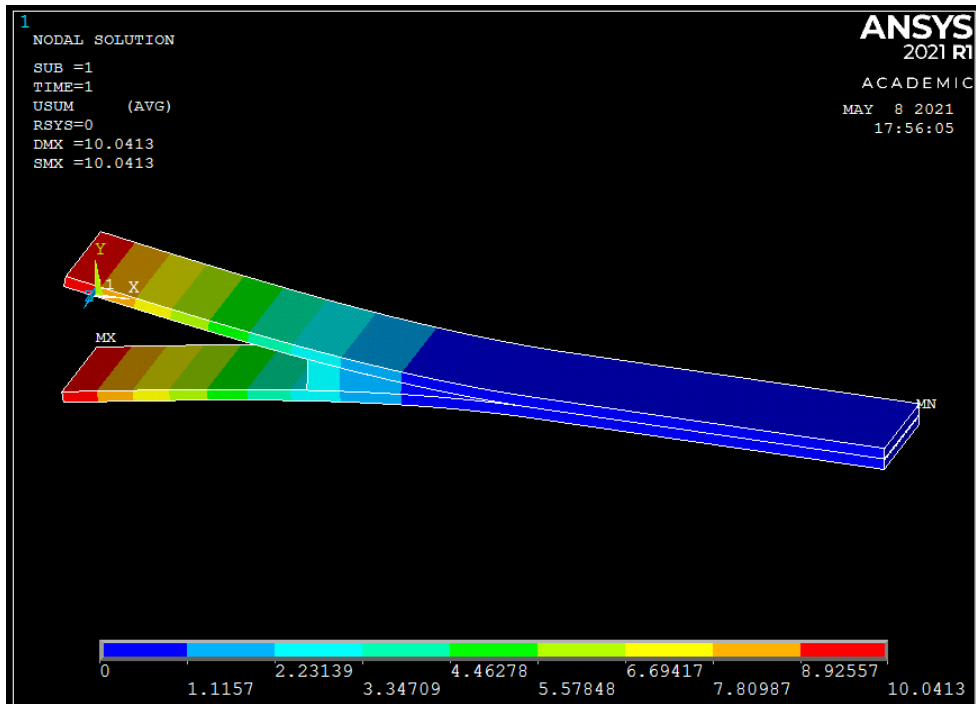
Рисунок 33 – Виртуальное расслоение ДКБ (а), функция вывода зависимости усилие-раскрытие (б), экспоненциальная зависимость усилие-раскрытие (в) и билинейная зависимость (г)

Визуализация результатов расчета на элементах INTER20х достигается просмотром нормальных напряжений в /POST1 или /POST26 SS, ХиSS, ХУ рисунок 34 а. Деформированное состояние ДКБ, представлено на рисунке 34 б.

Узнать численное значение напряжения в когезионной зоне в любой точке, можно с помощью постпроцессора программы и функции результаты на участке ДКБ (для вывода изображения используются команды PLxSOL, PRxSOL или ESOL.), затем выбирается когезионный элемент и выводится распределение напряжений в когезионном слое, как показано на рисунке 35 а. На рисунке 35 б представлено распределение нормальных напряжений на элементах INTER205, расположенных по длине когезионной зоны, где разрушенные элементы - с нулевыми напряжениями.

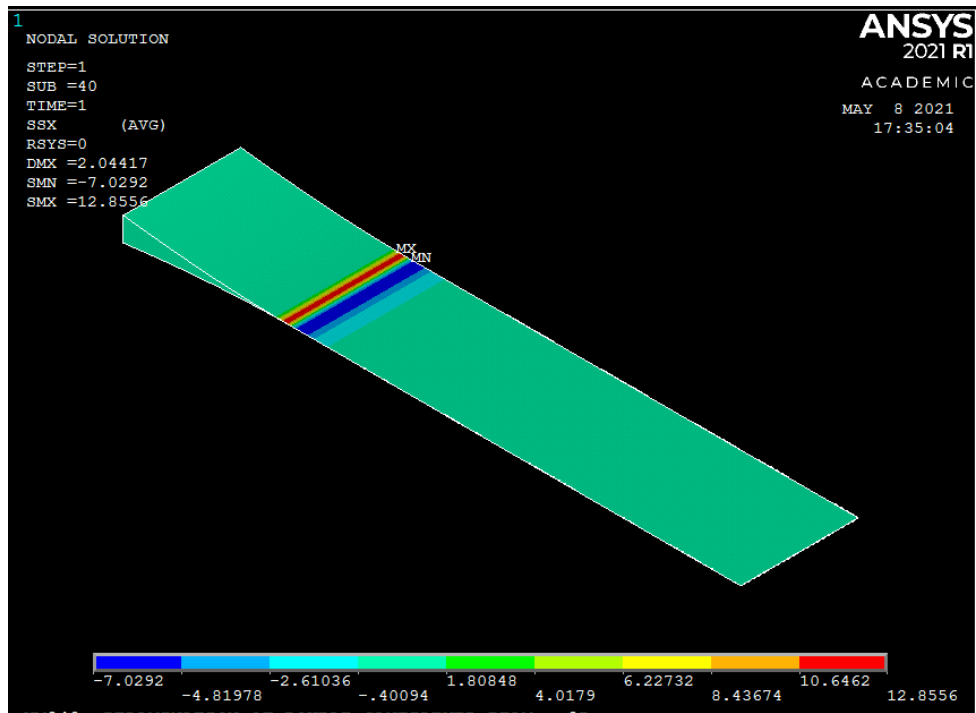


a

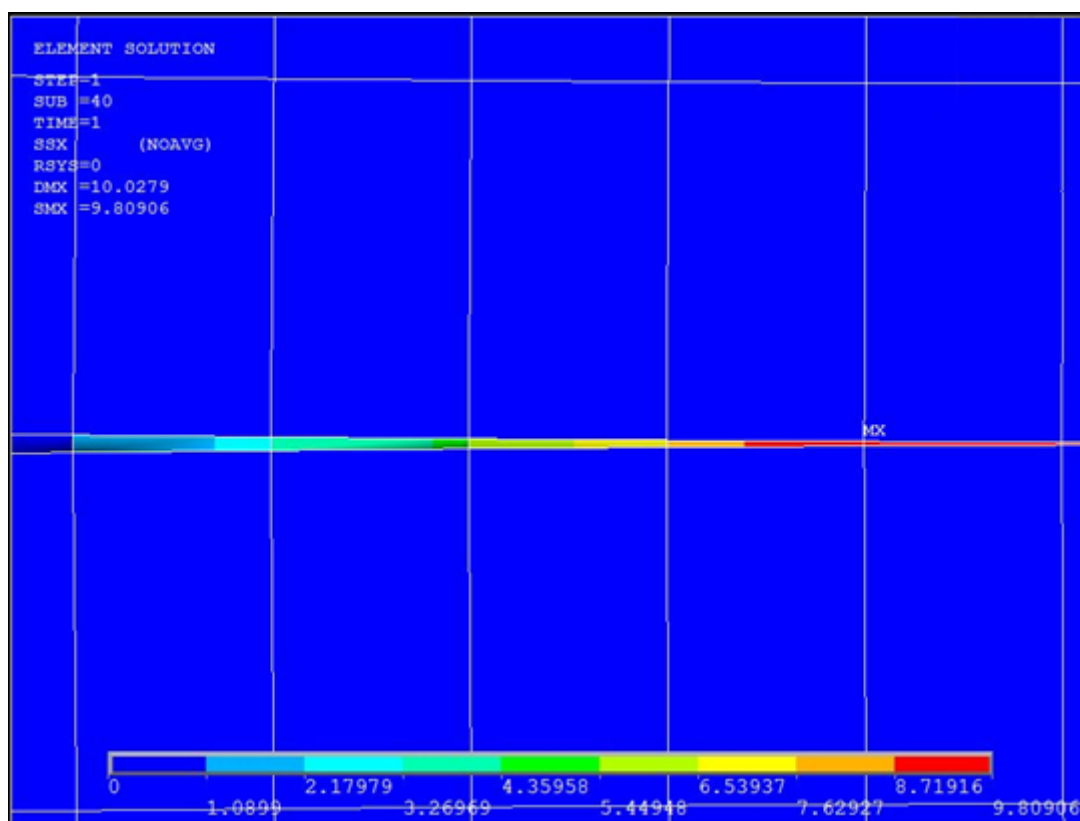


б

Рисунок 34 – Распределение нормальных напряжений по оси Y (а) и деформирование состояние ДКБ (б)



а



б

Рисунок 35 – Распределение напряжений в когезионном слое по оси X (а) и распределение нормальных напряжений в когезионной зоне при моделировании расслоения (б) в PostProcANSYS

Контактные нормальные и касательные напряжения можно просмотреть командами CONT, PRES и CONT, SFRIC. Расслоение и скольжение - через команды CONT, GAP и CONT, SLIDE.

Для элементов INTER20х, работа по расслоению принимается одной и той же для режимов ModeI и ModeII. Для контактных элементов CONTA17х, значение работы, затраченной на расслоение вычисляется отдельно. Элементы INTER20х не учитывают повреждаемость, в случае циклических нагрузок. Экспоненциальный закон расслоения численно более устойчив и стабилен чем билинейный закон.

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.

В настоящее время, применительно к моделированию расслоения слоистых ПКМ, не существует единой точки зрения относительно необходимого минимального количества конечных ИЭ [65-68]. Очевидно, что их должно быть больше двух, но сколько конкретно - зависит от расчетных мощностей и необходимой точности вычислений [69]. Предлагается определять минимального число когезионных ИЭ по количеству ИЭ (N_e), укладываемых по длине КС. Оно рассчитывается по формуле 18

$$N_e = l_{cz} / l_e, \quad (18)$$

где

l_{cz} – длина когезионной зоны для данного ПКМ, рассчитанная по экспериментальным данным и физической модели Баренблатта (см. уравнение 9);

l_e – выбранная длина конечного ИЭ. Минимальные значения длины и числа ИЭ, которые обеспечивают наилучшую сходимость расчетных и экспериментально определенных параметров трещиностойкости, и являются оптимальными.

Выводы по главе III

Разработана методика численного расчета закономерности изменения нагрузки по моде I на края трещины с увеличением ее раскрытия для 3D конечно-элементной модели критического роста трещины в двухконсольной балке с имплантированным билинейным и экспоненциальным законом когезионной зоны.

Глава IV ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВОЙСТВ СЛОИСТЫХ ПКМ

4.1 Определение модуля упругости при растяжении

В таблице 15 представлены значения модуля упругости при растяжении для каждого типа ПКМ. На рисунке 36 представлены образцы, полученные из СК-ПКА.

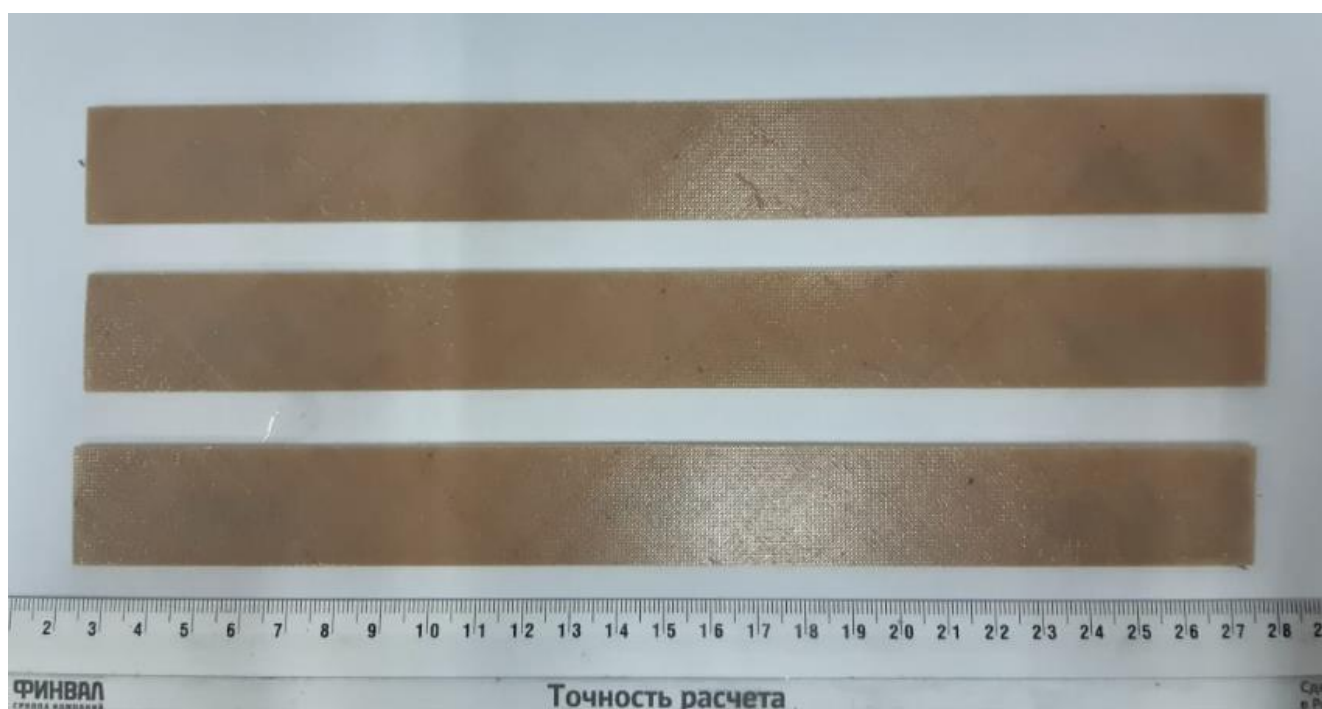


Рисунок 36 – Образец для испытаний на растяжение из СК-ПКА

Таблица 15 – Модули упругости при растяжении исследуемых материалов

Характеристика	УК-ЭА	УК-ПЭЭК	СК-ПКА	ОК-ПКА
E_{11} , ГПа	128±5	133±5,5	34±2	54±2
E_{22} , ГПа	115±5	127±5,5	2,5±0,2	3,0±0,2

4.2 Определение межслоевой трещиностойкости

Образцы для испытаний 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, свободная часть образца оставалась в свободном состоянии, образец представлен на рисунке 37.

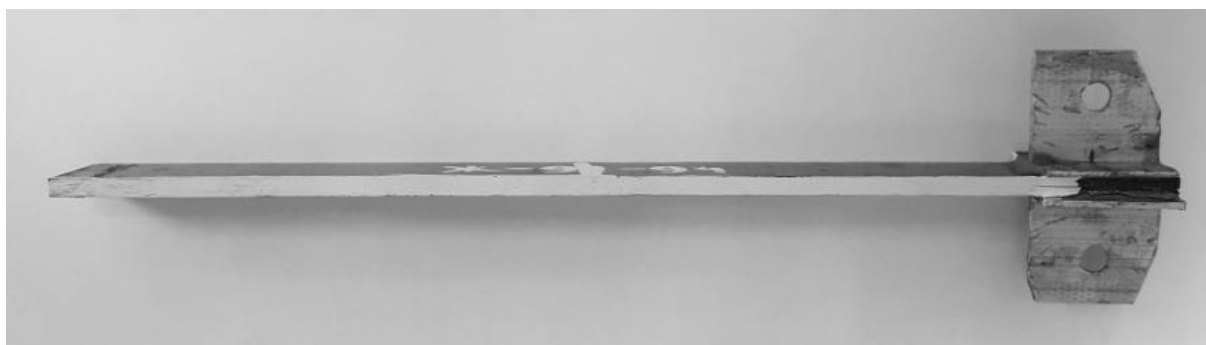


Рисунок 37 – Образец для испытаний на G_{IC}

Испытания проводили в помещении при температуре и относительной влажности окружающего воздуха при стандартных атмосферных условиях. С помощью разрывной машины WDW-10E, оснащённой электронной аппаратурой для измерения усилий и перемещений (деформаций) при скорости движения траверсы 1 мм/с раскалывали образцы (рисунок 38), записывая диаграмму разрушения усилие P - перемещение концов (глобальное раскрытие) трещины Δ . Начальную длину трещины и изменение ее длины измеряли с помощью катетометра В630. При увеличении длины трещины более чем на 50 мм испытания прекращались. На рисунке 39 *а* и *б* показаны примеры кривых разрушения для 2-х типов слоистых ПКМ (УК-ПЭЭК и ОК), полученные в результате эксперимента.

