



**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 05.16.09 – Материаловедение (машиностроение)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Салиенко Николай Викторович

Москва 2020

Содержание

Введение		7
Глава I	Состояние вопроса и постановка задач исследований	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	Стекловолоконные армирующие материалы.....	25
1.1.2.3	Органоволоконные армирующие материалы.....	29
1.1.3	Полимерные матрицы (связующие) армированных слоистых ПКМ, используемые в авиастроении.....	31
1.1.3.1	Отверждающиеся (термореактивные) полимерные связующие (матрицы).....	33
1.1.3.2	Термопластичные полимерные матрицы.....	38
1.1.4	Традиционные и аддитивные технологии формования армированных слоистых ПКМ (прессовые, автоклавные и безавтоклавные), используемые в авиастроении.....	44
1.1.4.1	Препреговые технологии (жидкостные, порошковые и волоконные).....	44
1.1.4.2	Преформовые жидкостные технологии (вакуумная инфузия, пропитка под давлением).....	48
1.2	Межслоевая трещиностойкость слоистых ПКМ: показатели и методы оценки.....	53
1.2.1	Дефекты и трещины в элементах авиаконструкций из армированных слоистых ПКМ.....	53
1.2.2	Аналитические методы линейной упругой механики	

разрушения.....	57
1.2.2.1 Энергетические параметры трещинодвижущих сил и трещиностойкости ЛУМР.....	в 58
1.2.2.2 Силовые параметры трещинодвижущих сил и трещиностойкости ЛУМР.....	в 61
1.2.2.3 Классические микромеханические модели в рамках ЛУМР....	63
1.2.3 Экспериментальные данные о межслоевой трещиностойкости армированных волокнами слоистых ПКМ.....	68
1.2.4 Численные подходы к оценке трещиностойкости слоистых ПКМ.....	74
1.2.4.1 Метод виртуального закрытия трещины (VCCT).....	74
1.2.4.2 Метод когезионной зоны (МКЗ).....	77
Выводы по главе I.....	84
Глава II Экспериментальное определение параметров расслоения слоистых ПКМ.....	87
2.1 Объекты исследования.....	87
2.1.1 Характеристики объектов исследования.....	88
2.1.2 Получение образцов ПКМ для исследований.....	90
2.2 Методы исследования.....	92
2.2.1 Метод определения модуля упругости при растяжении.....	92
2.2.2 Метод определения межслоевой трещиностойкости.....	94
2.2.3 Метод определения локальной межслоевой когезионной прочности.....	96
2.2.4 Методика создания КЭ модели процесса расслоения по моде I образцов типа ДКБ.....	98
Выводы по главе II.....	106

Глава III Обобщение и сравнительный анализ экспериментальных и численных результатов исследования устойчивости к расслоению различных по составу армированных слоистых ПКМ.....	108
3.1 Анализ закономерности изменения нагрузки, приложенной по моде I, на края трещины для образцов в виде ДКБ исследуемых слоистых ПКМ.....	108
3.2 Исследование влияния размеров интерфейсных элементов на точность расчетов в конечно-элементной модели возникновения и развития трещины для слоистых ПКМ на термопластичных и термореактивных матрицах.....	114
Выводы по главе III.....	118
Выводы и заключения по диссертационной работе.....	120
Список литературы.....	123

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 и др. 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 методов 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 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 и экспоненциальным законом 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 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-, углекомполтов на основе терморепактивных и термопластичных матриц количество и размер интерфейсных элементов (ИЭ), располагающихся по длине когезионной зоны, влияет на точность расчета усилия возникновения и развития трещины. Установлено, что для УК-ЭАП при длине ИЭ 0,9 мм минимально возможное их количество равно 4, для УК-ПЭЭК при длине ИЭ 0,2мм – 4.5, для СК-ПКА при длине ИЭ 0,2 мм – 5 и для ОК-ПКА при длине ИЭ 0,3 мм – 3,6.

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-, углекомполтов на основе терморепактивных и термопластичных матриц при допустимом минимальном объёме вычислений. Это даёт 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_c , максимальном раскрытии когезионной зоны δ_{max} и 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.

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 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).

По теме диссертации опубликовано 13 работ из них 2, входящих в Перечень ведущих периодических изданий, рекомендуемых ВАК РФ, 1 статья в зарубежном научном издании, входящем в реферативную базу Scopus.

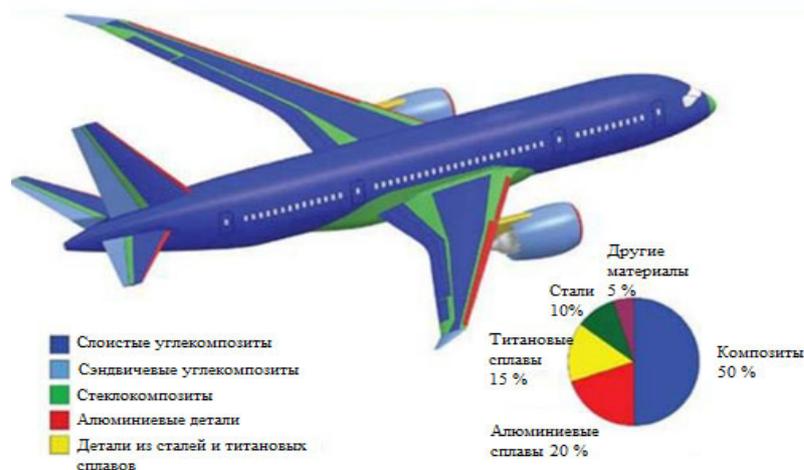
Глава I Состояние вопроса и постановка задач исследований

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

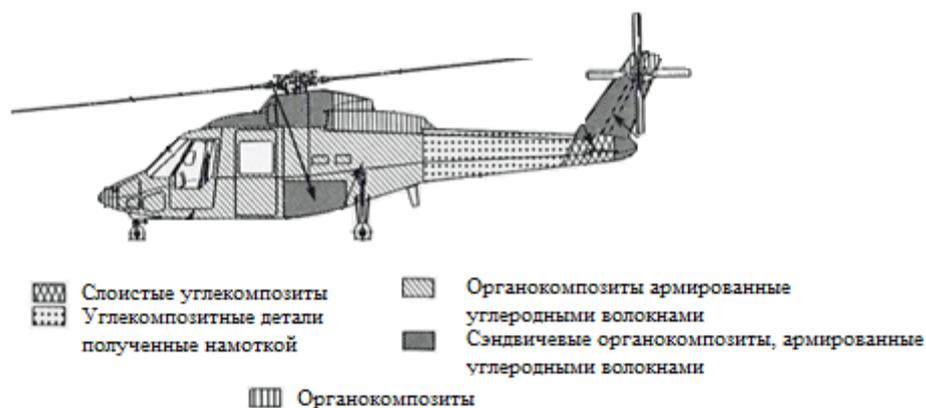
1.1.1 Применение армированных слоистых ПКМ в авиастроении

В современном авиастроении 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).

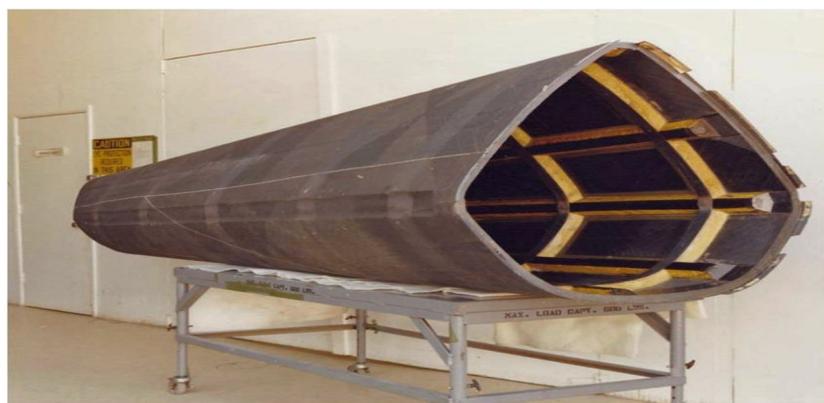


Рисунок 2 – Фотография подкрепленного хвостового конуса вертолета Sikorsky S-75

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.

1.1.2.3 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

Широко распространенной характеристикой элементарных волокон служит их линейная плотность T , выражаемая в текс и равная массе в г волокна длиной 1 км и рассчитывается по формуле 1

$$T=10^3m/l, \quad (1)$$

где m – масса в г,

l – длина в м.

Линейная плотность волокна определяет, в конечном счете, его поперечные размеры. Чем ниже линейная плотность, тем меньше диаметр поперечного сечения волокна, т. е. тем тоньше волокно. В большинстве случаев эта величина для УВ лежит в пределах 0,05-0,09 текс, что соответствует диаметру филамента порядка 7-10 мкм.

Углеродные волокнистые армирующие материалы выпускаются промышленностью в виде жгутов или нитей с различным количеством элементарных волокон и в различных текстильных формах: однонаправленных лент с редким поперечным плетением и тканей с различным плетением взаимно перпендикулярных систем нитей.

Жгуты углеродных волокон представляют собой набор непрерывных филаментов в виде некрученых или слабо крученых нитей. Важными их характеристиками, помимо их деформационно-прочностных свойств, являются количество филаментов в жгутах (в тысячах, K), определяющее их линейную (в текс) и объемную (в г/см³) плотность. В таблице 2 приведены характеристики углеродных жгутов отечественной фирмы UMATEX.

Таблица 2 – Технические характеристики углеродных жгутов фирмы UMATEX[3]

Сортамент УВ		Количество филаментов	Прочность, ГПа	Модуль упруго- сти, ГПа	Предель- ная деформа- ция, %	Линейная плотность , текс	Объёмная плотность , г/см ³
Среднемо- дульные	UMT40	3К	4,0	260	1,5	190	1,77
	UMT45	12К	4,5	260	1,7	780	1,78
	UMT49	12К	4,9	260	1,8	760	1,78
	UMT42	24К	4,2	260	1,5	1 530	1,78
	UMT40	48К	4,0	250	1,5	3100	1.78
	UMT290	12К	4.4	290	1.4	730	1.74
Высокому- дульные	UMT400	12К	4,2	400	1,1	710	1,82
	UMT430	12К	4,0	430	1,0	700	1,84
	UMT530	12К	3.8	530	0.7	680	1.93

Однонаправленные углеродные ленты (однонаправленные ткани) имеют тканую структуру, в которой жгуты углеродных волокон (не менее 85%) расположены в одном направлении и скрепляются с помощью уточных (поперечных нитей), в качестве которых используются тонкие стеклянные, арамидные или термоклеевые нити. Такая структура обеспечивает высокую прочность углеродной ленты на разрыв в продольном направлении. В таблице 3 приведены характеристики углеродных лент, производимых отечественной фирмой UMATEX.

Таблица 3 – Технические характеристики однонаправленных углеродных лент UMATEX [4]

Наименование	Поверхностная плотность, г/м ²	Переpletение	Марка нити основы	Марка нити утка	Количество нитей на 10 см по основе / по утку, шт.	Соотношение массы нитей по основе / по утку, %	Совместимость со связующим
1	2	3	4	5	6	7	8
UWUD-3K-PLAIN-130-100	130	Полотно	3К	3К	51 / 17	75 / 25	эпоксидные
UWUD-12K-PLAIN-205-100	205	Полотно	12К	ТЕРМОКЛЕЕВАЯ НИТЬ	25 / 10	96 / 4	эпоксидные
FIBARM TAPE-230/300	230	Полотно	12К	ТЕРМОКЛЕЕВАЯ НИТЬ	28 / 10	97 / 3	эпоксидные

Продолжение таблицы 3

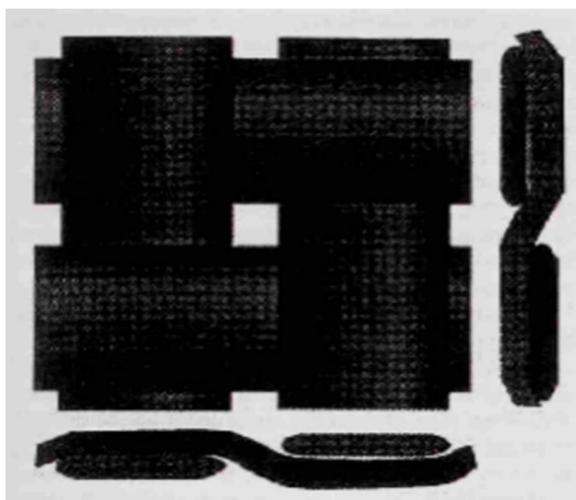
1	2	3	4	5	6	7	8
FIBARM TAPE- 530/300	530	Полотно	24К	ТЕРМОК ЛЕЕВАЯ НИТЬ	33 / 10	99 / 1	эпоксидные

Большинство используемых в производстве армированных слоистых ПКМ углеродных тканей относятся к двунаправленным тканям, в которых жгуты волокон переплетаются в направлении 0 (основа) и 90 градусов (уток). Наиболее распространенные типы плетения углеродных тканей показаны на рисунке 3:

1. Полотняное плетение (рисунок 3а), при котором происходит строгое чередование основной и уточной нитей в соотношении 1:1. При этом, если первая нить основы вышла за поверхность, то вторая закрывается уточной нитью и т.д. Такое строгое чередование происходит по всей длине и ширине ткани. Получается материал, одинаковый с обеих сторон и равнопрочный в обоих направлениях.

2. Саржевое плетение (рисунок 3б), в котором каждая нить утка по отношению к нити основы в каждом следующем ряду сдвигается на один ход вправо или влево. Места пересечения нитей образуют на поверхности ткани диагональные полосы под углом 45 градусов.

3. Сатиновое плетение (рисунок 3в) отличается от саржевого тем, что не менее пяти нитей основы закрывают уток, выходящий на поверхность только над одной.



а

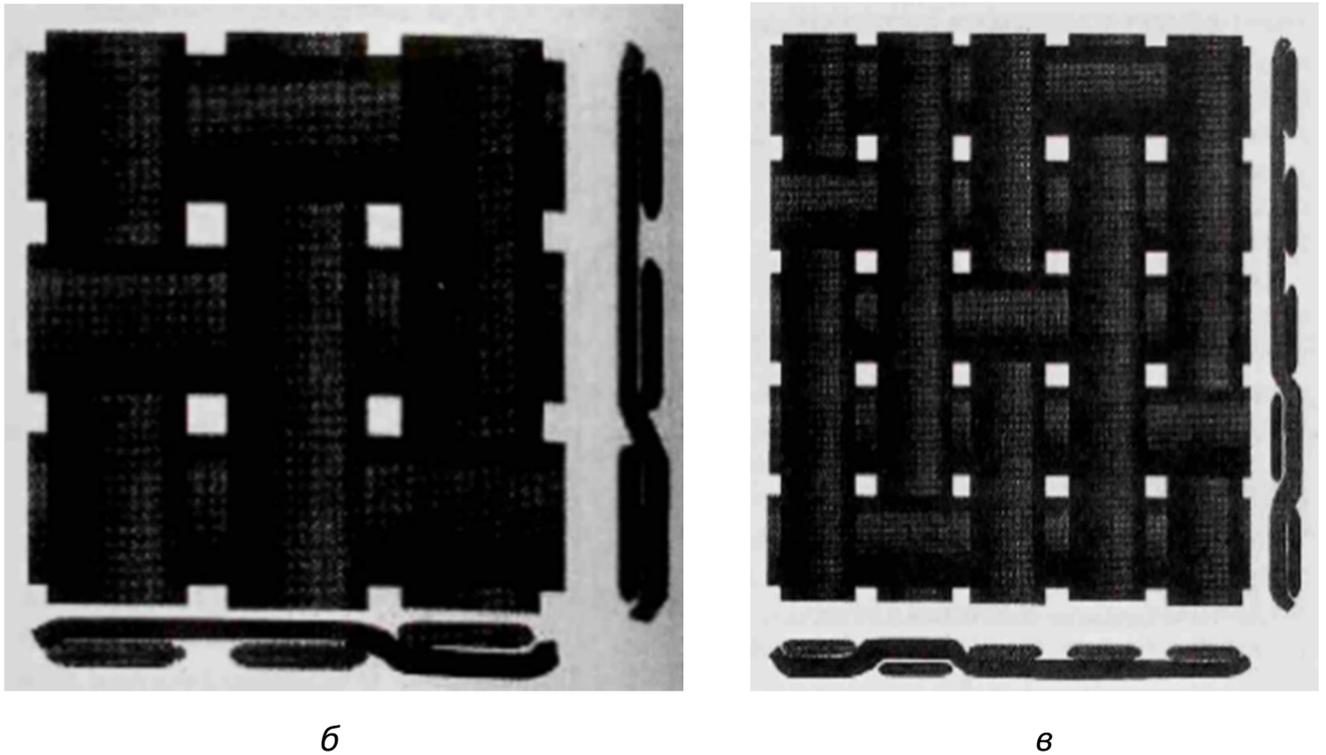


Рисунок 3 – Углеродные ткани полотняного (*а*), саржевого (*б*) и сатинового (*в*) плетения [5]

Важными характеристиками углеродных, как и других, тканей, в значительной мере определяемыми типом плетения. Являются поверхностная и объемная плотность, т.е. масса единицы площади и объема соответственно. Углеродные ткани изготавливают с массой единицы площади от 60 до 1600 г/м². При этом отклонение от номинального значения плотности может составлять $\pm 5\%$ для тканей с поверхностной плотностью от 60 до 400 г/м² и $\pm 10\%$ для тканей с поверхностной плотностью от 400 до 1600 г/м². В аэрокосмической отрасли применяют в основном углеродные ткани с поверхностной плотностью от 60 до 400 г/м².

Важное значение имеет также относительная объемная пористость (коэффициент пористости) тканей Π как отношение объема пор к общему объему, рассчитываемая по формуле 2

$$\Pi = V_{\text{пор}} / V_{\text{в.с.}} = 1 - \rho_{\text{в.с.}} / \rho_{\text{нап}}, \quad (2)$$

где $\rho_{в.с.}$ - объемная плотность волокнистой структуры, кг/м³,

$\rho_{нап}$ - плотность материала волокна, кг/м³.

Функциональную зависимость пористости от давления уплотнения $\Pi = f(p)$ определяют экспериментально, уплотняя модельные пакеты различными давлениями p_i . В процессе уплотнения измеряют высоту пакета, при каждом давлении пакет выдерживают до тех пор, пока его толщина не достигала равновесного значения. По результатам эксперимента строят зависимость в координатах $h = f(\lg p)$ (кривую уплотнения), где относительная высота пакета h вычисляется по формуле 3

$$h = H_{pi} / H_0 , \quad (3)$$

где

H_{pi} — высота пакета при давлении p_i ;

H_0 — начальная высота пакета.

Кривую уплотнения пересчитывают в зависимость $\Pi = f(p)$ по формуле 4

$$\Pi = 1 - M_n / (\rho_{нап} \cdot H_{pi}) = 1 - \rho_s \cdot n / (\rho_{нап} \cdot H_{pi}) , \quad (4)$$

где

M_n - масса пакета единичной площади, кг/м², при заданной толщине H ;

ρ_s - поверхностная плотность слоя волокнистой структуры, кг/м²;

n - количество слоёв в пакете.

По кривым уплотнения с учетом массы единицы площади листовых волокнистых наполнителей ρ_s , и коэффициента пористости Π рассчитывают относительное объемное содержание волокна в пакете φ_v по формуле 5

$$\varphi_v = 1 - \Pi = p_s \cdot n / (\rho_{\text{нап}} \cdot H_{pi}) \quad (5)$$

которое, с одной стороны, определяет её проницаемость при пропитке связующим, с другой – объемную долю армирующего наполнителя и физико-механические свойства будущего ПКМ.

В таблице 4 приведены некоторые технические характеристики двунаправленных углеродных тканей, производимых отечественной фирмой UMATEX из жгутов волокон.

