



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

---

На правах рукописи

**ШАТАЛИН АЛЕКСАНДР АНДРЕЕВИЧ**

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

Специальность 2.6.17 - Материаловедение

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор технических наук  
Бабаевский Петр Гордеевич

Москва 2024

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	5
Глава I Состояние вопроса (степень проработанности проблемы) .....	13
1.1 Слоистые стекло- и углекомпозиаты на основе клеевых связующих и препрегов: типы, составы, технологии .....	13
1.1.1 Клеевые связующие и препреги, композиты на их основе.....	13
1.1.2 Технологии получения клеевых препрегов и формования СК и УК из них.....	18
1.2 Проблемы устойчивости тонкослойных ПКМ (СК и УК) к межслоевому разрушению и подходы к ее оценке и прогнозированию в рамках линейной упругой механики разрушения .....	21
1.2.1 Аналитическая и экспериментальная оценка межслоевой трещиностойкости слоистых ПКМ (СК и УК) в макромеханическом подходе ЛУМР.....	22
1.2.2 Аналитическая и экспериментальная оценка межслоевой трещиностойкости слоистых ПКМ (СК и УК) в микромеханическом подходе ЛУМР.....	34
1.2.3 Конечно-элементное численное моделирование и оценка межслоевой трещиностойкости слоистых ПКМ в рамках макро- и микромеханических подходов ЛУМР .....	39
Выводы по главе I .....	49
Глава II Объекты и методы исследования трещиностойкости и локальной межслоевой прочности .....	52
2.1 Объекты исследования .....	52
2.2 Экспериментальные методы .....	57
2.2.1 Определение структурных характеристик (компонентного состава, плотности, пористости).....	57
2.2.2 Определение параметров трещиностойкости .....	57
2.2.3 Определение локальной межслоевой прочности .....	62

2.2.4 Численные методы оценки трещиностойкости слоистых стекло- и углекомполитов.....	65
Глава III Экспериментальное определение трещиностойкости и локальной межслоевой прочности УК и СК из клеевых препрегов при индивидуальном и комбинированном нагружении.....	90
3.1 Межслоевая трещиностойкость УК и СК из клеевых препрегов при нагружении по моде I.....	90
3.2 Локальная межслоевая прочность УК и СК из клеевых препрегов при нагружении по моде I.....	93
3.3 Межслоевая трещиностойкость УК и СК из клеевых препрегов при нагружении по моде II.....	98
3.4 Локальная межслоевая прочность УК и СК из клеевых препрегов при нагружении по моде II.....	101
3.5 Трещиноподвижные силы и критерии межслоевого роста трещины при комбинированном нагружении по модам I/II.....	106
Выводы по главе III.....	112
Глава IV Численная оценка трещиностойкости слоистых стекло- и углекомполитов с использованием экспериментально определенных параметров при индивидуальном и комбинированном нагружении.....	114
4.1 Индивидуальные моды нагружения I и II: образцы ДКБ и БКН, метод МКЗ.....	114
4.2 Комбинированная (смешанная) мода нагружения I/II: образцы SLB и OLB, метод МВЗТ.....	118
Выводы по главе IV.....	127
Выводы и заключения по диссертационной работе.....	129
Список литературы.....	132

## **СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ**

ПКМ - полимерный композиционный материал

СК - стеклокомпозит

УК - углекомпозит

ТС - трещиностойкость

ТДС - трещиноподвижная сила

ЛУМР - линейная упругая механика разрушения

ДКБ - метод двойной консольной балки

БКН - метод балки с концевым надрезом

МВЗТ (VCCT) - модель виртуального закрытия трещины

МКЗ (CZM) - модель когезионной зоны

SLB (УПБ) - метод изгибом с укороченной полубалкой

OLB (НПБ) - метод изгибом над укороченной полубалкой

КЭ - конечный элемент

ЗКЗ - закон когезионной зоны

ИЭ - интерфейсный элемент

СЗ - степенной закон

ИСМ - метод изгиба при смешанной моде

МКЭ - метод конечных элементов

КЗ - когезионная зона

ККЭ - конечный когезионный элемент

## Введение

### Актуальность темы исследования

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

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

### Степень разработанности темы

При производстве и эксплуатации элементы конструкций из слоистых ПКМ, в том числе стекло- и углекомполитов (СК, УК), наиболее часто подвергаются изгибающим и растягивающим нагрузкам, которые создают индивидуальные или комбинированные напряжения отрыва и сдвига композитных слоев - моды нагружения I и II соответственно. Эти напряжения вызывают возникновение и рост трещин между слоями с нарушением структурной целостности конструкций. Чаще всего это происходит из-за геометрических и материальных неоднородностей, таких как обрывы слоев, изогнутые и скошенные углы, при взаимодействии обшивки и элементов жесткости и многослойных переходах в сложных конструкциях.

Поскольку такие расслоения трудно контролировать, предотвращение их возникновения и распространения является наиболее эффективным способом обеспечения несущей способности слоистых ПКМ. Поэтому при проектировании и расчете на прочность и несущую способность элементов конструкций из таких ПКМ, а также при их эксплуатации важнейшее значение имеют надежные, экспериментально определенные критерии устойчивости к инициированию и росту межслоевых трещин - межслоевой трещиностойкости (ТС) при комбинированных режимах нагружения (трещиноподвижных силах (ТДС)) с различным соотношением основных мод нагружения - межслоевом отрыве (мода I) и сдвиге (мода II). Применительно к индивидуальным модам межслоевого нагружения слоистых ПКМ в рамках линейной упругой механики разрушения (ЛУМР) разработаны стандартные методы оценки параметров трещиностойкости слоистых ПКМ ( $G_{IC}$  и  $G_{IIC}$ ) с использованием простых образцов в виде пластин с заданной межслоевой краевой трещиной с раскрытием трещины растяжением (метод двойной консольной балки (ДКБ)) и 3-х точечным изгибом (метод балки с концевым надрезом (БКН)), соответственно.

Для комбинированного режима межслоевого нагружения слоистых ПКМ (смешанной моды I/II) такие методы активно разрабатываются с использованием обобщенного критерия трещиностойкости ( $G_{I/IIc}$ ), учитывающего вклады различных мод нагружения. Для определения такого критерия используются различные эмпирические соотношения, в частности, уравнение (критерий) Бензегга-Кенана (Б-К).

### **Цель работы**

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

### **Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи:**

1. Обобщить информацию о непрерывно армированных слоистых стекло- и углекомполитах из клеевых препрегов, используемых в авиационной и ракетной технике, их дефектности, межслоевой трещиностойкости, теоретических, экспериментальных и численных методах оценки и прогнозирования устойчивости к расслоению при индивидуальном и комбинированном нагружении по модам I и II.

2. Экспериментально определить глобальный и локальный параметры межслоевой трещиностойкости пластин слоистых ПКМ, отформованных вакуумным методом из клеевых препрегов КМКС и КМКУ, при индивидуальном растяжении и сдвигом и критерий разрушения при комбинированном нагружении.

3. Разработать конечно-элементные модели критического расслоения простых образцов слоистых ПКМ типа ДКБ, БКН, SLB и OLB с

использованием методов когезионной зоны (МКЗ) и виртуального закрытия трещины (МВЗТ).

4. Определить для моделей ПКМ на основе выбранных препрегов, с использованием полученных экспериментально параметров и критериев межслоевой трещиностойкости, зависимости глобальной нагрузки на образцы от их деформаций и значения критической интенсивности высвобождения упругой энергии при индивидуальной и комбинированной нагрузке на трещину ( $G_{IC}$ ,  $G_{IIC}$  и  $G_{IIIC}$ ) по максимальной (критической) нагрузке на образцы, инициирующей рост заданной трещины или дефекта.

5. Установить влияние для каждого из выбранных составов непрерывно армированных слоистых стекло- и углекомполитов, размеров конечно-элементной сетки и, соответственно, числа интерфейсных элементов на точность численного предсказания начала расслоения с целью минимизации объема вычислений.

6. Проверить адекватность моделей путем сравнения результатов компьютерного моделирования с экспериментальными данными о критической межслоевой трещиностойкости исследованных армированных слоистых ПКМ.

### **Научная новизна**

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

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



3. Впервые разработана и прошла апробацию методика экспериментального определения когезионной прочности  $\sigma_{II}$  и деформации  $\delta_{II\max}$  при сдвиге.

4. Экспериментально выявлено, что природа армирующего наполнителя влияет на критическое значение интенсивности выделения упругой энергии при индивидуальных модах нагружения I и II. Показано, что трещиностойкость углекомполита КМКУ при нагружении по моде I в 1,38 раза больше по сравнению со стеклокомполитом КМКС, а при нагружении по моде II в 1,4 раза и составляет 655 Дж/м<sup>2</sup> и 1025 Дж/м<sup>2</sup> соответственно.

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

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

7. Показано, что методы когезионной зоны и виртуального закрытия трещины, имплантированные в метод конечных элементов, могут быть применены с высокой степенью точности для оценки межслоевой трещиностойкости и прогнозирования устойчивости к расслоениям не только на простых образцах, но и на сложных элементах авиационных конструкций.

### **Теоретическая и практическая значимость**

Разработаны трехмерные модели критического роста трещины, базирующиеся на методе конечных элементов, с внедренными в метод КЭ

законом когезионной зоны (ЗКЗ) для простых образцов типа двухконсольной балки при нагружении по моде I и балки с концевым надрезом при нагружении по моде II и методом виртуального закрытия трещины для нестандартных образцов типа ДКБ/БКН при комбинированном нагружении по модам I и II, обеспечивающие достоверную оценку межслоевой трещиностойкости слоистых композиционных материалов.

Выявлено оптимальное количество интерфейсных элементов (ИЭ), обеспечивающие расхождение расчетных и экспериментально полученных значений не более 5% для слоистых стекло- и углекомполитов на основе терморезактивных матриц при минимально необходимом объеме вычислений. Это позволяет применять апробированные в трехмерной модели ИЭ для более точного анализа процессов зарождения и роста трещин в конструкциях любой геометрии в научно-исследовательских институтах и конструкторских бюро при проектировании авиационной техники из полимерных композиционных материалов с требуемыми физико-механическими характеристиками.

### **Методология и методы исследований**

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

Задачи, поставленные в настоящей работе, решаются с помощью современных методов исследования, таких как: 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 при

индивидуальном нагружении по моде I  $G_{IC}$  и модуля упругости при одноосном растяжении для стекло- и углекомполитов на основе терморреактивных матриц.

2. Результаты экспериментальных исследований критических параметров когезионной зоны при индивидуальном нагружении по моде I: локальной межслоевой когезионной прочности  $\sigma_{IC}$ , максимальном раскрытии когезионной зоны  $\delta_{I\max}$  для стекло- и углекомполитов на основе терморреактивных матриц.

3. Результаты экспериментальных исследований по определению параметра интенсивности высвобождения упругой энергии при индивидуальном нагружении по моде II  $G_{IIC}$  и модуля упругости при изгибе для стекло- и углекомполитов на основе терморреактивных матриц.

4. Результаты экспериментальных исследований критических параметров когезионной зоны при индивидуальном нагружении по моде II: локальной межслоевой когезионной прочности  $\sigma_{IIC}$ , максимальном раскрытии когезионной зоны  $\delta_{II\max}$  для стекло- и углекомполитов на основе терморреактивных матриц.

5. Результаты экспериментальных исследований по определению параметра интенсивности высвобождения упругой энергии при комбинированном нагружении модам I и II  $G_{I/II}$  для стекло- и углекомполитов на основе терморреактивных матриц.

6. Построенные в программном комплексе ANSYS численные трехмерные конечно-элементные модели критического роста трещины в двухконсольной балке, нагруженной по моде I, в балке с концевым надрезом, нагруженной по моде II и в балке типа ДКБ/БКН, нагруженной комбинировано по модам I и II, для анализа зависимостей нагрузки на края трещины от величины ее раскрытия и распределения напряжений по длине моделируемой когезионной зоны для исследуемых слоистых полимерных композиционных материалов

7. Результаты численного анализа влияния размеров ИЭ, располагающихся по длине когезионной зоны, на точность численного прогнозирования зарождения и развития трещины в слоистых ПКМ.

### **Степень достоверности результатов**

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

### **Апробация результатов**

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

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

# Глава I Состояние вопроса (степень проработанности проблемы)

## 1.1 Слоистые стекло- и углекомпози́ты на основе клеевых связующих и препрегов: типы, составы, технологии

### 1.1.1 Клеевые связующие и препреги, композиты на их основе

В НИЦ «Курчатовский институт» ФГУП ВИАМ (ГНЦ РФ) разработан большой ассортимент термореактивных эпоксидных клеевых составов (клеев или клеевых связующих) типа ВСК. Такие составы представляют собой однородную пластическую массу с низким содержанием летучих продуктов при отвержении, которое не превышает 2 % (по массе). Температура отверждения этих составов варьируется от 85 до 115 °С, температура стеклования и, соответственно, деформационная теплостойкость в отвержденном состоянии - от 140 до 175 °С, а их рабочая температура - от -130 до +175 °С в зависимости от состава и степени отверждения и условий эксплуатации.

Клеевые связующие типа ВСК эффективно используются в создании конструкционных клеевых (адгезионных) соединений, для повышения прочности которых клеевыми составами пропитывают высокопрочные волокнистые системы (ткани, ленты или ровинги). Получаемые при этом так называемые клеевые препреги эффективны в качестве адгезионных слоев клеевых соединений, обеспечивающих возможность реализовывать высокоэффективные технологии сборки клееных интегральных высоконагруженных конструкций как одинарной, так и сложной кривизны за одну технологическую операцию.

Клеевые препреги также широко востребованы в производстве армированных полимерных композиционных материалов (ПКМ) применительно к современному авиа- и ракетостроению. Применение клеевых препрегов в производстве конструкций из полимерных

композиционных материалов с использованием современных технологий их формования обеспечивает высокий уровень прочностных свойств, герметичность и весовую эффективность. В настоящее время для этих целей наиболее широко используются слоистые стекло- и углекомпозиаты (СК и УК соответственно) из клеевых препрегов на основе стекло- и угле тканей и лент или ровингов, пропитанных клеевым связующим (матрицей), которые обладают высокими технологическими и эксплуатационными (физико-механическими и теплофизическими) характеристиками. Они применяются практически во всех современных изделиях авиационной и ракетно-космической техники, выпускаемых ОАО «ОКБ Сухого», ОАО «ГСС», ФГУП «РСК МиГ», ФГУП «ЭМЗ им. В.М. Мясищева», ОАО «АК им. С.В. Ильюшина», АНТК им. А.Н. Туполева, ОАО «РКК «Энергия им. С.П. Королева» и др., внедрены в конструкции истребителя пятого поколения Т-50, самолета SuperJet-100 для изготовления деталей и агрегатов из ПКМ, а также в изделии МС-21. Применение этих материалов в качестве элементов конструкций новых изделий авиационно-ракетной техники позволяет решить важнейшую задачу по повышению прочности, надежности и ресурса работы, что обеспечит достижение высоких эксплуатационных свойств, при одновременном снижении весовых характеристик и производственных затрат.

В таблице 1 приведены марки и назначение разработанных ВИАМом клеевых связующих типа ВСК-14, предназначенных преимущественно для изготовления клеевых препрегов на основе стекло- и углетканей (КМКС и КМКУ, соответственно).

Таблица 1. Назначение клеевых связующих марок ВСК-14 [2-6].

Марка связующего	Назначение
ВСК-14-1	Для изготовления клеевых препрегов марок КМКС-1.80 и КМКУ-1.80, предназначенных для изготовления деталей конструкционного назначения, в том числе сотовых конструкций, работающих в интервале температур от -60 до +80°C

ВСК-14-1с	Связующее с пониженной температурой отверждения $140\pm 5$ °С для изготовления клеевых препрегов марок КМКС-1с.80.Т60 и КМКС-1с.80.ТС8/3-к, предназначенных для изготовления агрегатов из ПКМ сотовой конструкции, в том числе радиотехнического назначения (обтекатель), работоспособных при температурах от -60 до +80 °С
ВСК-14-2	Для изготовления клеевых препрегов марок КМКС-2.120, предназначенных для изготовления деталей конструкционного назначения, в том числе сотовых конструкций, работающих в интервале температур от -130 до +120 °С
ВСК-14-2м	Для изготовления клеевых препрегов марок КМКС-2м.120 и КМКУ-2м.120, предназначенных для изготовления деталей конструкционного назначения, в том числе сотовых конструкций, работающих в интервале температур от -60 до +120 °С
ВСК-14-2мР	Для изготовления клеевых препрегов на стеклоаполнителях марок РВМПН (ровинг), предназначенных для изготовления гибридных полимерных и слоистых металлополимерных композиционных материалов, работающих в интервале температур от -60 до +120 °С
ВСК-14-3	Для изготовления клеевых препрегов марок КМКУ-3.150.Э0,1 и КМКУ-3м.150.УОЛ(У), предназначенных для изготовления деталей конструкционного назначения, в том числе сотовых конструкций, работающих в интервале температур от -60 до +150 °С
ВСК-14-4	Для изготовления клеевых препрегов марок КМКС-4.175.Т10(Т15), предназначенных для изготовления деталей конструкционного назначения, в том числе сотовых конструкций, работающих в интервале температур от -60 до +175 °С
ВСК-14-4м	Для изготовления клеевых препрегов марок КМКС-4м.175.Т64.55 и КМКС-4к.175.ТС8/3, предназначенных для изготовления деталей конструкционного назначения, в том числе сотовых конструкций, работающих в интервале температур от -60 до +150 °С

ВСК-14-5м	Связующее с пониженной температурой отверждения $155\pm 5$ °С для изготовления клеевых препрегов марок КМКУ-5м-150.УОЛ(У) с использованием отечественной углеродной ткани марки УОЛ-300Р улучшенной текстильной формы, предназначенных для изготовления деталей конструкционного назначения, в том числе сотовых конструкций, работающих в интервале температур от -60 до +150 °С
-----------	---

В таблицах 2-4 обобщены физико-механические характеристики клеевых соединений, стекло- и углекомполитов на основе клеевых связующих и препрегов типа ВСК-14.