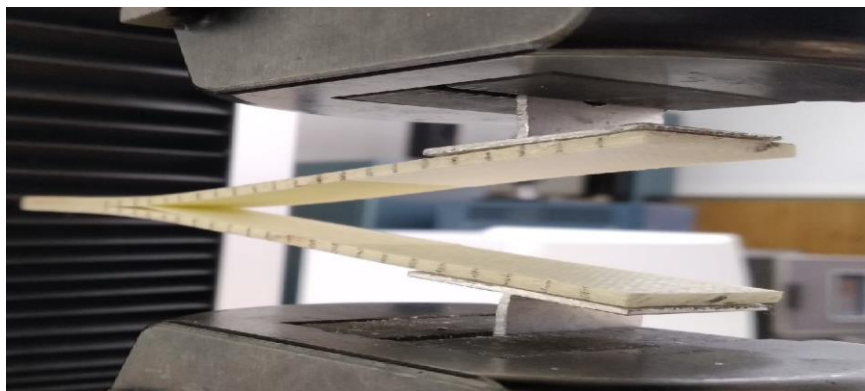


Рисунок 38 – Испытания на расслоение ДКБ для определения G_{IC}

По максимальному усилию P_C расслаивания и начальной длине трещины a_0 рассчитывали параметр межслоевой трещиностойкости как критического значения интенсивности высвобождения упругой энергии при росте трещины по моде I (G_{IC}) в терминах ЛУМР по формуле 12.

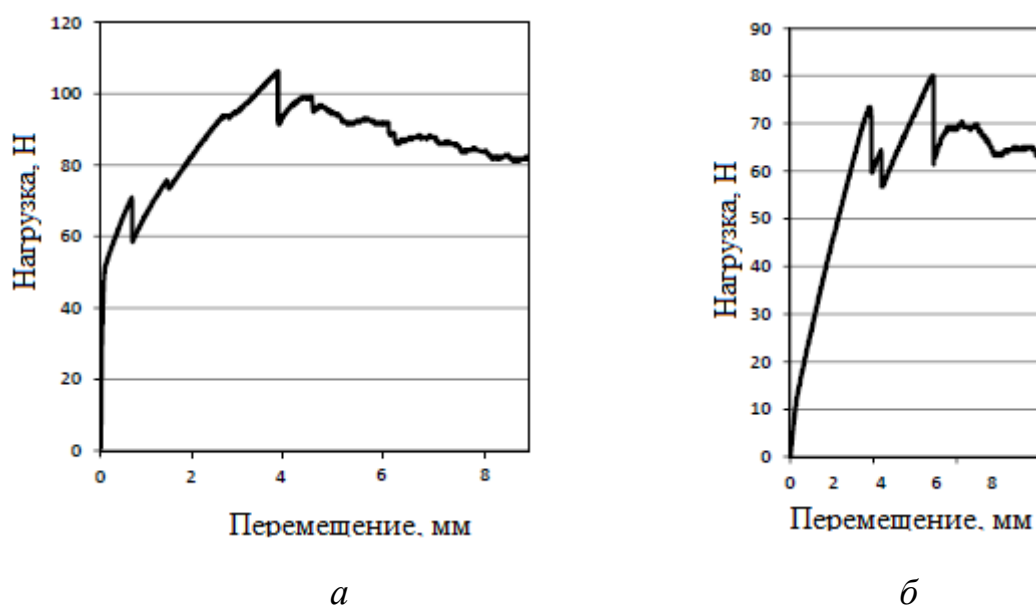


Рисунок 39 – Примеры экспериментально полученных зависимостей
усилие-перемещение для УК-ПЭЭК (а) и ОК (б)

На рисунке 40 представлены обработанные диаграммы усилие-раскрытие трещины ($P-\Delta$) в процессе расслоения образцов типа ДКБ из всех исследуемых типов слоистых ПКМ.

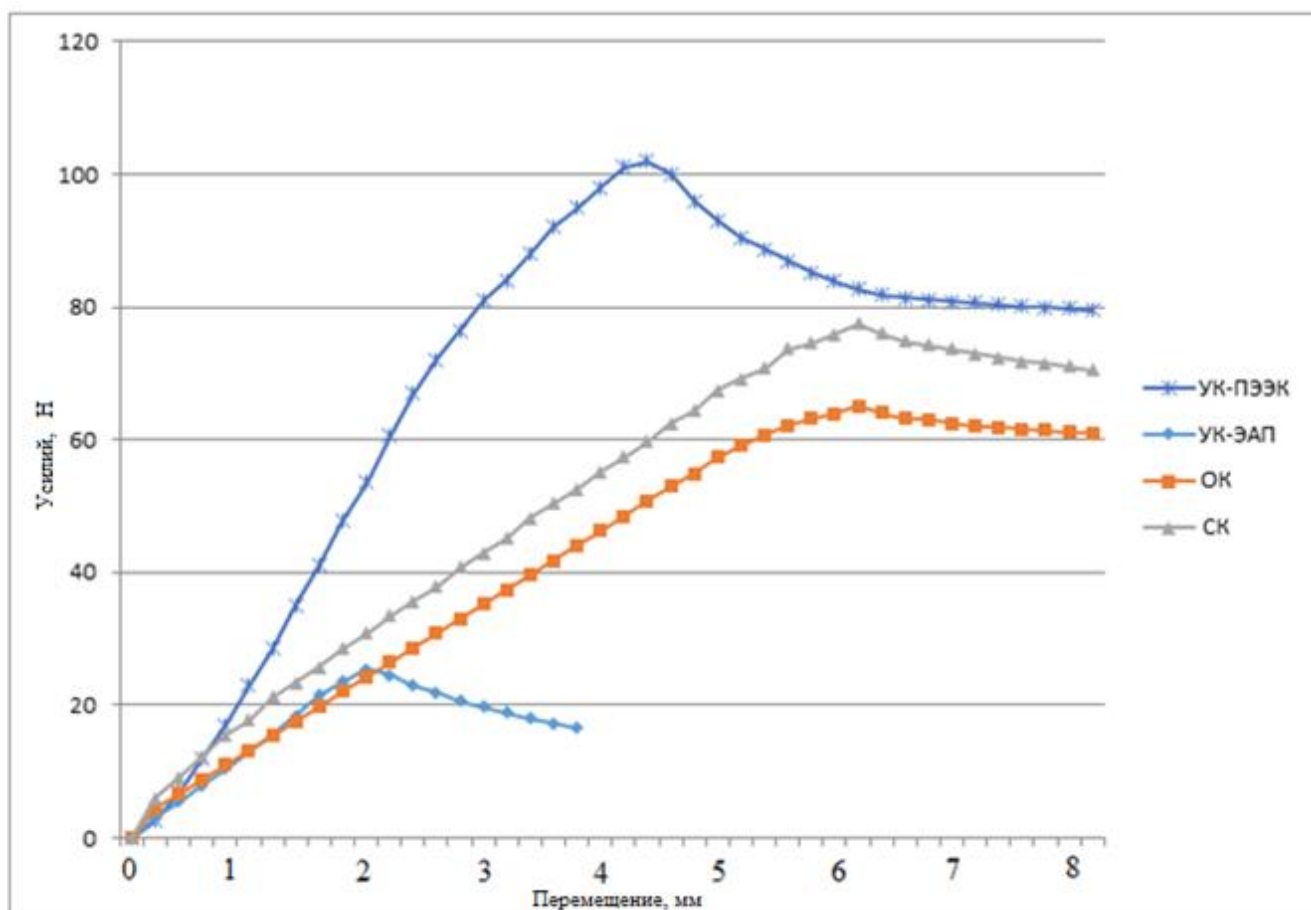


Рисунок 40 – Обработанные диаграммы усилие-раскрытие трещины (P-Δ) в процессе расслоения образцов типа ДКБ из 4-х типов слоистых ПКМ после обработки результатов

При проведении испытаний на расслоение ДКБ происходят так называемые «скачки», т.к. рост трещины происходит неравномерно вследствие неравномерности структуры и расположения слоев ПКМ. На рисунке 41 а-в представлены структуры, полученные после проведения испытаний. При испытаниях образца, представленного на рисунке 41 а, рост трещины наиболее плавный, и в результате на диаграмме усилие-раскрытие можно увидеть более пологую функцию чем при испытании образца на рисунке 41 б.

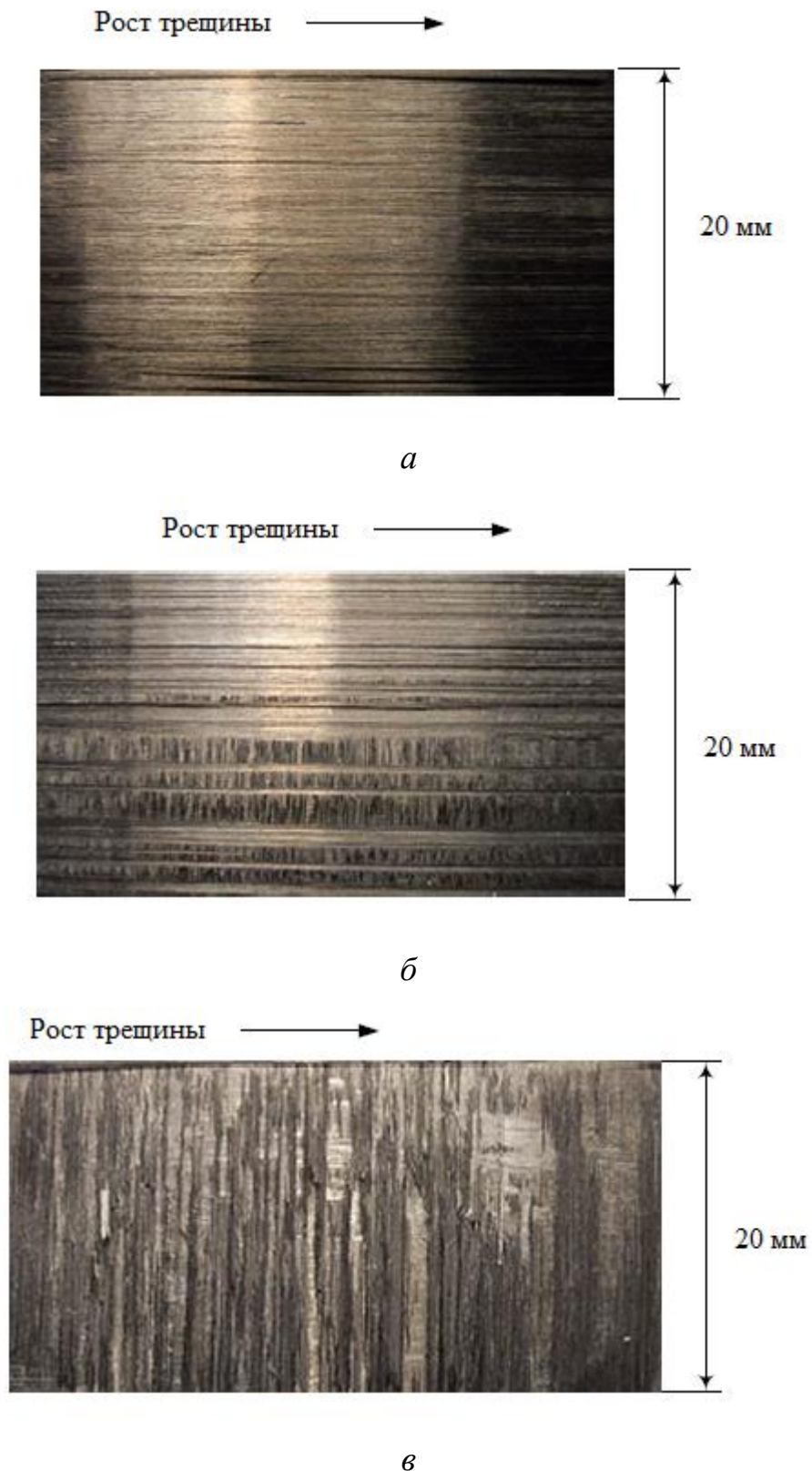


Рисунок 41 – Структуры, полученные после испытаний ДКБ из УК-ПЭЭК для определения G_{IC} на разных участках (*a* – слой 0° , *б* – два слоя 0° и 90° , *в* – слой 90°)

В таблице 16 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 ± 4 Дж/м².

Таблица 16 – Экспериментально полученные параметры G_{IC} для каждого типа ПКМ

Характеристика	УК-ЭАП	УК-ПЭЭК	СК-ПКА	ОК-ПКА
G_{IC} , Дж/м ²	210±3	352 ± 4	324 ± 4	286 ± 4

4.3 Определение локальной межслоевой когезионной прочности

Для экспериментального определения локальной межслоевой когезионной прочности при нормальном отрыве слоистых ПКМ (σ_{IC}) использовали образцы размером 70×40×4 мм, вырезанные из пластин меньшего размера с модельной когезионной зоной размером 10x10 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.

На рисунке 42 представлены фотографии общего вида образца для испытания на когезионную прочность (*a*) и контактных площадок после межслоевого разрыва образцов СК и УК (*б* и *в*) соответственно. Фотографии получали с помощью оптического микроскопа Carl Zeiss Axio Lab.A1.