Таблица 4 – Технические характеристики двунаправленных углеродных тканей фирмы UMATEX [5]

Наименование	Поверхностная плотность, г / м ²	Переплетение	Марка нити основы	Марка нити утка	Количество нитей на 10 см по основе / по утку, шт.	Соотношение массы нитей по основе / по утку, %	Совместимость со связующим
UWB-200-3K-TWILL2/2-100	200	Саржа 2 / 2	UMT 40-3K-EP	UMT 40-3K-EP	53 / 53	50 / 50	эпоксидные
АСМ С240Р	240	Полотно	3К	3К	60 / 60	50 / 50	эпоксидные
АСМ С240Т	240	Саржа 2 / 2	3К	3К	60 / 60	50 / 50	эпоксидные
АСМ С270Т	270	Саржа 2 / 2	3К	3К	71 / 71	50 / 50	эпоксидные
АСМ С370Т	370	Саржа 2 / 2	12К	12К	23 / 23	50 / 50	эпоксидные

Важное практическое применение в производстве армированных слоистых ПКМ с повышенной межслоевой прочностью и трещиностойкостью находят так называемые мультиаксиальные (прошитые многослойные), в частности, двухслойные углеродные ткани – текстильные материалы, состоящие из нескольких слоев углеродных нитей или тканей, скрепленных друг с другом посредством тонких прошивных (стабилизирующих) нитей, обычно другой природы (гибридные мультиаксиальные ткани). В таблице 5 приведены характеристики двухслойных углеродных тканей и одной 4-х слойной, производимых отечественной фирмой UMATEX из углеродных тканей, прошитых стеклонитью.

Таблица 5 – Технические характеристики многослойных углеродных тканей, прошитых стеклонитью, фирмы UMATEX [4]

Наименование	Ширина, мм	Поверхностная плотность ткани, г/м ²	Ориентация слоев в ткани	Количество филаментов в жгуте УВ	Поверхностная плотность слоев ткани, г/м ²	Стабилизирующие нити
АСМ С600В	1270	607	0° / 90°	24К	300 / 300	-
АСМ С400В	1270	407	0° / 90°	12К	200 / 200	-
АСМ С300Х	1270	316	+45° / -45°	12К	150 / 150	Е-СТЕКЛО
АСМ С300Х	1270	308	+45° / -45°	12К	150 / 150	Е-СТЕКЛО
АСМ С300Х	1270	316	+45° / -45°	12К	150 / 150	Е-СТЕКЛО
АСМ С400Х	1270	417	+45° / -45°	12К	200 / 200	Е-СТЕКЛО
АСМ С600Х	1270	617	+45° / -45°	24К	300 / 300	Е-СТЕКЛО
АСМ С800Q	1270	807	0°/+45°/90°/-45°	12К	200/200/200/200	-

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 6 приведены марки и некоторые свойства элементарных СВ.

Таблица 6 – Свойства стекланных волокон и стекол различного состава [6]

Показатели	Алюмооб- росиликат- ное Е	Известко- вонатриево е А	Магнезиальное алюмосиликат- ное высокопрочное		Щелочное кислотостойкое		С низкой диэлект- рической проница- емостью 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
Относительно е удлинение при разрыве , %	4,8	4,0	5,4	4,8	–	3,6	4,7	–
Удельная теплоемкость стекла, Дж/кг·К	720	–	670	–	715	–	670	870
Коэффициент теплопровод- ности стекла, Вт/(м·К)	0,9	–	–	–	1,05	–	–	–

Продолжение таблицы 6

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Коэффициент линейного термического расширения, $\times 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$ (20–100 $^\circ\text{C}$)	5,0	–	2,5	3,6	–	7,0	3,1	0,55 –
Диэлектрическая проницаемость, ϵ при 10^2 Гц	8,43	-	4,57	-	6,70	-	3,61	3,78
Тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta$ при 10^2 Гц	4,2	-	3,3	-	1,5	-	3,0	0,15
Удельное объемное электрическое сопротивление Ом·м при 10^2 Гц	$6,7 \cdot 10^{11}$	-	$1,2 \cdot 10^{12}$	-	$1,2 \cdot 10^{12}$	-	$1,7 \cdot 10^{12}$	$1 \cdot 10^{18}$
Температура размягчения, $^\circ\text{C}$	845	–	970	–	750	–	770	1670

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). В таблицах 7-8 приведены характеристики стекловолоконистых армирующих нитей и тканей нескольких марок.

Таблица 7 – Основные характеристики ровингов из стеклянных волокон [7]

Марка	Результирующая линейная плотность, текс	Разрывная нагрузка, Н, не менее	Массовая доля, %	
			замаасливателя	влаги не более
РБН 10-420-78	420±35	200	0,7-1,2	0,5
РБН 10-840-78	840±70	400		
РБН 10-1260-78	1260±88	450		
РБН 10-2520-78	2520±176	800		
РВМН 10-420-80	420	240		
РВМН 10-1260-80	1260	800		
РВМН 10-1680-80	1680	1000		
РВМН 10-2520-80	2520	1500		

Таблица 8 – Технические характеристики стеклотканей различных марок [7]

Марка ткани,	Тип переплетения	Поверхностная плотность, кг/м ²	Разрывная нагрузка для полоски 25x100 мм, Н		Толщина, мм	Относительная пористость
			по основе	по утку		
1	2	3	4	5	6	7
Т-10	Сатин 8/3	0,29	2646	1470	0,23	0,496
Т-11	Сатин 8/3 или 5/3	0,39	2842	1666	0,30	0,480
Т-12		0,37	2842	1666	0,30	0,510
Т-13	Полотно	0,29	1960	1274	0,27	0,570
Т-14		0,31	1960	1617	0,29	0,573
А-1		0,11	589	589	0,10	0,560
А-2		0,07	294	245	0,06	0,534

Продолжение таблицы 8

1	2	3	4	5	6	7
ТСУ8/3- ВМ	Сатин 8/3	0,32	2940	1764	0,27	0,526
ТУ ПР	Полотно	0,29	2156	1372	0,26	0,554

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. Стекланные волокна имеют высокоактивные поверхности и хорошо смачиваются связующими, однако вместе с этим их поверхность легко загрязняется, и смачивание может ухудшиться. Адсорбированная влага также снижает поверхностную энергию волокон и их смачиваемость полимерами, особенно с малой полярностью. В процессе формирования 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]. Однако текстильные замасливатели резко ухудшают адгезионные свойства волокон, снижая их поверхностную энергию. Поэтому перед совмещением со связующим замасливатели необходимо удалять смывкой или термообработкой при 300°С. Для целенаправленного регулирования зоны контакта волокнистого наполнителя с полимерным связующим на поверхность наполнителя наносят низкомолекулярные вещества различного состава с биполярной структурой молекул — аппреты, которые специально разрабатываются под конкретный вид связующего и армирующих волокон.

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.

При разрыве органические волокна с высоким модулем упругости и большим предельным удлинением обеспечивают слоистым ПКМ высокую ударную вязкость и малую чувствительность к повреждениям. При сжатии композиты на основе органических волокон значительно уступают стеклокомпозитам. Общим недостатком органических волокон является высокая сорбция влаги, и, следовательно, потеря механических свойств на 15-20 %. ОВ отличаются хорошей способностью к текстильной переработке, сохраняя после

ткачества 90% исходной прочности нитей, что позволяет использовать ОВ в производстве тканых армирующих материалов [2].

В таблице 9 приведены данные о плотности и деформационно-прочностных свойствах основные марок органических волокон.

Таблица 9 – Плотность и деформационно-прочностные свойства основные марок 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 СВМПЭ				
Дайнема	970	3,3	3,0-6,0	50-120
Спектра 900	970	2,5	3,0-6,0	50-120

Органические высокомодульные 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 терморезистивные (ТР) и термопластичные (ТП) полимеры.

ТР полимерные матрицы формируются непосредственно в ПКМ в результате необратимых химических превращений сложных реакционноспособных пре- или форполимерных (мономер-олигомерных или олигомер-полимерных) композиций как исходных связующих на стадиях технологических процессов сочетания с армирующими системами, формования и фиксирования формы изделий, их дополнительных обработок обычно в отвержденных (густосетчатых, аморфных, стеклообразных) полимерах.

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 10.

Таблица 10 – Физико-механические характеристики реактопластов [2]

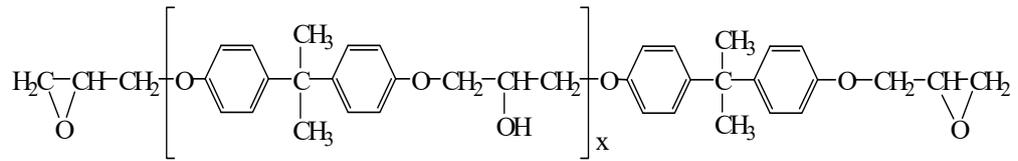
Параметр	Тип матрицы				
	Эпоксидная	Фенолформальдегидная	полиэфирная	Полиимидная	Кремнийорганическая
Предел прочности, МПа	35-100	40-70	30-70	90-95	25-50
Модуль упругости, ГПа	2,4-4,2	7-11	2,8-3,8	3,2-5,0	6,8-10
Плотность, г/см ³	1,2-1,3	1,2-1,3	1,2-1,35	1,41-1,43	1,35-1,4
Теплостойкость, °С	130-150	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

По оптимальному сочетанию технологических и эксплуатационных характеристик в производстве армированных слоистых ПКМ применительно к

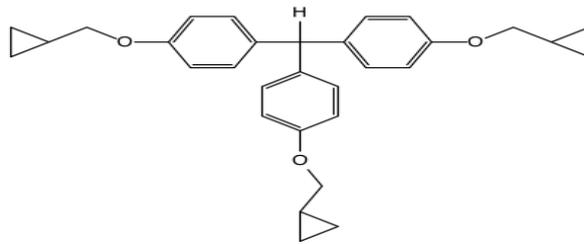
авиаконструкциям наиболее широко используются эпоксидные матрицы, важнейшими типами компонентов которых в исходном состоянии являются следующие компоненты, представленные на рисунке 4 а-е:

1) Ароматические глицидиловые эфиры (основные компоненты) представлены на рисунке 4 а-г.

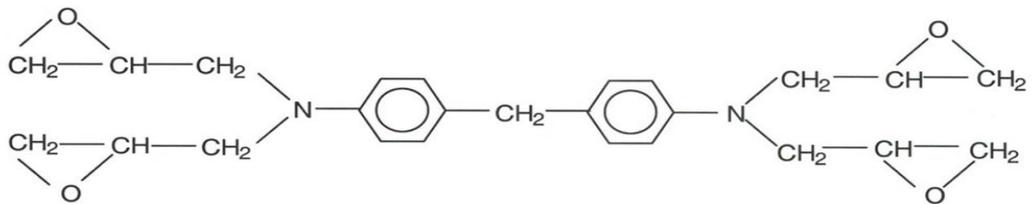
2) Алифатические глицидиловые эфиры (модифицирующие компоненты, разбавители) представлены на рисунке 4 д,е.



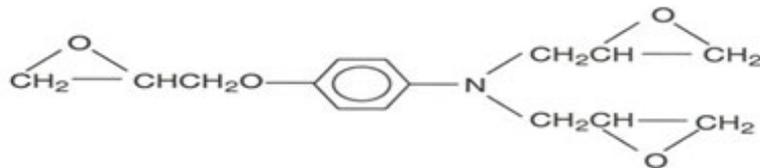
а



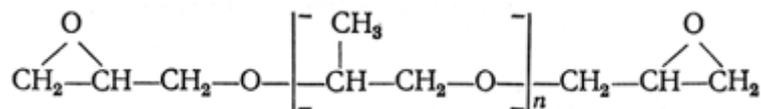
б



в



г



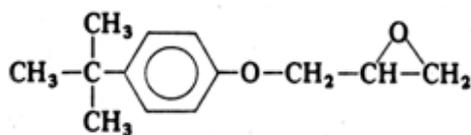
д*е*

Рисунок 4 – Компоненты эпоксидных матриц, *а* – диглицидиловые эфиры бис-фенола (ДГЭ БА), *б* – триглицидиловый эфир трифенилметана (ТГЭ ТФ), *в* – тетраглицидиловый эфир диаминодифенилметана (ТГЭ ДАДФМ), *г* – триглицидиловый эфира пара-аминофенола (ТГЭ ПАФ), *д* – диглицидиловый эфир полипропиленгликоля, *е* – глицидиловый эфир п-трет-бутилфенола

В таблице 11 приведены типы и характеристики отечественных эпоксидных компонентов связующих для армированных слоистых ПКМ.

Таблица 11 – 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-5	ДГЭ БА	360-470	18-23	0	-
ЭД-6	ДГЭ БА	480-600	13-18	10	-
ЭД-16	ДГЭ БА	239-269	16-18	-	5-18
ЭД-20	ДГЭ БА	195-216	20-22,5	72-82	13-20
ЭТФ	ТГЭ ТФ	-	19,5	40-65	-
ДЭГ-1	ДГЭ ДЭГ	-	24	-	-
УП-610	<i>ТГЭ ПАФ</i>	-	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°С.

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°С. Связующие могут быть использованы для изготовления изделий всех

категорий – от слабонагруженных деталей до особо ответственных конструкций. Поставки материалов осуществляются в виде препрегов. В таблице 12 приведен общий обзор связующих и препрегов, разработанных Институтом новых углеродных материалов и технологи (АО ИНУМиТ).

Таблица 12 – Общие характеристики эпоксидных связующих армированных слоистых ПКМ, формуемым по препреговым и преформовым технологиям

Продукт	T _{отверждения} / T _{стеклования} , °C	Описание, потенциальные области применения	Ключевые характеристики
T-26	180/205	Однокомпонентное связующее, температура пропитки 100- 110 °C, ориентировано на авиакосмический сектор и спец. изделия	Высокая прочность (95 МПа), водопоглощение менее 1,2%, уникально-низкая вязкость менее 100 мПа*с, технологическое окно более 7 часов
T-31	140/150 180/190	Двухкомпонентное связующее, температура пропитки 60-70 °C, ориентировано на промышленные изделия, товары для спорта	Высокая прочность (73 МПа), усадка (менее 1%), вязкость менее 500 мПа*с, технологическое окно более 3 часов
T-32	140/116	Двухкомпонентное связующее, температура пропитки 40-50 °C, ориентировано на промышленные изделия, товары для спорта	Низкая температура пропитки, вязкость менее 100 мПа*с, технологическое окно более 3 часов
T-37	80/110 140/150	Двухкомпонентное связующее, температура использования 20- 30 °C, ориентировано на промышленные изделия, товары для спорта	Большое технологическое окно более 3 часов, высокая прочность и жесткость, гибкий режим отверждения
TK123	80/101	Двухкомпонентное, комнатная температура пропитки, ориентировано на промышленные изделия, в том числе оснастку	Большое технологическое окно (не менее 60 мин. при 50 °C), высокие физико-механические характеристики.
T-107	180/185	Автоклавное формование, авиакосмический сектор, спец. техника	Высокая прочность, высокая температура стеклования, очень высокие ударные характеристики

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.

Термопластичные полимеры, применяемые в качестве матрицы ПКМ, представляют собой некристаллизующиеся и трудно кристаллизующиеся жесткоцепные полимеры с линейной или разветвленной формой макромолекул, находящиеся в условиях эксплуатации в аморфном или аморфно-кристаллическом фазовом состоянии с различной степенью кристалличности, температура стеклования аморфных областей которых (T_c) существенно выше комнатной температуры ($T_c \gg T_{комн}$), а температура плавления кристаллических областей и, соответственно, температура перехода в вязко-текучее состояние (в градусах Кельвина) примерно в 1,5 раза больше T_c ($T_{пл} \approx 1,5 T_c$). Деформационно-прочностные свойства аморфно-кристаллических полимеров этого класса сравнительно слабо зависят от степени кристалличности и в решающей стадии определяются стеклообразной аморфной фазой. Термостойкость таких полимеров определяется химическим строением повторяющихся звеньев (наличием

ароматических циклов). Их деформационная теплостойкость в аморфном состоянии и при малой степени кристалличности в решающей степени определяется их T_c , а при высокой степени кристалличности - $T_{пл}$.

На рисунке 5 представлены перечни и обобщенные характеристики основных термопластичных полимеров, используемых в качестве матрицы армированных ПКМ: полиэтилен (ПЭ) низкой плотности - PE-LD, линейный полиэтилен низкой плотности - PE-LLD, ПЭ высокой плотности - PE-HD, полипропилен (ПП) - PP; полиоксиметилен или полиформальдегид - POM, полиамид 6, капрон или найлон 6 - PA 6, полиамид 66 или найлон 66 - PA 66, полибутилентерефталат - PBT, полиэтилентерефталат или лавсан - PET, полистиролсульфонат - SPS, термопластичный эластомер - TPE, полиамид 46 - PA 46, полифталамид - PPA, полиамид 11/12 - PA 11/12; полифениленсульфид - PPS, полиэфирэфиркетон - PEEK, полиэфиркетон - PEK; полистирол - PS, поливинилхлорид - PVC, ударопрочный полистирол (УПС) - PS-HI, АБС пластик - ABS, полиметилметакрилат или органическое стекло - PMMA, сополимер стирола и акрилонитрила - SAN, смесь (сплав) полистирола и АБС-пластика - PC/ABS, полифениленоксид - PPEm, сплав поликарбоната и полиэтилентерефталата - PC/PET, поликарбонат - PC; сплав полисульфона и полиэфирсульфона - PSU/PES, полифениленсульфон - PPSU, поламидоимид - PAI).

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.

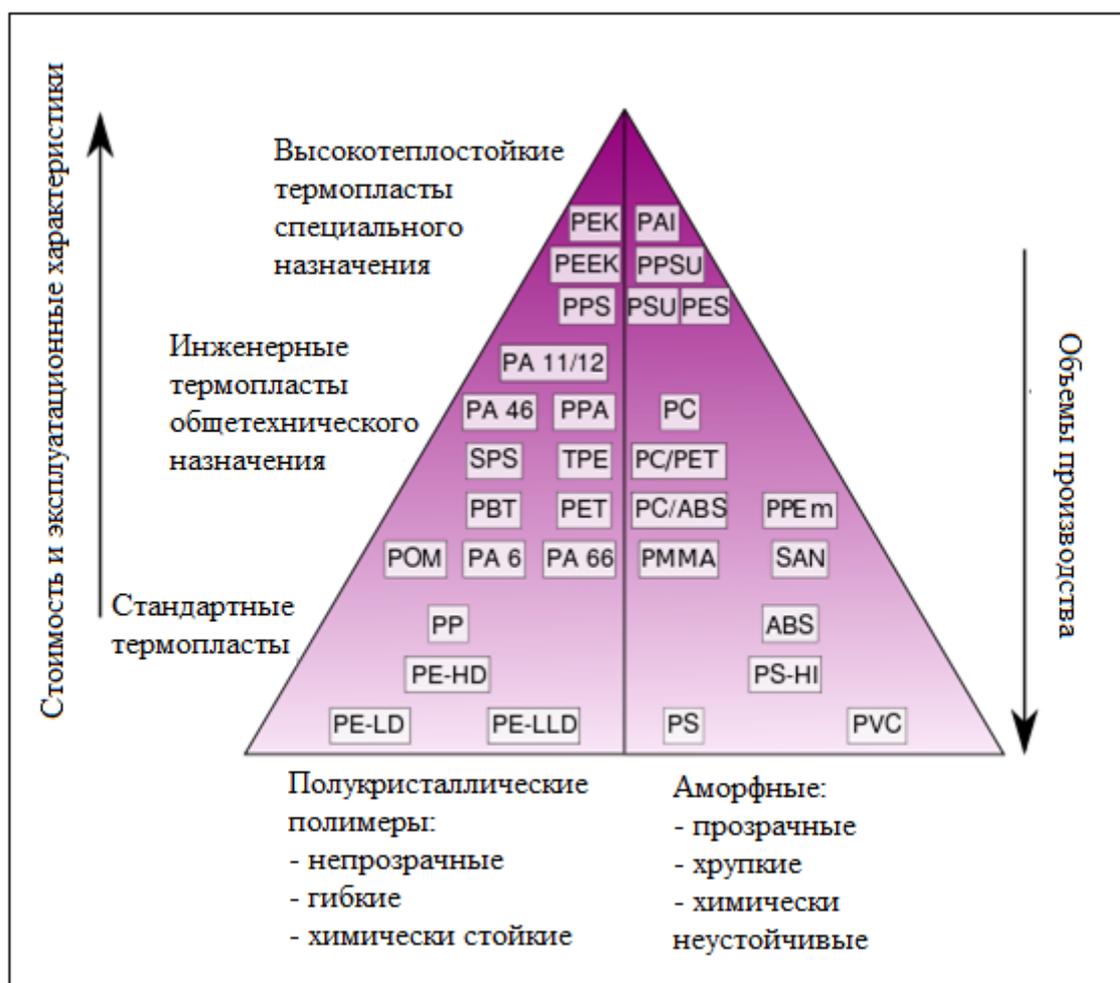


Рисунок 5 – Перечни и обобщенные характеристики основных термопластичных полимеров, используемых в качестве матрицы армированных ПКМ

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 термопластичные полимеры, находящиеся наверху пирамиды, повторяющиеся звенья полимерных цепей которых состоят преимущественно из ароматических (бензольных) циклов, соединенных мостиковыми группами (связями), представленными на рисунке 6 *a-з*:

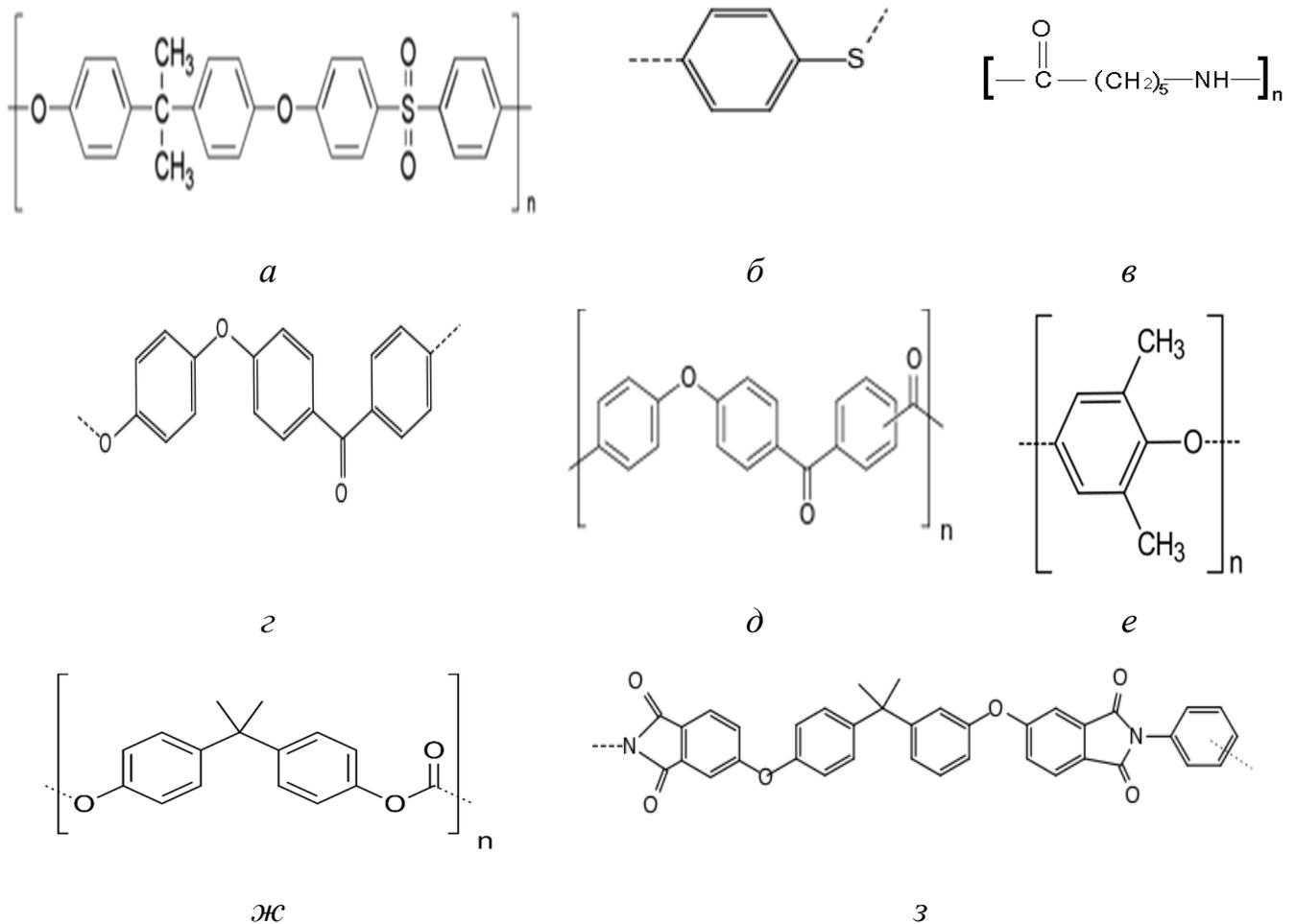


Рисунок 6 – Формулы высокотеплостойких термопластичных полимеров (*a* - полиэфирсульфон, *б* - полифениленсульфид, *в* - термопластичный полиимид - полиэфиримид, *г* - полиэфирэфиркетон, *д* - полиэфиркетонкетон, *е* - полифениленоксид, *ж* – поликарбонат, *з* - поликапроамид)

Физико-механические свойства некоторых термопластичных полимеров представлены в таблице 13.

Таблица 13 – Физико-механические свойства термопластичных матриц

Матрица	Плотность, кг/м ³	σ_B	$\sigma_{B,сж}$	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	–
Полисulfон	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	–	–
Полиэфирэфиркетон	1300	130	–	5,1	50	50	4,80
Поликапроамид (ПКА, ПА-6))	1150	65	92	2,3	15	110	–

В последнее время применительно к производству авиаконструкций из армированных слоистых ПКМ широкое внимание уделяется термопластичным матрицам на основе полиэфирэфиркетонных (ПЭЭК) — ароматических полимеров (полиариленов), состоящих из фениленовых циклов и мостиковых карбонильных (кетонных) и простых эфирных групп. ПЭЭК относится к кристаллизующимся термопластичным полимерам с высокой степенью кристалличности и температурой плавления, обеспечивающими его технологичность в расплаве и высокой деформационной теплостойкостью в аморфно-кристаллическом состоянии со способностью эксплуатироваться в интервале температур $-40+260^{\circ}\text{C}$, выдерживая кратковременное нагревание до 300°C при хорошей водостойкости. При увеличении содержания кетонных групп относительно эфирных от 33% до 67% повышаются температура стеклования (от 141 до 165°C),

температура плавления (от 335 до 390°C) и степень кристалличности (от 50% до 70%).

В таблице 14 обобщены физико-механические свойства ПЭЭК.

Таблица 14 – Физико-механические свойства ПЭЭК

Показатель	Значение
Плотность, кг/м ³	1300-1500
Предел прочности, МПа	100-150
Относительное удлинение, %	3-50
Модуль упругости, ГПа	3,6-6,5
Коэффициент трения, Н/мм	0,30-0,38
Теплопроводность, Вт/(м·К)	0,25-0,92
Удельная теплоемкость, Дж/кг·К	0,32
Линейный коэффициент теплового расширения, 1/К	$50 \cdot 10^{-6}$
Водопоглощение за сутки, %	0,1-0,2

В связи с развитием волоконной технологии получения полуфабрикатов, армированных высокопрочными волокнами слоистых ПКМ на основе термопластичных матриц (см. ниже) важное значение имеют матричные поликапроамидные (капроновые) волокна. Волокнообразующий поликапроамид (полиамид 6) обладает сравнительно невысокой молекулярной массой (до 25 000) с высокой температурой плавления ($T_{пл} = 220$ °C) и степенью кристалличности (до 75%), а также достаточно высокими физико-механическими свойствами (см. таблицу 13).

1.1.4 Традиционные и аддитивные технологии формования армированных слоистых ПКМ (прессовые, автоклавные и безавтоклавные), используемые в авиастроении

К настоящему времени, применительно к производству элементов авиаконструкций из армированных слоистых ПКМ на основе как терморезистивных, так и термопластичных матриц, разработано большое число различных технологических схем. В последнее время большое внимание уделяется разработке автоматизированных процессов производства таких конструкций, базирующихся на аддитивных технологиях послойного формообразования. В зависимости от выбора и реализации технологии формования структура и свойства полимерных композитов могут резко отличаться. Выбор технологии зависит от конструкции изделия, условий его эксплуатации, объема изготовления и имеющихся производственных ресурсов. При этом во всех случаях в основе изделий из армированных слоистых ПКМ лежат преформовые и препреговые технологии первичного формообразования с последующим прессовым, автоклавным или безавтоклавным формованием фиксированием и стабилизацией конечной формы изделия.

1.1.4.1 Преформовые жидкостные технологии (вакуумная инфузия, пропитка под давлением)

В преформовых, так называемых инфузионных технологиях, первичная заготовка (преформа) формируется из «сухого» армирующего компонента и под вакуумом или при избыточном давлении, в том числе в сочетании с вакуумом, пропитывается низковязким отверждающимся связующим (вакуумная пропитка и пропитка (инжекция) под давлением соответственно). При этом окончательное формообразование изделия и отверждение связующего с фиксацией и стабилизацией формы изделия могут быть достигнуты в заданном температурно-временном режиме при атмосферном или избыточном давлении в эластичной

форме (безавтоклавный метод) или в автоклаве, а также прессованием в жесткой форме, в том числе термокомпрессионным прессованием.

При производстве средних и крупных партий изделий из армированных слоистых ПКМ на основе низковязких отверждающихся связующих целесообразно применение метода инъекции связующего в закрытую форму, получившего название РТМ (RTM – Resin Transfer Moulding), схема которого представлена на рисунке 7.

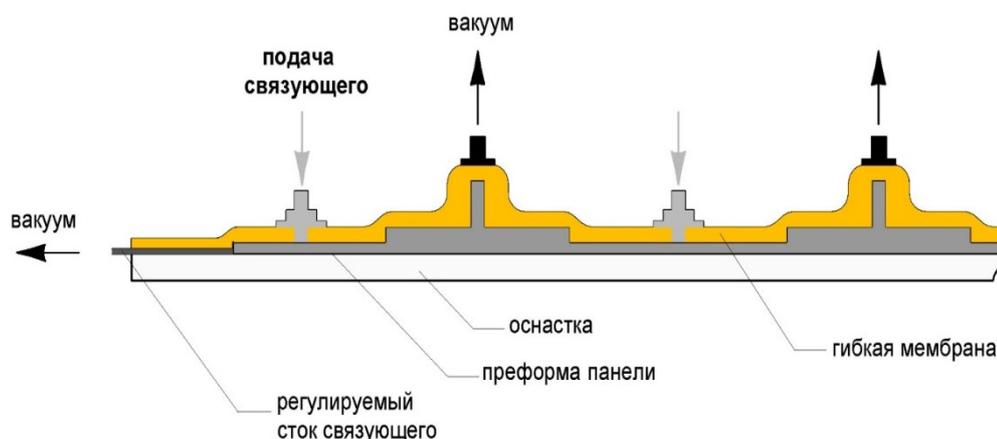


Рисунок 7 – Схема метода РТМ

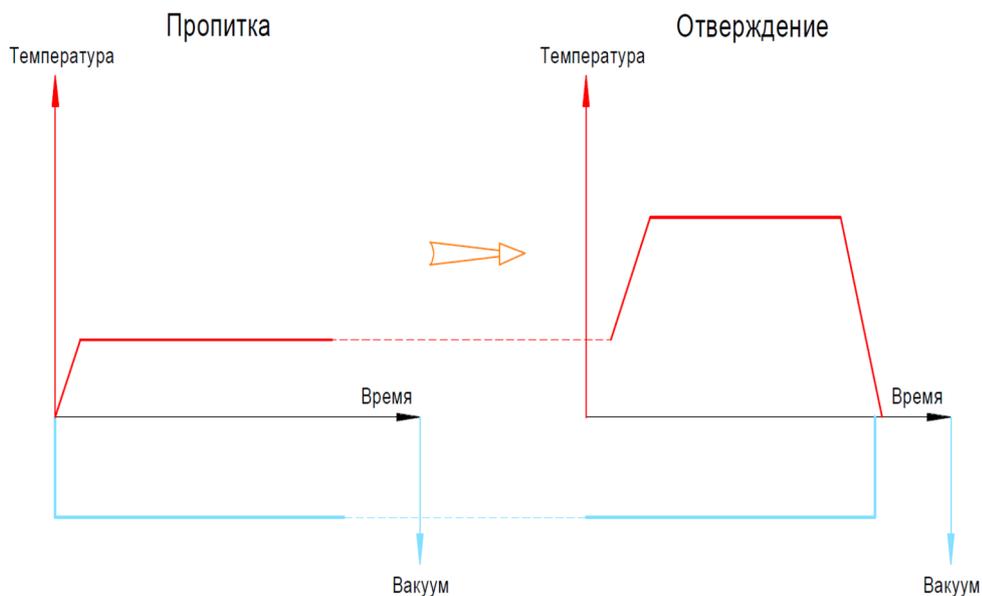
Метод РТМ требует использования специальной оснастки, состоящей из двух частей: самой матрицы и ответной формы – пуансона. Суть метода заключается в следующем: между матрицей и пуансоном укладывается сухой, предварительно раскроенный армирующий материал, чаще всего пропитанная ткань (углеродная или стеклоткань), уплотняемая приложением давления на пуансон между плитами пресса, в автоклаве или с помощью специальных зажимом. Затем, при помощи специального оборудования, в закрытую форму под давлением связующее инжектируется и отверждается по заданному температурно-временному режиму. Эта технология требует оборудования высокого давления для инъекции связующего, вспомогательного оборудования и двухсторонней оснастки для изготовления изделия. При этом требуются низковязкие, быстро отверждающиеся при сравнительно низких температурах эпоксидные и

ненасыщенные полиэфирные связующие и могут использоваться практически любые армирующие материалы, но предпочтительнее – пропитые ткани, так как они имеют пустоты для более быстрой инъекции связующего. При изготовлении сэндвичевых структур рекомендуется использование сотовых наполнителей, так как при подаче связующего под давлением они могут быть разрушены. Преимущество метода РТМ заключается в том, что он позволяет формировать изделие с повышенным содержанием армирующего наполнителя (до 65 об.%) и обе стороны изделия из слоистого ПКМ имеют гладкую поверхность с предварительно заданным рельефом. При изготовлении изделий минимизированы отходы материалов, достигается высокая точность размеров и отличное воспроизводство изделий, отсутствуют воздушные включения в изделии и сокращается времени изготовления изделия в 3-5 раз. К недостаткам метода необходимость сложной оснастки, ограниченные размеры изделия, необходимость применения специальных связующих.

Применительно к производству авиаконструкций из армированных слоистых ПКМ на основе низковязких отверждающихся связующих большое распространение в настоящее время находит преформовая технология, получившая название вакуумной инфузии или вакуумной пропитки и представленная на рисунке 8.



а



б

Рисунок 8 – Схемы формирования изделий из слоистых ПКМ методом вакуумной инфузии (а) и температурно-временные режимы пропитки преформы и отверждения связующего (б)

Основными причинами популярности данной технологии является низкая стоимость оборудования (в сравнении с автоклавным методом и РТМ-технологией), а также высокое качество конечного изделия и возможность формирования крупногабаритных изделий при относительно небольших временных затратах. Вакуумная инфузия — закрытый процесс формования. На подготовленную оснастку укладывается предварительно раскрытый армирующий материал. Набор толщины конечного изделия осуществляется сразу, на этапе укладки армирующих тканей, путем выкладки требуемого количества слоев ткани и, при производстве сэндвичевых структур, пенопластового или сотового наполнителя. Вместе с армирующим материалом укладывается набор вспомогательных расходных материалов. Будущее изделие накрывается вакуумной пленкой и крепится к фланцам оснастки при помощи герметизирующего жгута. К вакуумному мешку, через установленный вакуумный порт, подключают вакуумный насос, создающий разрежение в мешке благодаря

созданному разряжению предварительно дегазированное связующее по вакуумной трубке поступает в вакуумный мешок и пропитывает армирующую преформу. Использование специальной сетки способствует быстрой и равномерной пропитке армирующего материала. При сохранении вакуума связующее отверждается в печи или в автоклаве по заданному температурно-временному режиму. При использовании данной технологии обеспечивается высокая точность изготовления конструкции конечного изделия за счет заданного соотношения связующего и армирующего материала. Воздушные включения и излишки связующего удаляются из армирующего материала путем постоянно поддерживаемого вакуума. Процесс полностью обратим до момента подачи связующего.

К недостаткам вакуумной инфузии можно отнести низкий допуск на толщину детали по сравнению с автоклавным и прессовым методами, повышенную пористость детали и сложный процесс пропитки преформы связующим.

1.1.4.2 Препреговые технологии (жидкостные, порошковые и волоконные)

В препреговых технологиях из препрегов - высокопрочных и высокомодульных армирующих жгутов волокон (нитей), лент или тканей, предварительно пропитанных жидким полимерным связующим или скомбинированных с ним плавких термопластичных полимеров в форме порошка или волокон (порошковая и волоконная технологии соответственно), различными методами (послойной выкладки или намотки) формируется заготовка, из которой под давлением в пресс-форме или автоклаве по заданному температурно-временному режиму окончательно формируется элемент конструкции, фиксируется и стабилизируется его форма в результате отверждения термореактивного связующего или кристаллизации и стеклования термопластичной матрицы. По препреговой технологии могут быть изготовлены элементы конструкций из

армированных слоистых ПКМ на основе как отверждающиеся, так и термопластичных полимерных матриц. При этом препрег может быть получен на начальной стадии техпроцесса или в отдельном производстве с использованием автоматизированных пропиточных (при жидкостной или порошковой технологии) или ткацких (при волоконной технологии) устройств.

Формирование заготовок из препрегов и окончательное формообразование изделия с фиксацией и стабилизацией его формы чаще всего реализуется по прессовой или автоклавной технологии.

Прессование применяют, когда требуется высокая производительность, точность и воспроизводимость деталей. На данный момент — это самый оптимальный метод изготовления изделий из армированных слоистых ПКМ. Он сочетает в себе высокое качество изделий при минимальной стоимости. Даже при малых объемах производства, как в аэрокосмической отрасли, где высокие требования к точности и воспроизводимости, в большинстве случаев используют технологию прессования в жестких пресс-формах методами прямого или термокомпрессионного прессования с использованием гидравлических прессов, обеспечивающих заданное давление на прессуемую деталь. Прямое прессование в открытых пресс-формах используют для получения несложных изделий с небольшой высотой стенок. Для ответственных деталей используют более дорогие закрытые пресс-формы в которых достигается максимальное уплотнение материала. Перспективным является прессование эластичным пуансоном. Основными параметрами прямого прессования, тесно связанными между собой являются: температура, время и давление.

Термокомпрессионное прессование (ТКП) применяются для прессования изделий сложной конфигураций из термопластичных слоистых армированных ПКМ, т.к. стандартные методы прессования и технологической оснастки ограничены. Пресс-формы с увеличением габаритных размеров становятся нерентабельными, кроме того зачастую отсутствуют прессы со столами, необходимых размеров. Свое название метод получил благодаря тому, что для создания давления на заготовку в форме используют термостойкие резины, в

частности, кремнийорганические, расширяющиеся при нагревании и вследствие температурной деформации создающие давление формования. Метод очень эффективен, но то же время ему присущи некоторые недостатки, в частности, низкий ресурс резиновых вкладышей, и при сложной геометрии детали давление на препрег существенно различается в зонах с большими и малыми объемами.

Примеры элементов авиаконструкций, изготавливаемых методом прессования, представлены на рисунке 9.

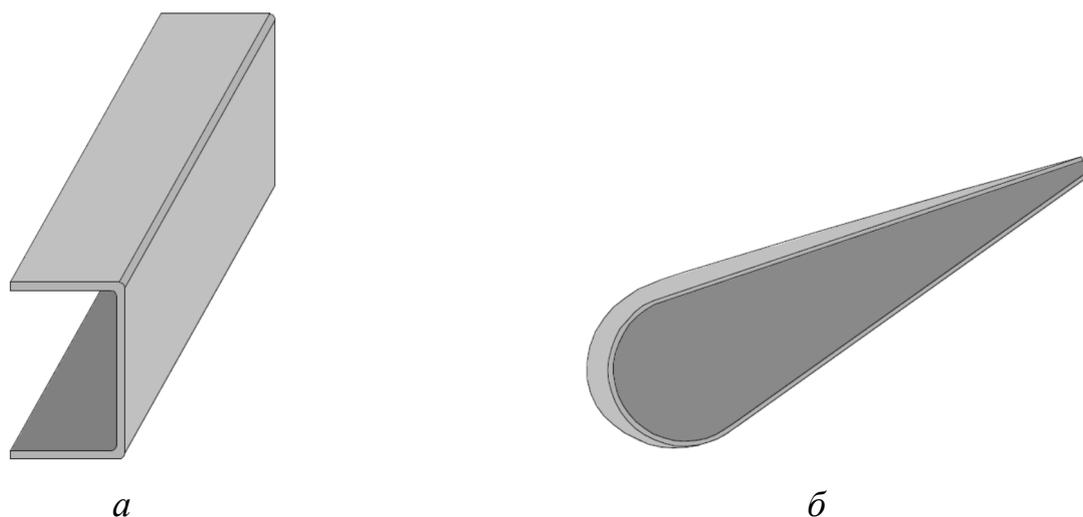


Рисунок 9 – Примеры элементов авиаконструкций, изготавливаемых методом прессования: *а* – лонжерон, *б* – нервюра

К методам прямого прессования с точки зрения приложения внешнего давления на препрег или заготовку из него можно условно отнести также такие методы формования элементов конструкций из препрегов армированных слоистых ПКМ как пултрузия (протяжка), ролтрузия (прокатка) и штамповка.