Таблица 2. Прочность при сдвиге ( $\tau_B$ ) при трех температурах испытания клеевых соединений на основе связующих типа ВСК-14, отвержденных при соответствующей температуре [2-6].

Связующее	$\tau_B$ , МПа, при температуре испытания, °С			Температура отверждения, °С
	20	80	150	
ВСК-14-1	19,6	19,6	-	125
ВСК-14-1с	19,6	19,6	-	140
ВСК14-2	34,4	-	17,6	175
ВСК-14-2м	19,6	-	19,6	175
ВСК-14-2мР	20,0	20,0*	-	175
ВСК-14-3	14,7	-	14,7	175
ВСК-14-4	17,6	-	17,6**	175
ВСК-14-4м	17,6	-	17,6**	175
ВСК-14-5м	17,6	-	17,6	155



Таблица 3. Основные физико-механические свойства стеклокомпозитов на основе клеевых препрегов марок КМКС при различной укладке слоев ткани (в числителе - по основе, в знаменателе - по утку) [1].

Марка материала	Характеристика						
	$\sigma$ , МПа	E, ГПа	$\sigma_{-}$ , МПа	E $_{-}$ , ГПа	$\sigma_{и}$ , МПа	$\alpha$ , кДж/м <sup>2</sup>	$\tau$ , МПа
КМКС-1.80.T10	<u>620</u>	<u>22,0</u>	<u>520</u>	30	<u>785</u>	200	75
	335	17,0	-		550		
КМКС-2.120.T10	<u>600</u>	<u>22,4</u>	<u>560</u>	30	<u>700</u>	260	70
	390	21,9	430		440		
КМКС-2.120.T15	<u>450</u>	<u>22,0</u>	<u>560</u>	20	<u>640</u>	145	55
	-	-	340		480		
КМКС-2.120.T60	<u>1325</u>	<u>50,0</u>	<u>930</u>	40	<u>1275</u>	200	70
	70	12,0	220		127		
КМКС-2.120.ЛСК	<u>750</u>	<u>29,0</u>	<u>470</u>	-	<u>780</u>	220	73
	-	-	310		-		
КМКС-2м.120.T64	<u>750</u>	<u>31,0</u>	<u>720</u>	-	<u>940</u>	230	77
	410	22,0	440		565		
КМКС-2м.120.T10	<u>570</u>	<u>27,5</u>	<u>555</u>	-	<u>760</u>	240	69
	245	17,5	380		480		
КМКС-2м.120.T15	<u>385</u>	<u>19,0</u>	<u>560</u>	-	<u>440</u>	160	55
	240	17,0	390		380		
КМКС-2м.120.T60	<u>1500</u>	<u>42,0</u>	<u>900</u>	-	<u>1400</u>	210	80
	75	11,5	210		130		
КМКС-4.175.T10	<u>605</u>	<u>29,0</u>	<u>630</u>	-	<u>760</u>	210	75
	315	22,0	390		470		
КМКС-4.175.T15	<u>450</u>	<u>21,8</u>	<u>560</u>	-	<u>435</u>	170	50
	230	19,0	390		375		

В числителе - значения показателей по основе, в знаменателе - по утку;  $\sigma$  - предел прочности при растяжении, E - модуль упругости при растяжении,  $\sigma_{-}$  - предел прочности при сжатии, E $_{-}$  - модуль упругости при сжатии,  $\sigma_{и}$  - предел прочности при статическом изгибе,  $\alpha$  - удельная ударная вязкость,  $\tau$  - предел прочности при межслоевом сдвиге.

Таблица 4. Основные физико-механические свойства углекомполитов на основе клеевых препрегов марок КМКС при различной укладке слоев ткани (в числителе - по основе, в знаменателе - по утку) [1].

Марка материала	Характеристика						
	$\sigma$ , МПа	E, ГПа	$\sigma_{-}$ , МПа	E-, ГПа	$\sigma_{и}$ , МПа	$\alpha$ , кДж/м <sup>2</sup>	$\tau$ , МПа
КМКУ- 3.150.Э0,1	<u>900</u> 46	<u>120</u> -	<u>1025</u> 155	110	1545	-	82
КМКУ- 1.80.Э0,1	<u>830</u> 44	<u>100</u> 9,0	<u>890</u> 180	95	1130	75	83
КМКУ- 2м.120.Э0,1	<u>880</u> 44	<u>113</u> 8,1	<u>880</u> 115	108	1200	70	73
КМКУ- 2м.120.70.08	<u>1225</u> 44	<u>132</u> 9,3	<u>980</u> 196	127	1200	70	78
КМКУ- 2м.120.P4510	<u>1950</u> 60	<u>125</u> 9,0	<u>990</u> 170	125	2050	77	77
КМКУ- 2м.120.P2009	<u>920</u> 800	<u>67</u> -	<u>900</u> 700	66	1230	75	75

В числителе - значения показателей по основе, в знаменателе - по утку;  $\sigma$  - предел прочности при растяжении, E - модуль упругости при растяжении,  $\sigma_{-}$  - предел прочности при сжатии, E - модуль упругости при сжатии,  $\sigma_{и}$  - предел прочности при статическом изгибе,  $\alpha$  - удельная ударная вязкость,  $\tau$  - предел прочности при межслоевом сдвиге.

### 1.1.2 Технологии получения клеевых препрегов и формования СК и УК из них

Клеевые препреги типа КМКС и КМКУ на основе клеевых связующих и соответствующих армирующих материалов производят предварительной пропиткой ткани и ленты на специальных установках по определенным температурно-временным режимам, зависящих от марки клеевого связующего [2]. Так, для производства клеевых препрегов марок КМКС и

КМКУ на основе трех марок связующих рекомендованы следующие температурные режимы [2]:

Клеевое связующее	Диапазон температур, °С
ВСК-14-3	110 - 115
ВСК-14-2мР	95 - 100
ВСК-14-5м	85 - 90.

Для изготовления изделий авиационного назначения из СК и УК из клеевых препрегов, как правило, применяются технологии с использованием внешнего избыточного давления (методы прямого прессования и автоклавного формования) и только атмосферного давления (методы вакуумного формования) [7-11].

На рис. 1.1 представлено схематичное изображение процесса прямого горячего прессования листовых препрегов.

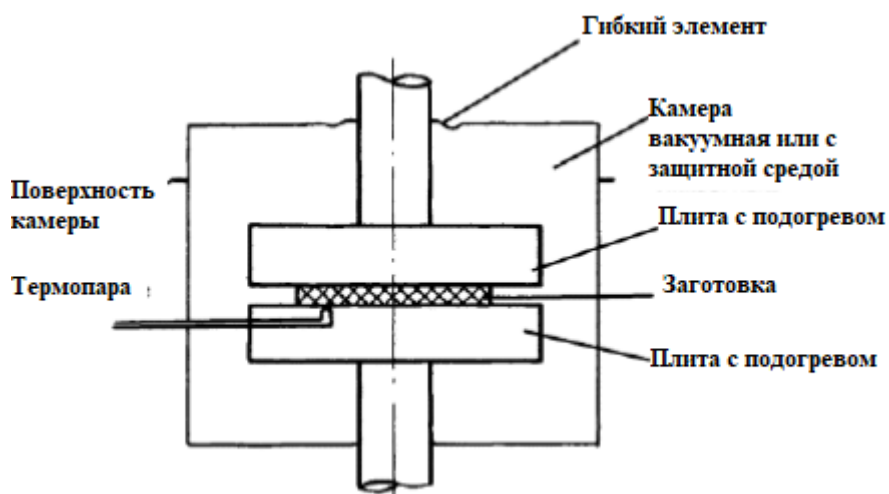


Рисунок 1.1 - Схематическое изображение пресса для метода прямого горячего прессования листовых заготовок клеевого препрега.

Суть метода заключается в следующем: предварительно изготовленный препрег раскраивается под параметры формуемого изделия, выкладывается в формующую оснастку, и исполнительный механизм (пуансон) воздействует на материал, расположенный в оснастке, в результате чего происходит формование - придание формы изделия с последующим ее фиксированием и отверждением связующего. Для этого используется формующая оснастка с

обогревом. К технологическим параметрам процесса можно отнести температуру формования, давление прессования и продолжительность выдержки под давлением.

К достоинствам данного метода можно отнести относительную простоту технологического процесса, небольшое количество инструмента и расходных элементов, а также относительно невысокую стоимость оборудования в сравнении с конкурирующими технологиями.

К недостаткам данного метода можно отнести низкую производительность процесса и ограничения по ассортименту изготавливаемых изделий в связи со сложностью формования узлов и агрегатов с многопрофильной поверхностью.

Технология вакуумного формования в сравнении с прессованием и автоклавным формованием обладает своими достоинствами (преимуществами) и недостатками. Схематичное изображение технологической оснастки для этой технологии представлено на рис. 1.2.

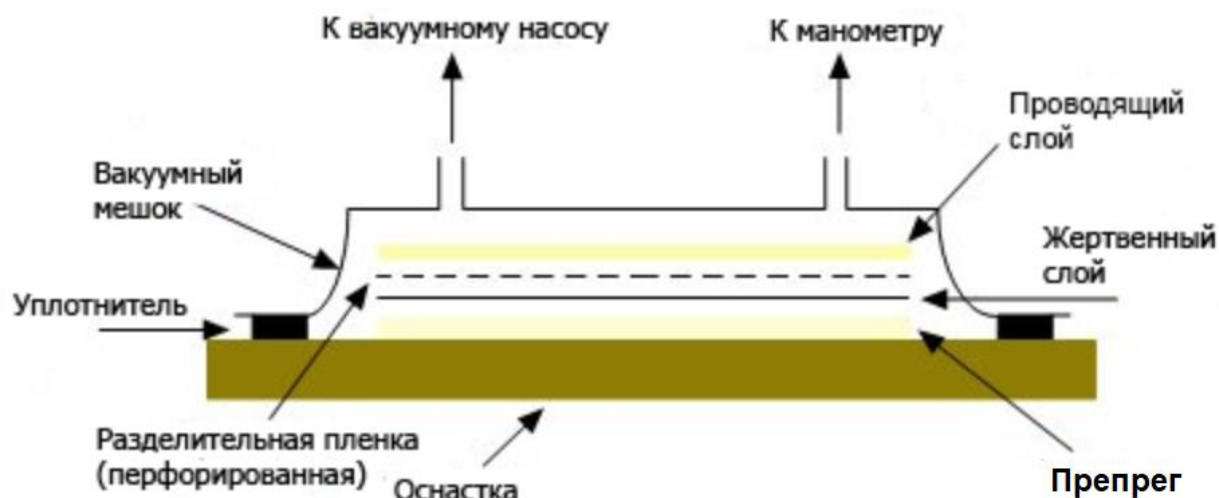


Рисунок 1.2 - Схематическое изображение технологической оснастки для вакуумного формования.

Суть метода заключается в следующем: необходимое для послойной укладки количество слоев предварительно вырезают по размеру и по одному укладывают в форму. Каждый слой отдельно обрабатывают для удаления

захваченного воздуха и складок, чтобы обеспечить плотный контакт с предыдущим слоем. Готовый слоевой пакет закрывают пористым не прилипающим материалом, который способствует легкому извлечению изделия, и впитывающим материалом, удаляющим излишки связующего, после чего подсоединяют вакуум. Обычно сначала создают небольшой вакуум, чтобы разгладить поверхность мешка, а затем окончательно вакуумируют и нагревают систему. В большинстве случаев вакуум поддерживается на протяжении всего цикла нагрева и охлаждения.

К достоинствам данного метода можно отнести лучшее соотношение волокно/связующее, по сравнению с ручным формованием, меньшее количество пустот, лучше пропитываются волокна, снижение времени контакта рабочего с вредными летучими веществами.

К недостаткам данного метода можно отнести увеличение стоимости необходимого оборудования, увеличение затрат на производство (вакуумный мешок, жертвенная ткань и т.д.), более высокие требования к рабочим.

Этим методом легко получать изделия сложной формы, в том числе и с двойным очертанием, а также сравнительно крупные детали. Процесс может быть использован и в тех случаях, когда нельзя применять высокие давления формования. К технологическим параметрам процесса относят температуру формования, величина вакуума при формовании и продолжительность выдержки под вакуумом.

## **1.2 Проблемы устойчивости тонкослойных ПКМ (СК и УК) к межслоевому разрушению и подходы к ее оценке и прогнозированию в рамках линейной упругой механики разрушения**

Тонкослойные ПКМ (СК и УК) на основе отвержденных полимерных матриц и высокопрочных и высокомодульных волокнистых армирующих компонентов, в том числе получаемые из клеевых препрегов вакуумным формованием, обладают высокой удельной прочностью, жесткостью и

хорошими усталостными характеристиками в плоскости укладки армирующих слоев (см. табл. 3-4). Однако такие материалы в трансверсальном (межслоевом) направлении обладают значительно меньшей жесткостью и прочностью по сравнению с плоскостью армирования и склонны к микрорастрескиванию и межслоевому разрушению (расслоению) при чрезмерных статических, усталостных и ударных локальных и глобальных нагрузках вблизи дефектов и в других местах концентрации напряжений во время производства и сборки конструкций в составе изделий, операций обслуживания и ремонта или в процессе эксплуатации. Наиболее важными недостатками таких ПКМ при использовании их в производстве несущих авиаконструкций является слабая устойчивость к возникновению и развитию межслоевых дефектов или трещин (межслоевая прочность и трещиностойкость), что резко снижает несущую способность и надежность конструкций. Поэтому оценка и прогнозирование устойчивости к межслоевому разрушению слоистых ПКМ на глобальном и локальном уровнях при производстве, эксплуатации и ремонте элементов конструкций из них являются в настоящее время важнейшими задачами, которые необходимо решать при их проектировании. Эффективное решение этих задач должно базироваться на использовании аналитических, экспериментальных и численных макро- и микромеханических подходов и методов линейной упругой механики разрушения (ЛУМР) [12-28].

### **1.2.1 Аналитическая и экспериментальная оценка межслоевой трещиностойкости слоистых ПКМ (СК и УК) в макромеханическом подходе ЛУМР**

*А) Общие представления о трещинодвижущих силах, параметрах и критериях роста трещин.*

Для характеристики условий инициирования и устойчивости к росту межслоевых дефектов/трещин в хрупких и псевдохрупких слоистых ПКМ (при линейно-упругом поведении трещины под нагрузкой с малым

отклонением от линейности) в рамках ЛУМР применяется классический энергетический подход. В этом подходе параметром нагрузки на трещину или трещнодвижущей силы (ТДС) служит интенсивность высвобождения накопленной при деформировании упругой энергии ( $G$ ), приходящейся на единицу площади поверхности, образующейся при росте дефекта/трещины, определяемая уравнением Ирвина-Киза:

$$G = \frac{1}{2B} \frac{dU}{da}, \quad (1.1)$$

где  $U$  - накопленная упругая энергия,  $a$ ,  $B$  - длина трещины и ширина образца соответственно.

При заметном отклонении поведения трещины под нагрузкой от упругого (линейного) в качестве эквивалентного  $G$  параметра ТДС используют независимый от пути интеграл  $J$  при различных модах нагружения.

Инициирование и рост трещины в макромеханическом энергетическом подходе ЛУМР рассматривается при трех простых типах (модах) нагружения (i) - растяжении ( $G_I$ ), простом сдвиге в плоскости ( $G_{II}$ ) и антиплоскости ( $G_{III}$ ) (рис. 1.3).

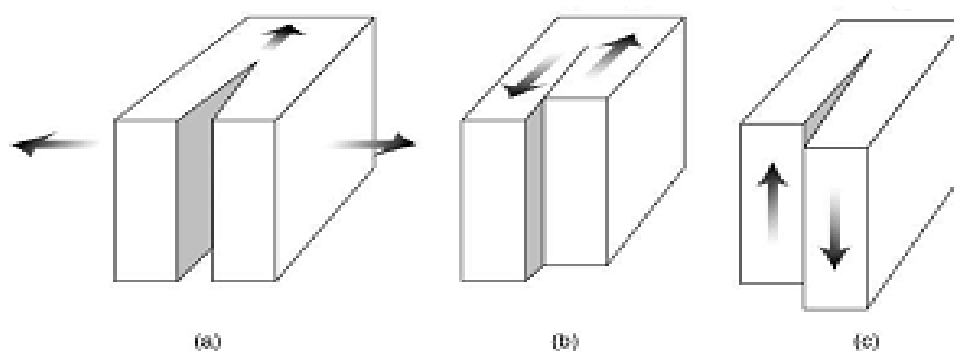


Рисунок 1.3 - Три типа (моды) нагрузки на межслоевую трещину: (а) - растяжение берегов или нормальное раскрытие трещины (мода I); (в) - сдвиг в плоскости (мода II); (с) - сдвиг в антиплоскости или срез (мода III).