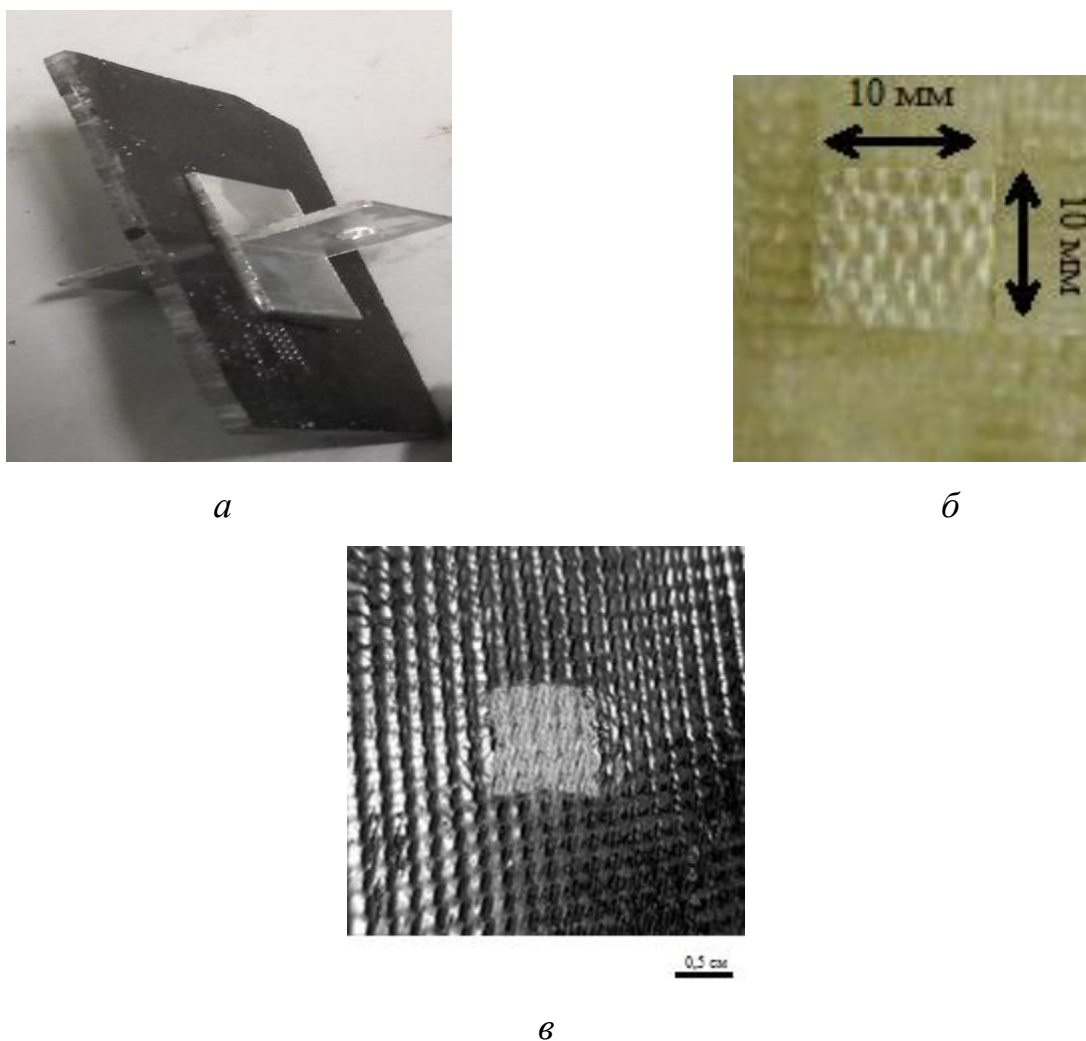


Рисунок 42 – Фотографии общего вида образца (*a*) и поверхности слоев образцов после разрыва локальной зоны сцепления в СК (*б*) и УК (*в*)

В таблице 17 приведены результаты испытаний при локальном межслоевом разрушении (максимальные напряжение σ_{1C} , деформация при максимальной нагрузке δ_{1C} , максимальное раскрытие δ_{max} , а также рассчитанные по модели Баренблатта (уравнение 9) значения длины когезионной зоны l_{cz}) для каждого типа ПКМ.

Таблица 17 – Экспериментально полученные параметры ЗКЗ для каждого типа ПКМ

Характеристика	УК-ЭАП	УК-ПЭЭК	СК-ПКА	ОК-ПКА
σ_{IC} , МПа	10,7±0,3	28,1 ± 0,6	21,5 ± 0,6	17,6 ± 0,4
δ_{IC} , МКМ	7,3	4,6	5,6	6,0
δ_{max} , МКМ	19,8	12,5	15,2	16,3
lcz , мм	3,6	0,89	0,96	1,1

Выводы по главе IV

1. Выполнен комплекс экспериментальных исследований и получены новые данные о влиянии состава ПКМ на трещиностойкость слоистых ПКМ. Экспериментально получены зависимости усилие-раскрытие трещины в процессе расслоения образцов типа ДКБ из 4-х типов слоистых ПКМ и по ним рассчитаны критические значения интенсивности высвобождения упругой энергии при росте трещин.

2. Выявлено, 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.

3. Установлено, что трещиностойкость термопластичного углекомпозиата больше в 1,6 раза по сравнению с углекомпозиатом на основе сетчатой эпоксидной матрицы и составляет 352 Дж/м². Трещиностойкость ПКМ на основе ПКА, армированного непрерывными стеклянными волокнами, больше в 1,13 раза по сравнению с ПКМ на основе армированного органическими волокнами ПКА и составляет 324 Дж/м².

4. Впервые экспериментально получены данные о критических параметрах закона когезионной зоны: локальной межслоевой прочности σ_{IC} и деформации при

максимальной нагрузке δ_{IC} , а также ее длине l_{K3} для органо-, стекло- и углекомполитов на основе эпоксидной, ПЭЭК и ПКА матриц. Выявлены закономерности изменения этих параметров, в зависимости от природы входящих в ПКМ компонентов.

5. Проведен цикл испытаний на растяжение образцов в виде пластин, получены новые экспериментальные данные по модулю упругости слоистых ПКМ на основе различных типов армирующих волокон и матриц.

**Глава V ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ К РАССЛОЕНИЮ
РАЗЛИЧНЫХ ПО СОСТАВУ АРМИРОВАННЫХ СЛОИСТЫХ ПКМ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО ОПРЕДЕЛЕННЫХ
ПАРАМЕТРОВ ЗКЗ И В СРАВНЕНИИ С ЭКСПЕРИМЕНТЕЛЬНЫМИ
ДАННЫМИ**

В таблице 18 обобщены необходимые для численного моделирования по разработанной методике экспериментально полученные значения свойств (модулей Юнга E_{11} , E_{22} , критической интенсивности высвобождения упругой энергии (G_{IC}), локальной когезионной прочности (σ_{IC}) и локальной деформации (δ_{IC}), а также рассчитанной по ним и модели Баренблатта длине когезионной зоны (l_{cz}) для 4-х типов армированных слоистых ПКМ. Приведенные в таблицы данные по модулям сдвига G и коэффициентам Пуассона ν , взяты и усреднены из литературы, и являются общепризнанными и принципиально не влияют на результаты расчетов.

Таблица 18 – Полученные характеристики исследуемых материалов

Характеристика	УК-ЭАП	УК-ПЭЭК	СК-ПКА	ОК-ПКА
1	2	3	4	5
E_{11} , ГПа	128	133	34	54
E_{22} , ГПа	115	127	2,5	3,0
E_{33} , ГПа	5	5,1	2,5	3,0
G_{11} , ГПа	5,2	5,5	2,8	2,8
G_{12} , ГПа	5,2	5,5	2,8	2,8
G_{13} , ГПа	3,08	5,1	1,5	1,5
ν_{12}	0,24	0,31	0,22	0,26
ν_{13}	0,24	0,31	0,22	0,26
ν_{23}	0,33	0,2	0,3	0,3

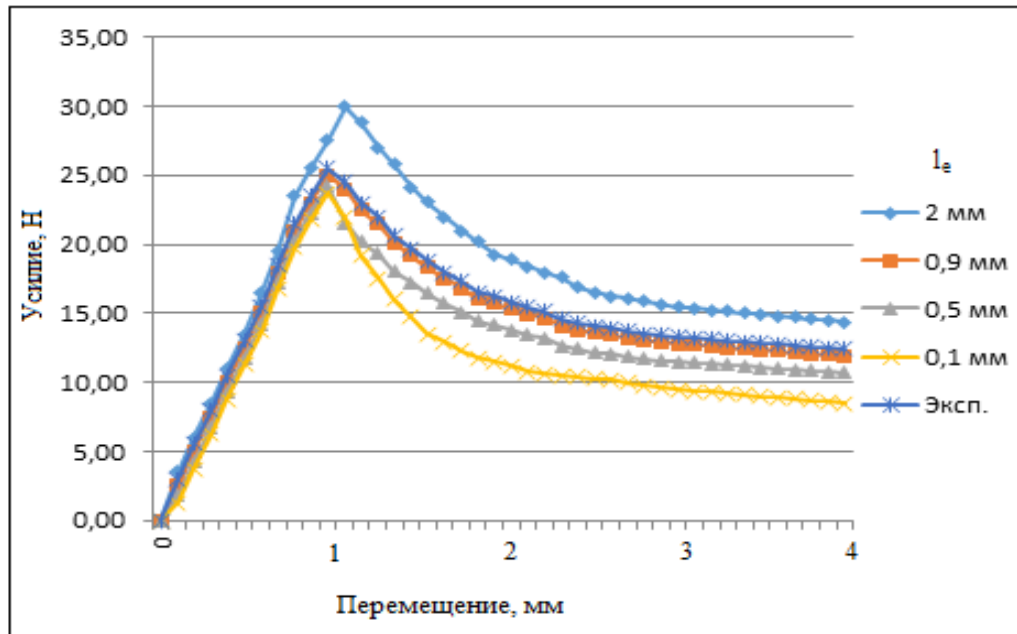
Продолжение таблицы 18

1	2	3	4	5
G_{IC} , Дж/м ²	210	352	324	286
σ_{IC} , МПа	10,7	28,1	21,5	17,6
δ_{IC} , мкм	7,3	4,6	5,6	6,0
l_{cz} , мм	3,6	0,89	0,96	1,1

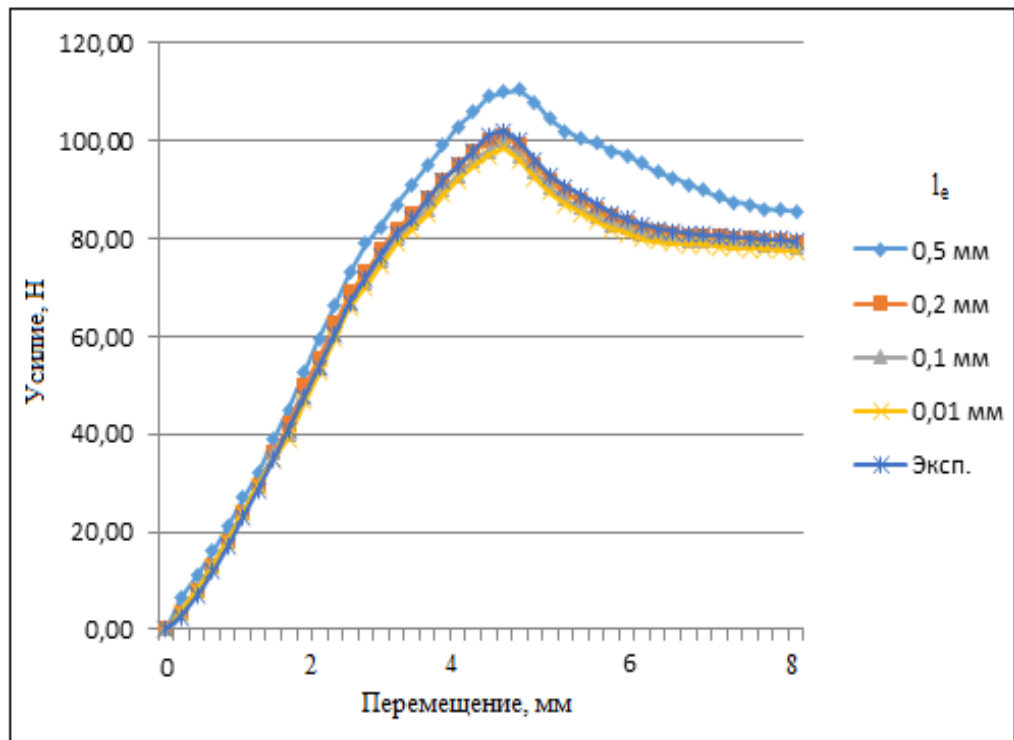
С использованием данных из таблицы 18 для каждого типа ПКМ проведено 3D моделирование процесса расслоения ДКБ по моде I с различной длиной и количество интерфейсных элементов по всей длине когезионного слоя с использованием экспоненциального и билинейного ЗКЗ.

5.1 Анализ закономерностей изменения нагрузки на края трещины для образцов в виде ДКБ с использованием экспоненциального закона когезионной зоны

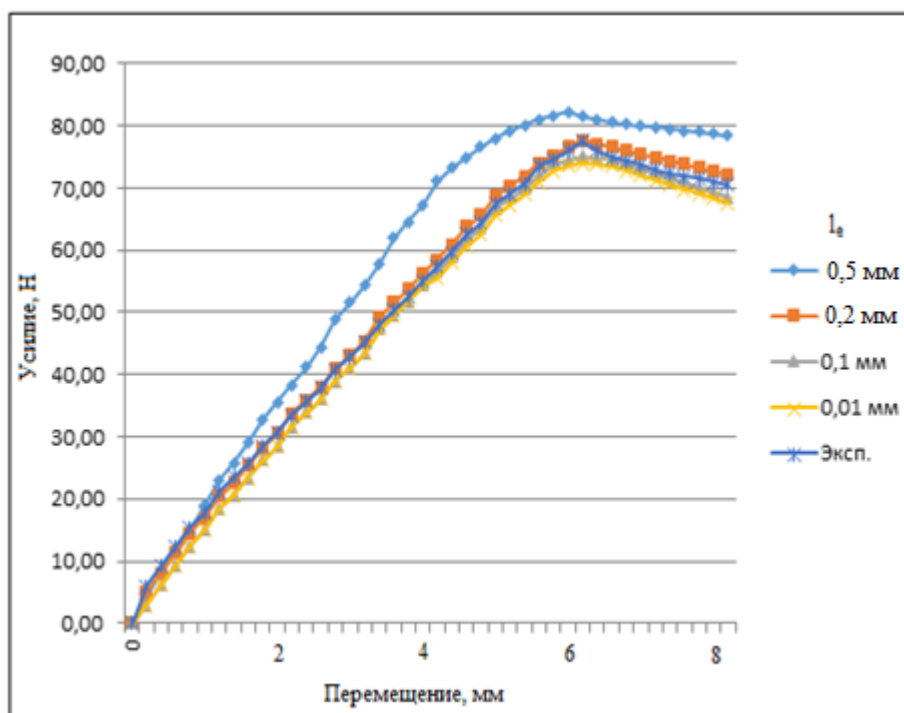
На рисунке 43 (а-г) представлены экспериментально полученные и рассчитанные по 3D модели с экспоненциальным ЗКЗ и использованием 4-х размеров конечных ИЭ l_c кривые усилие-перемещение краев трещины при ее раскрытии (P-Δ) для образцов в виде ДКБ армированных слоистых ПКМ четырех исследованных типов: УК-ЭАП; УК-ПЭЭК; СК-ПКА и ОК-ПКА. Количество ИЭ (N_c), располагаемых по длине когезионной зоны, рассчитывали для каждого типа ПКМ по формуле 18 и значениям l_{cz} , приведенным в таблице 18.