Автоклавное, или вакуум-автоклавное формование заключается в том, что сформированный на заданной форме из предварительно раскроенного препрега многослойный пакет-заготовка вместе с формой герметизируется в эластичной оболочке (вакуумном мешке) (Рисунок 10). Все это помещается в сосуд высокого давления (автоклав), с помощью вакуумного насоса снижается давление в мешке, и в автоклаве создается повышенное давление формования и заданная температура.

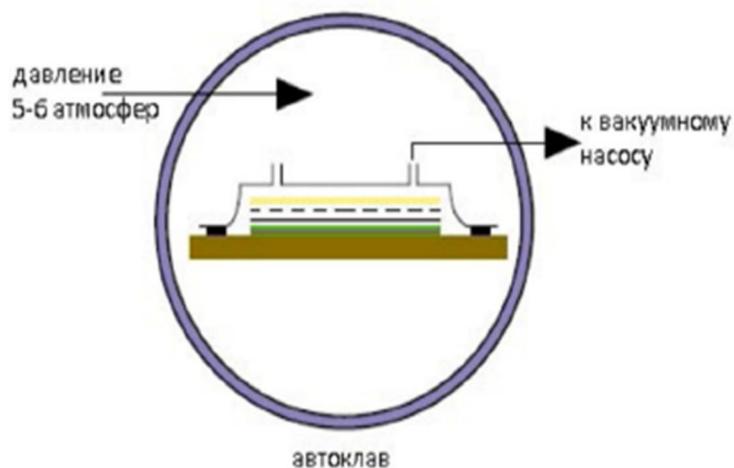


Рисунок 10 - Схема процесса вакуум-автоклавного формования армированных слоистых ПКМ

Использование вакуума в мешке позволяет свести пористость ПКМ к минимуму, что гарантирует высокое качество конечного изделия. Использование автоклавной технологии позволяет производить крупногабаритные изделия, к которым применяются самые высокие требования по равномерности толщины и качеству поверхности изделий. Данный метод малоприменим для крупносерийного производства и его обычно применяют в производстве небольших партий высококачественных изделий. Минусом автоклавного метода является высокая стоимость самого автоклава, дороговизна и пожароопасность использования вакуумных мешков, а также наличие ручного труда персонала с высокой квалификацией.

Под аддитивными технологиями понимают процессы изготовления («выращивания») изделий с помощью автоматических (робототехнических) устройств типа 3D-принтеров по САD-модели. Они позволяют изготавливать любое изделие послойно на основе компьютерной 3D-модели. Эти технологии являются динамично развиваемым направлением «цифрового» производства, считаются инновационными и противопоставляются традиционным способам промышленного производства. Применительно к производству элементов

авиаконструкций из армированных слоистых ПКМ наиболее перспективным направлением развития аддитивных технологий является сочетание автоматизированных процессов изготовления препрегов на основе нитей или лент и термопластичных связующих, в частности, ПЭЭК, или использование предварительно полученных препрегов и послойного формования из них изделий выкладкой или намоткой с локальным ИК, СВЧ или лазерным нагревом для уплотнения слоев. Одной из основных проблем при этом является разработка соответствующих автоматизированных устройств типа приведенной на фотографии головки для вкладочной установки, рисунок 11.



Рисунок 11 – Выкладочная головка фирмы «Automated Dynamics» США для производства композитных конструкций по аддитивной технологии

Теоретические основы и практические навыки, накопленные при разработке и освоении традиционных технологий производства изделий из армированных слоистых ПКМ, могут оказаться очень полезными при разработке соответствующих аддитивных технологий [11].

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 (рисунки 12-13) как на стадии производства, так и при эксплуатации конструкции под действием аэродинамических сил или локальных ударных нагрузок, что приводит к снижению усталостной и остаточной прочности, живучести и заданных ресурсных характеристик конструкций.

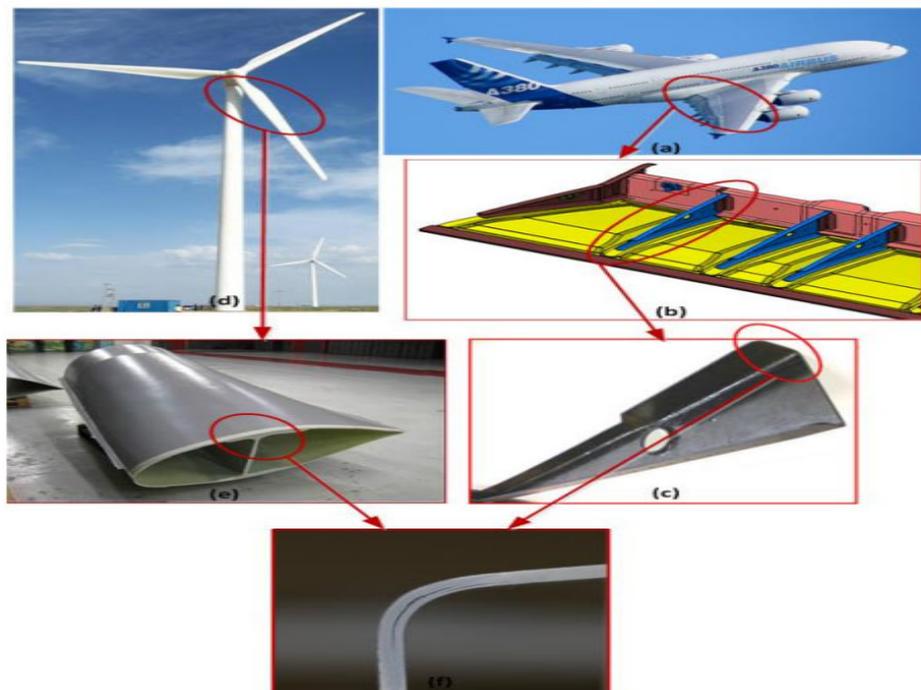
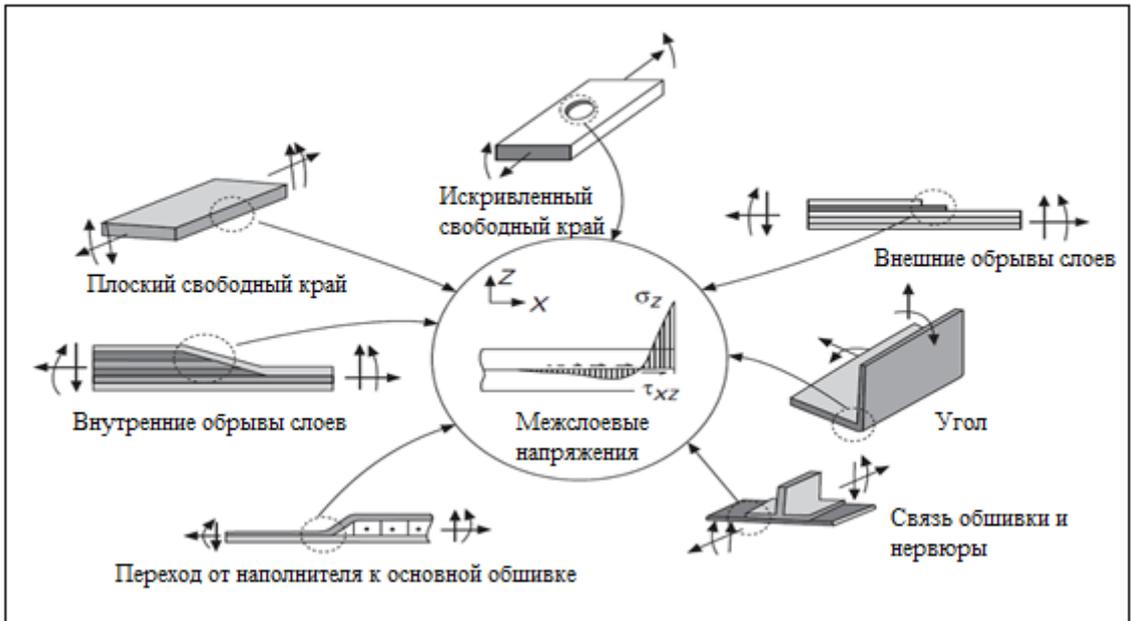


Рисунок 12 – Примеры макроскопического расслоения, армированного ПКМ в угловых элементах конструкций элерона крыла самолета и винта ротора ветроэнергостановки



а



б

Рисунок 13 – 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 14) расчетно-экспериментальной оценки и прогнозирования устойчивости авиаконструкций к расслоениям и отслоениям.

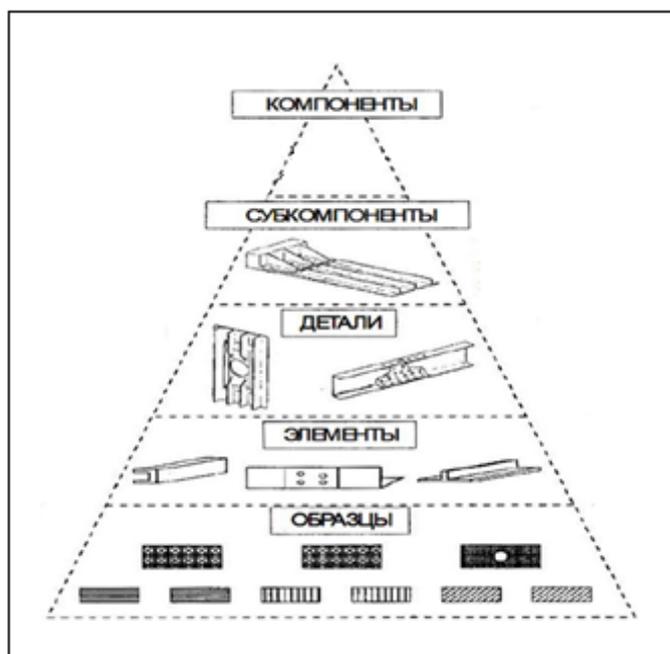


Рисунок 14 - Обобщенная многоуровневая пирамида расчетно-экспериментальной оценки и прогнозирования устойчивости к расслоениям и отслоениям авиационных конструкций из слоистых ПКМ [12]

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 рамках ЛУМР, 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 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 15а) с тремя типами (модами) нагрузок на нее (рисунок 15б), вызывающими ее инициирование (страгивание) и рост.

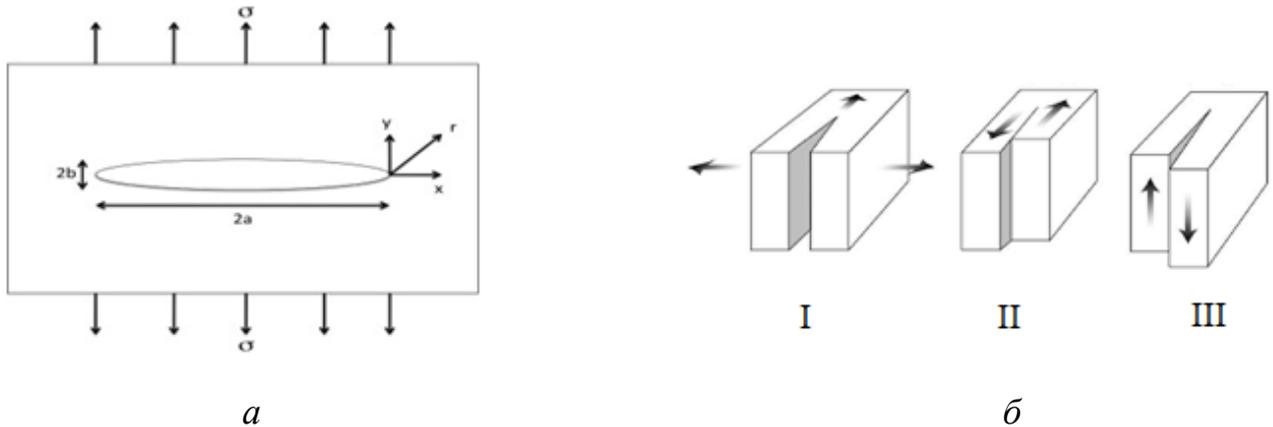


Рисунок 15 – Схема пластины из однородного и изотропного линейно-упругого материала единичной толщины с эллиптической (щелевой) центральной трещиной, растягиваемой глобальным напряжением σ вдали от трещины в направлении, перпендикулярном ее основной оси x – a ; типы (моды) нагрузки на трещину: I – растяжение (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].

1.3.2.1 Энергетические параметры трещинодвижущих сил и трещиностойкости в ЛУМР

Энергетические параметры трещинодвижущих 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 6 и соответствует равенству уменьшения накопленной энергии упругого деформирования (U) затрачиваемой работе (W) при бесконечно малом увеличении длины трещины a

$$dU/da=dW/da \quad (6)$$

Позднее величина была названа интенсивностью высвобождения энергии упругой деформации при обратимом развитии равновесной трещины и введена в качестве обобщенной энергетической характеристики трещиноподвижной силы (ТДС) – G -параметра с размерностью в системе СИ – Дж/м². При моде нагружения I на краевую трещину длиной a трещиноподвижная сила рассчитывается по формуле 7

$$G=Ya\sigma^2(\tau^2)/E, \quad (7)$$

где

Y - геометрический фактор, учитывающий форму и размеры тела;

σ - 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).

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 трещиноподвижная сила (G) достигнет или превысит предельное (критическое) значение (G_c), равное сопротивлению материала росту трещины (R) - работе, затрачиваемой на образование единицы площади поверхности при росте трещины (работе разрушения материала). Величина G_c 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: $G \geq G_c$.

В случае линейно-упругих гомогенных и изотропных тел с трещиной при заданном типе нагружения параметр трещиностойкости G_c 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 трещиноподвижной 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 8

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a}, \quad (8)$$

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 9

$$K_{IC}^2 = \frac{12P_C^2 a^2}{b^2 h^3} = \frac{3\Delta_C^2 E^2 h^3}{16a^4}, \quad (9)$$

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 10) при различных напряженно-деформированных состояниях и модах нагружения трещины

$$K_I^2 = EG_I; K_{II}^2 = E G_{II}; K_{III}^2 = 2\mu G_{III} = G_{III} \frac{E}{1+\nu}, \quad (10)$$

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, являясь векторными величинами, 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 трещинодвижущих 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.

При развитии достаточно большой зоны неупругих деформаций вблизи края трещины, где напряжения максимальны, наблюдается нехрупкое (упругопластическое или вязкоупругое) разрушение и использование классических G -параметров ЛУМР, строго говоря, не корректно. В этом случае в качестве энергетического параметра трещинодвижущей силы используется величина потока энергии через произвольный замкнутый контур, окружающий вершину трещины (J -интеграл, или J -параметр), критическое значение которого (J_c) соответствует началу роста трещин и характеризует трещиностойкость материала.

В случае псевдохрупких и псевдопластичных материалов, в том числе при межслоевом росте трещины в конструкционных армированных ПКМ, вблизи кончика трещины развивается небольшая локальная зона неупругих деформаций, размеры которой значительно меньше, чем размеры самой трещины, и материал на макроуровне сохраняет линейную упругость. При этом не накладываются

существенные ограничения на расчеты трещиноводвижущих сил и параметров трещиностойкости в рамках ЛУМР, и при моде нагружения I параметры J_I и J_{Ic} равны G_I и G_{Ic} соответственно.

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 11

$$r_y = \left(\frac{K_I^2}{2\pi\sigma_y^2} \right) = \left(\frac{G_I E}{2\pi\sigma_y^2} \right), \quad (11)$$

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 12

$$\Delta a_y = \frac{\pi K_{IC}^2}{8 \sigma_y^2} = \frac{\pi G_{IC} E}{8 \sigma_y^2}, \quad (12)$$

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 13

$$\delta_a = \frac{K_{IC}^2}{\sigma_y E} = \frac{G_{IC}}{\sigma_y}, \quad (13)$$

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 16).

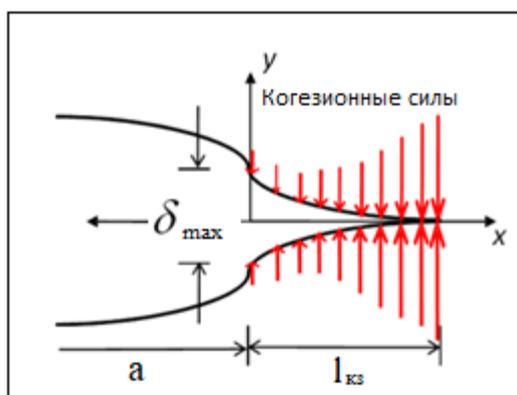


Рисунок 16 – Схема общего вида трещины в хрупком теле с когезионной зоной в модели Баранблатта

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 14 и 15 соответственно

$$l_{cz} = \frac{\pi EG_{IC}}{8 \sigma_{IC}^2}, \quad (14)$$

$$\delta_{\max} = \frac{G_{IC}}{\sigma_{IC}}, \quad (15)$$

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 16

$$\sigma_c \approx \frac{E}{\pi} \approx \sqrt{\frac{E\gamma_s}{b}}, \quad (16)$$

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 определяется по формуле 17

$$G_{IC} = 2\gamma F = 2 \int_0^{\delta_c} \sigma(\delta) d\delta \quad (17)$$

С другой стороны, производная параметра экспериментально определенного параметра трещиностойкости по раскрытию когезионной зоны позволяют определять закон когезионной зоны $\sigma(\delta)$ по формуле 18

$$\sigma(\delta) = \frac{dG_{IC}}{d\delta} \quad (18)$$

1.2.3 Экспериментальные данные о межслоевой трещиностойкости армированных волокнами слоистых ПКМ

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 полувисотой h , толщиной b и длиной краевой трещины a (рисунок 17).

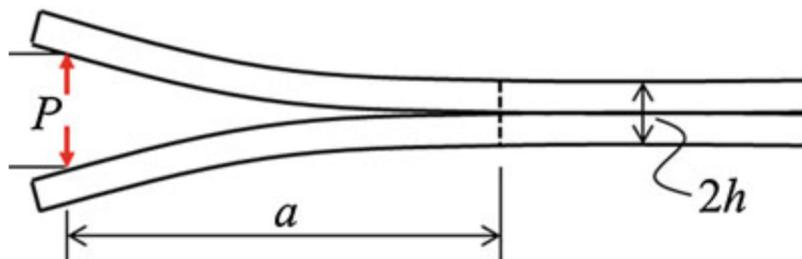


Рисунок 17 - Схематическое изображение образца с трещиной в виде двухконсольной балки (ДКБ)

Энергетическая нагрузка на трещину G_I рассчитывается через податливость образца по формуле 19. Податливость определяют по формуле 20

$$G_I = \frac{P^2}{2b} \frac{dC}{da} = \frac{\Delta^2}{2b} \frac{1}{C^2} \frac{dC}{da}, \quad (19)$$

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.

$$C = \Delta/P, \quad (20)$$

При этом задавать можно или силу, или раскрытие трещины. Для образца ДКБ интенсивность высвобождения упругой энергии определяется по формуле 21

$$G_I = \frac{12 P^2 a^2}{E b^2 h^3} = \frac{3 \Delta^2 E h^3}{16 a^4}, \quad (21)$$

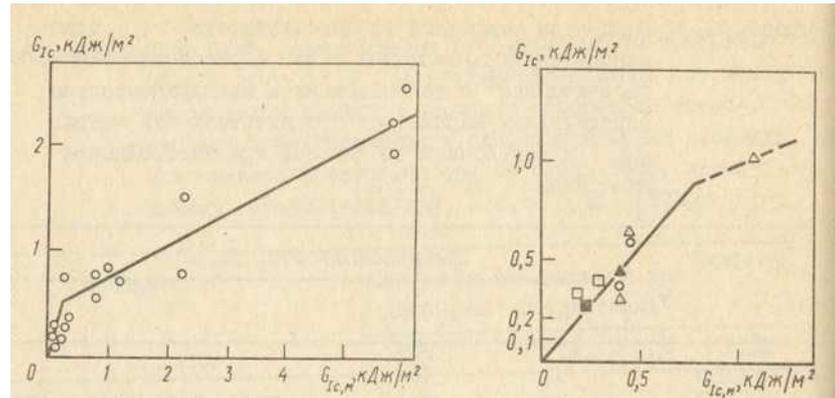
Параметр трещиностойкости G_{IC} соответствует критическому значению трещиноподвижной силы и рассчитывается, при монотонном нагружении, по экспериментально определенному предельному значению силы P (P_C) по 1-й (левой) части уравнения 15 или по предельному глобальному раскрытию трещины (Δ_C) по 2-й (правой) части этого уравнения. С поправкой на толщину слоев, учитывающей возникновение сдвиговых деформаций в вершине трещины вследствие крутящего момента при монотонном нагружении, выражение 15 принимает вид, как представлено в формуле 22

$$G_I = \frac{4P^2}{Eb^2} \left(\frac{3a^2}{h^3} + \frac{1}{h} \right), \quad (22)$$

При достижении критических условий трещина в идеально хрупком теле прорастает мгновенно, так как нагрузка на нее резко возрастает с увеличением длины трещины, а сопротивление росту трещины остается постоянным. В случае псевдохрупкого роста трещины с развитием неупругой когезионной зоны сопротивление росту трещины с увеличением ее длины может изменяться (возрастать или снижаться) вследствие протекания процессов ослабления или упрочнения материала в локальной зоне вблизи вершины трещины. Для характеристики локального ослабления или упрочнения материала при росте трещины экспериментально определяют так называемые R-кривые - зависимости предельного сопротивления росту трещины (G_{IC} или K_{IC}) от ее длины в момент инициирования роста. 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].