Применительно к межслоевому росту трещин в слоистых ПКМ мода II и III обычно считаются эквивалентными и на практике используется только мода II.

Критерием разрушения (инициирования и роста дефекта/трещины) при индивидуальных простых модах нагружения (растяжение и сдвиг краев трещины) служит отношение параметров ТДС  $G_i$  и сопротивления росту трещины  $R_i$ , где  $i$  - мода нагружения: инициирование и рост трещины происходит, когда это отношение равно или больше 1:

$$\frac{G_i}{R_i} \geq 1, \quad (1.2a)$$

т.е. когда ТДС ( $G_i$ ) достигнет или превысит сопротивление ( $R_i$ ). При этом критическое значение ТДС, равное сопротивлению ( $G_{iC}=R_i$ ), принимается за параметр трещиностойкости (ТС), и критерии разрушения для индивидуальных мод I или II обычно записываются в виде:

$$G_I/G_{IC} \geq 1 \text{ и } G_{II}/G_{IIC} \geq 1, \quad (1.2б)$$

Параметры  $G_{IC}$  и  $G_{IIC}$  являются материальными характеристиками, равными удвоенной удельной работе, затрачиваемой на образование единицы новой поверхности при данной индивидуальной моде нагружения.

При комбинированной (смешанной) моде нагрузки на трещину сочетанием простых мод I и II, в качестве критериев разрушения используются различные эмпирические соотношения между параметрами ТДС ( $G_I$  и  $G_{II}$ ) и ТС ( $G_{IC}$  и  $G_{IIC}$ ), соответствующие инициированию или росту трещины. На практике в качестве таких критериев используется степенной критерий (формула 1.2в) и особенно часто - критерий Бензегга-Кенана (критерий Б-К) (формула 1.2д) [49]

$$\left(\frac{G_I}{G_{IC}}\right)^\alpha + \left(\frac{G_{II}}{G_{IIC}}\right)^\alpha \geq 1, \quad (1.2в)$$

$$\frac{G_I + G_{II}}{G_{IC} + (G_{IIC} - G_{IC})\left(\frac{G_{II}}{G_I + G_{II}}\right)^\eta} = \frac{G_T}{G_{IC} + (G_{IIC} - G_{IC})\beta^\eta} \geq 1, \quad (1.2г)$$

где  $G_T = G_I + G_{II}$  - сумма ТДС по обоим модам;  $\beta = \frac{G_{II}}{G_I + G_{II}} = \frac{G_{II}}{G_T}$  - доля ТДС по моде II при комбинированном нагружении I/II;  $\alpha$  и  $\eta$  - материальные константы.



В соответствии с этими критериями критическое значение суммарной ТДС при комбинированной моде ( $G_C$ ) рассчитывается по критическим параметрам ТС для простых мод с учетом доли нагрузок по этим модам в суммарной ТДС [28-43], соответственно, по уравнениям степенного закона (критериальное уравнение СЗ) (1.2д) и Бензегга-Кеннана (критериальное уравнение Б-К) (1.2е) [44-49]:

$$G_C = \left[ \left( \frac{1-\beta}{G_{IC}} \right)^\alpha + \left( \frac{\beta}{G_{IIC}} \right) \right] - 1/\alpha^\alpha, \quad (1.2д)$$

$$G_C = G_{IC} + (G_{IIC} - G_{IC})\beta^\eta, \quad (1.2е)$$

При использовании критериального уравнения Б-К (1.2е) величина  $\eta$  рассчитывается по соотношению (1.2ж):

$$\eta = \frac{\lg \left( \frac{G_C - G_{IC}}{G_{IIC} - G_{IC}} \right)}{\lg \beta}, \quad (1.2ж)$$

Точные аналитические выражения для параметров ТДС, которые служат основой экспериментальных методов оценки трещиностойкости, в том числе, межслоевой ТС слоистых ПКМ, получены в рамках макромеханического энергетического подхода ЛУМР только для простых образцов с заданными геометрическими параметрами нагружением по индивидуальным (I и II) и смешанной (I/II) модам. Получение таких выражений для образцов с более сложной геометрией и характером нагружения затруднено.

#### *Б) Нагружение трещины по индивидуальной моде I.*

При нагружении трещины по индивидуальной моде I, в том числе применительно к определению межслоевой ТС слоистых ПКМ, наибольшее распространение получили плоские образцы с заданной межслоевой трещиной при ее нагружении растяжением за края или при увеличении расстояния между краями (расклинивании) (рис. 1.4), получившие название двойной консольной балки (ДКБ), или Double Cantilever Beam (DCB).

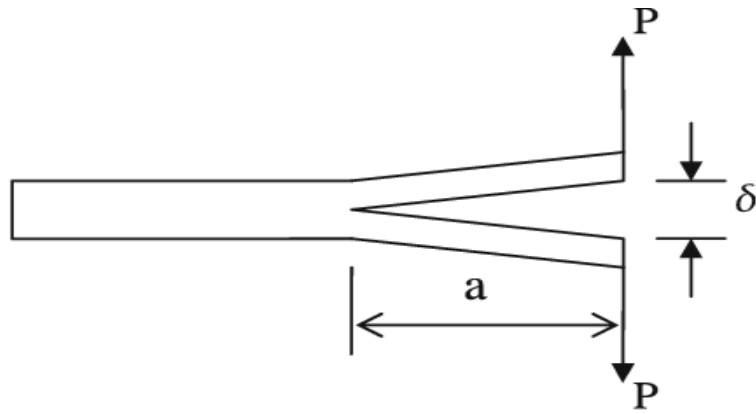


Рисунок 1.4 - Схема образца с трещиной типа двойной консольной балки, нагружаемого по моде I:  $P$  - нагрузка на края трещины;  $a$  и  $\delta$  - длина и раскрытие трещины соответственно.

Аналитические выражения для расчета ТДС по нагрузке  $P$  на края трещины и их смещению (раскрытию трещины  $\delta$ ) при заданных геометрических и материальных параметрах ДКБ получены по зависимости податливости полубалок, как отношения раскрытия к нагрузке ( $C=\delta/P$ ), от длины трещины в соответствии с уравнением Ирвина-Киза:

$$G_I = \frac{P^2}{B} \frac{dC}{da}, \quad (1.3a)$$

где  $B$  - ширина образца.

Из теории балок следует, что  $C = \frac{8a^3}{Eb^3}$  (1.3б) и  $\frac{dC}{da} = \frac{24a^2}{Eb^3}$  (1.3в), где  $h$  - толщина полубалки (полутолщина образца),  $E$  - модуль упругости материала. Тогда, при растяжении концов полубалок силой  $P$  и расклинивании трещины (увеличения ее раскрытия  $\delta$ ) ТДС определяется, соответственно, по формулам: 1.4 и 1.5:

$$G_I = \frac{12P^2a^2}{Eb^2h^3}, \quad (1.4)$$

$$G_C = \frac{3\delta^2Eh^3}{16a^4}, \quad (1.5)$$

По экспериментально определяемым значениям предельной нагрузки на полубалки при растяжении ( $P_C$ ) или предельного раскрытия трещины при расклинивании ( $\delta_C$ ) при известной длине трещины по этим формулам

рассчитываются параметры устойчивости материала к инициированию и росту трещин (трещиностойкости) ( $G_{IC}$ ).

В случае тонкослойных слоистых ПКМ в образцах типа ДКБ при повышенных нагрузках, требующихся для инициирования и роста трещины, может возникать большой изгибающий момент в разделяемых слоях (полубалках) и сжимающие напряжения на их поверхности, что, как следствие, может приводить к нелинейному изгибу полубалок вплоть до их разрушения, что вносит большие погрешности в расчеты ТДС и параметров ТС. Для снижения этих погрешностей приклеивание к поверхностям образцов наклеивают ужесточающие и упрочняющие накладки (дублеры) из жестких пластин или вносят поправки в расчетные методики, используя модифицированную теорию балок и корректировку размеров эффективной трещины по податливости образца.

*В) Напряжение трещины по индивидуальной моде II.*

Применительно к нагружению по индивидуальной моде II наиболее проработан анализ ТДС для образца с заданной краевой трещиной [58], аналогичного ДКБ, но подвергаемого трехточечному изгибу, и получившему название изгиба образца с боковым надрезом (БКН), или End Notched-Flexure (ENF) (Рис. 1.5).

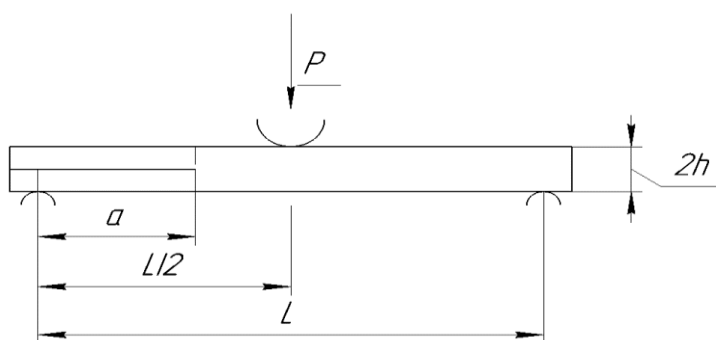


Рисунок 1.5 - Конфигурация образца БКН (ENF), нагружаемого по индивидуальной моде II:  $2h$  - толщина образца;  $L$  - пролет между опорами;  $P$  - нагрузка;  $a$  - длина заданной трещины.

Параметр ТДС при этом рассчитывается по силе ( $P$ ), прогибу образца в центре ( $\Delta$ ) и длине трещины ( $a$ ) с учетом размеров образца по формуле 1.6:

$$G_{II} = \frac{P \Delta a^2}{2b(2L^3 + 3a^3)}, \quad (1.6)$$

где  $b$  - ширина образца,  $L$  - расстояние между точками опоры.

Параметр ТС  $G_{II}$  рассчитывается по этой формуле для предельной изгибающей нагрузки, при которой начинается критический рост заданной трещины длиной  $a$ . По аналогии с введением поправки в расчеты параметров ТДС и ТС при нагружении образцов типа ДКБ по моде I, для снижения погрешностей в расчетах для образцов БКН также используется корректировка размеров эффективной трещины с учетом реальной податливости образца [58].

*Г) Нагружение трещины по комбинированной (смешанной) моде I/II.*

Применительно к оценке межслоевой трещиностойкости слоистых ПКМ при нагружении по смешанной моде I/II также наиболее широко используются подобные ДКБ и БКН образцы с краевой трещиной, которые подвергаются изгибу с одновременным растяжением за края трещины. Такой образец и метод получили название изгиба по смешанной моде (ИСМ), или Mixed-Mode Bending (MMB), когда трещина одновременно нагружается по моде I и II в различном соотношении в зависимости от расстояния между точкой приложения общего усилия  $P$  и точкой приложения изгибающей нагрузки (Рис.1.6) [84].

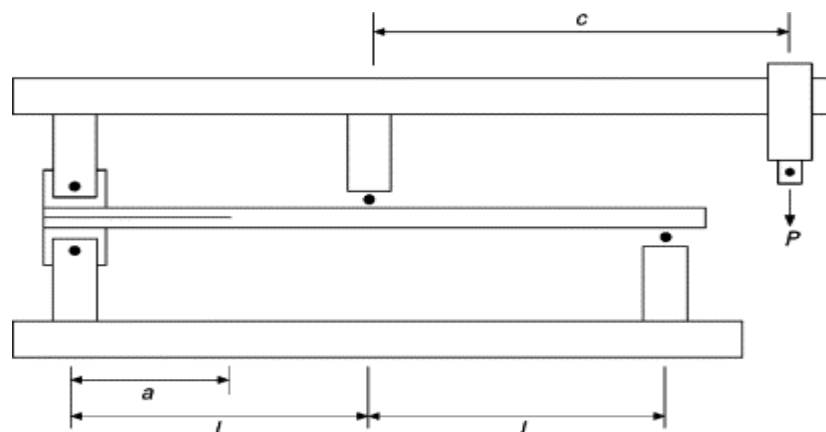


Рисунок 1.6 - Принципиальная схема нагружения образца с краевой трещиной по смешанной моде I/II (ИСМ или MMB).

Для расчета индивидуальных и общей нагрузок на трещину (обобщенной интенсивности высвобождения упругой энергии) в методе ММВ используются следующие соотношения, полученное с помощью уравнения Ирвина-Киза с учетом эффективной длины трещины:

$$G_I = \frac{12P^2(3c-L)^2}{16b^2h^3L^2E_{1f}}(a + \chi h), \quad (1.7a)$$

$$G_{II} = \frac{9P^2(c+L)^2}{16b^2h^3L^2E_{1f}}(a + 0,42\chi h), \quad (1.7б)$$

$$G_T = \frac{3P^2a_e^2}{16E_{1f}L^2B^2h^3}(39c^2 - 18cL + 7L^2), \quad (1.7в)$$

где  $P$  - прилагаемая нагрузка;  $c$  - расстояние между точкой приложения нагрузки и изгибающим упором на середине образца (изменяемая величина, определяемая разнице во вкладах мод I и II в суммарную ТДС);  $L$  - полудлина образца или половина расстояния между точками опоры образца;  $a_e$  - эффективная длина трещины;  $B$  - ширина и  $h$  - полутолщина образца,  $E_{1f}$  - модуль Юнга продольном направлении, определяемый по наклону линейного участка кривой нагрузка-прогиб образца;  $\chi$  - поправочный коэффициент на эффективную длину трещины, определяемый соотношением продольных и трансверсальных модулей упругости анизотропных слоистых ПКМ:

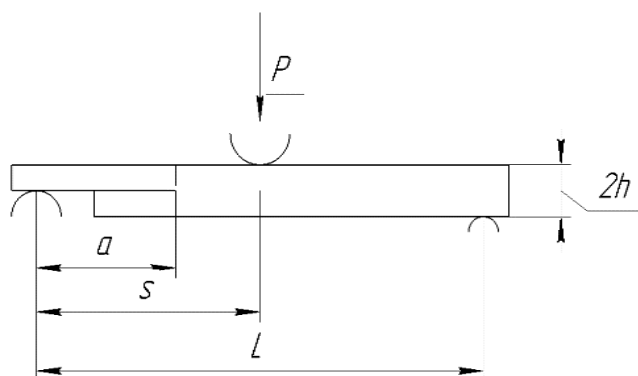
$$\chi = \sqrt{\frac{E_{11}}{11G_{13}} \left(3 - 2\left(\frac{\Gamma}{1+\Gamma}\right)^2\right)}, \quad (1.7г)$$

$$\Gamma = \frac{1,18\sqrt{E_{11}E_{22}}}{G_{13}}, \quad (1.7д)$$

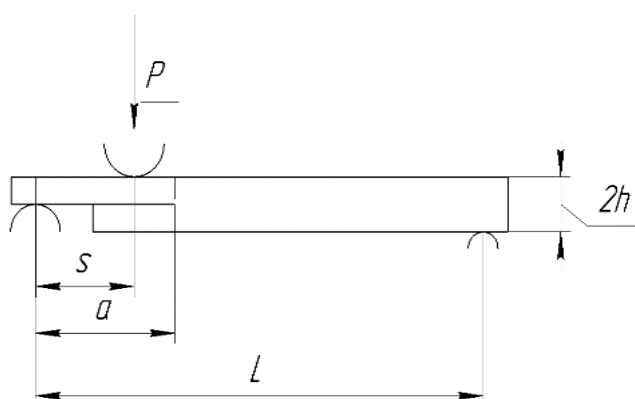
Суммарный критический параметр ТС определяется по предельному значению нагрузки  $P_C$  при соответствующей длине трещины и расстояния  $c$ .

Предлагаемая в этом методе схема нагружения образца при практической реализации требует сложной оснастки, поэтому в настоящее время интенсивно разрабатываются более простые схемы смешанного нагружения образцов различной конфигурации. Наиболее простыми и эффективными с этой точки являются образцы с боковой трещиной,

асимметричные вышеописанным и подвергаемые только 3-х точечному изгибу (Рис.7).



(a)



(б)

Рисунок 1.7 - Схемы образцов и их нагружения с опорой на одну ножку и приложением изгибающей нагрузки вне трещины (а) и над трещиной (б).

Образцам придается асимметричность за счет удаления части одной (нижней) стороны трещины (полубалки или ножки), оставляя другую сторону неукороченной с опорой на нее. Изгибающая нагрузка прикладывается с верхней стороны на различном удалении от трещины или непосредственно над ней. В первом случае метод называется изгибом с укороченной полубалкой (УПБ) (Single-Leg Bending, SLB), а во втором - изгибом над укороченной полубалкой (НПБ) (Over-Leg Bending, OLB). Варьирование длины трещины и точки приложения нагрузки позволяют изменять вклады различных мод в нагружение трещины.