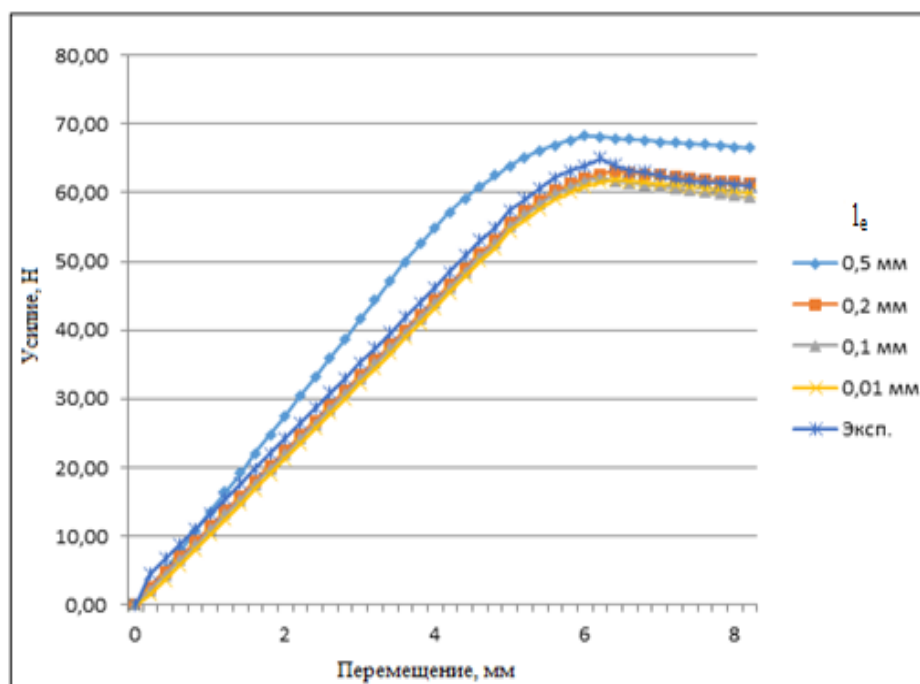
а



б



б



г

Рисунок 43 – Экспериментально полученные и рассчитанные по 3D модели с экспоненциальным ЗКЗ и использованием различного количества конечных ИЭ кривые в координатах усилие-перемещение при раскрытии трещины для 4-х типов ПКМ (а – УК-ЭАП б – УК-ПЭЭК, в – СК-ПКА, г – ОК-ПКА)

Анализ расчётных и экспериментальных зависимостей, с использованием экспоненциально ЗКЗ, для углекомполитов на основе ЭАП и ПЭЭК (рисунок 43 *a* и *б*) выявил влияние природы полимерной матрицы на длину когезионной зоны, для УК-ЭАП она составила 3,6 мм, а для УК-ПЭЭК 0,89 мм. Сравнение экспериментально и численно определённых значений нагрузки начала расслоения и трещиностойкости для этих материалов показало, что нагрузка начала расслоения для углепластика на основе жесткоцепного линейного ПЭЭК в 4 раза больше чем для УК-ЭАП и составляет 102 Н. Соответственно трещиностойкость для УК-ПЭЭК больше в 1,6 раза по сравнению с углепластиком на основе сетчатой эпоксидной матрицы и составляет 352 Дж/м².

Анализ зависимостей, с использованием экспоненциально ЗКЗ, для стеклокомполитов и органокомполитов на поликапроамидной матрице (рисунок 43 *в* и *г*), выявил влияние природы армирующего волокнистого наполнителя на длину когезионной зоны для СК-ПКА она составила 0,96 мм, а для ОК-ПКА 1,1мм. Сравнение экспериментально и численно определённых значений нагрузки начала расслоения и трещиностойкости для этих материалов показало, что нагрузка начала расслоения для стеклопластика на основе линейного ПКА в 1,2 раза больше чем для органопластика ОК-ПКА и составляет 78 Н. Соответственно трещиностойкость для ПКА армированного непрерывными стеклянными волокнами больше в 1,13 раза по сравнению с ПКА армированного органическими волокнами и составляет 324 Дж/м².

Кроме вышеизложенного установлено, что в случае с углекомполитом на эпоксидной матрице результат моделирования существенно зависит от размера интерфейсного элемента: при уменьшении размеров интерфейсного элемента, и как следствие, увеличение количества ИЭ по длине когезионного слоя растёт расхождение результатов моделирования, кривые на рисунке 43 *a* расположены достаточно далеко друг от друга. А в случае с углекомполитом, стеклокомполитов и органокомполитов на основе термопластичного связующего размер и количество интерфейсных элементов влияют менее заметно только до определенного уровня, после которого точность расчетов не увеличивается, а объем расчетов растет в

геометрической прогрессии, расчётные кривые расположены очень близко друг к другу, как показано на рисунке 43 б, в, г.

Таким образом длина когезионной зоны является значимым свойством материала, определяющим его способность к зарождению и развитию дефектов в виде трещин. Чем меньше длина когезионной зоны слоистого ПКМ тем более устойчив материал к зарождению и росту трещин. В свою очередь значение длины когезионной зоны в ПКМ, будет определяться природой и свойствами полимерной матрицы в большей степени, чем природой армирующего наполнителя.

Проведя анализ результатов моделирования стеклокомпозитов и органокомпозитов на поликапроамидной матрице выявлено, что для разных по природе материалов, но пропитанных одинаковым связующим, наполнителями размеры интерфейсных элементов отличаются, и это тоже оказывает влияние на результат моделирования. Природа армирующего наполнителя влияет на размер и количество интерфейсных элементов оказывают влияние только до определенного уровня, после которого точность расчетов не увеличивается, также, как и для углекомпозита на термопластичной матрице. В результате моделирования расслоения ДКБ каждого типа ПКМ определено минимальное необходимое количество интерфейсных элементов в когезионном слое – 4, а вот размеры интерфейсных элементов в КС различаются, кроме СК-ПКА и УК-ПЭЭК. В таблице 19 представлено количество конечных ИЭ в КЗ и их длина для каждого типа ПКМ.

Таблица 19 – Количество конечных ИЭ в КЗ и их длина для каждого типа ПКМ

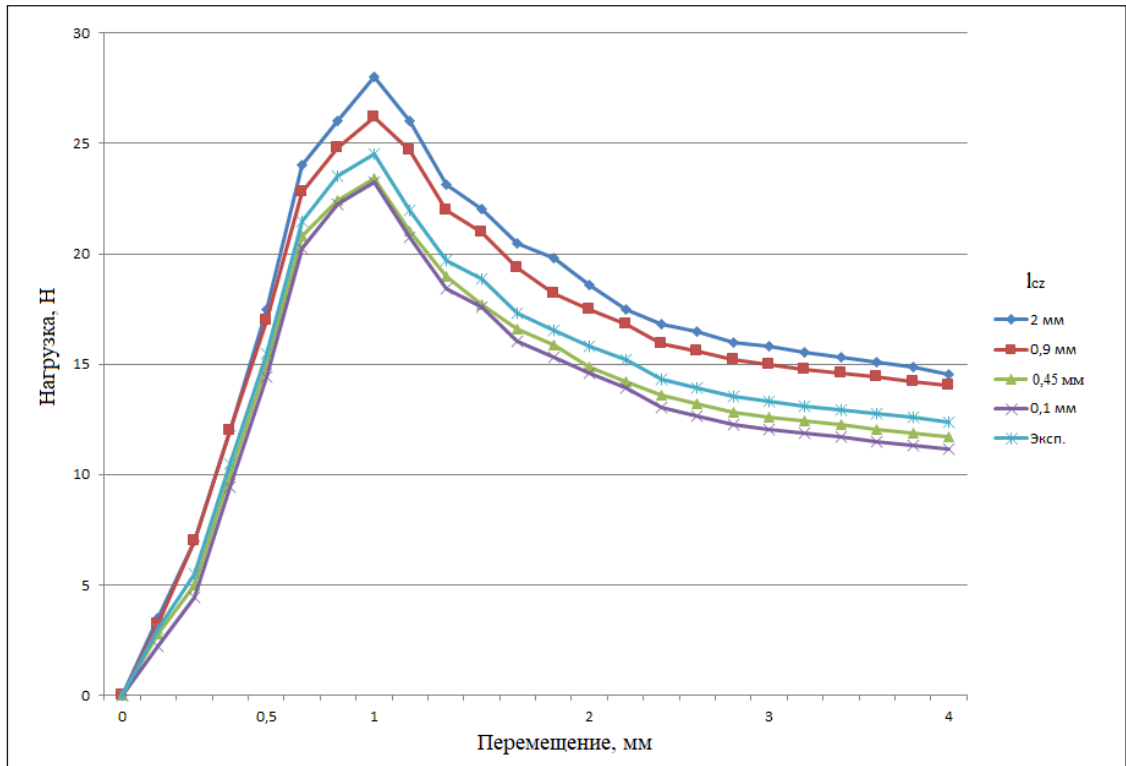
Тип ПКМ	Длина конечного ИЭ, l_e , мм	Количество ИЭ в КЗ, N_e
УК-ЭАП	2	1,8
	0,9	4
	0,5	7,2
	0,1	36
УК-ПЭЭК	0,5	1,8
	0,2	4,5
	0,1	8,9
	0,01	89
СК-ПКА	0,5	2
	0,2	5
	0,1	9,6
	0,01	96
ОК-ПКА	0,5	2,2
	0,2	5,5
	0,1	11
	0,01	110

5.2 Анализ закономерностей изменения нагрузки, приложенной по моде I на края трещины для образцов в виде ДКБ исследуемых слоистых ПКМ с использованием билинейного ЗКЗ

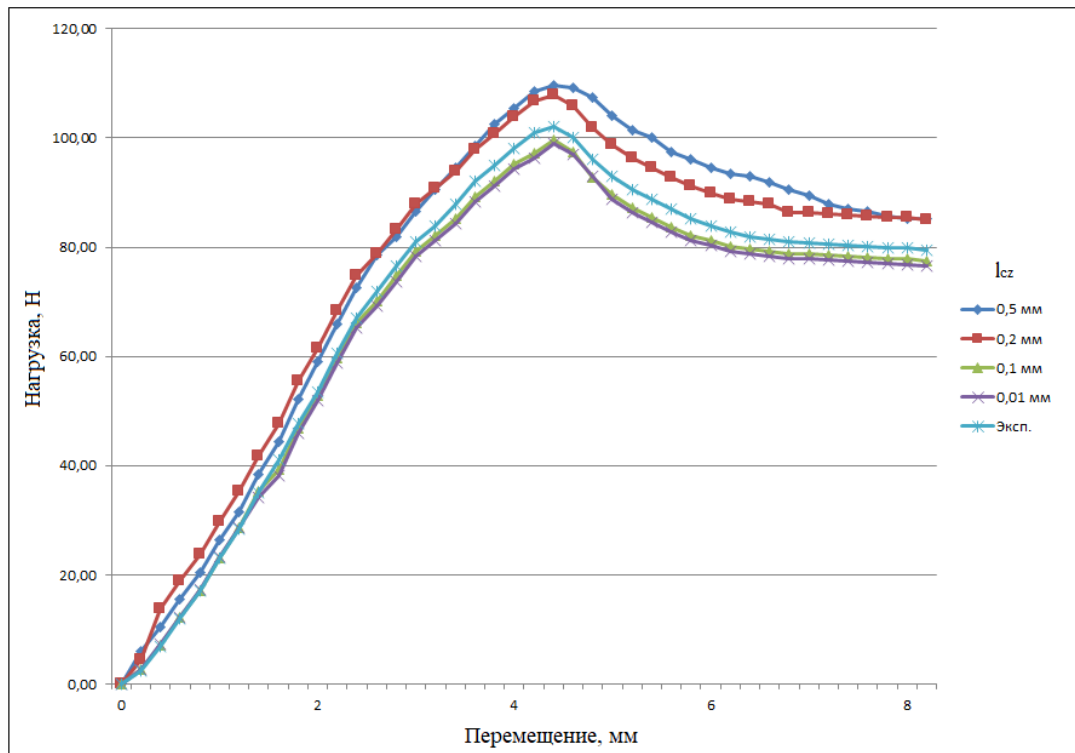
Для каждого типа ПКМ проведено также 3D моделирование процесса расслоения ДКБ по моде I с различной длиной и количеством интерфейсных элементов по всей длине когезионного слоя с использованием билинейного ЗКЗ.

На рисунке 44 (а-г) представлены экспериментально полученные и рассчитанные по 3D модели с билинейным ЗКЗ и использованием 4-х размеров конечных ИЭ (размеры ИЭ аналогичные, как и для модели с экспоненциальным ЗКЗ, кроме ИЭ длиной 0,5 мм для УК-ЭАП и 0,2 мм для СК, а для лучшей кратности был взяты ИЭ длиной 0,45 мм 0,1 мм соответственно) кривые усилие-перемещение краев трещины при ее раскрытии (Р-Δ) для образцов в виде ДКБ армированных

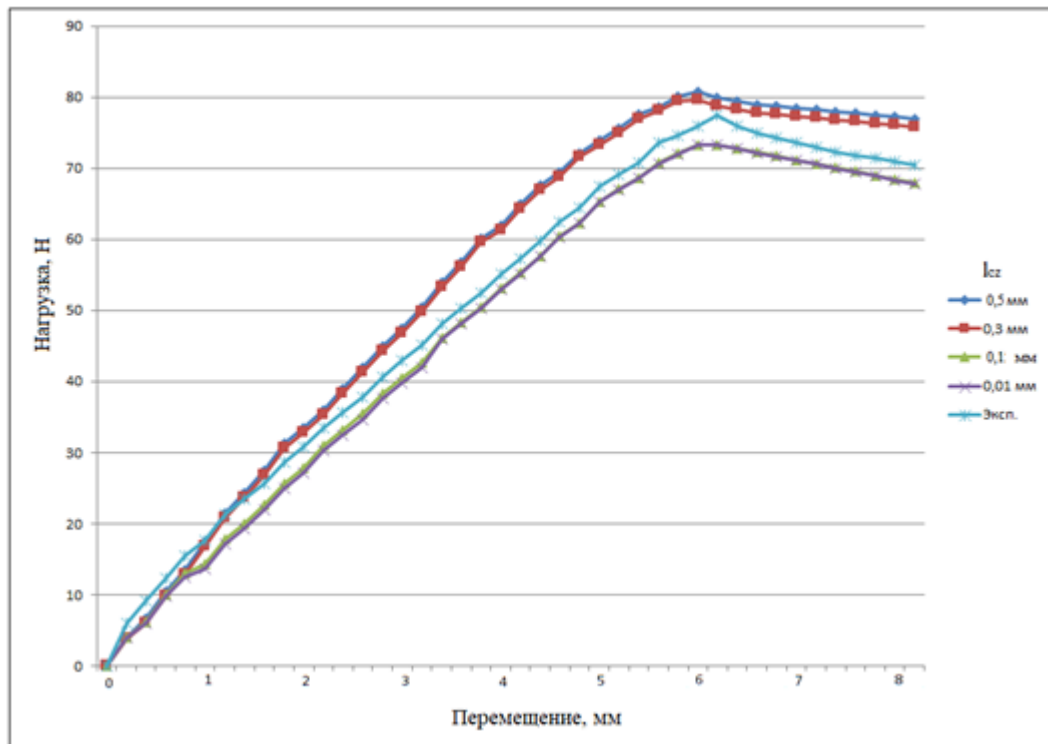
слоистых ПКМ четырех исследованных типов: УК-ЭАП; УК-ПЭЭК; СК-ПКА и ОК-ПКА.