К настоящему времени в литературе имеется достаточно большое количество данных о межслоевой трещиностойкости слоистых армированных ПКМ на основе различных типов армирующих систем, особенно стеклянных и углеродных непрерывно-волокнистых наполнителей при широком наборе отверждающихся связующих - эпоксидных, полиэфирных, полиимидных, цианатэфирных и о факторах, ее определяющих. Наиболее систематически среди этих факторов экспериментально исследованы роли природы и свойств отвержденной матрицы, типа армирующей системы (при оптимальной объемной доле), характера распределения волокон относительно направления роста трещины и характера обработки их поверхности [13].

На рисунках 18 *а* и *б* в таблицах 15-17 приведены типичные примеры полученных данных.



а

б

Рисунок 18 - Корреляция между межслоевой трещиностойкостью (G_{IC}) однонаправленных волокнистых углекомполитов на основе различных углеродных волокон и трещиностойкостью отвержденных матриц (G_{IC}): а – эпоксидных матриц, резко различающихся по трещиностойкости [13]; б – бисмалеимидной матрицы, немодифицированной (\square, \blacksquare) и модифицированной (Δ, \blacktriangle), полиэфиримидной (\circ), эпоксидной (\square, Δ, \circ) и полиимидной ($\blacktriangle, \blacksquare$) [13]

Таблица 15 – Параметры межслоевой трещиностойкости стеклокомполитов на основе различных типов отвержденных связующих и стеклотканей различного плетения и поверхностной обработки [13]

Матрица		Стеклоткань		Межслоевая трещиностойкость стеклокомполита
Тип	Трещиностойкость $G_{IC,m}$, Дж/м ²	Плетение	Поверхностная обработка	G_{IC} , Дж/м ²
Ненасыщенное полиэфирное	40	Тонкое тканое полотно (181)	910	350
Эпоксиаминное	175	То же	910	546
	175	То же	1100	418
	175	То же	Волан А	520
	175	Грубое тканое полотно (107)	Волан А	703
Эпоксиаминное дисперсно-эластифицированное	1690	Тонкое тканое полотно (181)	А 1100	508

Таблица 16 – Параметры межслоевой трещиностойкости стеклотекстолитов на основе различных связующих и тканей

Связующее		Ткань	Стеклокомпозит $G_{Ic, M}$, Дж/м ²
Тип			
Эпоксидное	70	На основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена, полотняного плетения	140-230
Бисмалеинимидное (керимид)	60-80	Углеродная ткань полотняного плетения	200-300
Бисмалеинимидное (дисбимид)	470	Углеродная ткань сатинового плетения	390-460

Таблица 17 – Усредненные параметры межслоевой трещиностойкости (Дж/м²) эпокситекстолитов на основе стеклянной, углеродной и арамидной тканей ($\varphi_B = 50-55\%$ об.) при росте трещины по типу I и II под различными углами θ к основной оси (основе) ткани [13]

Угол θ , град	Стеклоянная ткань		Углеродная ткань		Арамидная ткань	
	G_{Ic}	G_{IIc}	G_{Ic}	G_{IIc}	G_{Ic}	G_{IIc}
0	524	1340	1040	1534	635	863
15	885	1556	766	1681	971	1337
30	694	1796	843	1784	839	1307
45	680	1506	1229	2683	864	1881

Эти данные показывают, что для оценки межслоевой трещиностойкости слоистых ПКМ, армированных тканями (текстолитов) на основе отверждающихся связующих, применимы традиционные параметры линейной механики трещин и методы их определения. Величина этих параметров в решающей степени определяется трещиностойкостью матрицы, типом и поверхностной обработкой ткани. В значительной степени она может также изменяться в зависимости от

типа раскрытия трещины и направления ее распространения относительно главной оси ткани. Обычно параметры межслоевой трещиностойкости текстолитов больше, чем однонаправленных слоистых композитов, хотя в случае полимерных волокон с высокой степенью ориентации и плохой адгезией к матрице, как, например, полиэтиленовых, может быть наоборот. В случае хрупкой матрицы межслоевая трещиностойкость слоистых ПКМ превышает трещиностойкость ненаполненной матрицы при одинаковом типе раскрытия трещины и прочих равных условиях. Для существенного повышения их межслоевой трещиностойкости помимо модификации связующих и поверхности волокон, предложено армировать матрицу короткими микроволокнами типа углеродных нанотрубок или, что более эффективно, прошивать слои ткани поперечными нитями [13].

1.2.4 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, имплантированные 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).

1.2.4.1 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 псевдохрупких 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 моделировании роста трещин в методике VCCT в математическую модель вводятся дополнительные допущения:

- траектория роста трещины задается интерфейсными элементами;

- расчет является квазистатическим и не учитывает переходные эффекты;

- материал считается линейно-упругим изотропным, ортотропным или анизотропным.

В методика VCCT трещина помещается вдоль интерфейса между одним и тем же материалом или между двумя материалами. Можно задавать составные трещины. Основные этапы выполнения анализа состоят из создания конечно-элементной модели с траекторией роста трещины, вычисления параметра интенсивности высвобождения энергии и выполнения анализа роста трещины.

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 19.

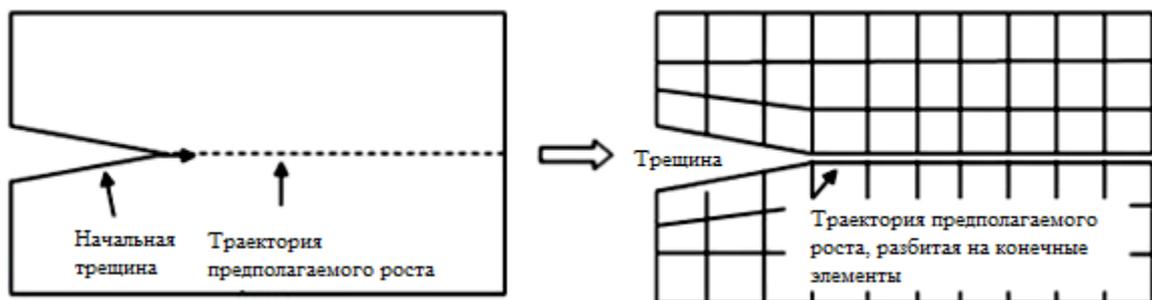


Рисунок 19 – Предпоределяемая траектория роста трещины при моделировании на основе интерфейсных элементов

Интерфейсные элементы создаются командой CZMESH или в специализированных сеточных генераторах. Опция (KEYOPT(2)=1) элемента MPC сцепляет потенциальные поверхности трещинообразования вместе перед началом процесса роста трещины. Уравнения MPC впоследствии удаляются при выполнении критерия разрушения, затем происходит дальнейший рост трещины.

В 2D задачах, при выполнении критерия разрушения, происходит раскрытие трещины на одном интерфейсном элементе, что достаточно для дальнейшего

роста трещины на данном подшаге. В 3D задачах, все интерфейсные элементы по фронту трещины могут изменить свой статус, если встретится критерий разрушения.

Различия в размерах конечных элементов впереди и позади вершины трещины влияет на точность вычисления скорости высвобождения энергии при разрушении. Программа использует алгоритм коррекции, что уже предполагает получение некорректных результатов. Лучше использовать равные по размеру элементы в сетке вдоль траектории роста трещины.

Для вычисления параметра интенсивности высвобождения энергии вводится команда CINT, TYPE, VCC.

Выполнение анализа роста трещины запускается после фазы вычисления напряжений в узлах расчетной модели. Для этого необходимо задать необходимый набор параметров роста трещины: траекторию роста трещины, критерий разрушения и параметры решателя. Команда CGROW задает все необходимые параметры вычисления процесса роста трещины.

Задание идентификатора ID осуществляется через команду CGROW, CID, n, где n - ID для расчета интенсивности высвобождения энергии. (Команда CINT задает параметры, ассоциированные с расчетом параметра разрушения или трещиностойкости. Для критерия разрушения, выраженного как критическое значение интенсивности высвобождения энергии, необходимо ввести команду CGROW, FCOPTION, GC, value, где value - критическое значение интенсивности высвобождения энергии. Для более сложных критериев разрушения, пользователю необходимо задавать критерии разрушения через таблицу данных материала. Вводится команда CGROW, FCOPTION, MTAB.

В методе VCCT вычисления интенсивности высвобождения энергии инициализируется при обращении к команде CINT, которая поддерживает следующие конечные элементы: PLANE182, PLANE183, SOLID185, SOLID186. В большинстве случаев, ANSYS, рекомендует использование линейных элементов, включая PLANE182 и SOLID185. 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.

1.2.4.2 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 [42-46], и в настоящее время этот метод получил очень широкое распространение для численной оценки трещиностойкости различных материалов, в том числе при межслоевом росте трещин в конструктивных армированных слоистых ПКМ.

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 20 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.
- 3) Общая площадь под кривой является величиной интенсивности высвобождения упругой энергии при распространении трещины в материале.

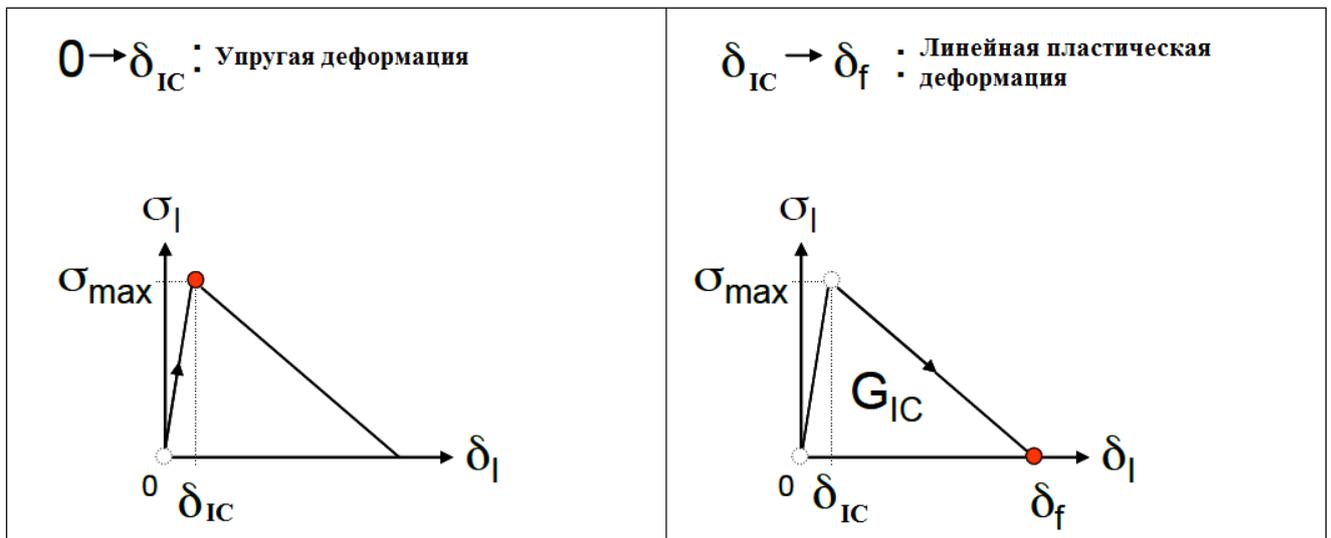


Рисунок 20 – Билинейный ЗКЗ

При начале движения вершины трещины, интерфейсный элемент (ИЭ), примыкающий к этой вершине, достигает своей максимальной прочности между

поверхностями и перемещается в 2 область ЗКЗ (область пластической 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 [47].

Интерфейсный элемент – это специальный конечный когезионный элемент (ККЭ) используемый для численного моделирования процесса возникновения и роста трещины. На рисунке 21 представлено развитие числовой когезионной зоны в билинейном ЗКЗ.

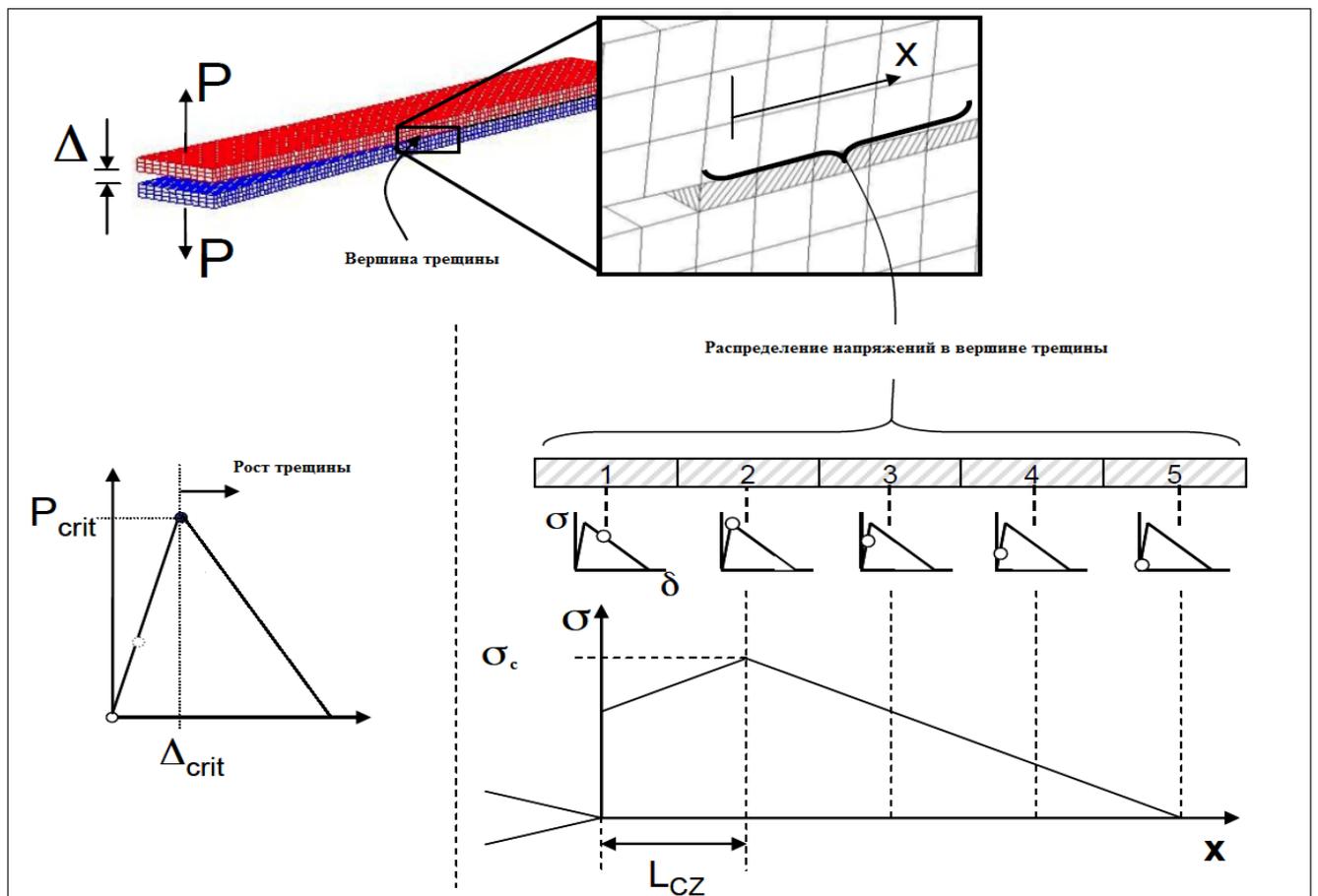


Рисунок 21 – Развитие числовой когезионной зоны в билинейном ЗКЗ

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, в следствии 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 22), который, наряду с билинейным законом, наиболее часто используется при численном моделировании с использованием пакета прикладных программ ANSYS®.

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 G_{IC} .

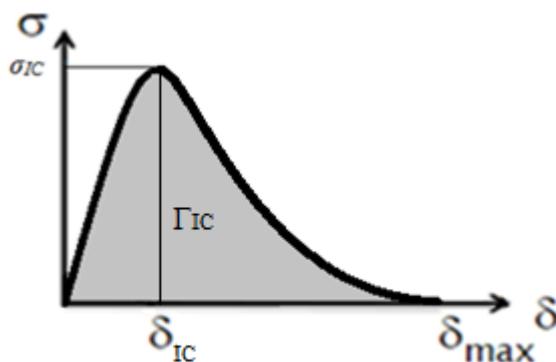


Рисунок 22 – Экспоненциальный тип ЗКЗ

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 иницирование повреждения когезионной зоны с линейным или экспоненциальным спадом напряжения, представленном на рисунке 19, т.е. когезионная зона состоит из двух частей – упругой зоны и зоны повреждения [43,54,55].

На данный момент 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 зависимостей 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 23, 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 локального напряжения от локального раскрытия вершины трещины. В частности, должны быть определены соответствующие параметры когезионной зоны, а также форма закона расслоения. В случае закона расслоения в литературных источниках есть множества моделей, которые можно использовать для расчета [58]. Например, закон расслоения может быть представлен в виде экспоненциальной зависимости, трапециевидной 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].

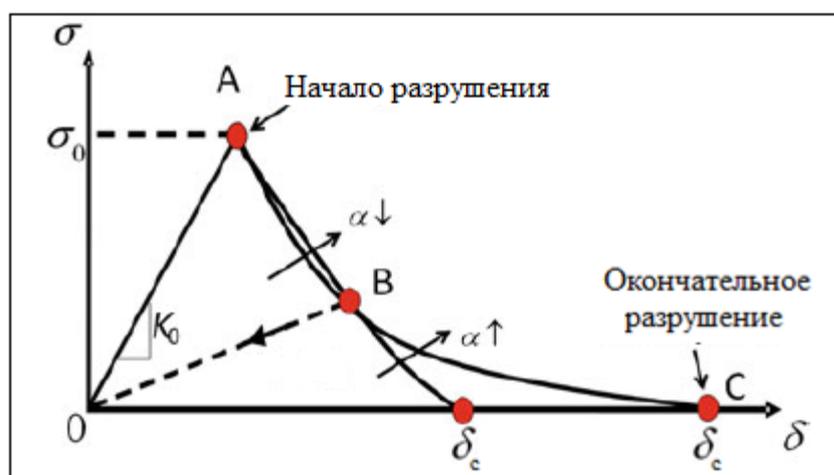


Рисунок 23 – ЗКЗ с областью линейно-упругой деформации и областью экспоненциального спада

Таким образом, использование МКЗ, имплантированного в МКЭ, дает возможность, при известном ЗКЗ, оценивать трещиностойкость материала по уравнению 17, а по зависимости параметра трещиностойкости от раскрытия когезионной зоны и от локальной прочности материала рассчитывать, соответственно, ЗКЗ по уравнению 18 и его параметр δ_c – по уравнению 15 при различных конфигурациях образцов и модах нагружения.

Выводы по главе I

На основе анализа литературных источников, можно сделать следующие выводы:

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

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 наиболее эффективным подходом к оценке их устойчивости к росту существующих дефектов (трещин) является линейная упругая механика разрушения (ЛУМР), позволяющая определять энергетические и силовые глобальные параметры нагрузки на трещину при заданном ее положении, конфигурации и типе нагружения. Критические значения этих

параметров характеризуют устойчивость материала к инициированию роста трещин – его трещиностойкость.

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.