Интенсивности высвобождения упругой энергии при нагрузке на трещину по моде I и II в методе УПБ или SLB ( $G_I^{SLB}$ ,  $G_{II}^{SLB}$ ) и НПБ или OLB ( $G_I^{OLB}$ ,  $G_{II}^{OLB}$ ) с учетом поправок на эффективную длину трещин рассчитываются по формулам (1.8а-1.8г) [65]:

$$G_I^{SLB} = \frac{12P^2a^2}{16b^2h^3E_{11}} \left[ 1 + 0,85 \left( \frac{h}{a} \right) \left( \frac{E_{11}}{E_{33}} \right)^{\frac{1}{4}} + 0,71 \left( \frac{h}{a} \right)^2 \left( \frac{E_{11}}{E_{33}} \right)^{\frac{1}{2}} + 0,32 \left( \frac{h}{a} \right) \left( \frac{E_{11}}{G_{13}} \right)^{\frac{1}{2}} + 0,1 \left( \frac{h}{a} \right)^2 \left( \frac{E_{11}}{G_{13}} \right) \right] \quad (1.8а)$$

$$G_{II}^{SLB} = \frac{9P^2a^2}{16b^2h^3E_{11}} \left[ 1 + 0,22 \left( \frac{h}{a} \right) \left( \frac{E_{11}}{G_{13}} \right)^{\frac{1}{2}} + 0,048 \left( \frac{h}{a} \right)^2 \left( \frac{E_{11}}{G_{13}} \right) \right] \quad (1.8б)$$

$$G_I^{OLB} = \frac{12P^2s^2c^2}{16b^2h^3E_{11}L^2} \left[ 1 + 0,85 \left( \frac{h}{c} \right) \left( \frac{E_{11}}{E_{33}} \right)^{\frac{1}{4}} + 0,71 \left( \frac{h}{c} \right)^2 \left( \frac{E_{11}}{E_{33}} \right)^{\frac{1}{2}} + 0,32 \left( \frac{h}{c} \right) \left( \frac{E_{11}}{G_{13}} \right)^{\frac{1}{2}} + 0,1 \left( \frac{h}{c} \right)^2 \left( \frac{E_{11}}{G_{13}} \right) \right] \quad (1.8в)$$

$$G_{II}^{OLB} = \frac{9P^2s^2c^2}{16b^2h^3E_{11}L^2} \left[ 1 + 0,22 \left( \frac{h}{c} \right) \left( \frac{E_{11}}{G_{13}} \right)^{\frac{1}{2}} + 0,048 \left( \frac{h}{c} \right)^2 \left( \frac{E_{11}}{G_{13}} \right) \right] \quad (1.8г)$$

где:  $P$  - приложенная изгибающая нагрузка,  $a$  - длина заданной трещины,  $h$  - полутолщина образца,  $L$  - половина расстояния между опорами,  $s$  - расстояние от точки опоры на одну ножку до точки приложения нагрузки,  $c=2L-a$  - длина части образца без трещины;  $E_{11}$ ,  $E_{33}$ ,  $G_{13}$  - продольный и трансверсальный модули упругости при растяжении и модуль сдвига в плоскости армирования соответственно.

Интенсивности высвобождения упругой энергии, рассчитанные по этим формулам при предельной нагрузке на образец, вызывающей инициирование и рост трещины, рассматриваются как вклады различных мод нагружения в критическое разрушение, а общий или эффективный параметр трещиностойкости определяется критериальными уравнениями, в частности степенным уравнением или, чаще, уравнением Безега-Кеннана

(см. уравнения 1.2д и 1.2е) обычно с учетом доли моды II  $\beta$ , определяемой соотношением (1.8д):

$$\beta = \frac{G_{IIC}^{SLB(OLB)}}{G_{IC}^{SLB(OLB)} + G_{IIC}^{SLB(OLB)}} = \frac{G_{IIC}^{SLB(OLB)}}{G_T^{SLB(OLB)}}, \quad (1.8д)$$

Простота геометрии образцов и полнота теоретического анализа ТДС и критериев разрушения обусловили стандартизацию и широкое распространение методов экспериментальной оценки трещиностойкости ПКМ с использованием образцов типа ДКБ, БКН и ИСМ (DCB, ENF и MMB) и в меньшей степени не стандартизованных образцов - УПБ (SLB) и НПБ (OLB). Для первых трех типов образцов разработаны международные и отечественные стандарты: ГОСТР56815-2015 или ASTM D5528-2013 (ДКБ), ASTM D7905/D7905M-19e (БКН) и ASTM D6671 (ИСМ) соответственно.

В литературе имеется огромное количество экспериментальных данных, полученных всеми этими методами для стекло- и углекомполитов различных, преимущественно зарубежных марок, в первую очередь, о межслоевой трещиностойкости однонаправленных слоистых ПКМ [52-63, 91, 92]. На рис. 1.8 - 1.11 в качестве примеров приведены типичные кривые нагрузка-раскрытие трещины (P- $\delta$ ) для образцов УК и СК различного типа и геометрии, полученные при использовании данных методов.

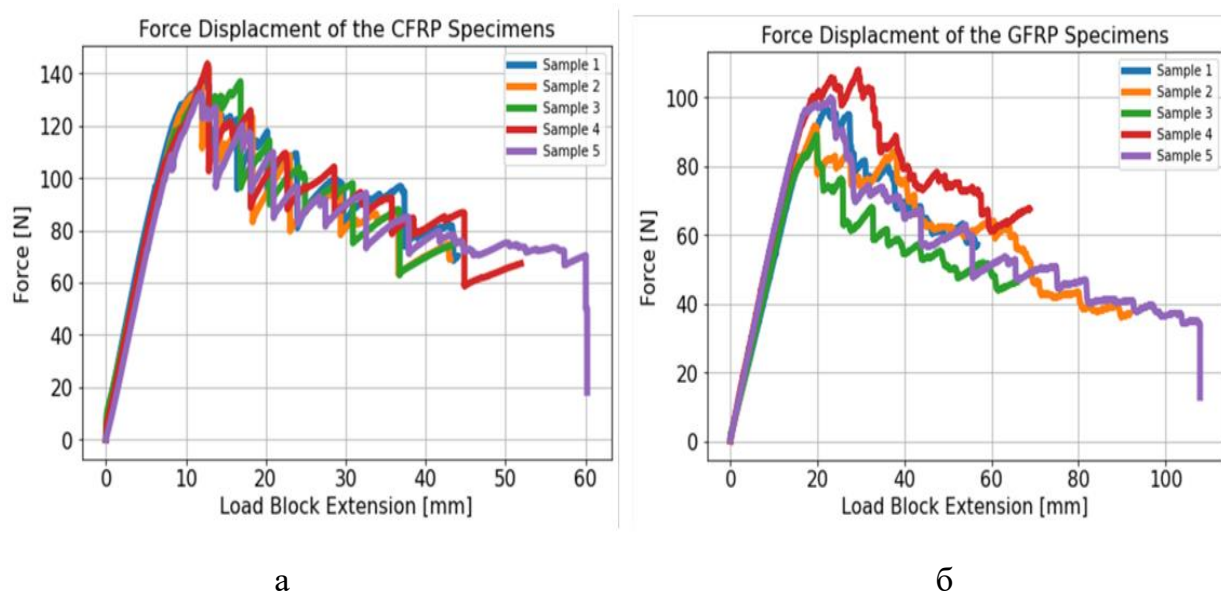


Рисунок 1.8 - Кривые P- $\delta$  для пяти образцов типа ДКБ (DCB) из слоистых УК (а) и СК (б) [52].



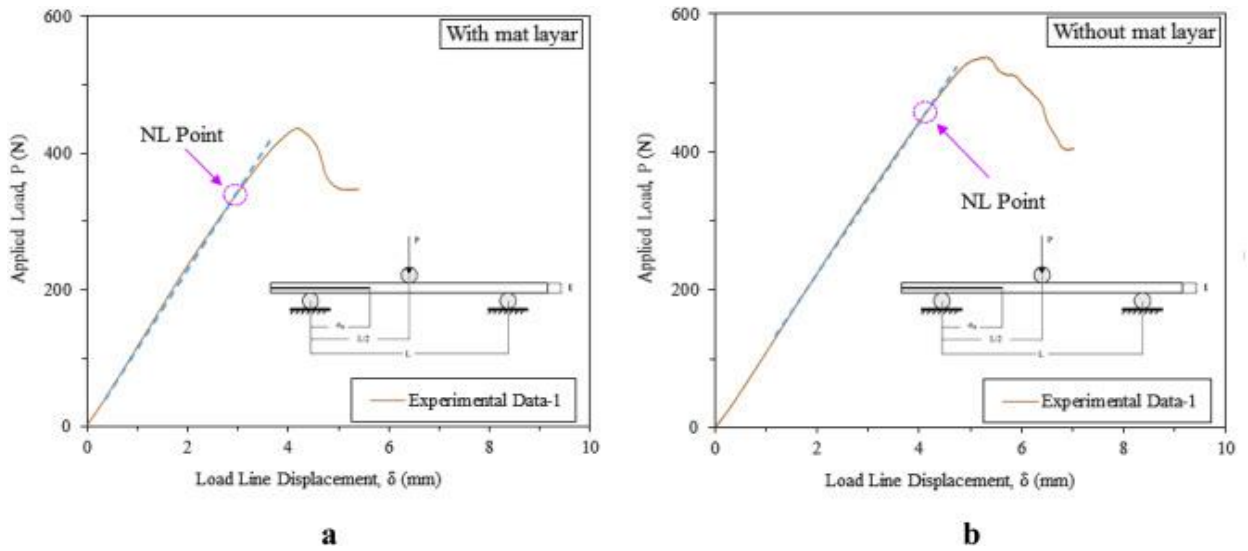


Рисунок 1.9 - Кривые  $P$ - $\delta$  для различных образцов эпоксидных СК типа БКН (ENF) [59].

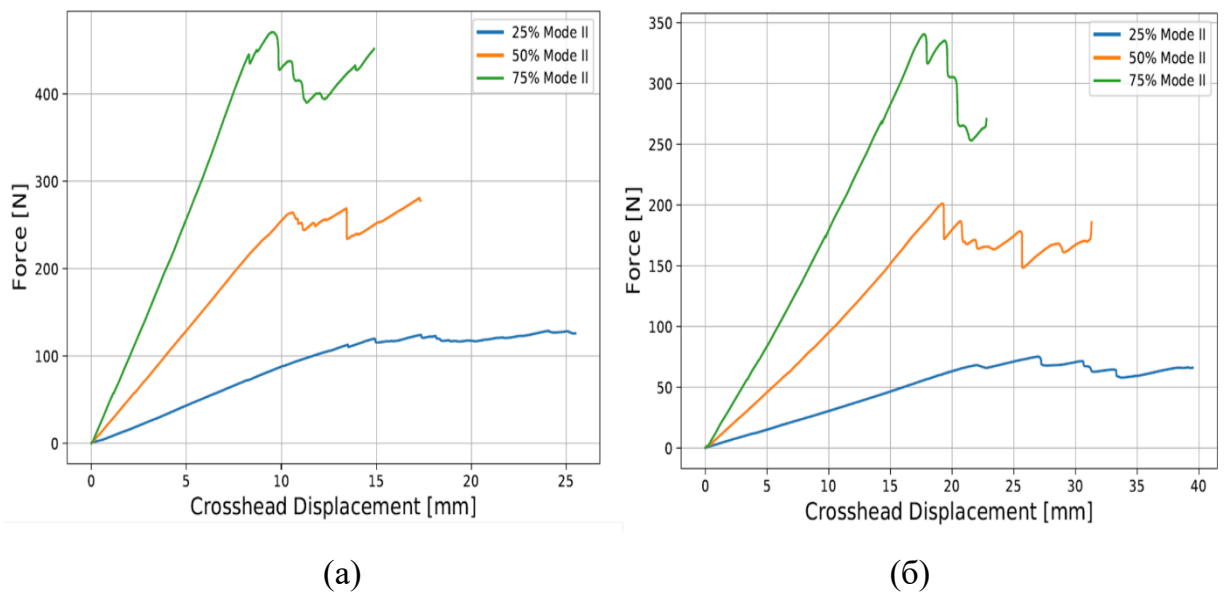


Рисунок 1.10 - Примеры кривых нагрузка-прогиб для образцов типа ИСМ (ММВ) из слоистых УК (а) и СК (б) на основе порошковых эпоксидных связующих при смешанной моде нагружения с различной долей моды II (25%, 50% и 75%) [91].

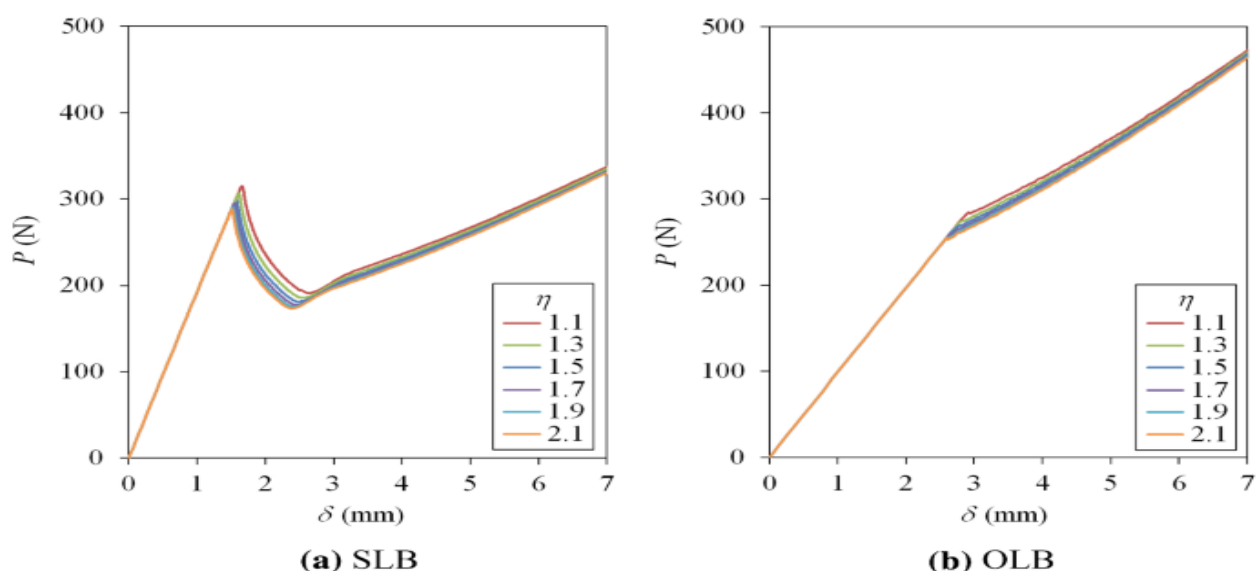


Рисунок 1.11 - Примеры кривых нагрузка-прогиб для образцов типа УПБ (SLB) (а) и НПБ (OLB) (б) из слоистых УК [92].

### 1.2.2 Аналитическая и экспериментальная оценка межслоевой трещиностойкости слоистых ПКМ (СК и УК) в микромеханическом подходе ЛУМР

В микромеханическом подходе ЛУМР предполагается, что трещиностойкость псевдоупругих или псевдохрупких материалов, т.е. устойчивость к линейно-упругому инициированию и росту трещины при заданном типе нагружения, в том числе межслоевая трещиностойкость слоистых УК и СК, в решающей степени определяется развитием вблизи кончика (вершины) трещины локальной зоны неупругих деформаций (упруго-пластического деформирования или предразрушения по различным механизмам) с сохранением до определенного предела сил, сдерживающих берега трещины. При этом параметр трещиностойкости  $G_C$  включает в себя не только энергию, необходимую для преодоления межмолекулярных сил сцепления (химических и физических связей), т.е. энергию упругого разрыва всех связей в плоскости трещины, равную удвоенной поверхностной энергии материала, но и в большей степени - затраты энергии на процессы предразрушения в локальной зоне неупругих деформаций, называемой когезионной зоной или зоной пластичности или предразрушения. При малом

размере такой зоны отклонение от линейно-упругого поведения материала в целом не существенно и не накладывает принципиальных ограничений на расчеты ТДС и ТС в рамках ЛУМР [50].

Дагдейл [51] и Баренблатт [93] отдельно предложили для трещины в псевдо-упругом теле, нагруженной по моде I, две эквивалентные микромеханические модели, учитывающие неупругие процессы (пластичности и предразрушения соответственно) в локальной области вблизи вершины трещины. В этих моделях при заданной нагрузке вблизи вершин (краев) трещины существуют зоны неупругих деформаций длиной  $l_I$ , в которой действуют когезионные силы, сдерживающие берега трещины и препятствующие ее росту (рис. 1.12).

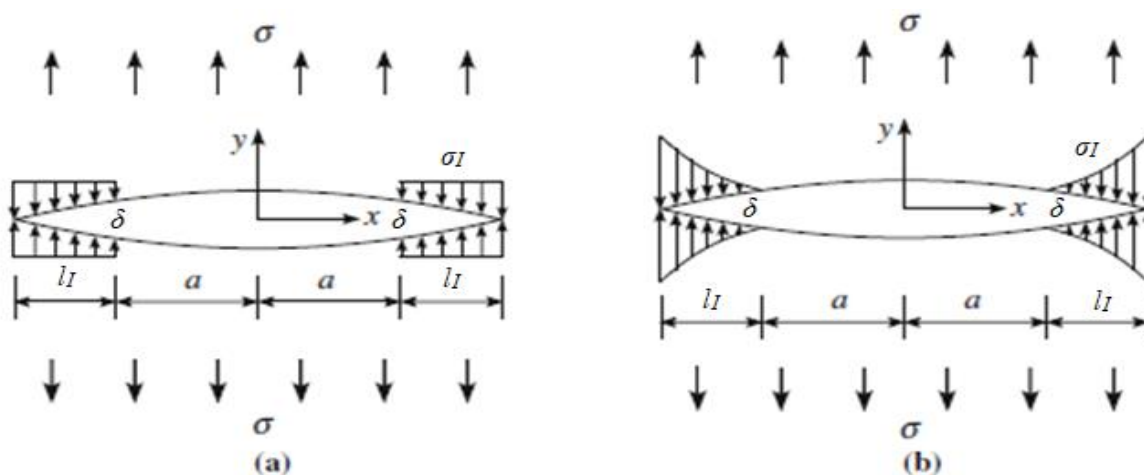


Рисунок 1.12 - Модели когезионных зон Дагдейла и Баренблатта при нагружении по моде I: (a) модель пластичности Дагдейла, (b) модель предразрушения Баренблатта:  $2a$  - длина трещины без сдерживающих сил;  $l_I$  - длина когезионной зоны.