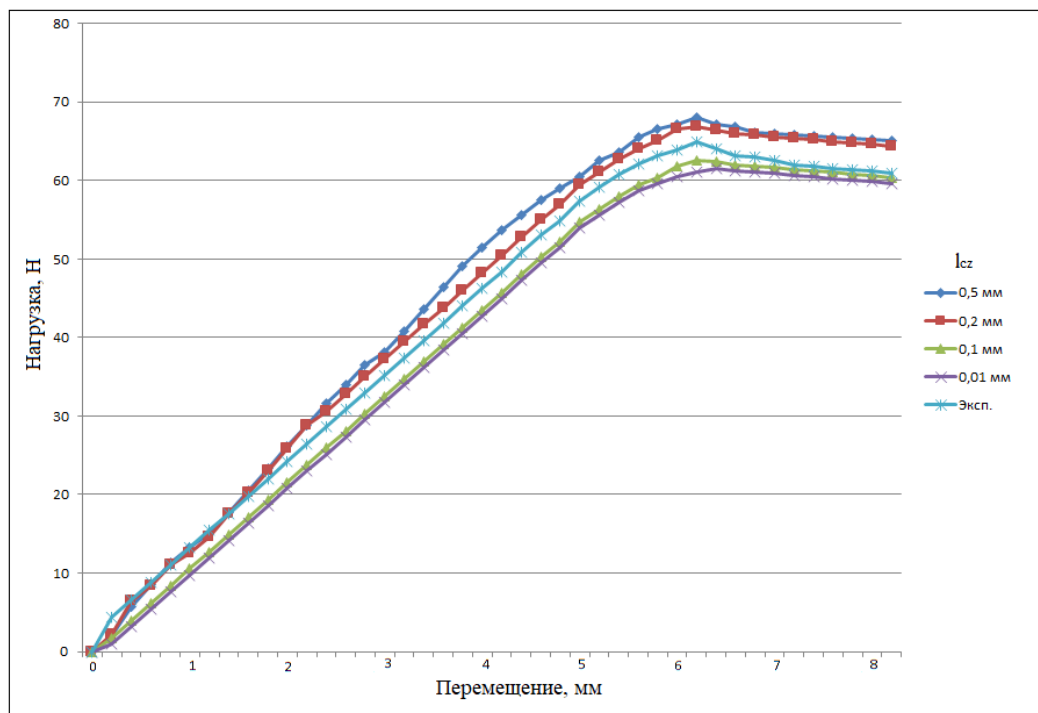
a



б



б



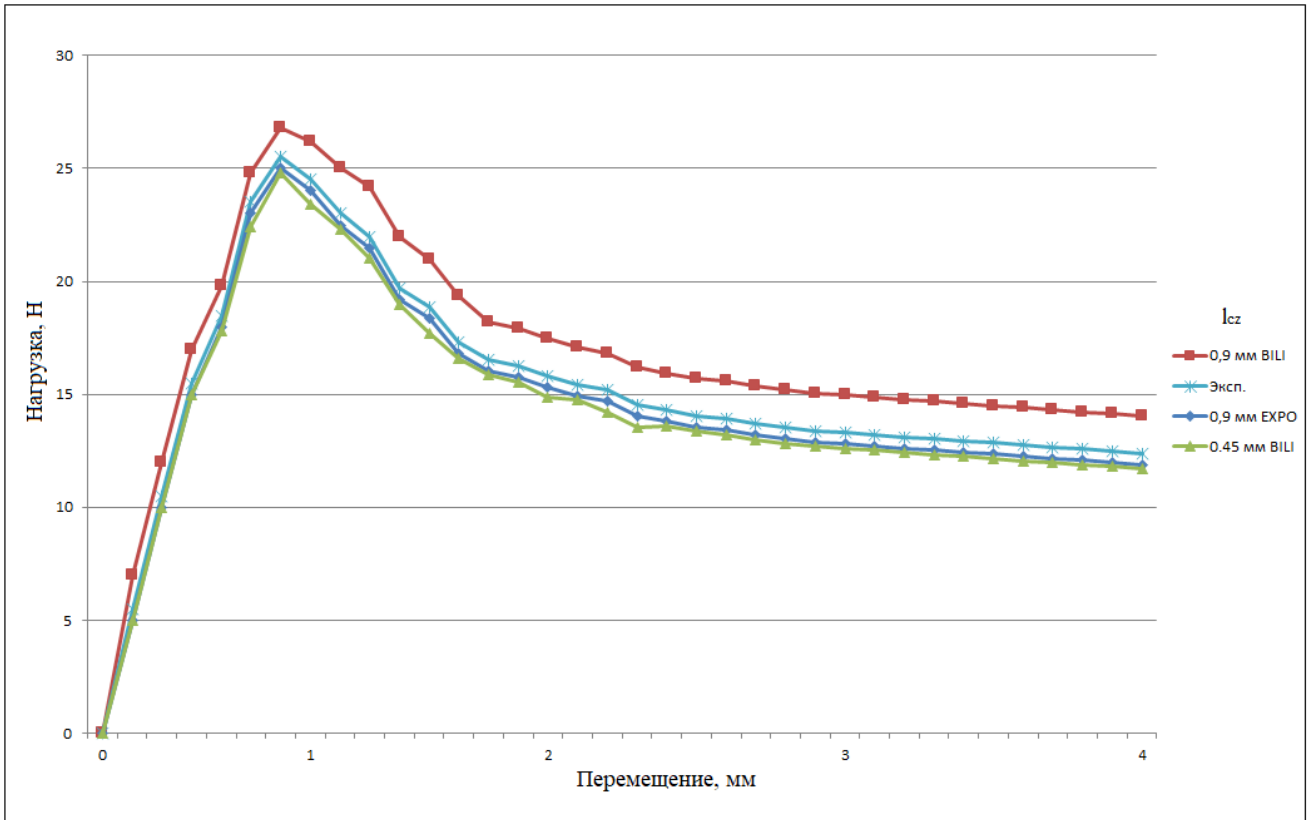
в

Рисунок 44 – Экспериментально полученные и рассчитанные по 3D модели с билинейным ЗКЗ с использованием различного количества конечных ИЭ кривые в координатах усилие-перемещение при раскрытии трещины для 4-х типов ПКМ (а – УК-ЭАП б – УК-ПЭЭК, в – СК-ПКА, г – ОК-ПКА)

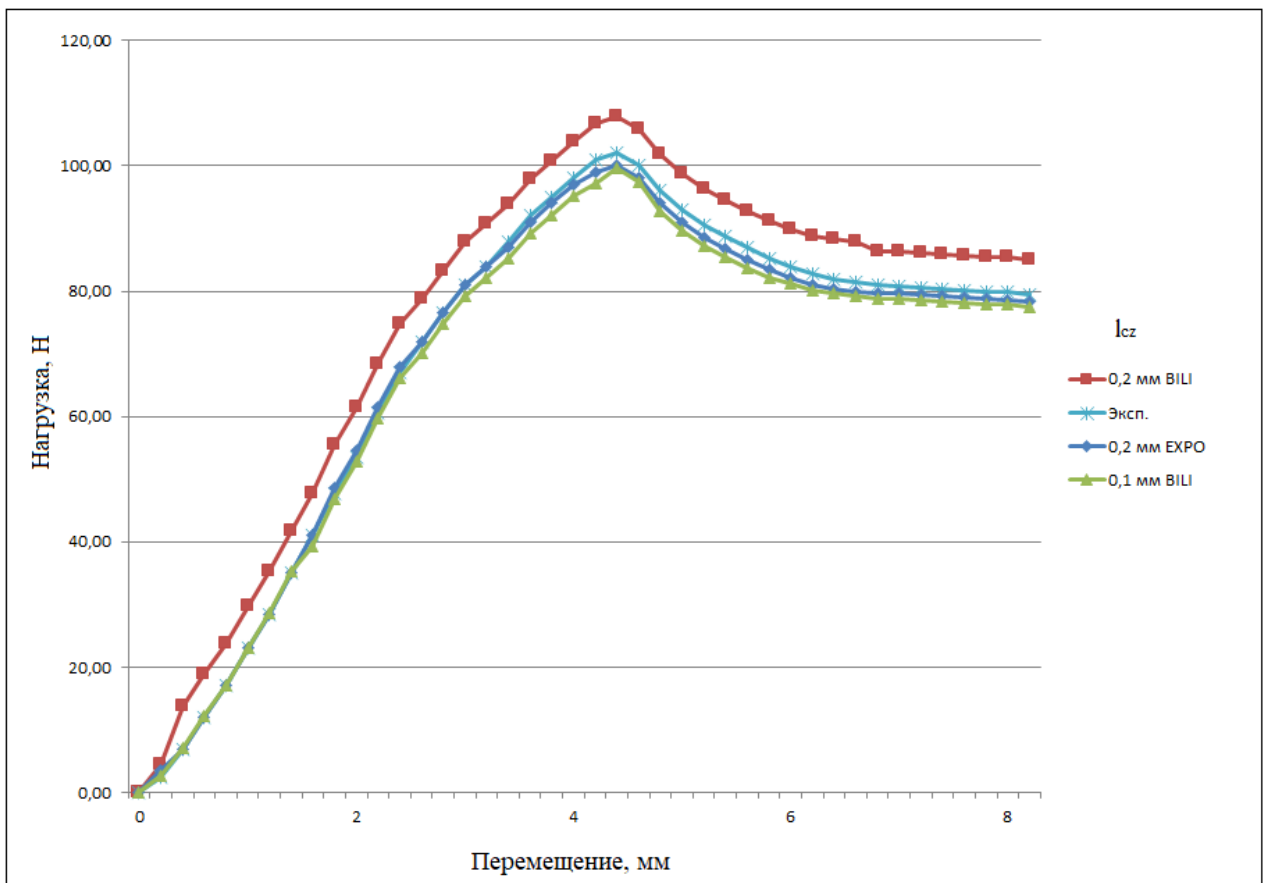
В результате проведенного моделирования расслоения ДКБ с использованием билинейного ЗКЗ показало адекватные результаты на всех 4-х типах ПКМ, но в отличие от модели с экспоненциальным ЗКЗ, адекватные результаты моделирования получились только при использовании не менее 8 ИЭ элементов по длине КЗ. При количестве ИЭ менее 8 результаты моделирования имеют большую погрешность (более 6%), а при использовании более 8-х элементов, точность моделирования не увеличивается. Для УК-ЭАП наиболее адекватные результаты в сравнении с экспериментальными результатами получились при использовании ИЭ длиной 0,45 мм, для УК-ПЭЭК – 0,1 мм, СК-ПКА – 0,15 мм, ОК – 0,1 мм.

5.3 Сравнение результатов численного моделирования с использованием экспоненциального и билинейного ЗКЗ и экспериментальными данными

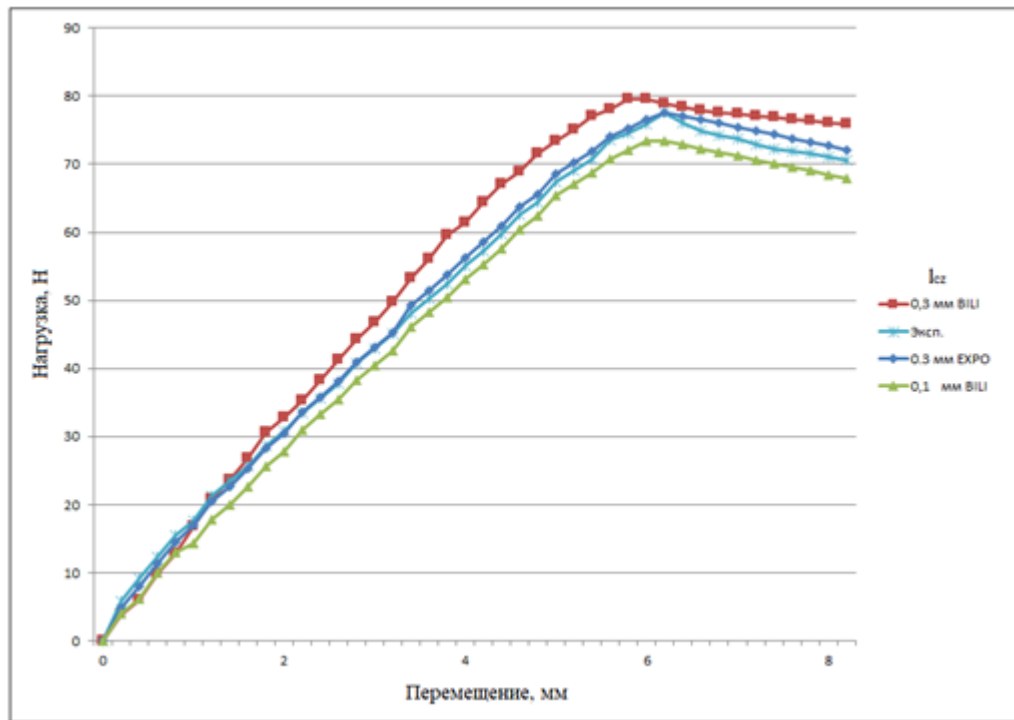
На рисунке 45 (а-г) представлены четыре экспериментально полученные и рассчитанные по 3D модели с билинейным и экспоненциальным ЗКЗ (с использованием ИЭ одного типа размера) кривые усилие-перемещение краев трещины при ее раскрытии (Р-Δ).



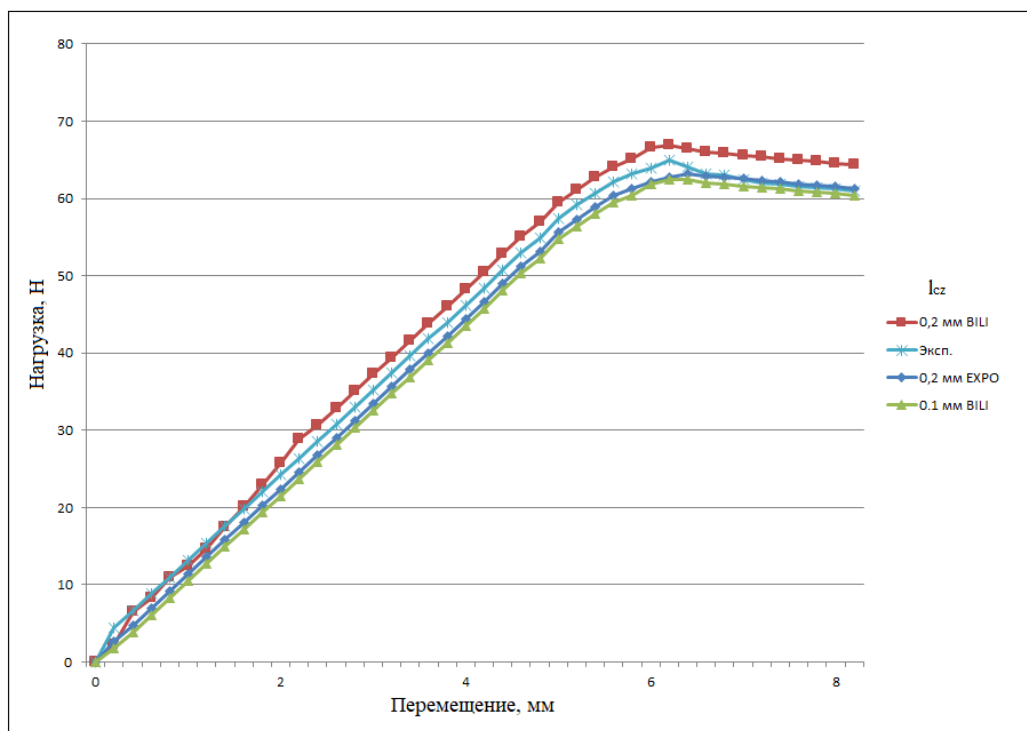
а



б



а



б

Рисунок 45 – 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 4-х типов ПКМ (а – УК-ЭАП б – УК-ПЭЭК, в – СК-ЛКА, г – ОК-ЛКА)

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).