2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАССЛОЕНИЯ СЛОИСТЫХ ПКМ

2.1 Объекты исследования

В работе использовались 4 типа слоистых ПКМ:

- Два типа углекомполитов (УК), один из УК получаемый прессованием препрега на основе углеродной ткани УРАЛ Т-1-22А и эпокси-аминной матрицы (УК-ЭАП), а второй УК получаемый прессованием на основе сухого препрега пропитанного полиэфирэфиркетонотом Tenax®-Е TRCL РЕЕК-НТА40 с содержанием углеродных волокон Tenax®-Е НТА40 ЗК (60 об.%) (УК-ПЭЭК). Углеродная ткань УРАЛ Т-1-22А – саржевого переплетения из углеродных волокон на основе вискозной технической нити, полученные по специальной технологии. Эпокси-аминная матрица представляет собой модельный эпокси-аминный полимер на основе эпоксидной смолы ЭД-20, отвержденной ароматическим диамином – диаминодифенилметаном в эквимольном соотношении (28 м.ч отвердителя на 100 м.ч. смолы).

Стеклокомполит (СК) и органокомполит (ОК), 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.% (СК-ПКА и ОП-ПКА). На рисунке 24 представлена схема тканого полуфабриката, получаемого по волоконной технологии.

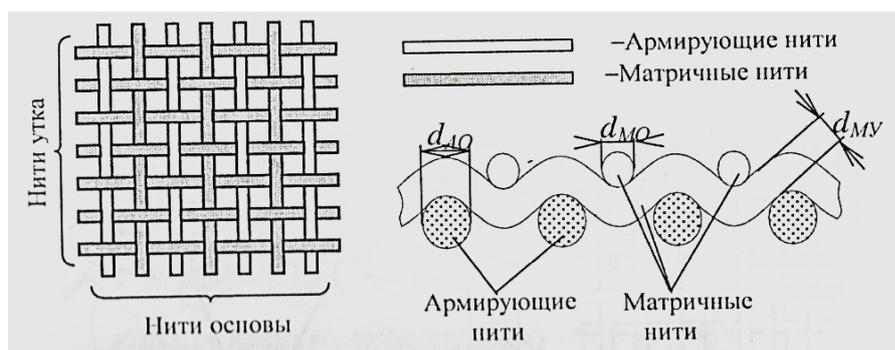


Рисунок 24 – Схема тканого полуфабриката, получаемого по волоконной технологии

2.1.1 Характеристики объектов исследования

Основные характеристики компонентов УК представлены в таблицах 18 и 19.

Таблица 18 – Основные характеристики углеродной ткани 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
	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

Продолжение таблицы 18

1	2	3	4
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	98
		74	70
	Толщина, мм	0,25 – 0,35	0,25 – 0,35

Таблица 19 – 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

В таблицах 20-21 обобщены основные характеристики компонентов СК и ОК.

Таблица 20 – Характеристики стеклянных волокон марки ВМС 6-7,2x1x4 и органических волокон марки Терлон

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 21 – Характеристики поликапроамида (ПКА) или полиамида 6 (ПА-6)

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

2.1.2 Получение образцов ПКМ для исследований

Пластины для получения образцов для экспериментальных исследований всех 4-х типов ПКМ размером 200×180×4мм и 80×50×4мм получали прессованием в закрытых пресс-формах (рисунок 25) пакетов-заготовок из 10 слоёв терморезистивного препрега УК-ЭАП, 14 слоев термопластичного препрега

УК-ПЭЭК и из 20 слоев тканых полуфабрикатов СК и ОК на основе термопластичных матричных волокон (СК-ПКА и ОК-ПКА).

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

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

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

Пластины для получения образцов для испытаний на растяжение для всех 4-х типов ПКМ размером 200×180×2мм получали прессованием в закрытых пресс-форме, представленной на рисунке 24, пакетов-заготовок из 5 слоев терморезактивного 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.



Рисунок 25 – Оснастка для прессования пластин из ПКМ

2.2 Методы исследования

2.2.1 Метод определения модуля упругости при растяжении

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 и образец полученный из СК-ПКА представлены на рисунке 26 *а* и *б*.

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. В таблице 22 представлены значения модуля упругости при растяжении для каждого типа ПКМ

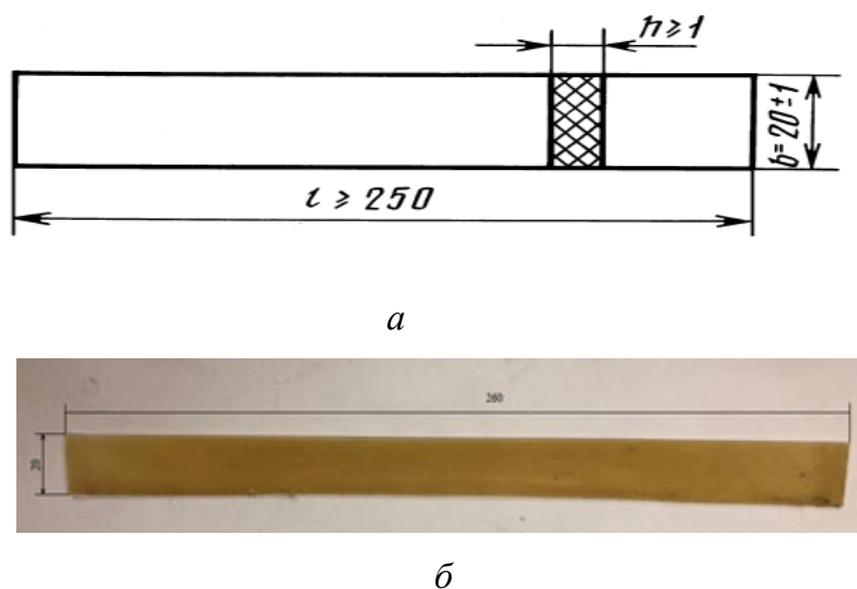


Рисунок 26 – Эскиз образца (а) и образец для испытаний на растяжение из СК-ПКА (б)

Таблица 22 – Модули упругости при растяжении исследуемых материалов

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

2.2.2 Метод определения межслоевой трещиностойкости

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_{IC}) использовали стандартный метод и образцы в форме ДКБ, представленный на рисунке 27 [31].

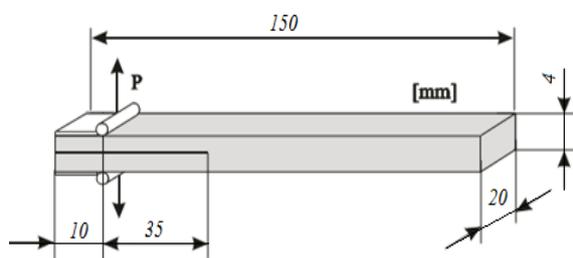


Рисунок 27 – Схема образца ДКБ

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 28.

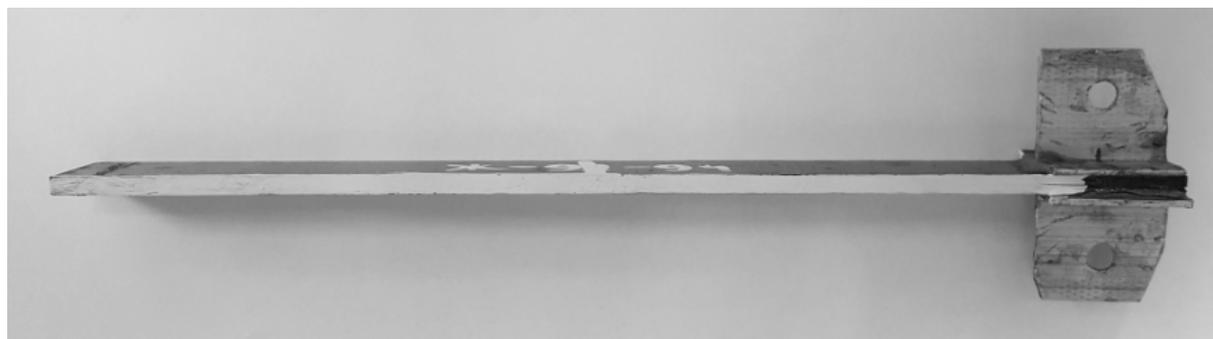


Рисунок 28 – Образец для испытаний на G_{IC}

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, 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 29 показаны кривые разрушения для 4-х типов слоистых ПКМ, полученные в результате.

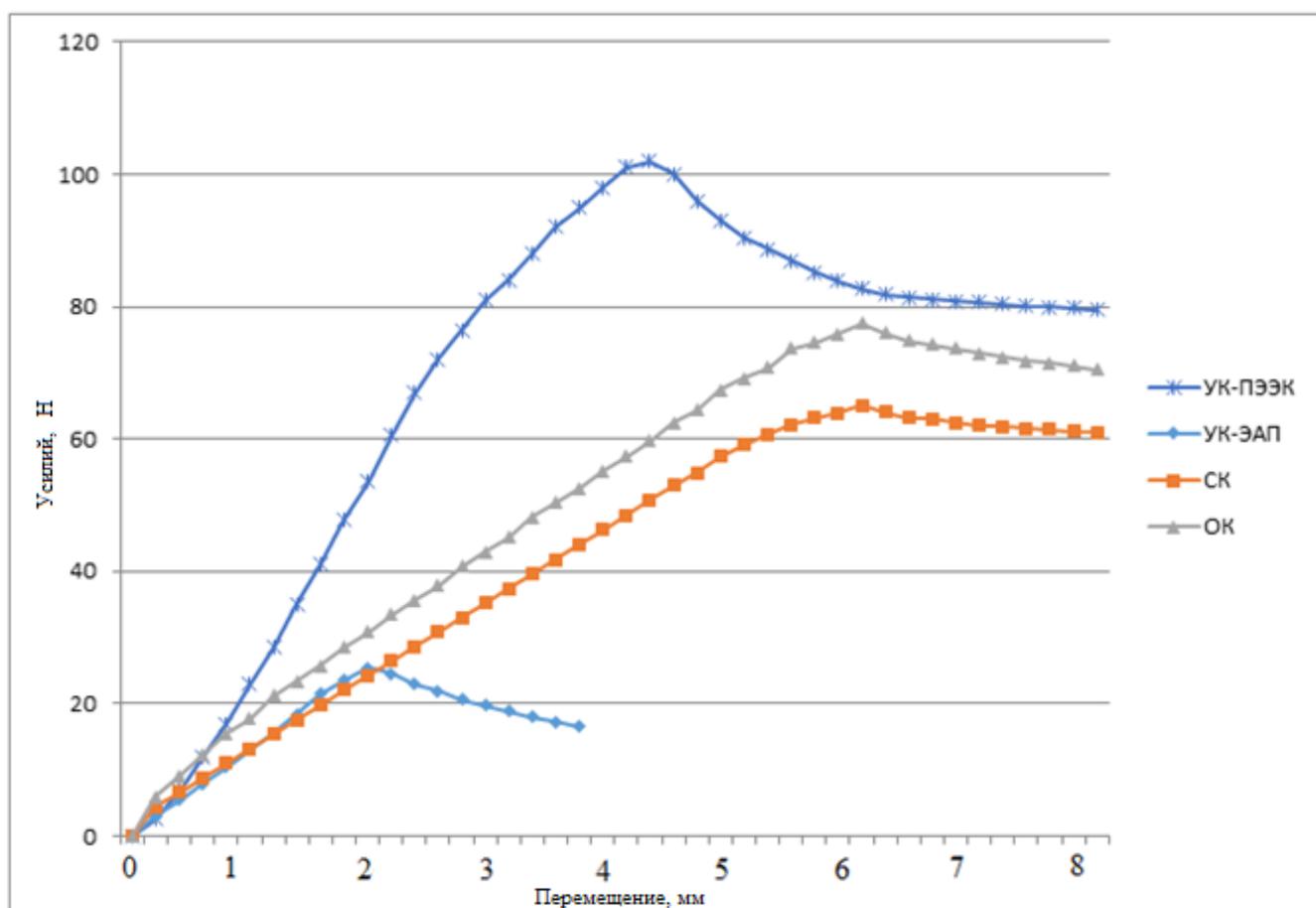


Рисунок 29 – Примеры экспериментально полученных диаграмм усилие-раскрытие трещины (P - Δ) в процессе расслоения образцов типа ДКБ из 4-х типов слоистых ПКМ

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 19.

В таблице 23 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 23 – 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

2.2.3 Метод определения 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. 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 23

$$\sigma_{IC} = \frac{P_{\text{макс}}}{S}, \quad (23)$$

где S – площадь зоны разрушения, м^2 .

На рисунке 30 представлены фотографии общего вида образца для испытания на когезионную прочность (*а*) 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.

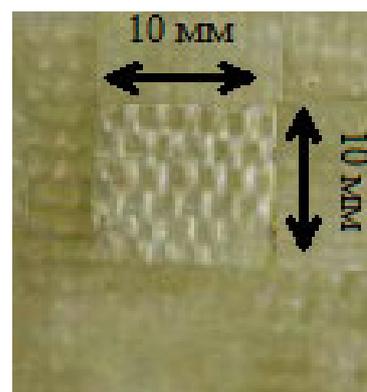
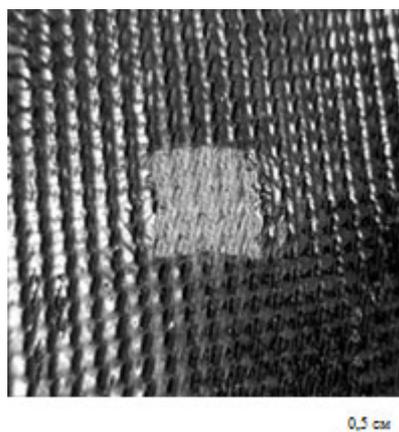
*а**б**в*

Рисунок 30 – Фотографии общего вида образца (*а*) и поверхности слоев образцов после разрыва локальной зоны сцепления в СК (*б*) и УК (*в*)

В таблице 24 приведены результаты испытаний при локальном межслоевом разрушении (максимальное напряжение σ_{IC} , деформация при максимальной нагрузке δ_{IC} , максимальное раскрытие δ_{max} , а также рассчитанные по модели Баренблатта (уравнение 14) значения длины когезионной зоны l_{cz}) для каждого типа ПКМ.

Таблица 24 – Экспериментально полученные параметры 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
l_{cz} , мм	3,6	0,89	0,96	1,1

2.2.4 Методика создания КЭ 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 решения задачи расслоения применительно к межслоевому росту трещины в слоистых ПКМ используют обычно первый метод 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 31.

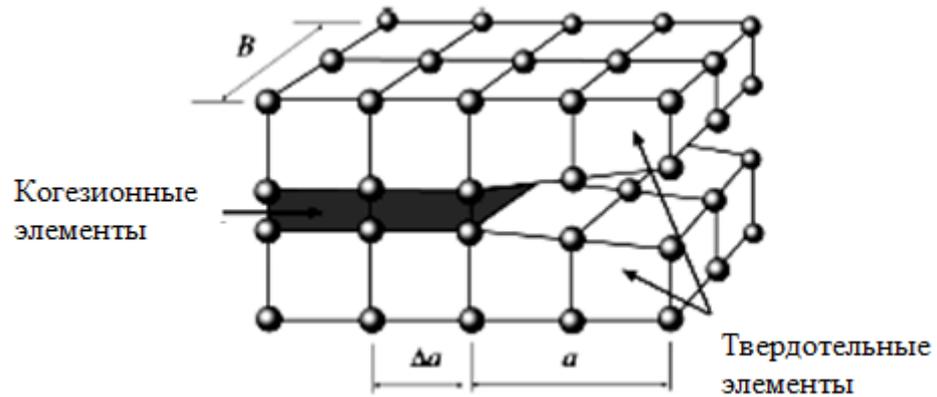


Рисунок 31 - Расположение в плоскости роста трещины когезионных элементов

При этом:

- Элементы создаются вручную командами E или EGEN, либо командой CZMESH (для удаления элементов команда CZDEL);
- 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 32 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 32 (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).

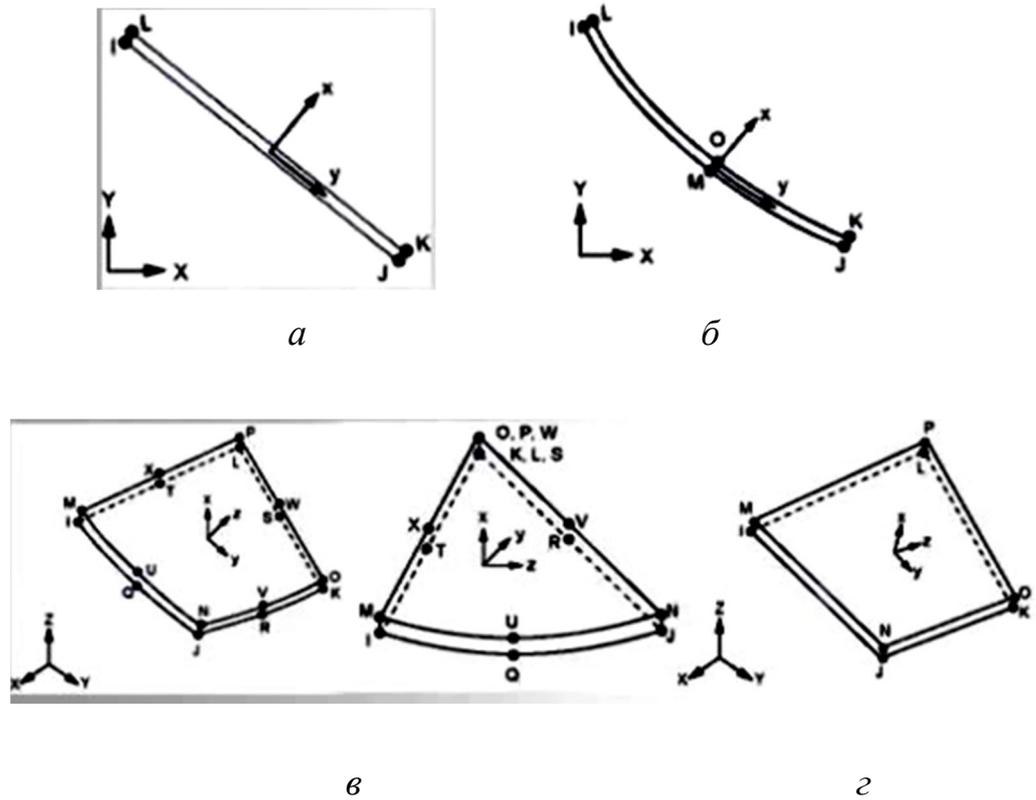


Рисунок 32 - 2D (а, б) и 3D (в, г) интерфейсные элементы

Для генерации сетки интерфейсных элементов INTER20x применяется команда CZMESH. 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 33:

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

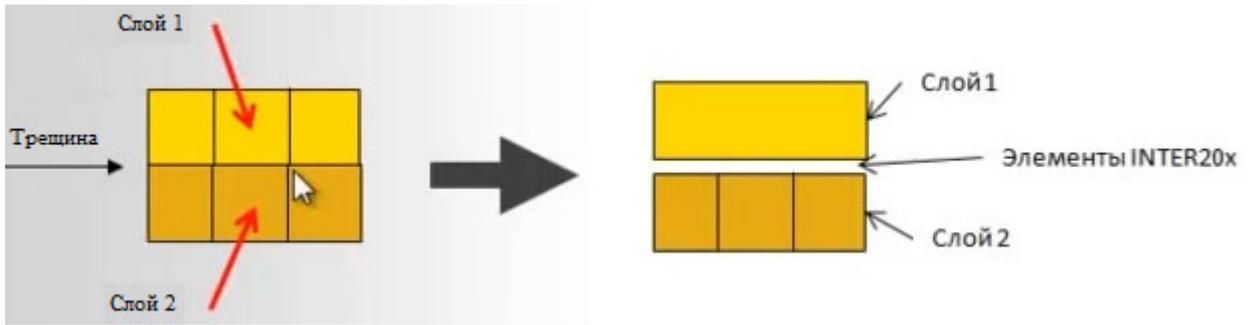


Рисунок 33 - Схема формирования интерфейсных элементов

В методе МКЗ/МКЭ используются следующие команды:

NPT - число точек данных для указанной температуры.

ТВОРТ – ЗКЗ. При моделировании расслоения, т.е. межслоевого роста трещины, в методе МКЗ/МКЭ могут быть применены различные ЗКЗ, чаще всего экспоненциальный и билинейный, причем экспоненциальный более физически обоснован применительно к слоистым ПКМ, поэтому ниже описывается методика расчетов с применением этого ЗКЗ с опцией команды ТВОРТ - EXPO и с общим набором команд ТВ,CZM,,,EXPO для расслоения по нормали (по моде I) .