Инициирование и рост трещины происходит тогда, когда эти силы (локальные напряжения вблизи кончика трещины  $\sigma_I$ ) превысят предел текучести материала  $\sigma_y$  или предел предразрушения  $\sigma_c$  соответственно. Применительно к межслоевому псевдохрупкому росту трещин в слоистых ПКМ физически более обоснованной является модель Баренблатта, в локальной зоне предразрушения которой напряжения, сдерживающие берега

трещины  $\sigma_I$ , зависят от локальной деформации в этой зоне, т.е. от ее раскрытия  $\delta$  по оси  $y$ . Эта зависимость называется законом когезионной зоны (ЗКЗ). В модели Баренблатта она описывается экспоненциальной функцией и называется экспоненциальным ЗКЗ. Максимальные значения локального напряжения ( $\sigma_I^*$ ) и деформации ( $\delta_I^*$ ) соответствуют локальной прочности и предельной деформации при предразрушении соответственно (рис. 1.13).

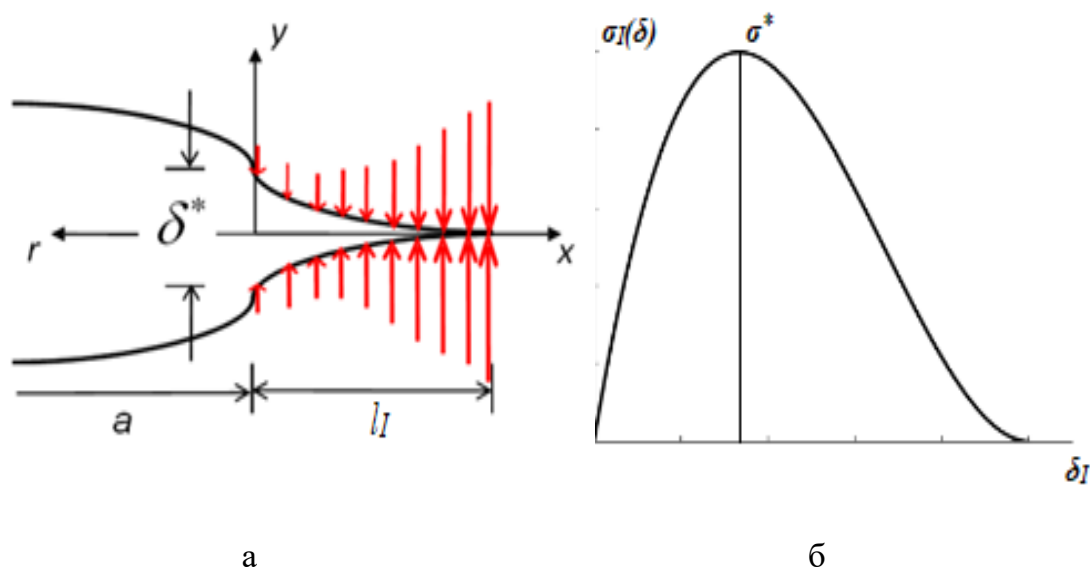


Рисунок 1.13 - Схема общего вида кончика краевой трещины общей длиной «а» в псевдохрупком теле с когезионной зоной длиной  $l_I$  и предельным раскрытием  $\delta_I^*$  в модели Баренблатта (а) и зависимость локального напряжения  $\sigma$  от раскрытия в кончике трещины  $\delta$  (экспоненциальный закон когезионной зоны  $\sigma(\delta)$ ) (б).

При этом длина неупругой зоны прямо пропорциональна модулю Юнга  $E_I$ , нагрузке на трещину  $G_I$  и обратно пропорциональна квадрату локальной прочности при растяжении  $\sigma_{IC}^2$ :

$$l_I = \frac{\pi G_I E_I}{8 \sigma_{IC}^2}, \quad (1.9)$$

а локальное раскрытие  $\delta_I$  в поперечном направлении (перпендикулярном плоскости трещины) - пропорционально  $G_I$  и обратно пропорционально  $\sigma_{IC}$ :

$$\delta_{Ic} = \frac{G_I}{\sigma_{IC}}, \quad (1.10)$$

Предельным значениям нагрузки на трещину  $G_I = G_{IC}$  соответствуют предельная длина  $l_{Ic}$  и предельное раскрытие  $\delta_{Ic}$  неупругой локальной зоны.

Площадь под кривой ЗКЗ, т.е. интеграл по величине локального раскрытия трещины в ее кончике, дает удельную энергию разрушения материала, соответствующую критической величине интенсивности высвобождения упругой энергии при росте трещины:

$$\int_0^{\delta^*} \sigma_I(\delta) d\delta I = G_{IC}, \quad (1.11)$$

С другой стороны, производная экспериментально определенной зависимости параметра трещиностойкости от раскрытия когезионной зоны соответствует ЗКЗ  $\sigma_I(\delta)$ .

В настоящее время модель Баренблатта распространяется на аналитическое описание когезионной зоны при нагрузке на трещину по моде II с заменой глобальных и локальных растягивающих напряжений и деформаций на сдвиговые ( $\tau_{II}$ ,  $\delta_{II}$ ), параметров ТДС и ТС - на  $G_{II}$  и  $G_{IIC}$ , а модуля Юнга - на модуль сдвига ( $G$ ). При этом возможности применения микромеханических моделей для анализа условий комбинированного нагружения до сих пор не рассматривались.

Прямые экспериментальные исследования локальных неупругих зон и определения их деформационно-прочностных характеристик, определяющих трещиностойкость, до настоящего времени практически отсутствуют. Для этих целей используется имитация локального межслоевого разрушения образцов с локальным межслоевым контактом, создаваемым при формовании пластин слоистого ПКМ с межслоевой антиадгезионной прокладкой, обычно тонкой фторопластовой пленкой, в центре которой вырезается отверстие заданной формы и размеров. Образцы испытываются на разрыв или сдвиг с фиксированием усилия и деформации до разрушения локального контакта. По площади контакта рассчитывается его прочность.

На рис. 1.14 приведены фотография образца слоистого СК с размером локального контакта площадью  $10 \times 10 \text{ мм}^2$  и типичные кривые в координатах нагрузка-смещение, полученные при испытании таких образцов

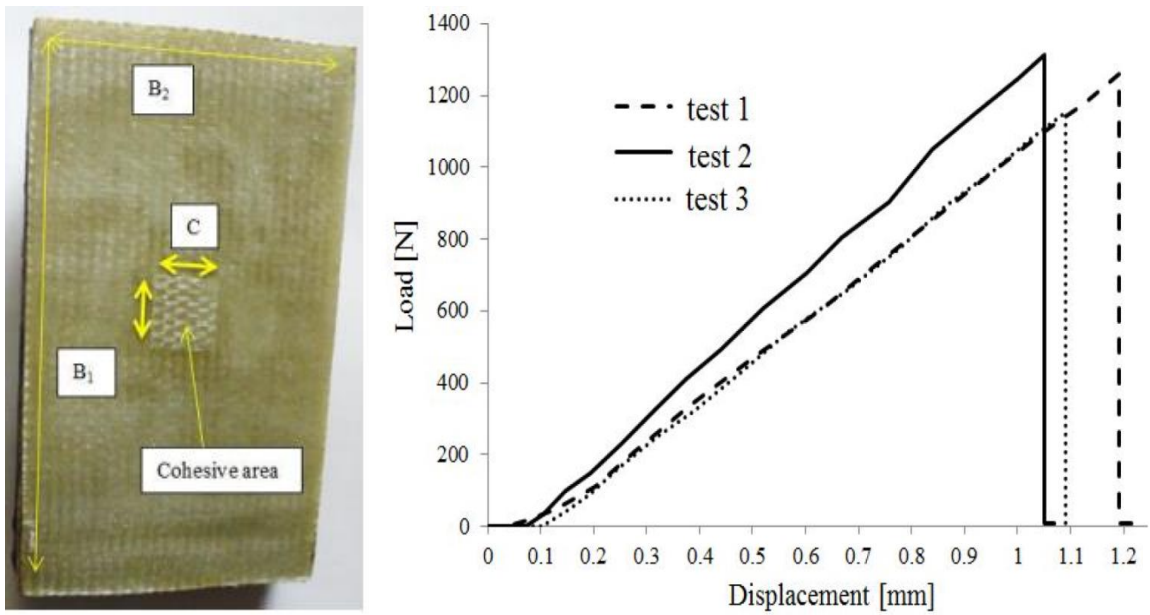


Рисунок 1.14 - Фотография одной стороны межслоевого контакта слоистого СК и кривые разрушения при проведении трех таких испытаний [71]

На рис.1.15 приведены аналогичные кривые, полученные при испытании на локальную прочность при сдвиге образцов внахлест.

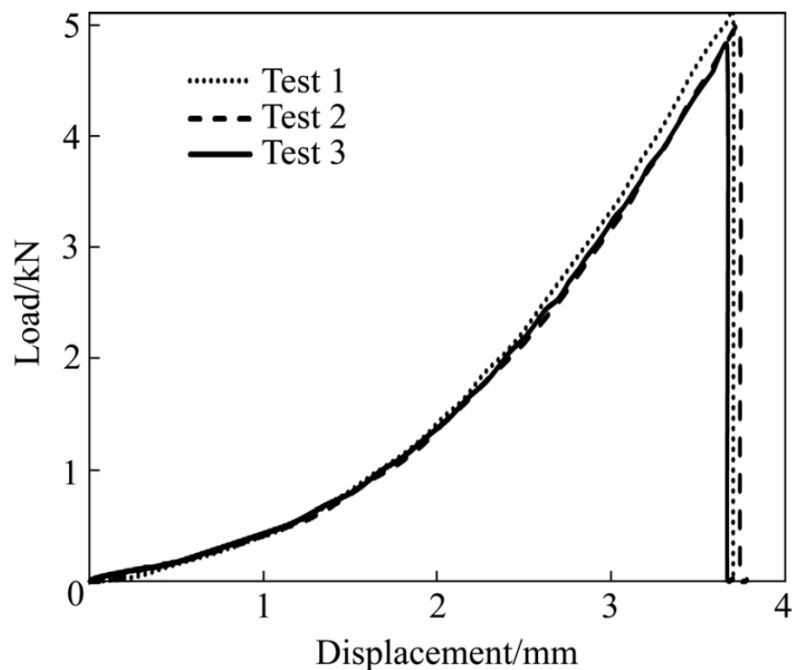


Рисунок 1.15 - Кривые нагрузка-смещение при сдвиге, полученные при испытании трех образцов внахлест из СК с локальным межслоевым контактом [76]

Отсутствие стандартов на такие испытания затрудняет их применение и анализ получаемых результатов из-за резкой зависимости результатов от

формы и размеров образцов, в первую очередь, зоны контакта, способа и режимов получения и условий испытания образцов.

### **1.2.3 Конечно-элементное численное моделирование и оценка межслоевой трещиностойкости слоистых ПКМ в рамках макро- и микромеханического подходов ЛУМР**

Как указывалось выше, макро- и микромеханические подходы ЛУМР лежат в основе аналитических расчетов и экспериментальных методов определения параметров межслоевой трещиностойкости слоистых ПКМ. Однако, при сложной конфигурации конструкций и дефектов аналитическая оценка трещиностойкости и прогнозирование роста трещин в рамках ЛУМР затруднена или невозможна из-за трудности учета геометрических факторов. 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 разработаны 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 (МВЗТ), или Virtual Crack Closure Technique (VCCT) и модель когезионной зоны (МКЗ), или Cohesive Zone Model (CZM).

#### *А) Методика виртуального закрытия трещины (VCCT).*

МВЗТ используется при моделировании роста трещин в слоистых композитах и оценки их трещиностойкости при простых и смешанных модах нагружения с использованием заданного критерия разрушения и при условии, что рост трещины всегда происходит вдоль заданной траектории.

Он основан на предположении, что напряженное состояние вокруг вершины трещины не изменяется значительно при небольшом прорастании трещины.

На рисунка 1.16 и 1.17 показаны принципиальные схемы, иллюстрирующие основную идею МВЗТ. Рис.1.16а,б иллюстрирует формирование траектории роста трещины в двумерной модели дискретизацией разрывов узлов сетки конечных элементов (интерфейсных узлов), а рис. 1.17 - структуру кончика трещины в трехмерной сетке конечных элементов до распространения (а) и после одноступенчатого прорастания (б), поясняющую принцип расчета интенсивности высвобождения энергии.

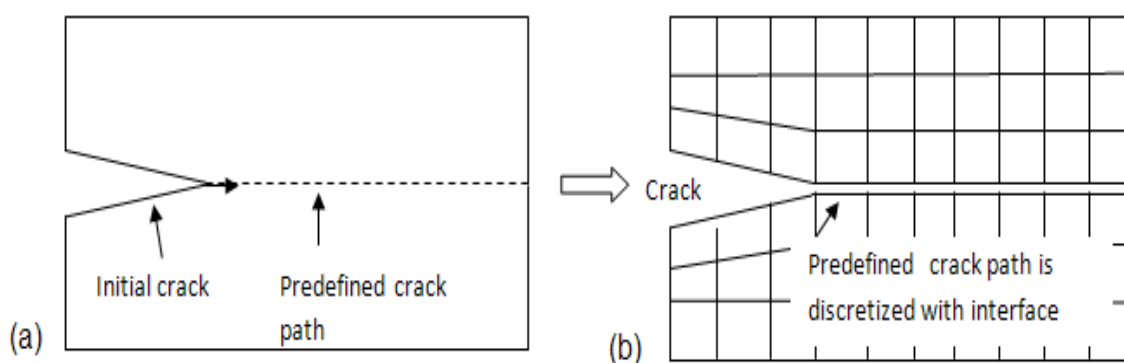


Рисунок 1.16 - Схема формирования predetermined траектории роста трещины в методе МВЗТ.

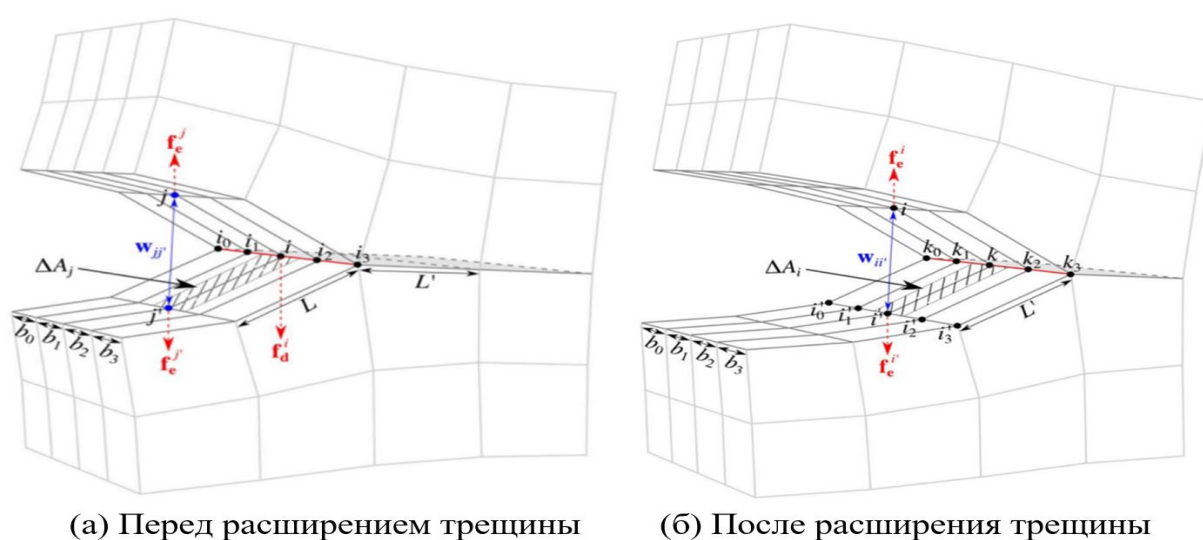


Рисунок 1.17 - Конечно-элементная схема распространения кончика трещины в методе МВЗТ [82].



Предполагается, что трещина распространяется вдоль межэлементной (интерфейсной) плоскости, образующей при разрыве узлов. Энергия  $\Delta E_i$ , высвобождающаяся при разрыве вершинного узла  $i$  и распространении вершины трещины до узла  $k$ , может быть рассчитана как энергия, необходимая для закрытия области трещины между  $i$  и  $k$  (см. рис. 1.17а):

$$\Delta E_i = -\frac{1}{2}(f_d^i - f_e^i)w_{ii'}, \quad (1.12)$$

где  $f_d^i$  - узловая сила в точке  $i$  в состоянии А;  $f_e^i$  - узловая сила в точке  $i$  в состоянии В;  $w_{ii'}$  - скалярное перемещение вектора между узлом  $j$  и узлом  $i$ . Площадь зоны между узлами  $i$  и  $k$  ( $\Delta A_i$ ) рассчитывается следующим образом (см. рис. 1.16б):

$$\Delta A_i = \frac{1}{2}(\Delta A_1 + \Delta A_2) = \frac{1}{2}(b_1 + b_2) \cdot L', \quad (1.13)$$

$L'$  - длина элемента между узлом  $i$  и  $k$ ;  $b_1$  и  $b_2$  - ширина элементов, подключенных к узлу  $k$ .