Погрешность на образцах из УК-ПЭЭК при использовании экспоненциального ЗКЗ составила 1,88 %, а при использовании билинейного ЗКЗ с длиной ИЭ 0,2 мм 6,66 %, а при использовании билинейного ЗКЗ с длиной ИЭ 0,1 мм – 2,67 %. В данном случае, как и в предыдущем при 4-х ИЭ в КЗ модель с билинейным ЗКЗ показывает большое расхождение с экспериментальными данными. Оптимальным вариантом для проведения моделирования с применением экспоненциального ЗКЗ для УК-ПЭЭК является длина ИЭ равная 0,2 мм (4 элемента), а для билинейного ЗКЗ – 0,1 мм (8 элементов).

Погрешность ОК-ПКА при использовании экспоненциального ЗКЗ с длиной ИЭ 0,2 мм составила 1,98 %, а при использовании билинейного ЗКЗ с длиной ИЭ 0,2 мм – 7,1 %, а при использовании билинейного ЗКЗ с длиной ИЭ 0,1 мм – 3,1 %. Оптимальным вариантом для проведения моделирования с применением экспоненциального ЗКЗ для ОК-ПКА является длина ИЭ равная 0,2 мм (5 элемента), а для билинейного ЗКЗ – 0,1 мм (11 элементов).

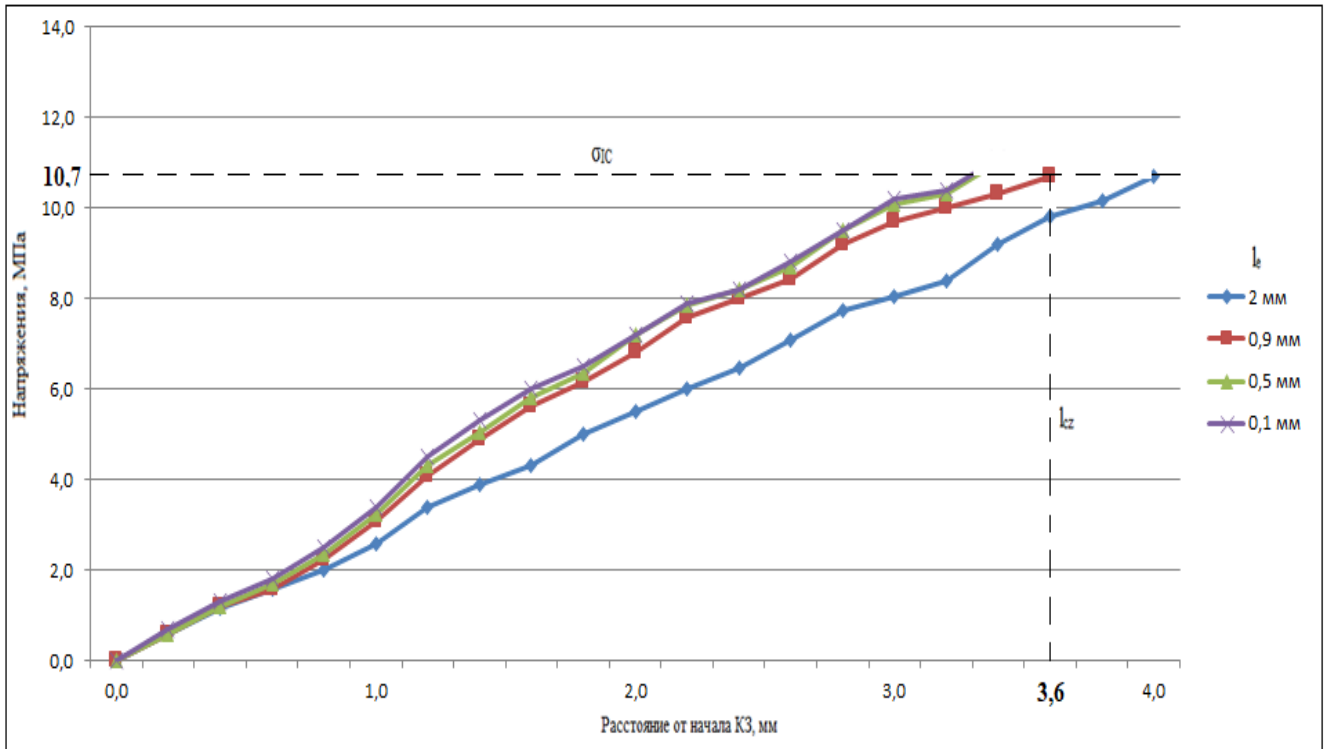
Погрешность СК-ПКА при использовании экспоненциального ЗКЗ с длиной ИЭ 0,2 мм составила 1,28 %, а при использовании билинейного ЗКЗ с длиной ИЭ 0,3 мм – 6,1 %, а при использовании билинейного ЗКЗ с длиной ИЭ 0,15 мм – 3,05 %. Оптимальным вариантом для проведения моделирования с применением

экспоненциального ЗКЗ для СК-ПКА является длина ИЭ равная 0,2 мм (4 элемента), а для билинейного ЗКЗ – 0,1 мм (9 элементов).

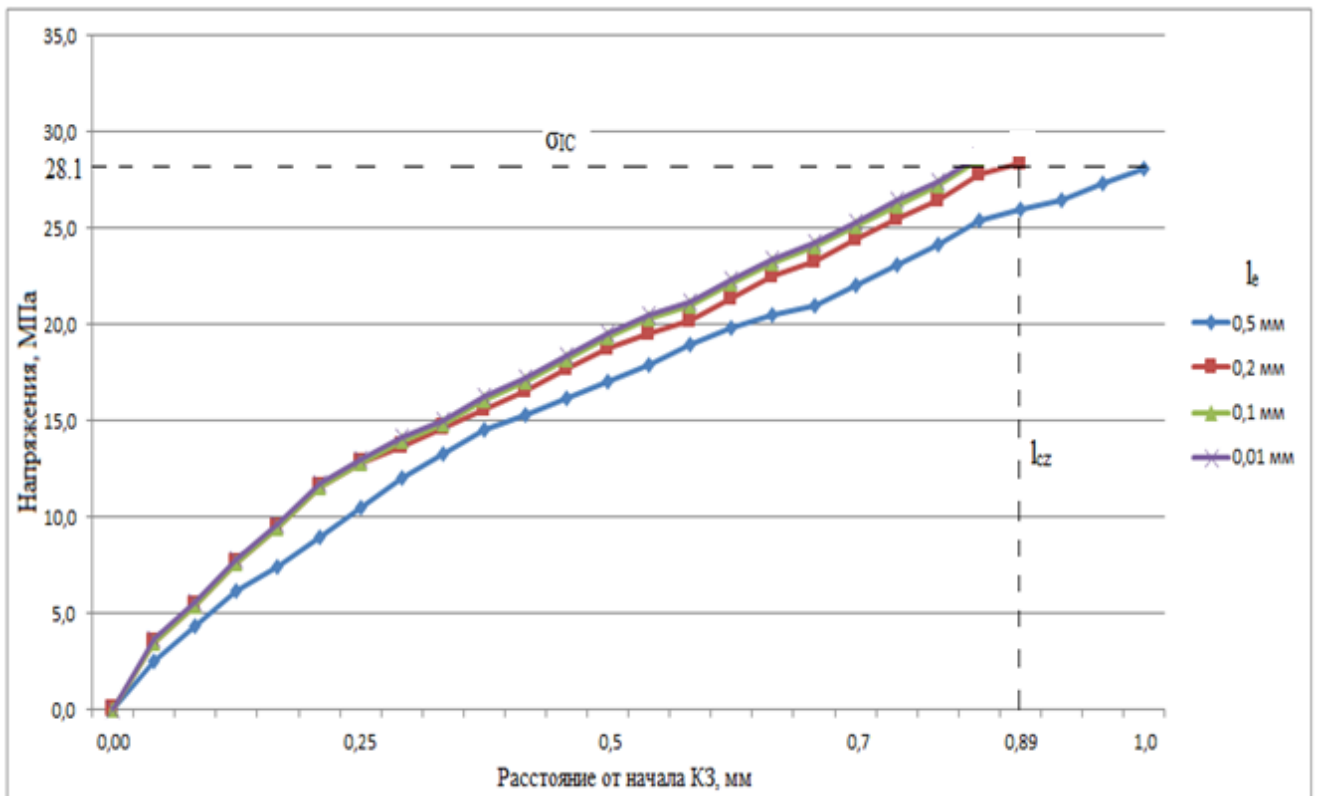
Установлено, что средняя погрешность для численного определения нагрузки, приводящей к началу роста трещины в ПКМ на основе термопластичных матриц при использовании модели с экспоненциальным и билинейным ЗКЗ составляет 2 % и 3,28 % соответственно.

5.4 Исследование влияния размеров интерфейсных элементов на точность расчетов в конечно-элементной модели возникновения и развития трещины для слоистых ПКМ на термопластичных и термореактивных матрицах

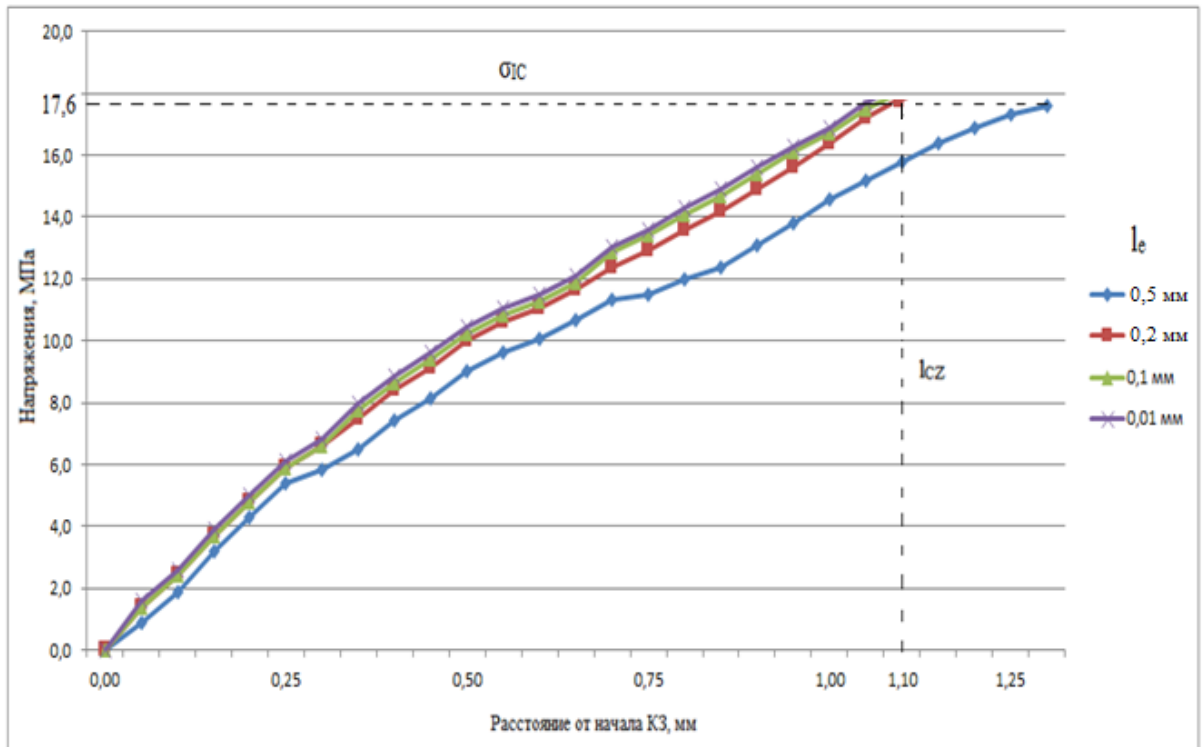
На рисунке 46 *а-г* обобщены рассчитанные по методу МКЭ/МКЗ кривые распределения напряжений по длине моделируемой когезионной зоны от ее начала с использованием модели с экспоненциальным ЗКЗ при раскрытии трещины в образцах в виде ДКБ при различной длине конечных когезионных (интерфейсных) элементов для исследованных слоистых ПКМ: УК-ЭАП; УК-ПЭЭК; СК-ПКА; ОК-ПКА с указанными пунктирными линиями экспериментально определенными значениями локальной межслоевой прочности (σ_{1c}) и рассчитанными по модели Баренблатта и экспериментальным данным значениями длины когезионной зоны (l_{cz}).