В процессе вычислений (при расслоении по нормали) необходимо ввести два параметра материала в команде ТВ,CZM:

C1: Максимальное нормальное напряжение раскрытия слоев σ_{\max} ;

C2: Величина деформации по нормали к поверхности δ_{IC} при напряжении σ_{\max} , когда отсутствует сдвиг слоев.

Вычисление работы раскрытия слоев по нормали ϕ_n осуществляется по формуле 24

$$\phi_n = e\sigma_{\max}\delta_{IC}, \quad (24)$$

где e – основание натурального логарифма.

Метод МКЗ/МКЭ с экспоненциальным ЗКЗ применяется совместно с интерфейсными элементами INTER20x и контактными элементами CONTA17x.

При этом требуется задание параметров для элементов INTER20х (ТВ,CZM,...EXPO). Интерфейсные элементы позволяют моделировать зону расслоения, применяя команду ТВ,CZM,,,ВОРТ с командой EXPO для задания экспоненциального закона поведения материала и командой ТВDATA для задания параметров, приведенных в таблице 25.

Таблица 25 – Параметры модели с экспоненциальным ЗКЗ

Параметр	Обозначение	Описание
C ₁	σ_{\max}	Нормальное напряжение расслоения, Па
C ₂	δ_{IC}	Величина зазора между слоями материала при действии нормальных напряжений, мм

Визуализация результатов расчета на элементах INTER20х достигается просмотром нормальных напряжений в /POST1 или /POST26 SS, X_iSS, XY (SS, XZ) и нормальных перемещений в /POST1 или /POST26 SD, X_iSD,XY (SD, XZ). Для вывода изображения используются команды PLxSOL, PRxSOL или ESOL. На рисунке 34 приведен пример распределения нормальных напряжений на элементах INTER20х, где разрушенные элементы - с нулевыми напряжениями.

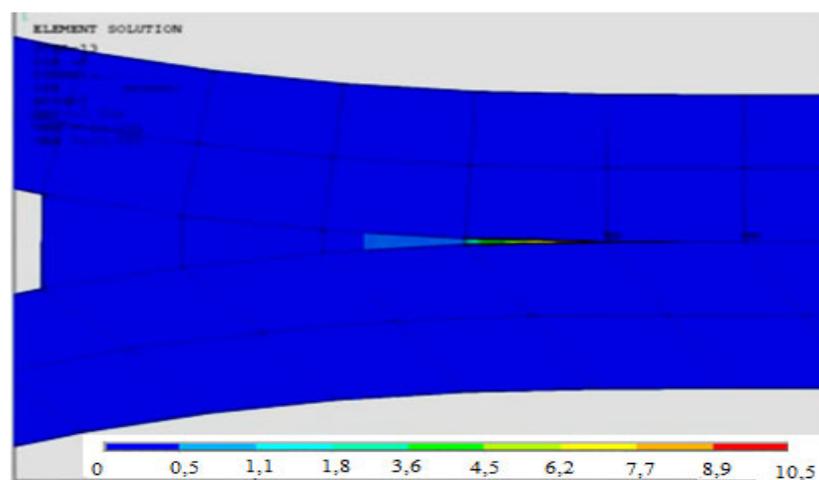


Рисунок 34 - Распределение нормальных напряжений при моделировании расслоения в PostProcANSYS.

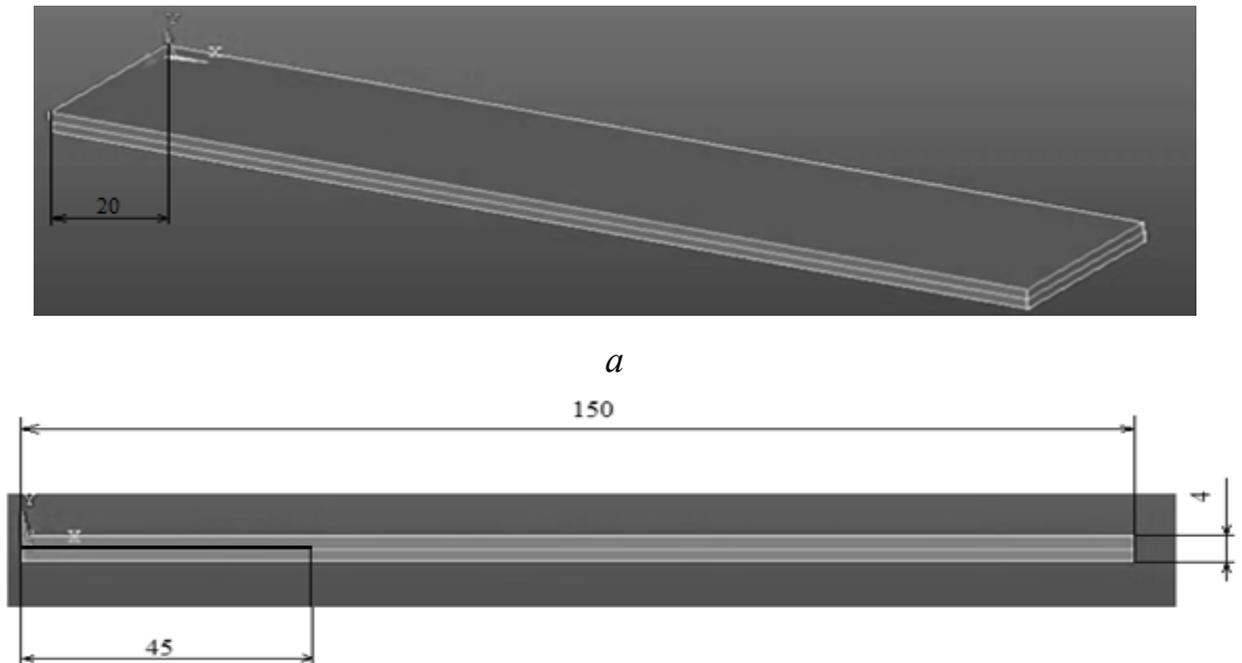
Контактные нормальные и касательные напряжения можно просмотреть командами CONT, PRES и CONT, SFRIC.

Компоненты касательных напряжений TAUR/TAUS через таблицу элементов.

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.

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 35).



б

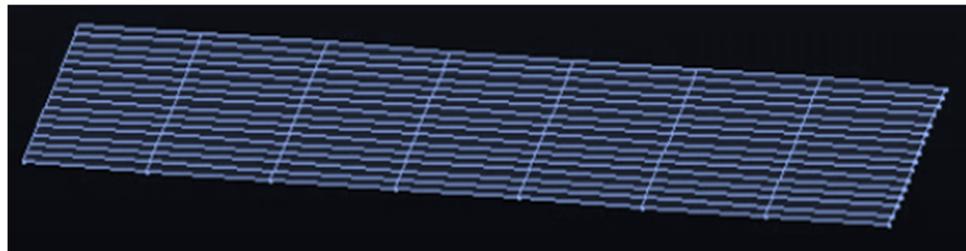
Рисунок 35 – Общий вид в изометрии и в профиль 3D модели образца в виде ДКБ с основными размерами модели и заданной начальной трещиной

3D модель разбивается на конечные элементы: Из предложенных в пакете прикладных программ ANSYS® типов конечных элементов в модели использовались Solid 185 и Inter 205. После этого задаются граничные условия: к краям трещины в образце типа ДКБ прикладывается усилие и определяется их перемещение (глобальное раскрытие трещины).

С помощью командной строки программы ANSYS между верхней и нижней частями геометрической модели вводится когезионный слой, представленный на рисунке 36а. Программными средствами задаётся 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 36б.



а



б

Рисунок 36 – Общий вид когезионного слоя в модели образца типа ДКБ (*а*) и его разбивка на конечные интерфейсные (когезионные) элементы (ИЭ) (*б*)

Для проведения моделирования процесса расслоения образца в виде ДКБ и расчетов параметров трещиностойкости в 3D модель с когезионным слоем вводится экспоненциальная форма ЗКЗ, 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}) и рассчитанное значение длины когезионной зоны (l_{cz}) как длины когезионного слоя, также являющиеся материальными константами.

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

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

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 25

$$N_e = l_{cz} / l_e, \quad (25)$$

где

l_{cz} – длина когезионной зоны для данного ПКМ, рассчитанная по экспериментальным данным и физической модели Баренблатта (см. уравнение 14);

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 II

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 углекомполита больше в 1,6 раза по сравнению с углекомполитом 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 деформация при максимальной нагрузке δ_{IC}), а также ее длине $l_{кз}$ 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. Проведён 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.

6. Предложена методика численного расчёта закономерности изменения нагрузки по моде I на края трещины с увеличением её раскрытия для 3D конечно-элементной модели критического роста трещины в двухконсольной балке с имплантированным экспоненциальным законом когезионной зоны и учётом экспериментально определённых параметров когезионной зоны.

3 ОБОБЩЕНИЕ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И ЧИСЛЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ К РАССЛОЕНИЮ РАЗЛИЧНЫХ ПО СОСТАВУ АРМИРОВАННЫХ СЛОИСТЫХ ПКМ

3.1 Анализ закономерности изменения нагрузки, приложенной по моде I, на края трещины для образцов в виде ДКБ исследуемых слоистых ПКМ

В таблице 26 обобщены 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 упругим характеристикам (модули сдвига G , коэффициенты Пуассона (ν)), взяты и усреднены из литературы, и являются общепризнанными и принципиально не влияют на результаты расчетов.

Таблица 26 – Полученные характеристики исследуемых материалов

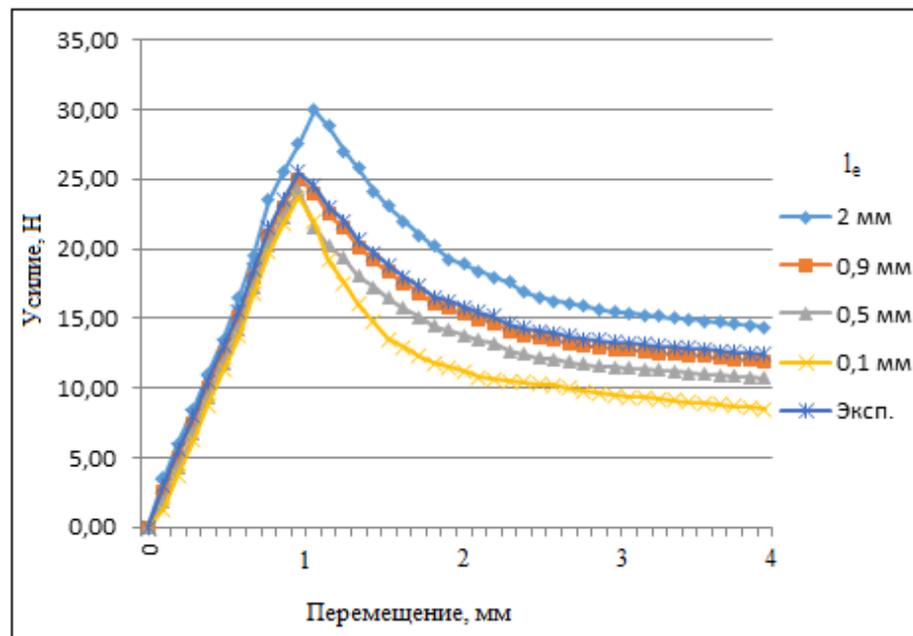
Характеристика	УК-ЭАП	УК-ПЭЭК	СК-ПКА	ОК-ПКА
1	2	3	4	5
E_{11} , ГПа	128	133	34	54
E_{22} , ГПа	115	127	2,5	3,0
E_{33} , ГПа	5	5,1	2,5	3,0
G_{11} , ГПа	5,2	5,5	2,8	2,8
G_{12} , ГПа	5,2	5,5	2,8	2,8
G_{13} , ГПа	3,08	5,1	1,5	1,5
ν_{12}	0,24	0,31	0,22	0,26
ν_{13}	0,24	0,31	0,22	0,26
ν_{23}	0,33	0,2	0,3	0,3

Продолжение таблицы 26

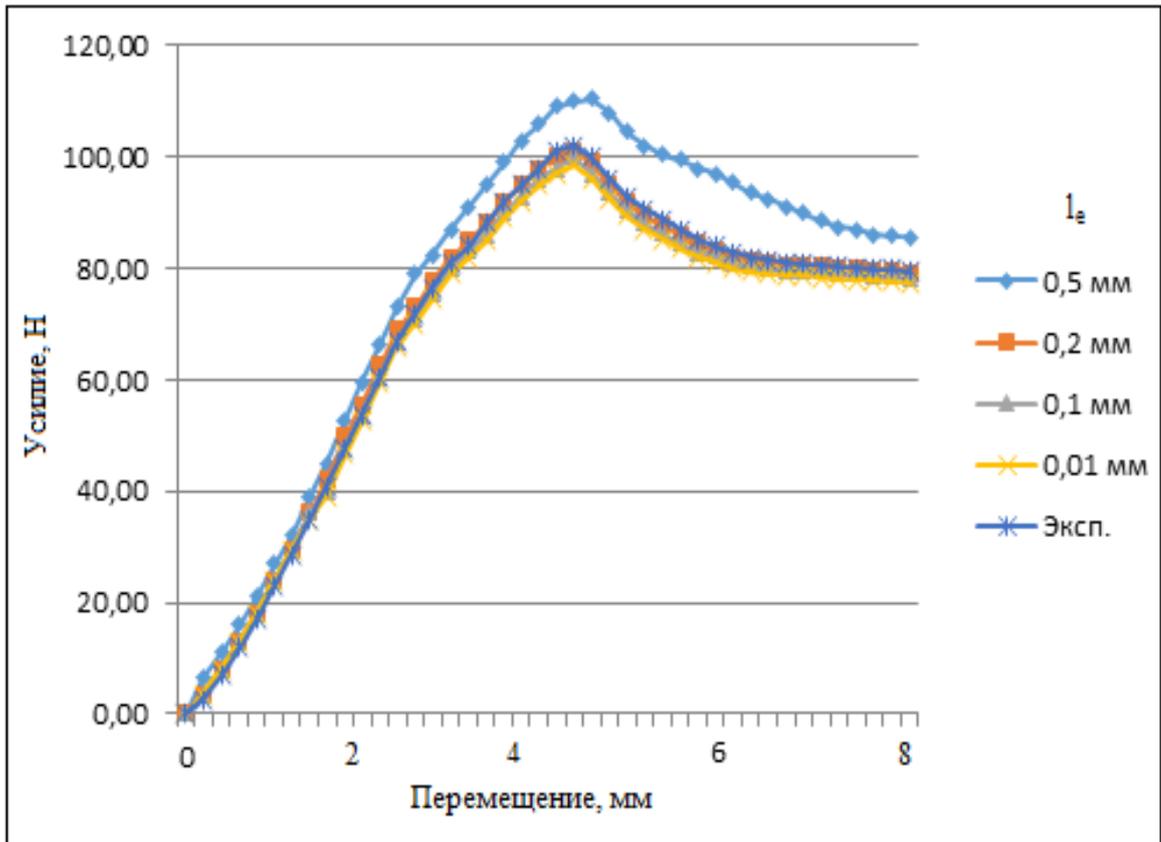
1	2	3	4	5
G_{IC} , Дж/м ²	210	352	324	286
σ_{IC} , МПа	10,7	28,1	21,5	17,6
δ_{IC} , мкм	7,3	4,6	5,6	6,0
l_{cz} , мм	3,6	0,89	0,96	1,1

С использованием данных из таблицы 27 для каждого типа ПКМ проведено 3D моделирование процесса расслоения ДКБ по моде I с различной длиной и количеством интерфейсных элементов по всей длине когезионного слоя.

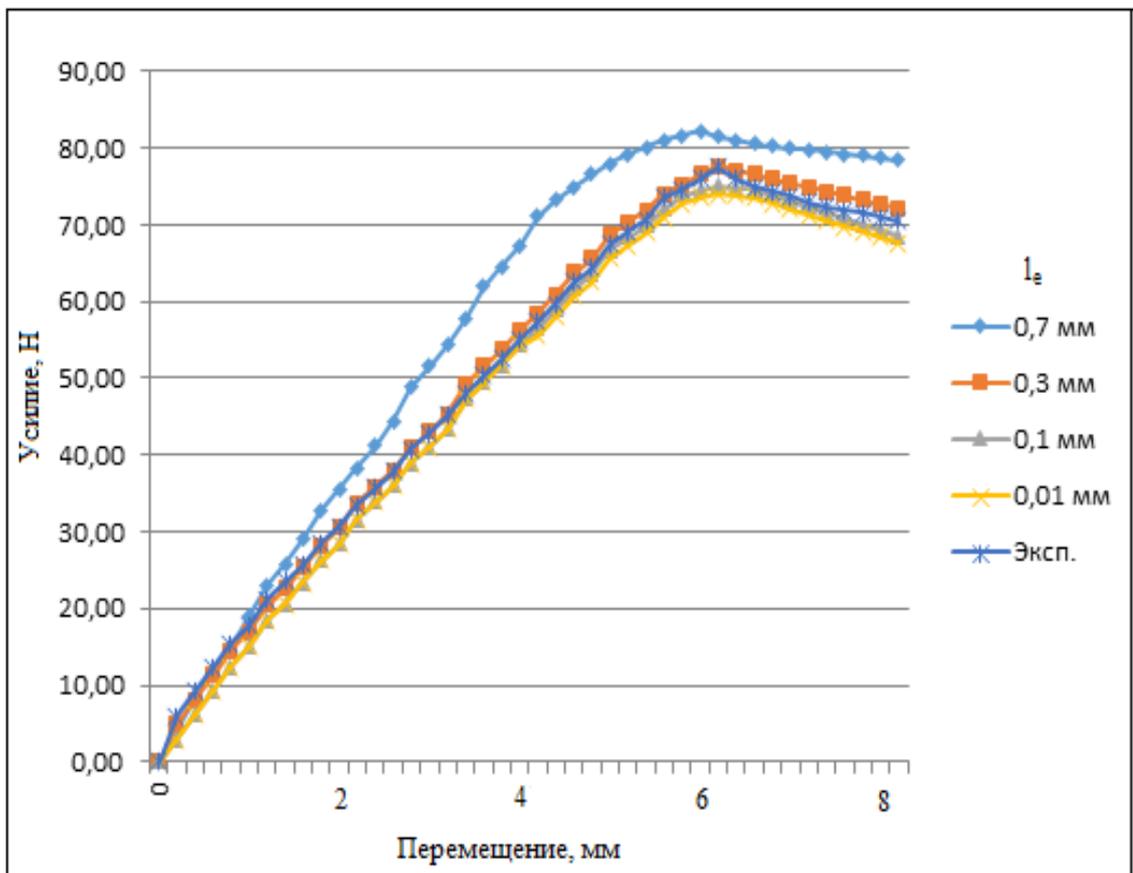
На рисунке 37 (а-г) представлены экспериментально полученные и рассчитанные по 3D модели МКЭ/МКЗ с использованием 4-х размеров конечных ИЭ l_e кривые усилие-перемещение краев трещины при ее раскрытии (P- Δ) для образцов в виде ДКБ армированных слоистых ПКМ четырех исследованных типов: УК-ЭАП; УК-ПЭЭК; СК-ПКА и ОК-ПКА. Количество ИЭ (N_e), располагаемых по длине когезионной зоны, рассчитывали для каждого типа ПКМ по формуле 25 и значениям l_{cz} , приведенным в таблице 26.