Интенсивность высвобождения энергии для узла  $i$  ( $G_i$ ) при этом равна:

$$G_i = \frac{\Delta E_i}{\Delta A_i} = -\frac{1}{(b_1 + b_2) \cdot L'}(f_d^i - f_e^i) \circ w_{ii'}, \quad (1.14)$$

Обычно  $w_{ii'}$  в уравнении 1.12 может быть получено только после расширения трещины, однако в рамках МВЗТ (VCCT),  $f_e^i$  и  $w_{ii'}$  аппроксимируются из анализа МКЭ конфигурации трещины до ее расширения в соответствии с предположением о самоподобии.

Все необходимые перемещения и узловые силы можно получить в результате МКЭ-анализа начального состояния трещины (рис. 1.17а). Векторные компоненты  $G$  могут быть соотнесены с  $G_I$ ,  $G_{II}$ , и  $G_{III}$ , если их повернуть в соответствующую систему координат.

При моделировании роста трещины в МВЗТ при индивидуальных модах нагружения критическое значение ТДС или параметр трещиностойкости ( $G_{IC}$ ) определяется по простому критерию разрушения (см. уравнение 1.2в и 1.2д). При смешанной моде I/II чаще всего используется критерий Б-К (см. уравнения 1.2г и 1.2е).

Методика MB3T в пакете прикладных программ ANSYS работает только с линейными конечными элементами серии 18X, в частности с такими как SOLID185. Доступ к расчетным возможностям метода осуществляется через команду CINT, которая задает необходимые параметры вычисления.

Использование методик для моделирования роста трещин требует ввода в математическую модель следующих допущений:

- 1) Рост трещины происходит вдоль заранее заданной траектории.
- 2) Траектория задается интерфейсными элементами.
- 3) Расчет является квазистатическим и не учитывает переходные эффекты, связанные со скоростью роста трещины.
- 4) Материал считается линейно-упругим изотропным, ортотропным или анизотропным, и рост трещины не изменяет состояние материала в вершине трещины.

Последний постулат не учитывает микромеханических моделей роста трещин и не позволяет учитывать в методе ВЗТ вклад локальных процессов неупругого деформирования материала вблизи кончика трещины [86, 87].

Трещина может быть помещена вдоль узлов конечных элементов заданного материала или вдоль интерфейса между двумя материалами. В расчете можно задавать составные трещины (Multiple cracks).

Основными этапами моделирования роста трещин в MB3T являются:

1. Создание конечно-элементной модели с траекторией роста трещины;
2. Вычисление параметра интенсивности высвобождения энергии (Energy-Release Rate);
3. Выполнение анализа роста трещин (Crack Growth Calculation);
4. Моделирование роста трещин является нелинейной прочностной задачей (Crack growth simulation).

Точность вычисления по методу MB3T 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.

*Б) Методика моделирования когезионной зоны (МКЗ)*

В отличие от метода виртуального закрытия трещины (МВЗТ или ВССТ), в котором моделируется прорастание трещины по строго определенной траектории по узлам конечных элементов геометрической (твердотельной) модели. Метод КЗ в рамках ЛУМР базируется на физической (микромеханической) модели Дагдейла-Баренблатта и учитывает эти процессы введением в твердотельную модель из твердотельных конечных элементов слоя специальных когезионных или контактных (интерфейсных) элементов (ИЭ), т.е. когезионной зоны, КЗ) (рис.1.18).

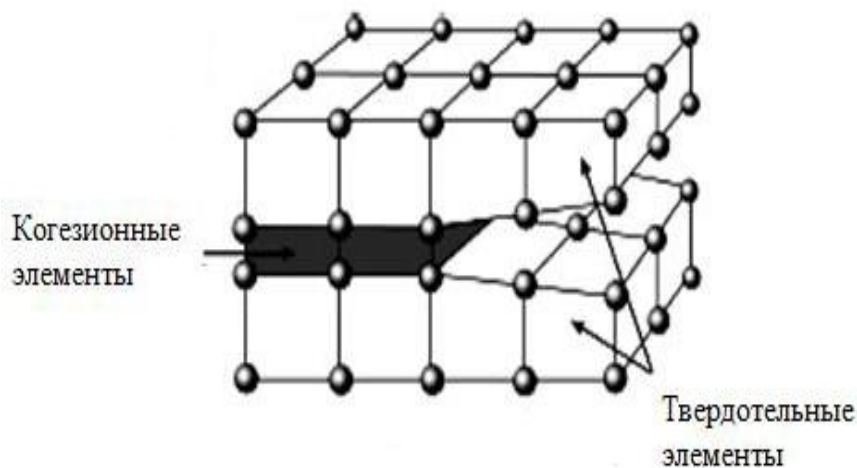


Рисунок 1.18 - Схема расположения специальных интерфейсных или контактных (когезионных) элементов в плоскости роста трещины в твердотельной конечно-элементной модели КЗ.

Такая модель позволяет учитывать микромеханические процессы вблизи вершины трещины, задавая локальные деформационно-прочностные свойства КЗ в виде закона когезионной зоны (ЗКЗ), причем не только при инициировании и распространении заданной трещины, но и при ее возникновении в местах концентрации напряжения при моделировании как слоистых материалов, так и адгезионных соединений и контактов. В методе МКЗ направление распространения трещины задается расположением

интерфейсных или контактных элементов в твердотельной модели: трещина может распространяться вдоль любого пути, где размещаются и разрушаются такие элементы [87]. При этом анализ процессов их разрушения упрощается и фокусируется только на области у кончика трещины, характеристики которой определяются ЗКЗ.

При конечно-элементном моделировании образования и роста трещины в образцах с заданной геометрией для оценки параметров ТДС и ТС слоистых ПКМ методом МКЗ используются различные формы ЗКЗ - зависимости локального раскрытия КЗ ( $\delta$ ) от действующего в ней локального напряжения ( $\sigma$ ,  $\tau$  или их сочетания). В терминах конечно-элементного моделирования напряжение, действующее в когезионной зоне, часто выражается как сила сцепления (когезии) или сопротивления  $T$  (traction) когезионных элементов, а локальное раскрытие трещины при ее иницировании и росте - как их разделение (separation)). При этом ЗКЗ как функция  $\sigma(\delta)$  задается и выбирается произвольно. На рис.1.19 приведены ЗКЗ, наиболее часто используемые при моделировании ТС слоистых ПКМ методом МКЗ.

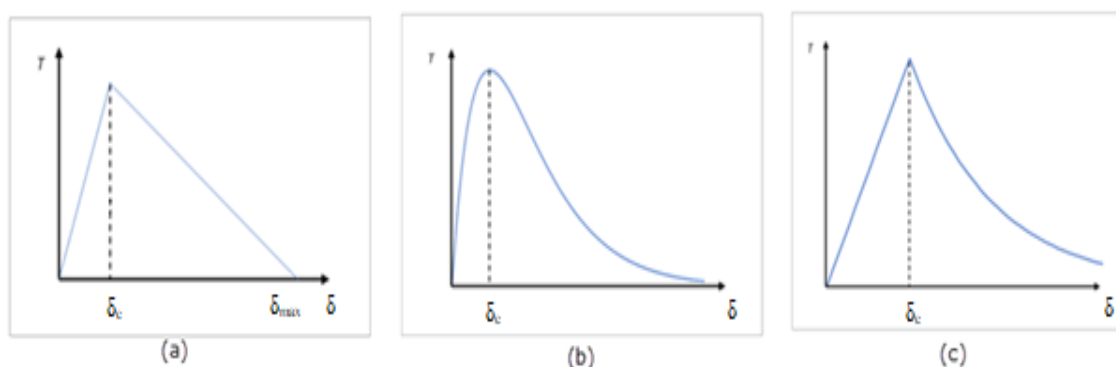


Рисунок 1.19 - Типичные формы ЗКЗ: (а) билинейная; (б) экспоненциальная; (в) линейно-экспоненциальная.

ЗКЗ содержат начальную линию упругой (линейной) или близкой к ней связи между напряжением сцепления и разделением ИЭ. После достижения предельного напряжения и критической величины разделения ЗКЗ переходит

в линию спада напряжения (прямая в билинейном ЗКЗ и экспоненциальные в двух других) соответствует развитию неупругого разрушения ИЭ и прорастанию трещины в КЗ

Численный анализ поведения КЗ и определения ТДС и ТС конечно-элементных моделей производится двумя основными способами - решением уравнений, описывающих ЗКЗ, и анализом накопления повреждений КЭ при спаде напряжения сцепления после достижения максимального усилия.

В первом способе решаются уравнения, описывающие вышеприведенные типы ЗКЗ и имеющие вид:

$$\sigma = \begin{cases} \frac{2G_c}{\delta_{\max}} \frac{\delta}{\delta_c} & 0 \leq \delta \leq \delta_c \\ \frac{2G_c}{\delta_m} \frac{(\delta_{\max} - \delta)}{(\delta_{\max} - \delta_c)} & \delta_c \leq \delta \leq \delta_{\max} \\ 0 & \delta > \delta_{\max} \end{cases}, \quad (1.15a)$$

$$\sigma = G_c \frac{\delta}{\delta_c} e^{\frac{\delta}{\delta_c}}, \quad (1.15b)$$

$$\sigma = \begin{cases} \frac{2qG_c}{d_c(q+2)} \frac{\delta}{\delta_c} & 0 \leq \delta \leq \delta_c \\ \frac{2qG_c}{\delta_c(q+2)} e^{q(1 - \frac{\delta}{\delta_c})} & \delta > \delta_{\max} \end{cases}, \quad (1.15b)$$

где  $G_c$  - предельное значение параметра ТДС (интенсивности высвобождения упругой энергии, Дж/м<sup>2</sup>), соответствующее параметру ТС и равное энергии, затрачиваемой на упругое и неупругое деформирование КЗ, т.е. площади поверхности под начальным и конечным участками кривой ЗКЗ;  $\delta_c$  и  $\delta_{\max}$  - раскрытие КЗ при максимальном и нулевом значениях напряжения сопротивления  $\sigma$  соответственно.

Во втором подходе к расчету трещиновдвижущих сил и трещиностойкости в модели когезионной зоны (МКЗ) используется метод оценки относительного понижения сопротивляемости КЗ - накопления повреждений за счет потери связности интерфейсных или контактных элементов на неупругом участке ЗКЗ спада напряжения от максимального ( $\sigma_0$ ) до нулевого значения ( $\sigma=0$ ) (Рис.1.20).

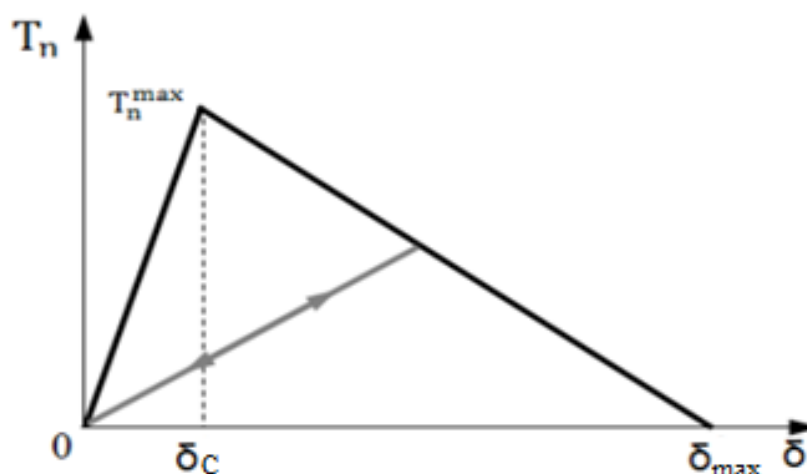


Рисунок 1.20 Схемы анализа билинейного ЗКЗ (диаграммы связывания-разделения  $T$ - $\delta$ ) в упругой зоне и зоне повреждений) с линейно-упругим раскрытием зоны  $\delta$  по накоплению повреждений [87].

Накопление повреждений в КЗ характеризуется показателем (индексом) повреждений  $D$ , определение которого базируется на анализе раскрытия КЗ или диссипации энергии в ней. При линейном спаде напряжения в обоих методах анализа индекс  $D$  рассчитывается по формуле 1.16а, а при экспоненциальном спаде - по формулам 1.16б (при анализе раскрытия) и 1.16в (при анализе диссипации энергии) соответственно:

$$D = \frac{\delta_f}{\delta_{\max}} \frac{(\delta_{\max} - \delta_0)}{(\delta_f - \delta_0)}, \quad (1.16a)$$

$$D = 1 - \frac{\delta_0}{\delta_{\max}} \left[ \frac{1 - \exp\left(-\alpha \frac{(\delta_{\max} - \delta_0)}{(\delta_f - \delta_0)}\right)}{1 - \exp(-\alpha)} \right], \quad (1.16б)$$

$$D = \int_{\delta_0}^{\delta_f} \frac{\sigma}{G_c - G_0} d\delta, \quad (1.16в)$$

где  $\delta_f$  - раскрытие КЗ в любой точке линии спада напряжения, соответствующее достижению определенного числа разрывов ИЭ в КЗ, например, в точке В на рис. 1.20;  $\delta_{\max}$  - максимальное раскрытие, соответствующие полному разрушению ( $D = 1$ ) КЗ (точка С на рис. 1.20) и  $\delta_0$  - нулевому повреждению ( $D = 0$ ) в точке А на рис. 1.20;  $\sigma$  - напряжение

сцепления;  $G_0$  - упругая энергия, затрачиваемая на преодоление сил сцепления и равная площади под начальным участком ЗКЗ и  $G_C$  - общая энергия, затрачиваемая на распространение трещины и равная общей площади под линией ЗКЗ.

При этом спад напряжения от  $\sigma_0$  до  $\sigma=0$  обусловлен изменением величины  $D$  от 0 до 1 и сопровождается изменением начальной жесткости пропорционально  $(D - 1)$ , а истинное остаточное напряжение в зоне повреждений при заданной ее толщине рассчитывается по формуле 1.17а:

$$\sigma = (1 - D)K_0 \frac{\delta_f}{t_0}, \quad (1.17a)$$

где  $(1 - D)K_0$  - остаточная жесткость (см. рис.1.20б);  $t_0$  - толщина КЗ.

Величина  $\delta_f$  изменяется от  $\delta_0$  до  $\delta_{\max}$ , и последняя рассчитывается по формуле 1.17б:

$$\delta_{\max} = \frac{2G_C}{\sigma_0}, \quad (1.17b)$$

При всех вариациях конечно-элементного численного моделирования трещиностойкости слоистых ПКМ методом МКЗ конечным результатом является получение кривых взаимосвязи глобального усилия и деформирования твердотельных образцов, вызывающих инициирование и распространение трещины с учетом геометрии и характера (моды) нагружения, и определение по этим кривым предельных нагрузок и параметров трещиностойкости. При индивидуальных и смешанных модах критериями трещиностойкости моделей служат те же соотношения, что и при экспериментальных методах и при моделировании методом ВЗТ: для индивидуальных мод - уравнение 1.2а, а для смешанной моды I/II - степенные уравнения 1.2в и 1.2д или, чаще, уравнения Кеннана-Бензегга 1.2г и 1.2е.

В литературе имеются многочисленные данные по моделированию трещиностойкости слоистых ПКМ методом КЗ с помощью пакетов прикладных программ ANSYS® и ABAQUS®. Подавляющее большинство имеющихся данных получены с использованием стандартных

экспериментальных образцов типа ДКБ (DCB), БКН (ENF), ИСМ (MMB), УПБ (SLB) и НПБ (OLB) и посвящены сравнению результатов моделирования и экспериментально полученных данных для выявления оптимальных параметров моделирования, обеспечивающих достаточную точность вычислений при минимальной их трудоёмкости. В настоящее время возрастает количество работ, посвященных моделированию трещиностойкости более сложных конструктивно подобных образцов и элементов конструкций летательных аппаратов, экспериментальные испытания которых трудно реализуемо. Поэтому, очевидно, что систематизация результатов экспериментальных исследований трещиностойкости современных отечественных классов слоистых тонкослойных УК и СК при различных модах нагружения с использованием локальных методов в сочетании с численными методами моделирования является одним из перспективных направлений в конструировании и производстве сложных элементов конструкций из таких материалов с высокой несущей способностью и стойкостью к расслоению и разрушению при ударных нагрузках.



## Выводы по главе I

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

численной оценки трещиностойкости этих материалов при индивидуальных и комбинированной модах нагружения отсутствуют.

На основании вышеизложенного цель настоящей работы состояла в проведении систематической оценки межслоевой трещиностойкости слоистых стекло- и углекомполитов из вакуум-формуемых клеевых препрегов при индивидуальном и комбинированном растяжении и сдвиге с использованием экспериментальных и численных методов.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи:

1. Обобщить информацию о непрерывно армированных слоистых стекло- и углекомполитах из клеевых препрегов, используемых в авиационной и ракетной технике, их дефектности, межслоевой трещиностойкости, теоретических, экспериментальных и численных методах оценки и прогнозирования устойчивости к расслоению при индивидуальном и комбинированном нагружении по модам I и II.