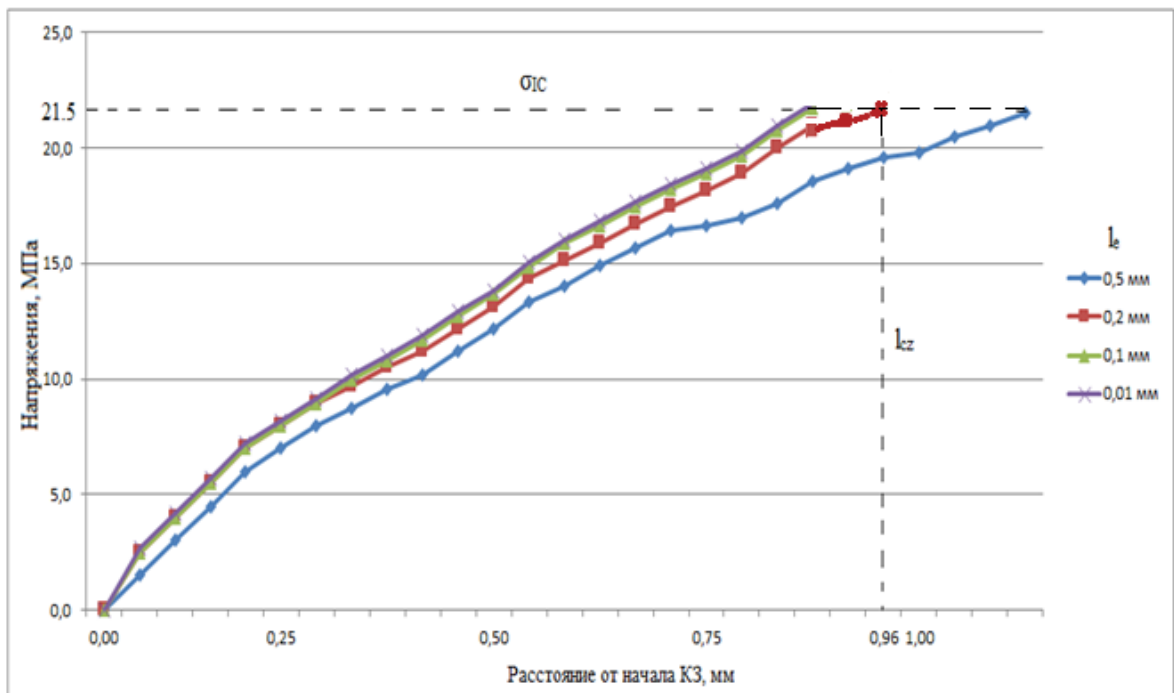
а



б



в

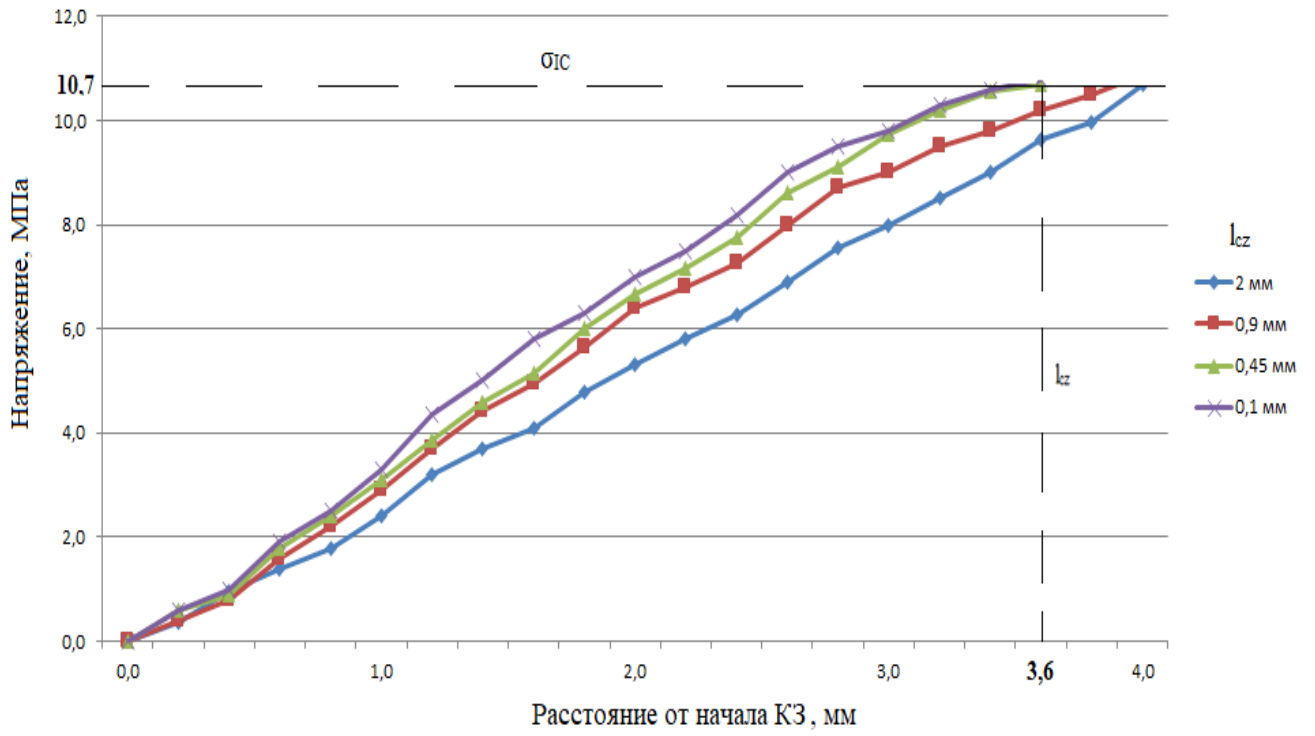


г

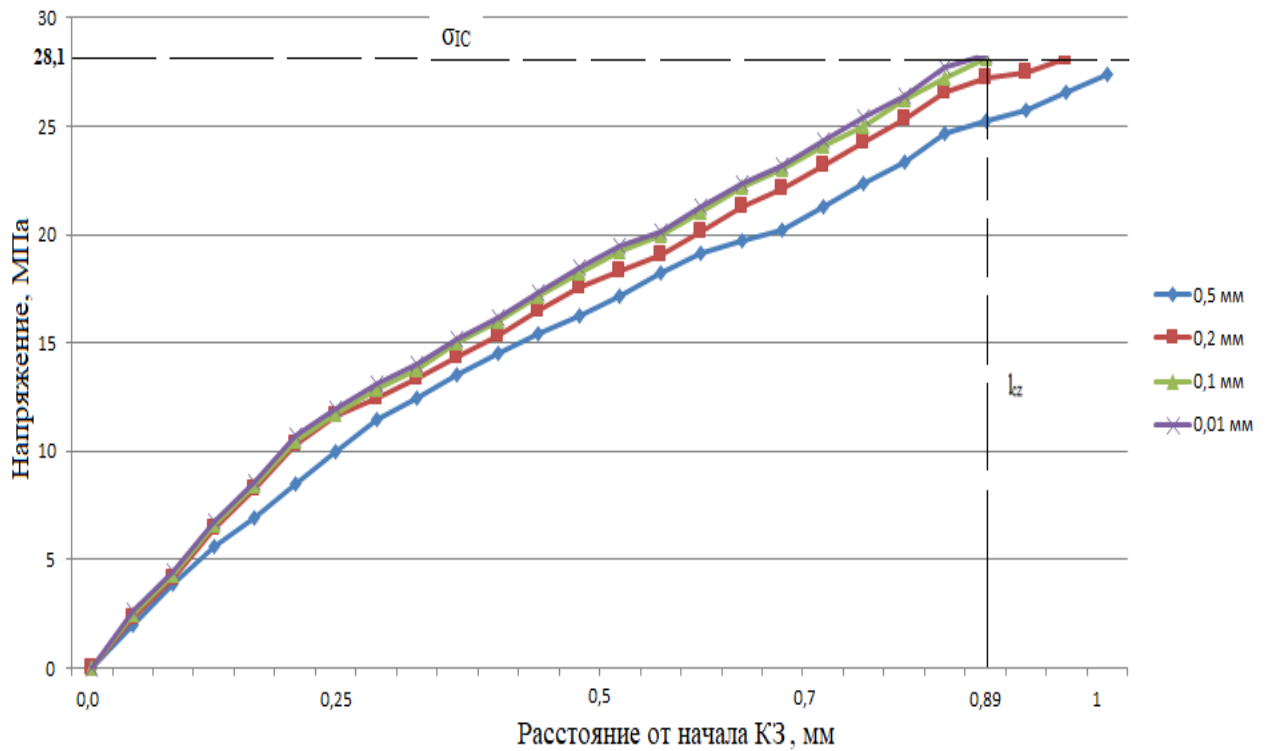
Рисунок 46 – Распределение локальных напряжений по длине моделируемой когезионной зоны (с экспоненциальным ЗКЗ) от начала КЗ при различной длине конечных интерфейсных элементов для слоистых ПКМ: *а* - УК-ЭАП; *б* - УК-ПЭЭК; *в* – ОК-ПКА; *г* - СК-ПКА

Проанализировав рассчитанные по методу МКЭ/МКЗ обобщенные зависимости распределения напряжений по длине моделируемой когезионной зоны от ее начала при раскрытии трещины в образцах в виде ДКБ при различной длине конечных интерфейсных элементов углекомполитов на основе ЭАП и ПЭЭК (рисунок 46 а и б) можно сделать выводы, что для одинаковых по природе материалов, но с разными наполнителями адекватные результаты получаются при четырех элементах в когезионном слое. Наибольшее расхождение результатов получилось на углекомполите с терморреактивным связующим. Наиболее адекватные результаты получились при моделировании процесса расслоения с ИЭ размером 0,9 мм, при этом количество элементов в КЗ составляет 4. В случае с углекомполитом на основе термопластичного связующего наиболее адекватные результаты получились при моделировании процесса расслоения с ИЭ размером 0,2 мм, при этом количество элементов в КЗ составляет 4,5. Рассмотрев, зависимости полученные для стеклокомполитов и органокомполитов на основе термопластичного связующего наиболее адекватные результаты получились при моделировании процесса расслоения с ИЭ размером 0,2 и 0,3 мм, при этом количество элементов в КЗ составляет 5 и 3,6, соответственно, при уменьшении размеров ИЭ значительного улучшения результатов не происходит.

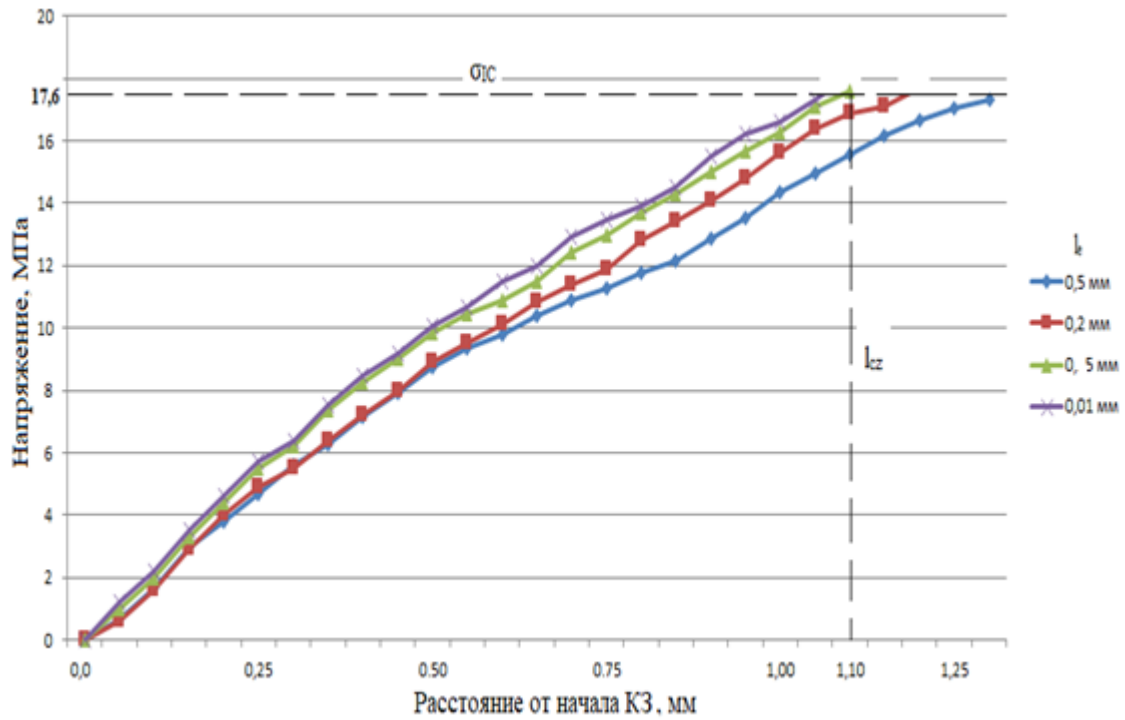
На рисунке 47 а-г обобщены рассчитанные по методу МКЭ/МКЗ кривые распределения напряжений по длине моделируемой когезионной зоны от ее начала с использованием модели с билинейным ЗКЗ при раскрытии трещины в образцах в виде ДКБ при различной длине конечных когезионных (интерфейсных) элементов для исследованных слоистых ПКМ: УК-ЭАП; УК-ПЭЭК; СК-ПКА; ОК-ПКА.



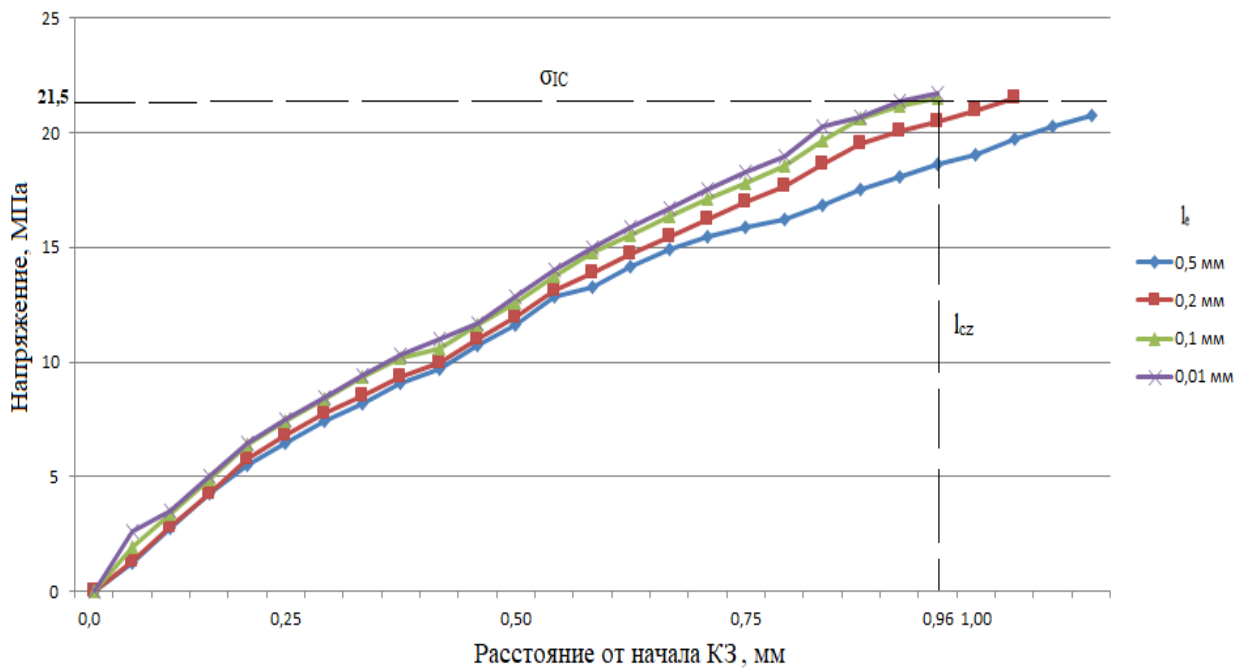
а



б



а



б

Рисунок 47 – Распределение локальных напряжений по длине моделируемой когезионной зоны (с билинейным ЗКЗ) от начала КЗ при различной длине конечных интерфейсных элементов для слоистых ПКМ: а - УК-ЭАП; б - УК-ПЭЭК; в - ОК-ПКА; г - СК-ПКА

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 углекомполитов на основе ЭАП и ПЭЭК (рисунок 47 а и б) можно сделать выводы, что для УК-ПЭЭК адекватные результаты получаются при восьми элементах в когезионном слое. В случае с углекомполитом на основе термопластичного связующего наиболее адекватные результаты получились при моделировании процесса расслоения с ИЭ размером 0,1 мм. Рассмотрев, зависимости полученные для стеклокомполитов и органокомполитов на основе термопластичного связующего наиболее адекватные результаты получились при моделировании процесса расслоения с ИЭ размером 0,1 мм, при этом количество элементов в КЗ составляет 11 и 9, соответственно, при уменьшении размеров ИЭ значительного улучшения результатов не происходит.

Сравнительный анализ экспериментально полученных и рассчитанных по модели МКЭ/МКЗ при расслаивании по моде I образцов ДКБ из 4-х исследованных слоистых ПКМ кривых в координатах усилие, приложенное к краям трещины, смещение краев (глобальное раскрытие трещины) $P-\Delta$, а также кривых распределения напряжений по длине моделируемой когезионной зоны с использованием различных размеров (длины) конечных когезионных или интерфейсных элементов (ИЭ) и, соответственно, различного их числа, расположенных по длине КЗ, показывает, что моделирование дает достаточно адекватные результаты при использовании экспериментально определенных параметров деформационно-прочностных свойств (закона) и длины когезионной зоны. Наилучшее совпадение расчетных и экспериментальных данных получается при выборе такой длины ИЭ, чтобы на рассчитанной по экспериментальным данным и модели Баренблатта длине когезионной зоны укладывалось примерно 4 ИЭ с экспоненциальным ЗКЗ и 8 с билинейным ЗКЗ. (Таблица 20). 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.