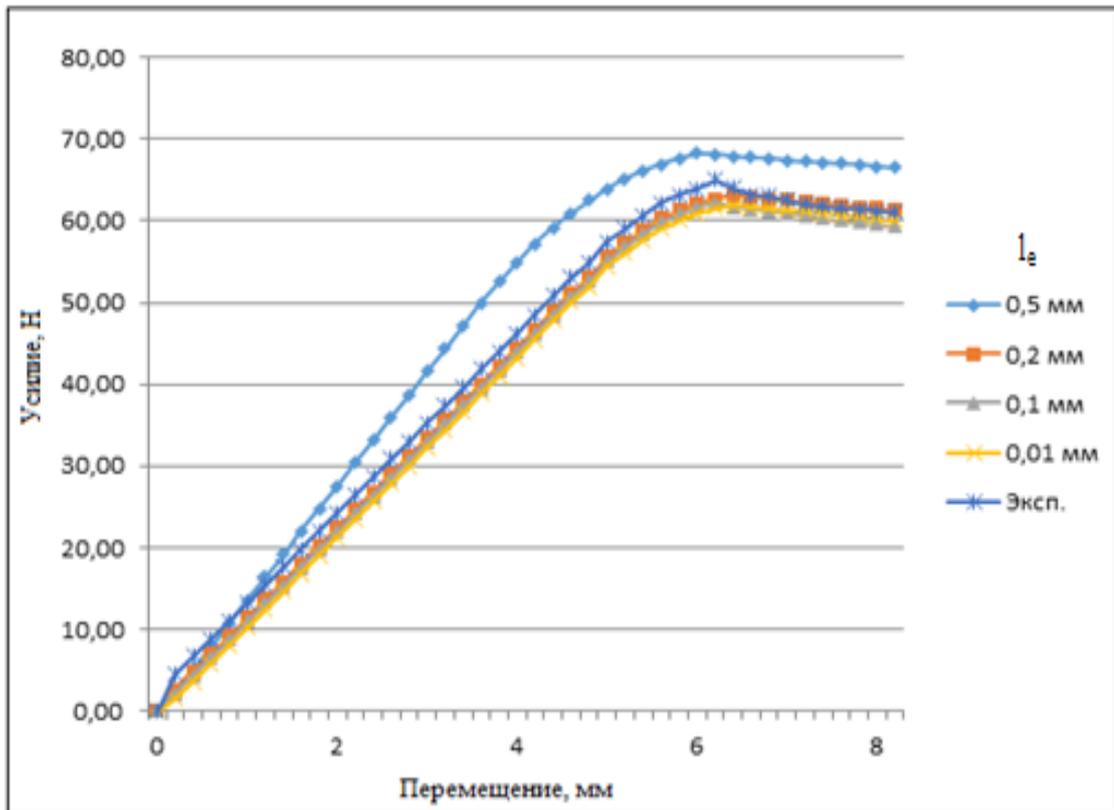
а



б



в



г

Рисунок 37 – Экспериментально полученные и рассчитанные по 3D модели 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)

Анализ расчётных и экспериментальных зависимостей для углекомполитов на основе ЭАП и ПЭЭК (рисунок 37 *а* 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 для стеклокомпозитов и органокомпозитов на поликапроамидной матрице (рисунок 37 *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 углекомпозитом 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 37*а* расположены достаточно далеко друг от друга. А в случае с углекомпозитом, стеклокомпозитов и органокомпозитов 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 37 *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.

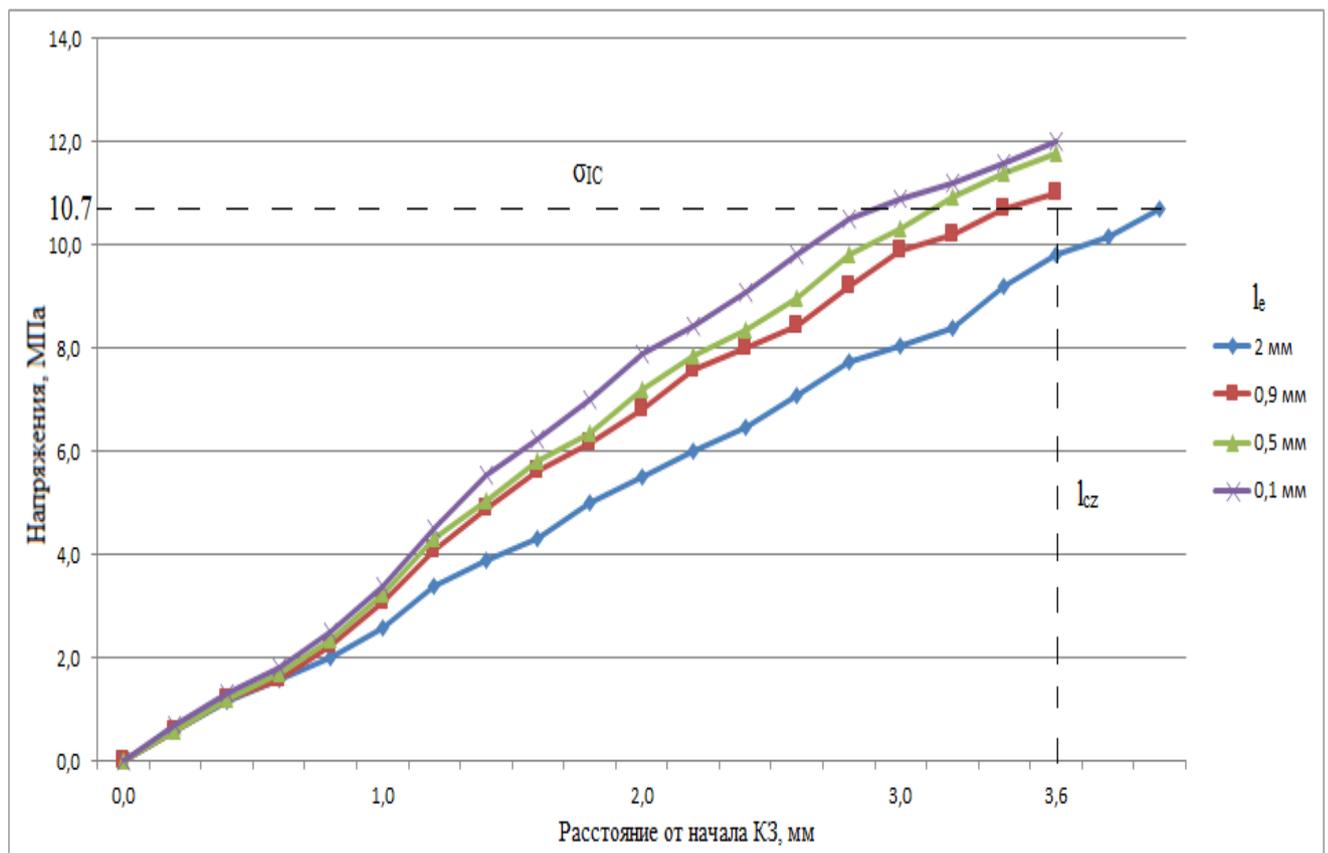
Проведя анализ результатов моделирования стеклокомпозитов и органических композитов на поликапроамидной матрице выявлено, что для разных по природе материалов, но пропитанных одинаковым связующим, наполнителями размеры интерфейсных элементов отличаются, и это тоже оказывает влияние на результат моделирования. 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 27 представлено количество конечных ИЭ в КЗ и их длина для каждого типа ПКМ.

Таблица 27 – Количество конечных ИЭ в КЗ и их длина для каждого типа ПКМ

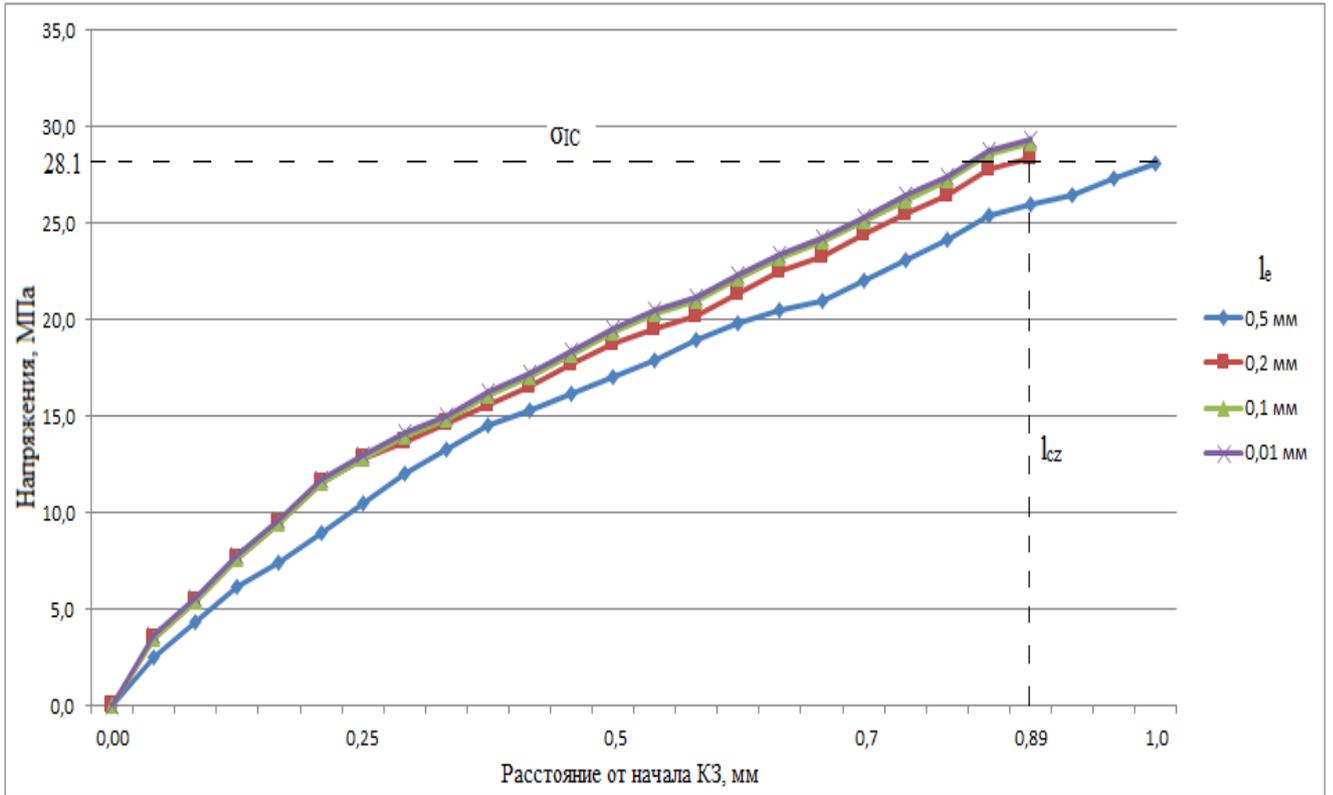
Тип ПКМ	Длина конечного ИЭ, l_e , мм	Количество ИЭ в КЗ, N_e
УК-ЭАП	2	1,8
	0,9	4
	0,5	7,2
	0,1	36
УК-ПЭЭК	0,5	1,8
	0,2	4,5
	0,1	8,9
	0,01	89
СК-ПКА	0,5	2
	0,2	5
	0,1	9,6
	0,01	96
ОК-ПКА	0,5	2,2
	0,3	3,6
	0,1	11
	0,01	110

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

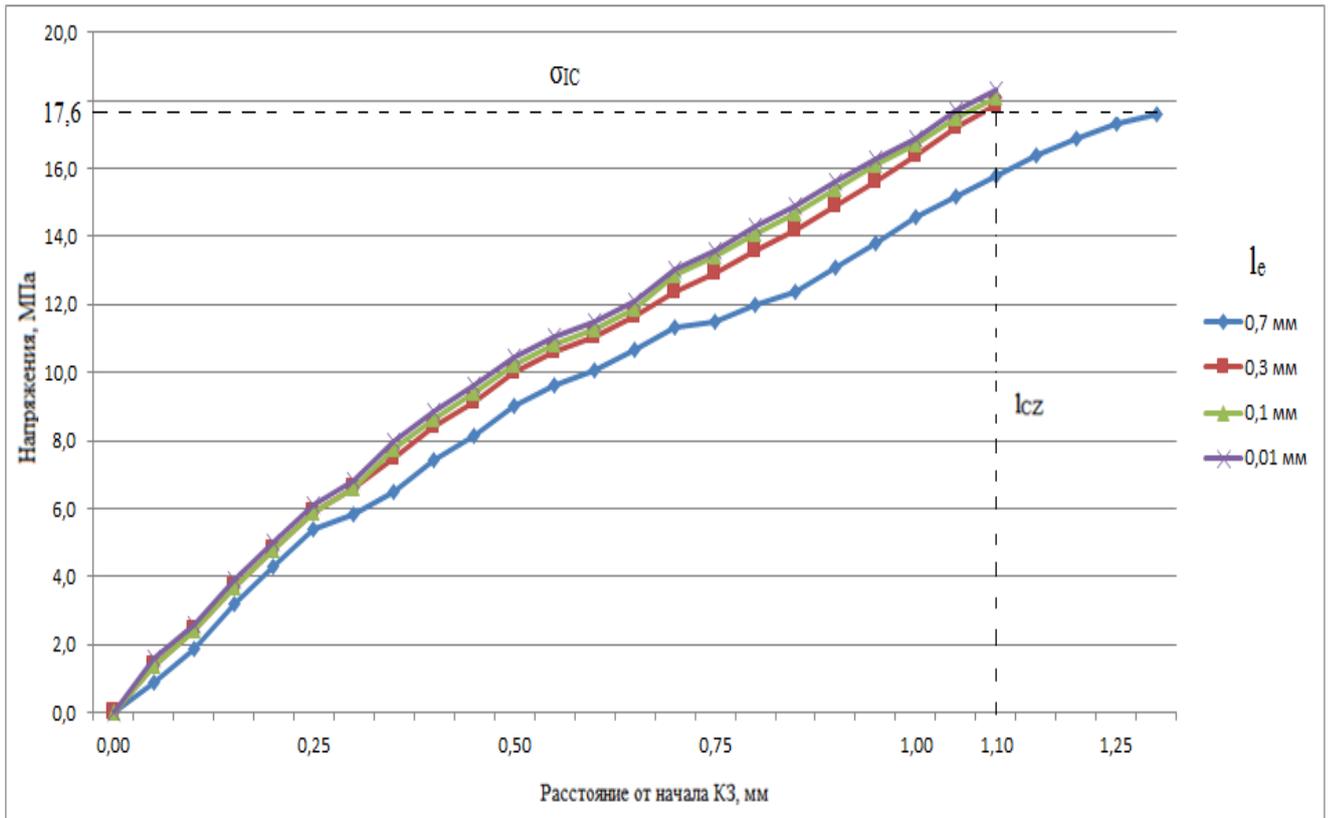
На рисунке 38 а-г обобщены кривые распределения рассчитанные по методу МКЭ/МКЗ напряжений по длине моделируемой когезионной зоны от ее начала при раскрытии трещины в образцах в виде ДКБ при различной длине конечных когезионных (интерфейсных) элементов для исследованных слоистых ПКМ: УК-ЭАП; УК-ПЭЭК; СК-ПКА; ОК-ПКА с указанными пунктирными линиями экспериментально определенными значениями локальной межслоевой прочности (σ_{IC}) и рассчитанными по модели Баренблатта и экспериментальным данным значениями длины когезионной зоны (l_{cz}).



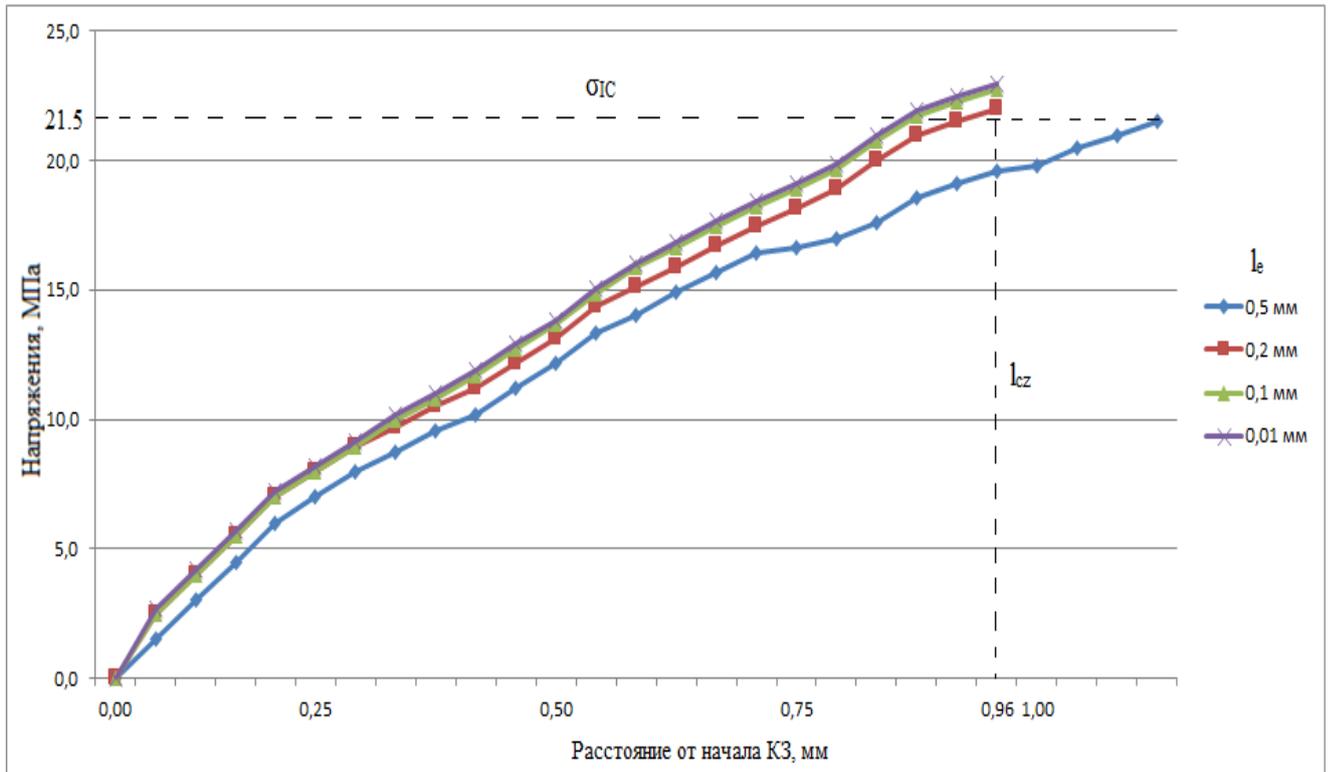
a



б



в



з

Рисунок 38 – Распределение локальных напряжений по длине моделируемой когезионной зоны от начала КЗ при различной длине конечных интерфейсных элементов для слоистых ПКМ: *а* - УК-ЭАП; *б* - УК-ПЭЭК; *в* – ОК-ПКА; *з* - 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 38 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 стеклокомпозитов и органокомпозитов 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.

Для материалов на основе термопластов результаты моделирования получаются более стабильнее чем для ПКМ на реактопластах. Это скорее всего связано с линейной структурой термопластов.

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) Р-Δ, 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 (Таблица 28).

Таблица 28 – 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, l_e , мм	Количество ИЭ в когезионном слое, N_e
УК-ЭАП	0,9	4
УК-ПЭЭК	0,2	4,5
СК-ПКА	0,2	5
ОК-ПКА	0,3	3,6

При использовании 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 III

1. Обобщены экспериментально полученные значения критической интенсивности высвобождения упругой энергии (G_{IC}), локальной когезионной прочности (σ_{IC}) и локальной деформации (δ_{max}) для 4-х типов армированных слоистых ПКМ.

2. Разработана и исследована 3D конечно-элементная модель критического роста трещины в двухконсольной балке с имплантированным экспоненциальным

законом когезионной зоны с использованием экспериментально определённых параметров когезионной зоны и упругих константами 4-х типов ПКМ.

3. Установлены закономерности изменения нагрузки на края трещины от величины её 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 размеров интерфейсных элементов, располагающихся по длине когезионной зоны, на точность расчётов в конечно-элементной модели возникновения и развития трещины для слоистых органо-, стекло-, углекомполитов на основе термореактивных и термопластичных матриц.

6. Установлена оптимальные длина интерфейсного элемента и 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 определению нагрузки начала расслоения для исследуемых случаев. Результаты численного моделирования хорошо согласуются с результатами экспериментов, и при оптимизации количества конечных элементов по длине когезионной зоны до 4-х, 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 полимерных композиционных материалов с использованием имплантированного в метод конечных элементов закона когезионной зоны и получены следующие выводы:

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

2. Выполнен цикл экспериментальных исследований по определению параметра интенсивности высвобождения упругой энергии для четырех типов образцов. Выявлено, что трещиностойкость термопластичного углекомполита больше в 1,6 раза по сравнению с углекомполитом 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-, углекомполитов 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 её 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 органоластика 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 расчётов в конечно-элементной модели возникновения и развития трещины для слоистых органо-, стекло-, углекомполитов на основе термореактивных и термопластичных матриц. Установлено минимально возможное без ущерба для точности вычислений количество ИЭ 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. Проведено сравнение результатов численного решения и эксперимента по определению нагрузки начала расслоения для исследуемых

случаев. Установлено, что результаты численного моделирования хорошо согласуются с результатами экспериментов, и при оптимизации количества конечных элементов по длине когезионной зоны до 4-х, погрешность определения нагрузки, приводящей к началу роста трещины, не превышает 5 %.

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. Khoshravan. 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 composite interface / F. Moroni [и др.] // Composites. Part B. 2013. V. 55. P. 635-641.
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.
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.