2. Экспериментально определить глобальный и локальный параметры межслоевой трещиностойкости пластин слоистых ПКМ, отформованных вакуумным методом из клеевых препрегов КМКС и КМКУ, при индивидуальном растяжении и сдвигом и критерий разрушения при комбинированном нагружении.

3. Разработать конечно-элементные модели критического расслоения простых образцов слоистых ПКМ типа ДКБ, БКН, SLB и OLB с использованием методов когезионной зоны (МКЗ) и виртуального закрытия трещины (МВЗТ).

4. Определить для моделей ПКМ на основе выбранных препрегов, с использованием полученных экспериментально параметров и критериев межслоевой трещиностойкости, зависимости глобальной нагрузки на образцы от их деформаций и значения критической интенсивности высвобождения упругой энергии при индивидуальной и комбинированной

нагрузке на трещину ( $G_{IC}$ ,  $G_{IIC}$  и  $G_{IIIC}$ ) по максимальной (критической) нагрузке на образцы, инициирующей рост заданной трещины или дефекта.

5. Установить влияние для каждого из выбранных составов непрерывно армированных слоистых стекло- и углекомполитов, размеров конечно-элементной сетки и, соответственно, числа интерфейсных элементов на точность численного предсказания начала расслоения с целью минимизации объема вычислений.

6. Проверить адекватность моделей путем сравнения результатов компьютерного моделирования с экспериментальными данными о критической межслоевой трещиностойкости исследованных армированных слоистых ПКМ.

## Глава II Объекты и методы исследования трещиностойкости и локальной межслоевой прочности

### 2.1 Объекты исследования

Объектами исследования в работе служили пластины тонколистовых слоистых армированных в плоскости полимерных композитов двух типов - стекло- и углекомпозитов (УК и СК соответственно).

Основные характеристики клеевого связующего приведены в таблице 5.

Таблица 5 - Основные характеристики эпоксидного клеевого связующего ВСК-14-2м [89].

Характеристика	Значение
Температура отверждения, °С	175
Динамическая вязкость при 120°С, Па*с	70 - 100
Прочность при растяжении, МПа	92
Относительное удлинение при растяжении, %	3,3
Модуль упругости при растяжении, ГПа	3,7
Прочность при изгибе, МПа	165
Модуль упругости при изгибе, ГПа	3,8
Вязкость разрушения связующего, Дж/м <sup>2</sup>	1800
Температура стеклования, °С, определенная методом:	
ДМА	170
ТМА	167
ДСК	174
Время гелеобразования, мин, при температуре 145 °С	120
Кажущаяся вязкость по Брукфильду, Па*с, при температуре 100 °С	182

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



Рисунок 2а - Фотография рулона клевого препрега марки КМКУ-2м.120

Основные характеристики углеродной ленты представлены в таблице 6.

Таблица 6 - Основные характеристики углеродной ленты марки ЭЛУР-П-А [88].

Характеристика	Значение
Ширина ленты, мм	245±30
Линейная плотность, г/м	30±5
Плотность нити, г/см <sup>3</sup>	1,71±0,04
Количество нитей на 10 см	420±25

Ортотропный стеклокомпозит, получаемый методом вакуумного формования клеевого препрега марки КМКС-2м.120 на основе стеклоткани марки Т-10-80 и эпоксидного клеевого связующего ВСК-14-2м, представленный на рис. 26. Содержание связующих в препреге КМКС-2м.120 35-37% (по массе). Толщина слоя препрега - 0,1 мм.

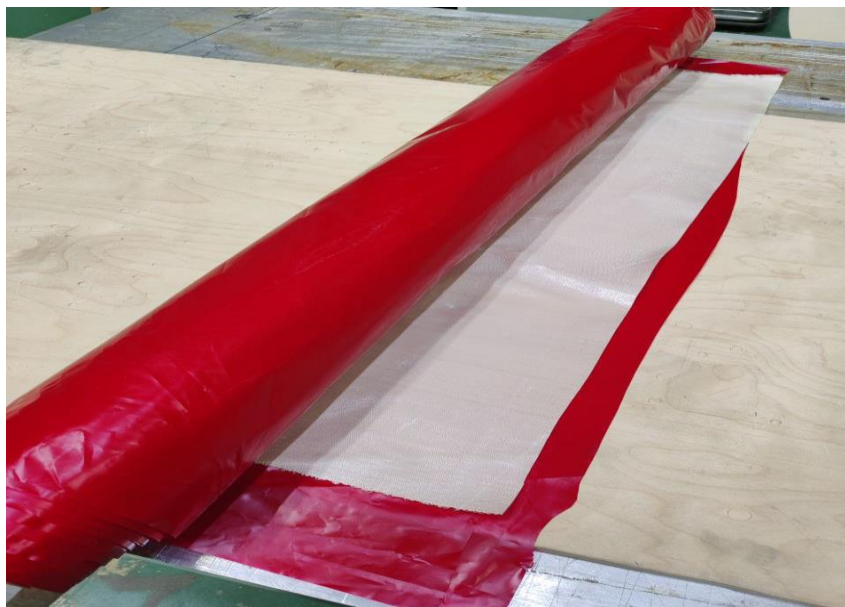


Рисунок 26 - Фотография рулона клеевого препрега марки КМКС-2м.120

Основные характеристики стеклоткани представлены в таблице 7.

Таблица 7 - Основные характеристики стеклоткани марки Т-10-80 [90].

Характеристика	Значение
Толщина ткани, мм	0,25
Поверхностная плотность, г/м <sup>2</sup>	290±7
Плотность нитей на 1 см, н/см, основа/уток	36/20
Разрывная нагрузка, кН, не менее, основа/уток	3,136/1,764

Значения упругих характеристик для исследуемых ПКМ приводятся в литературе и обобщены в таблице 8 [5].

Таблица 8 - Характеристики ПКМ на основе клеевых препрегов марок КМКС-2м.120 и КМКУ-2м.120.

ПКМ	Характеристика		
	Модуль Юнга E, ГПа	Модуль сдвигаG, ГПа	Коэффициент Пуассона
КМКС- 2м.120	E <sub>11</sub> - 20 E <sub>22</sub> - 18 E <sub>33</sub> - 3,5	G <sub>11</sub> - 4,2 G <sub>12</sub> - 4,2 G <sub>13</sub> - 3,08	v <sub>12</sub> - 0,24 v <sub>13</sub> - 0,24 v <sub>23</sub> - 0,45
КМКУ- 2м.120	E <sub>11</sub> - 110 E <sub>22</sub> - 99 E <sub>33</sub> - 5,1	G <sub>11</sub> - 5,5 G <sub>12</sub> - 5,5 G <sub>13</sub> - 5,1	v <sub>12</sub> - 0,31 v <sub>13</sub> - 0,31 v <sub>23</sub> - 0,58

Пластины из СК и УК размерами 500x500 мм толщиной 4 и 5,6 мм, соответственно, из 40 слоев препрега изготавливали методом вакуумного формования препрегов по схеме, приведенной в гл. 1 (см. рис. 1.2), на специальной оснастке, рабочая поверхность которой очищали от загрязнений и пыли, обезжиривали нефрасом с применением безворсовой салфетки и выдерживали в течение 10 минут на воздухе. После чего поверхность обезжиривали ацетоном и снова выдерживали в течение 10-15 минут на воздухе.

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

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

всему краю пакета в виде сплошной полосы шириной 40 мм в направлении роста трещины вдоль продольной укладки ленты препрега КМКУ и вдоль основы ткани КМКС, соответственно. Во втором случае ФП прокладывали по всему слою заготовки, предварительно проделав в пленке с помощью пробойников круглые отверстия диаметром 3 мм.

На оснастку выкладывались попарно друг на друга заготовки, изготовленные из клеевого препрега, а между заготовками выкладывалась подготовленная фторопластовая пленка. Данная сборка представляет конструкцию - технологический пакет.

#### *Подготовка к вакуумному формованию.*

Поверх технологического пакета выкладывалось 2 слоя перфорированной разделительной пленки. Сверху на технологический пакет устанавливались цулаги. Поверх цулаг выкладывались 2 слоя дренажного материала. Устанавливался вакуумный мешок из нейлоновой вакуумной пленки. Мешок герметизировался с помощью герметизирующей ленты. Через установленные штуцеры удалялся воздух, образуя внутри мешка вакуум не менее  $0,8 \text{ кгс/см}^2$ . После процедуры вакуумный мешок разбирается.

Эта процедура необходима для того, чтобы слои препрега максимально склеились между собой, и между слоями отсутствовали пространства, наполненные воздухом.

#### *Вакуумное формование.*

Внутри вакуумной печи создавался вакуум не менее  $0,8 \text{ кгс/см}^2$ , температура поднималась до  $(125 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$  со скоростью не более  $2^\circ\text{C/мин}$ . Технологический пакет выдерживался при температуре  $(125 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$  в течение 60 минут.

После первичной выдержки температура поднималась до  $(180 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$  со скоростью не более  $2 \text{ }^\circ\text{C/мин}$ , вторичная выдержка при температуре  $(180 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$  в течение 5 часов. Охлаждение до температуры не более  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  со



скоростью не более 1 °С/минуту. После охлаждения вакуумный мешок разбирался.

Пластины из УК и СК после вакуумного формования зачищались от облоя и разрезались на образцы для экспериментального исследования с помощью алмазного круга.

## **2.2 Экспериментальные методы**

### **2.2.1 Определение структурных характеристик (компонентного состава, плотности, пористости)**

Кажущуюся плотность, учитывающую закрытые поры, определяли методом гидростатического взвешивания согласно ГОСТ 15139-69.

Эффективную плотность ( $\rho_{эф}$ ), учитывающую объем закрытых и открытых пор, заключенных в общем объеме образца, определяли по данным о массе и объеме образцов с габаритными размерами 25x10 мм.

Открытую пористость определяли по относительной разности кажущейся и эффективной плотности.

Компонентный состав (соотношение армирующей ткани, полимерной матрицы и открытых пор) оценивали их массовыми долями.

### **2.2.2 Определение параметров трещиностойкости**

#### *А) Нагружение по моде I.*

Для экспериментального определения критического значения интенсивности высвобождения упругой энергии  $G_{IC}$  при нормальном отрыве использовали образцы, представляющие собой двухконсольную балку (ДКБ) размером 150x20 мм и толщиной 5,6 мм в случае КМКУ и 4 мм в случае КМКС с заданной начальной трещиной, которые вырезали из полученных пластин. Конфигурации образцов и их геометрические параметры приведены в главе I. Краевая трещина задавалась заложеной фторопластовой пленкой. К поверхности образцов со стороны, где расположена закладная пленка,

приклеивали алюминиевые уголки с подслоем клея ВК-25 на клей ВК-27 для закрепления в захватах разрывной машины. На рис 2.1 представлены фотографии образцов ДКБ из УК (а) и СК (б).

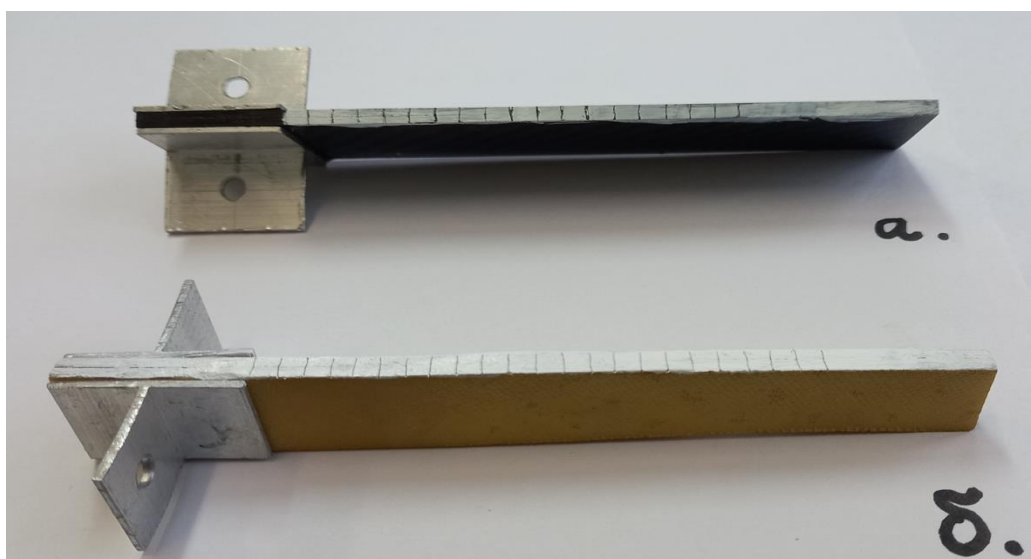


Рисунок 2.1- Фотографии образцов ДКБ из УК (а) и СК (б).

Испытания проводили по стандартной методике ГОСТ Р 56815-2015 или ASTM D5528-2013 раскрытием трещины при монотонном растяжении за ее края с заданной скоростью, фиксируя усилие растяжения  $P$  и раскрытие трещины  $\Delta$  и контролируя начало роста трещины.

Испытания проводили с помощью разрывной машины WDW-10E, обеспечивающей нагружение образца с заданной постоянной скоростью перемещения активного захвата (траверсы) и позволяющей проводить измерение нагрузки с точностью  $\pm 1\%$  измеряемой величины. При испытании использовали автоматическую систему записи, регистрирующую зависимость раскрытия трещины от усилия растяжения.

Характер кривой сила-глобальное раскрытие трещины соответствует кривым на рис. 1.8, приведенным в разделе I. По максимальной нагрузке и длине инициируемой трещины  $G_{IC}$  рассчитывали по формуле:

$$G_{IC} = \frac{12P^2 a^2}{Eb^2 h^3}, \quad (2.1)$$

где  $E$  - модуль Юнга;  $b$  - ширина и  $h$  - полутолщина образца,  $a$  - длина трещины.

### *Б) Нагружение по моде II*

Образцы для испытаний, представляющие собой балку с концевым надрезом (БКН) размером 150x20 мм и толщиной 5,6 мм в случае КМКУ и 4 мм в случае КМКС с заданной начальной трещиной, вырезали из полученных пластин с заложённой фторопластовой пленкой. Конфигурация образцов БКН и их геометрические параметры приведены в главе I. На рис 2.2 представлены фотографии образцов БКН из УК (а) и СК (б).

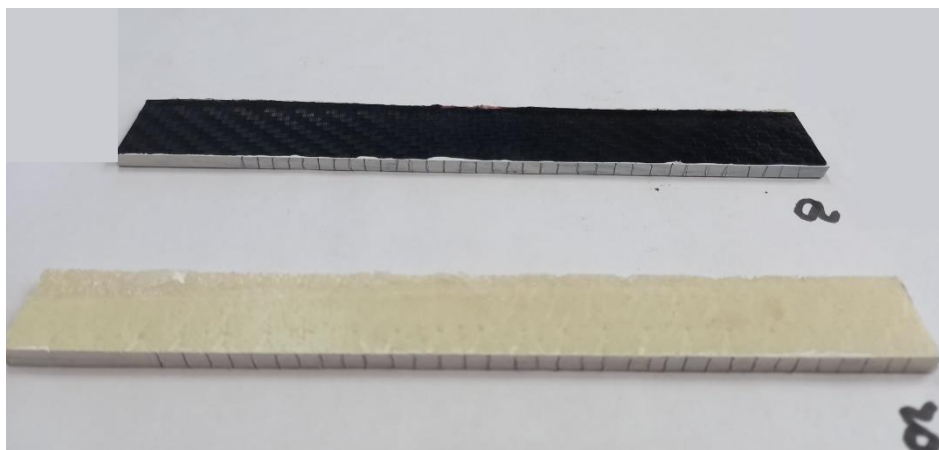


Рисунок 2.2 - Фотографии образцов БКН из УК (а) и СК (б).

Испытания проводили по стандартной методике ASTM D7905M-14. Образец, свободно лежащий на двух опорах, изгибается по центру с заданной скоростью нагружения с фиксацией усилия  $P$  и прогиба образца  $\Delta$  и контролем начала роста трещины. Для испытаний использовали разрывную машину WDW-10Ec приспособлением для трех-опорного изгиба. Радиус закругления краев опор и пуансона составляет  $(5,0 \pm 0,2)$  мм. Опоры закреплены неподвижно и позволяют точно центрировать образец (продольная ось образца параллельна боковой плоскости траверсы, а центр симметрии образца совпадает с осью приложения нагрузки). Отклонения от параллельности поверхностей опор и пуансона в горизонтальной плоскости составляет не более 0,005 мм по всей длине. Для измерения прогиба применялся датчик перемещения, обеспечивающий измерение деформации с точностью  $\pm 1\%$  от базы датчика деформации. Соотношение пролета между опорами к толщине образца выбрано таким, чтобы разрушения происходили

на внешней поверхности образца от напряжений растяжения. При испытании использовали автоматическую систему записи, регистрирующую зависимость прогиба от нагрузки или деформации изгиба (деформации растяжения на внешней поверхности образца) от напряжения изгиба.

Характер кривой сила-прогиб соответствует кривым на рис. 1.9, приведенным в разделе I.  $G_{IIC}$  рассчитывали по формуле:

$$G_{IIC} = \frac{9a^2 P_c \Delta_c}{2b(2L^3 + 3a^3)}, \quad (2.2)$$

где  $a$  - длина трещины;  $P_c$  - критическая нагрузка инициирования роста трещина;  $\Delta_c$  - прогиб балки при критической нагрузке;  $L$  - половина расстояния между опорами.