Таблица 20 – Минимальные значения длины и количества ИЭ в когезионном слое, обеспечивающие наилучшее совпадение экспериментальных и расчетных данных по трещиностойкости исследованных ПКМ

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

При использовании для обоих случаев меньшего, чем минимальное, количества ИЭ, укладываемых по длине реальной КЗ, результаты численных расчетов существенно отличаются от экспериментально полученных данных. При большем минимального количестве ИЭ в КЗ приводит к резкому возрастанию объема и длительности вычислений без существенного повышению их точности.

Выводы по главе V

1. Обобщены экспериментально полученные значения критической интенсивности высвобождения упругой энергии (G_{IC}), локальной когезионной п р
2. Разработана и исследована 3D конечно-элементная модель критического роста трещины в двухконсольной балке с имплантированным экспоненциальным и билинейным законом когезионной зоны с использованием экспериментально впределенных параметров когезионной зоны и упругих констант для 4-х типов БКМ.
3. Установлены закономерности изменения нагрузки на края трещины от величины ее раскрытия и распределения напряжений по длине моделируемой когезионной зоны для исследуемых слоистых ПКМ.
4. На основе экспериментально полученных значений интенсивности высвобождения упругой энергии и когезионной прочности определена длина когезионной зоны для каждого типа ПКМ. Длина когезионной зоны варьируется в интервале от 0,89 мм до 3,6 мм.
5. Выявлены закономерности влияния типа ЗКЗ и 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.
6. Установлены оптимальные длины интерфейсных элементов для экспоненциального и билинейного ЗКЗ, их количество по длине когезионной зоны, обеспечивающих низкую погрешность расчета диаграмм роста трещины в координатах нагрузка на края трещины и ее раскрытие при допустимом объеме вычислений.
7. Проведено сравнение результатов численного решения и эксперимента по впределению нагрузки начала расслоения для исследуемых случаев. Результаты численного моделирования для УК-ПЭЭК, СК-ПКА, ОК-ПКА хорошо согласуются й

с результатами экспериментов, и при оптимизации количества конечных элементов с экспоненциальным ЗКЗ по длине когезионной зоны до 4-х, а с билинейным ЗКЗ до 8-ми, погрешность определения нагрузки, приводящей к началу роста трещины, не превышает 5 %.

ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЯ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ 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/м². Трещиностойкость для ПКА, армированного непрерывными стеклянными волокнами, больше в 1,13 раза, по сравнению с ПКА, армированного органическими волокнами, и составляет 324 Дж/м².

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 σ_c , максимальном раскрытии когезионной зоны δ_{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 углекомполитов 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 стеклокомполитов и органокомполитов 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 терморреактивных 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 монослоев 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kay B.F., Maass D. Airframe Preliminary Design for an Advanced Composite Airframe Program: USAAVRADCOR-TR-80-D-35A / Applied Technology Laboratory, U.S. Army Research and Technology Laboratories. 1982. Vol. 1. 229 p. URL: <https://www.sikorskyarchives.com/.S-75%20ACAP.php>
2. И.М. Буланов, В.В. Воробей – Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов. М., «Издательство МГТУ им. Баумана» 1998, С. 10-96.
3. UMATEX, Госкорпорация РОСАТОМ. URL: <https://umatex.com/production/fiber/>, дата обращения 06.03.2020 г.
4. UMATEX, Госкорпорация РОСАТОМ. URL: <https://umatex.com/production/fabric/>, дата обращения 06.03.2020 г.
5. R. Mallors A review by the Materials and Structures National Technical Committee // Engines and Powerplants. – 2011 P. 90-105.
6. Мийченко И. П. Наполнители для полимерных материалов. Учебное пособие. М.: МАТИ 2010. - 196 с.
7. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учебное пособие / Кербер М.Л., Виноградов В.М., Головкин Г.С.- СПб: Профессия – 2014, С. 592.
8. Михайлин Ю.А. // Конструкционные полимерные композиционные материалы – СПб.: Научные основы и технологии, 2008, С. 820.
9. Детали машин электронный учебный курс. URL: <http://www.detalmach.ru/composit1.htm>, дата обращения 02.04.2020 г.
10. Мухаметов Р. Р., Петрова А. П., Пономаренко С. А. и др. Свойства связующего ЭДТ-69Н и ПКМ на его основе // ВИАМ 2018 №4 Электронный научный журнал «Труды ВИАМ» С. 10-15.
11. Гуляев Г.М. Сорина Г.Г., Хорошилова И.П. и др. // Конструкционные эпоксидные углепластики // Авиационная промышленность №12, 1984 г. С. 50-75

12. Ляпков А.А. // Полимерные аддитивные технологии: учебное пособие. // Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2016. С. 114.
12. Multi-level experimental and numerical analysis of composite stiffener debonding / J. Bertolini [и др.] // Part 1: Non-specific specimen level. Composite Structures, 2009, v. 90, p.381–403;
13. Бабаевский П.Г., Кулик С.Г. Трещиностойкость отвержденных полимерных композиций // М., «Химия» 1991 г. С. 336
14. Liu P.F., Islam M.M. A nonlinear cohesive model for mixed-mode delamination of composite laminates // Composite Structures. 2013, V. 106, P. 47-56.
15. Moure M.M., Sanchez-Saez S., Barbero E. Analysis of damage localization in composite laminates using a discrete damage model // Composites. Part B. 2014. V. 66. P. 224-232.
16. A comparison of direct and iterative methods for determining traction-separation relations / Shraavan G. [и др.] // International journal of fracture. № 2 2012. V 177, P. 109-120.
17. Использование модели развивающегося повреждения при оценке прочности слоистых углепластиков с различными концентраторами напряжений / В.А. Беспалов [и др.] // Омский научный вестник. 2015. №3. С. 329-333.
18. Гасанов Ф.Ф. Зарождение трещины в композите, армированном однонаправленными ортотропными волокнами при продольном сдвиге // Механика машин, механизмов и материалов. 2014. №2(27). С. 45-50.
19. Пановко Я. Г. Механика деформированного твердого тела. // М.: Наука, 1985. С. 287.
20. Dugdale D.S. Yielding of steel sheets containing slits // J. Mech. and Phys. Solids. – 1960. – V. 8, No 2. – P. 100–108.
21. Баренблатт Г.И. // Математическая теория равновесных трещин, образующихся при хрупком разрушении// Журнал прикладной механики и теоретической физики, 1961, №4, С.3-56.

22. M. Moslemi, M. Khoshnavan. Cohesive Zone Parameters Selection for Mode-I Prediction of Interfacial Delamination // *Journal of Mechanical Engineering* 61(2015)9, P. 507-516.
23. Z. Xia, W. A. Curtin Multiscale Modeling of Tensile Failure in Fiber-Reinforced Composites // *Multiscale Modeling and Simulation of Composite Materials and Structures*, 2008, P. 37-82.
24. Micromechanics-Based Progressive Failure Analysis of Composite Laminates Using Different Constituent Failure Theories / A. M. Moncada [и др.], // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, volume 31, no. 21, 2012, P. 1467–1487.
25. P. Tan, L. Tong, G. Steven Modelling for predicting the mechanical properties of textile composites - A review // *Composites Part A*, volume 28, no. 1997, Sidney, Australia, 1997, P. 903–922.
26. Greco F., Leonetti L., Lonetti P. A two-scale failure analysis of composite materials in presence of fiber/matrix crack initiation and propagation // *Composite structures*. 2013. V. 95. P. 582-597.
27. Manshadi B.D., Vassilopoulos A.P., Botsis J. A combined experimental/numerical study of the scaling effects on mode I delamination of GFRP // *Composites science and technology*. 2013. V. 83. P. 32-39.
28. Болотин В.В, Новичков Ю.Н. Механика многослойных конструкций // М.: Машиностроение, 1980. С. 375
29. Болотин В.В. Многопараметрическая механика разрушения // *Расчеты на прочность*. №25, 1984, С. 12-33.
30. Расчет эффективной трещиностойкости для упругопластической слоистой среды / Р.Я. Газизов [и др.] // *Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника*. 2014. №2(37). С. 154-171.
31. ASTM D5528-2007. Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites.
32. Кьонг Л.К., Лурье С.А., Дудченко А.А. Об оценке трещиностойкости при межслойном разрушении слоистых композитов // *Механика композиционных материалов и конструкций*. 2012. Т. 18, №1. 2012. С. 83-91.

33. Исследование механических характеристик образцов из углепластиков с учетом процессов старения / Г.Ф. Рудзей [и др.] // Конструкции из композиционных материалов. 2016. №1(141). С. 56-61.

34. A numerical investigation on the interlaminar strength of nanomodified

35. Чернякин С.А., Скворцов Ю.В. Анализ роста расслоений в композиционных конструкциях // Вестник СибГАУ. 2014. №4(56). С. 249-255.

36. M. A. Jimenez Application of the Finite-Element Method to Predict the Onset of Delamination Growth // Journal of Composite Materials, volume 38, no. 15, 2004, P. 1309–1335.

37. A. T. Travesa, Simulation of delamination in composites under quasi-static and fatigue loading using cohesive zone models // PhD thesis, University Girona, 2006.

38. Диаграммы трещиностойкости полимерно-композитных материалов при растяжении и сжатии / Ю.Г. Матвиенко [и др.] // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2015. №6. С. 42-52.

39. Navarro C., Vazquez J., Dominguez J. 3D and 2D fatigue crack initiation and propagation in notched plates // International Journal of fatigue. 2014. V. 58. P. 40-46.

40. Rybicki E.F., Kanninen M.F. A Finite Element Calculation of Stress-Intensity Factors by a Modified Crack Closure Integral // Engineering Fracture Mechanics. 9, 1977 P. 931-938.

41. Krueger R. The Virtual Crack Closure Technique: History // Approach and Applications. ICASE Report No. 2002-10, 2002.

42. Hillerborg A., Modéer M., Petersson P.-E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements // Cement and Concrete Research, vol. 6, no. 6, 1976, P. 773-781.

43. Harper P., Hallett S. R. Cohesive zone length in numerical simulations of composite delamination // Engineering Fracture Mechanics, 2008, 75(16), P. 4774-4792.

M

o

r

44. Rice J. A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks // *J Appl Mech* 1968; P. 379–386.
45. Leone FA, Girolamo D, Dávila CG. Progressive damage analysis of bonded composite joints // *NASA/TM-2012-217790*; 2012, P. 1–39.
46. Cantwell W, Scudamore R, Ratcliffe J, Davies P. Interfacial fracture in sandwich laminates // *Compos Sci Technol* 1999, P. 2079–2085.
47. Camacho G. T., Ortiz M. Computational Modelling of Impact Damage in Brittle Materials // *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 33, No. 20-22, 1996, P. 2899-2938.
48. Borg R.; Nilsson L.; Simonsson K. Modelling of delamination using a discretized cohesive zone and damage formulation // *Composites Science and Technology* 2002, P. 1299-1314.
49. Williams J., Hadavinia H. Analytical solutions for cohesive zone models // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 2002; P. 809-825.
50. Smith E. The effect of the stress-relative displacement law on failure predictions using the cohesive zone model // *International Journal of Fracture* 1999; P. 41-51.
51. Cox B., Yang Q. Cohesive Models for damage evolution in laminated composites // *International Journal of Fracture* 2005, P. 107-137.
52. Ed. Sridharan Delamination behavior of composites // 1st Edition, CRC, Woodhead Publishing, 2008 , P. 788.
53. X. Xu, A. Needleman, Numerical simulations of fast crack growth in brittle solids. J. // *Mechanics and Physics of Solids*. 42, p. 1397-1434 (1994).
54. Simon J-W., Hower D., Stier B., Reese S, Fish J. A regularized orthotropic continuum damage model for layered composites: interlaminar damage progression and delamination // *Comput Mech* 2017 P. 1–17.
55. Reinoso J., Paggi M., Blázquez A. A nonlinear finite thickness cohesive interface element for modeling delamination in fiber-reinforced composite laminates // *Compos Part B*: 2016; P. 116–128.

56. Аннин Б.Д. Механика деформирования и оптимальное проектирование слоистых тел // Новосибирск: Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, 2005. С. 203.
57. Heidari-Rarani M, Shokrieh M, Camanho P. Finite element modeling of mode I delamination growth in laminated DCB specimens with R-curve effects // *Compos Part B: Eng* 2013; P. 897–903.
58. Декрет В.А., Зеленский В.С., Быстров В.М. Численное исследование устойчивости слоистого композита при одноосном сжатии слоев наполнителя // *Прикладная механика*. 2014. Т. 50, №5. С. 80-91.
59. Shet C., Chandra N. Effect of the Shape of traction-displacement cohesive zone curves on the fracture response // *Mechanics of Advanced Materials and Structures* 2004; P. 249-275.
60. ГОСТ 25.601-80. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания плоских образцов на растяжение при нормальной, повышенной и пониженной температурах. Государственный комитет СССР по стандартам, 1980. С. 1-7.
61. ANSYS Inc. ANSYS mechanical APDL materials reference, Release15.
62. Naghipour P., Bartch M., Vonggenreiter H. Simulation and experimental validation of mixed mode delamination in multidirectional CF/PEEK laminates under fatigue loading // *International Journal of Solids and Structures*, 2011, Is. 48, P. 1070–1081.
63. De Borst R. Numerical aspects of cohesive zone models // *Engineering Fracture Mechanics*, 2003, Is. 70, P. 1743–1757.
64. Shanmugam V, Penmetsa R, Tuegel E, Clay S. Stochastic modeling of delamination growth in unidirectional composite DCB specimens using cohesive zone models // *Composite Structure* 2013; P. 38–60.
65. Munoz J. J., Galvanetto U., Robinson P. On the numerical simulation of fatigue driven delamination with interface elements // *International Journal of Fatigue*, 2006, Is. 28(10), P. 1136–1146.

66. Li S, Thouless M, Waas A, Schroeder J, Zavattieri P. Use of a cohesive-zone model to analyze the fracture of a fiber-reinforced polymer-matrix composite // *Compos Sci Technol* 2005, P. 537–549.

67. Cornec A., Scheider I., Schwalbe K.H. On the practical application of the cohesive model // *Engineering Fracture Mechanics*, 2003, Is. 70, P. 1963–1987.

68. B. R. K. Blackman, H. Hadavinia, A. J. Kinloch and J. G. Williams The Use of a Cohesive Zone Model to Study the Fracture of Fiber Composites and Adhesively-Bonded Joints // *International Journal of Fracture*, Vol. 119, No. 1, 2003, P. 25-46.

69. An engineering solution for mesh size effects in the simulation of delamination using cohesive zone models / Turon A. [и др.] // *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 74, no. 10, P. 1665-1682.

70. Научные основы производства изделий из термопластичных композиционных материалов Г.С. Головкин, В.П. Дмитренко РУСАКИ, 2005. – 472 с.

71. Головкин Г.С., Гончаренко В.А. Волоконная технология переработки термопластичных композиционных материалов / Под ред. Г.С. Головкина. - М.: Изд-во МАИ. - 1993. - 232 с.

72. Джонсон, Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Т.1 / Н. Джонсон, Ф. Лион. - Методы обработки данных. М. Мир, 1980. – 512 с.