*В) Комбинированное нагружение по модам I/II.*

Для экспериментального определения параметров трещиностойкости при смешанной моде нагружения  $G_{IIC}$  использовали методы изгиба образцов с укороченной полубалкой и приложением изгибающей нагрузки вне трещины и над трещиной (методы УПБ, или SLB и НПБ, или OLB соответственно), подробно описанные в гл. 1. Образцы представляют собой балку с одной укороченной (обрезанной) у края трещины полубалкой размером 150x20 мм и толщиной 5,6 мм в случае КМКУ и 4 мм в случае КМКС с заданной начальной трещиной «а» длиной 43 и 66 мм. Конфигурации образцов и их геометрические параметры приведены в главе I. Изгибающую нагрузку на образцы типа SLB прикладывали в середине образца между опорами, а на образцы типа OLB к краю с обрезанной полубалкой на заданном расстоянии от опоры (постоянной величиной  $s$ , равной 20 мм в расчетных уравнениях 1,8в,г). На рис. 2.3 представлены фотографии образцов SLB (OLB) из УК (а) и СК (б).



Рисунок 2.3 - Фотографии образцов SLB (OLB) из УК (а) и СК (б).

Для измерения прогиба применяется датчик перемещения, обеспечивающий измерение деформации с точностью  $\pm 1\%$  от базы датчика деформации.

Испытания проводили при монотонном нагружении с заданной скоростью (1 мм/мин) с фиксацией прикладываемого усилия  $P$  и прогиба образца  $\Delta$  и контролем начала роста трещины. Для испытаний использовали разрывную машину WDW-10E с приспособлением для трех-опорного изгиба, аналогичным испытанию по моде II, но с изменяемым положением точки приложения усилия изгиба.

Расчет параметров трещинодвижущих сил отдельных мод при различном расстоянии между точкой опоры при укороченной полубалке и точкой приложения общего усилия ( $s$ ) изгиба проводили по формулам 1.8а-г, приведенным в главе I. Соотношение мод нагружения оценивали по доле моды II ( $\beta$ ) в общей сумме вкладов мод в ТДС.

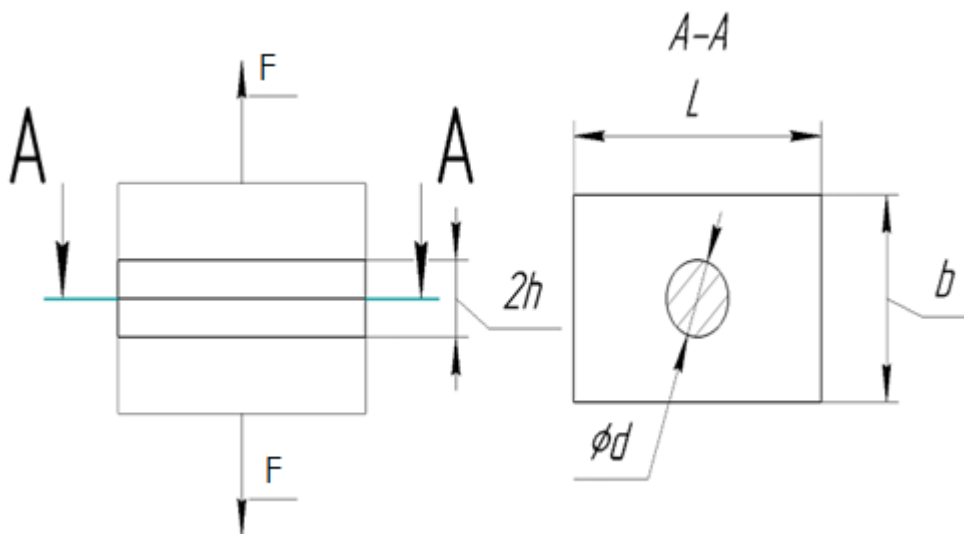
С учетом результатов определения параметров трещиностойкости при индивидуальных модах нагружения и по смешанной моде с различным заданным соотношением мод с использованием критерия и уравнения Кеннана (уравнения. 1.2г и 1.2е) определяли суммарный параметр и значения материальной константы  $\eta$  для УК и СК.

Характер кривой сила-прогиб соответствует кривым на рис. 1.10 и 1.11, приведенным в разделе I.

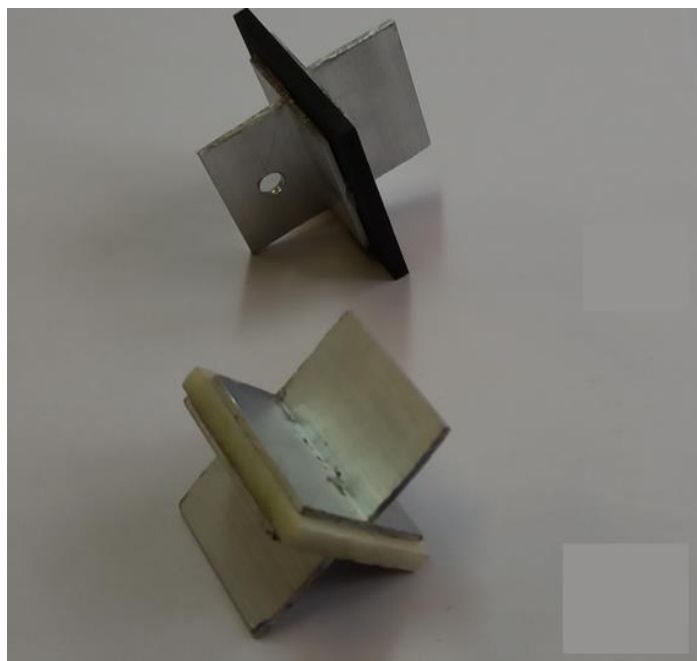
### 2.2.3 Определение локальной межслоевой прочности

#### А) Нормальный отрыв.

Для экспериментального определения локальной межслоевой прочности при нормальном отрыве использовали образцы размером 30x25 мм и толщиной 5,6 мм в случае КМКУ и 4 мм в случае КМКС, вырезанные из отформованных пластин с проложенной фторопластовой пленкой с круглым отверстием в центре, обеспечивающем образование локального межслоевого контакта в слоистом ПКМ (рис. 2.4). На образцы с двух сторон для закрепления в узле разрывной машины наклеены Т-образные алюминиевые профили с помощью подслоя клея ВК-25 и клея ВК-27. На рис. 2.4 (б) приведены фотографии образцов на отрыв из УК (а) и СК (б).



а



б

Рисунок 2.4 - Конфигурация образца ПКМ с локальным межслоевым контактом для испытания на разрыв:  $F$  - прикладываемая нагрузка,  $L$  - длина образца,  $2h$  - толщина образца,  $b$  - ширина образца,  $d$  - диаметр когезионной зоны (а), фотографии образца УК и СК (б).

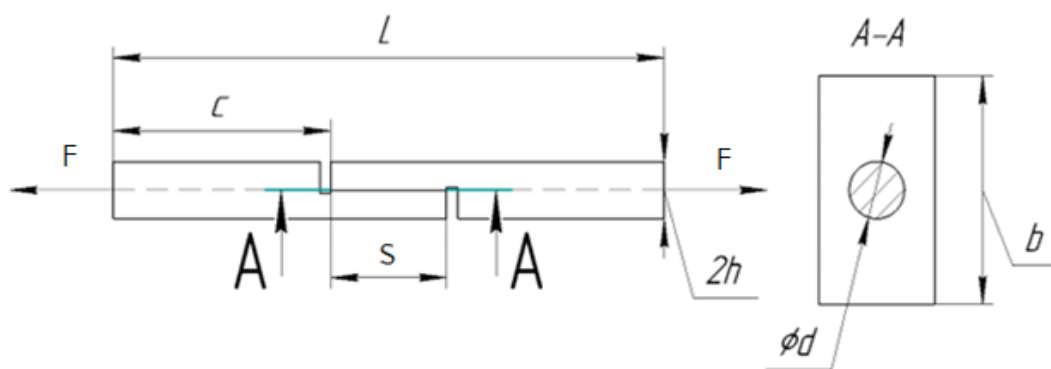
Образцы испытывали на растяжение до разрушения при скорости движения траверсы разрывной машины 1 мм/мин, записывая усилие  $F$  с помощью динамометра, а абсолютную деформацию (смещение когезионной зоны)  $\Delta h$  - с помощью датчика LVDP. Чтобы избежать возникновения сдвиговых напряжений и обеспечить равномерный нормальный отрыв в зоне сцепления слоев, образцы тщательно балансировали в горизонтальной плоскости. Испытания проводили в лабораторных условиях при нормальной температуре и относительной влажности. По кривым нагрузка-деформация определяли их предельные значения  $F_b$  и  $\Delta h_b$  соответственно. По предельной нагрузке и площади разрушения межслоевого контакта рассчитывали прочность (разрушающее напряжение) при нормальном отрыве:

$$\sigma_{IC} = \frac{F_{IC}}{S}, \quad (2.3)$$

где  $S$  - площадь когезионной зоны.

### Б) Сдвиг

Для экспериментального определения локальной межслоевой прочности при сдвиге использовали образцы размеров 150x20 мм и толщиной 5,6 мм в случае КМКУ и 4 мм в случае КМКС, вырезанные из отформованных пластин с проложенной фторопластовой пленкой с круглым отверстием в центре диаметром 3 мм, обеспечивающем образование локального межслоевого контакта пластин с модельной когезионной зоной между средними слоями образцов. Для испытания на сдвиг внахлест в образцах с противоположных сторон сделаны два надреза алмазным кругом на расстоянии «s» строго до ФП на глубину полуслоев (рис. 2.5).



a



б

Рисунок 2.5 - Конфигурация образца ПКМ с межслоевым контактом для испытания на локальный сдвиг: F - прикладываемая нагрузка, L - длина образца, 2h - толщина образца, b - ширина образца, d - диаметр контактной зоны (а), фотографии образца УК и СК (б).



Особое внимание при разработке этой методики уделено вопросу нанесения надрезов, точность которых резко влияет на получаемые результаты: не доведение надреза точно до срединной плоскости образца (до разделительной пленки) приводит к резкому повышению измеряемых нагрузок.

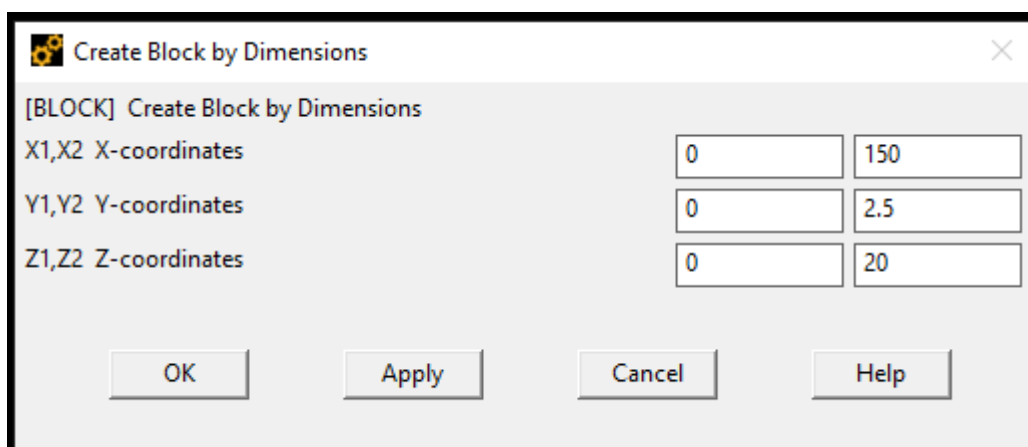
$$\sigma_{\text{IIC}} = \frac{F_{\text{IIC}}}{S}, (2.4)$$

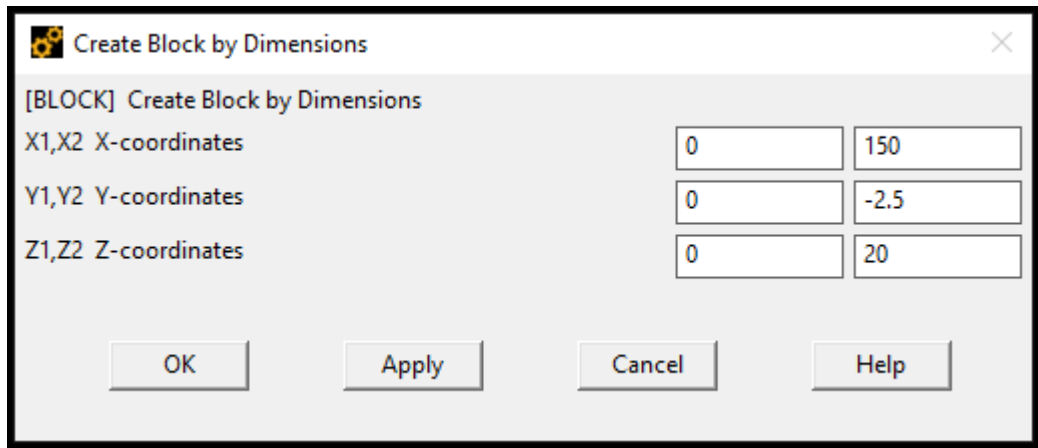
где  $S$  – площадь когезионной зоны.

## 2.2.4 Численные методы оценки трещиностойкости слоистых стекло- и углекомполитов

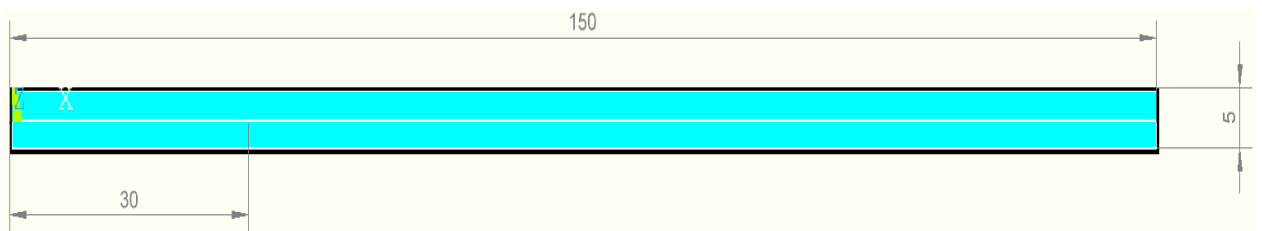
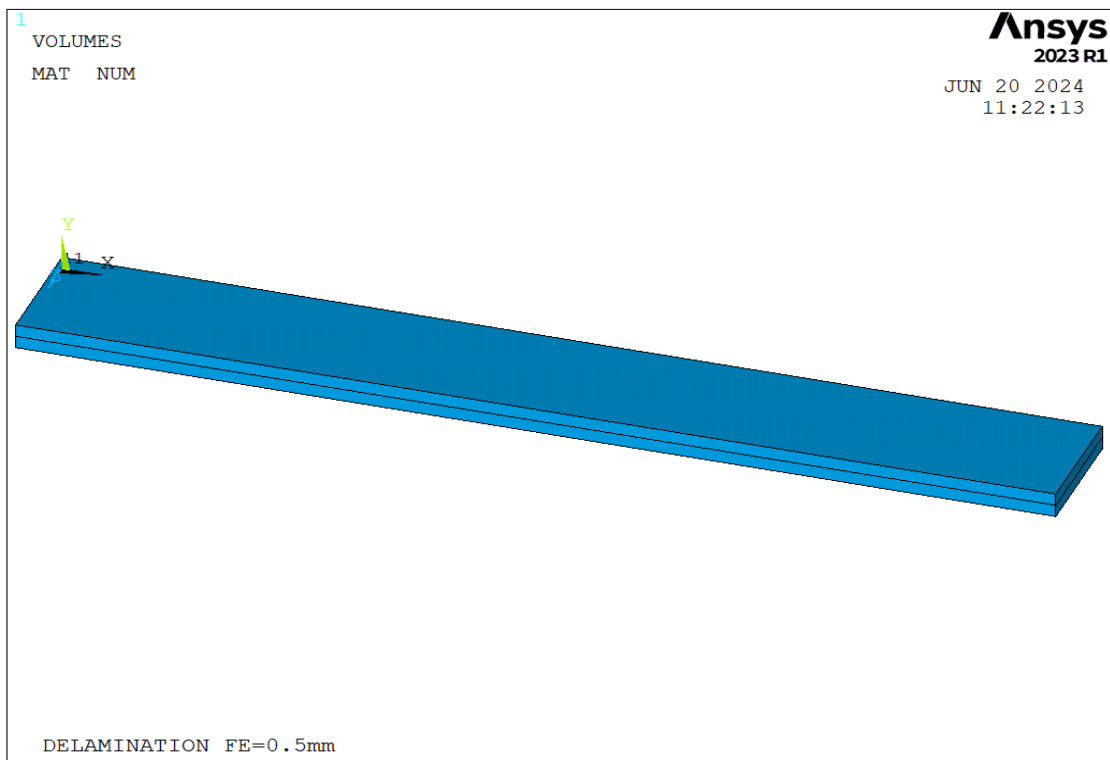
*А) Методика конечно-элементного численного моделирования процесса расслоения по моде I.*

Численное моделирование процесса расслоения по моде I образца типа ДКБ и расчет параметров трещиностойкости слоистых ПКМ с помощью, имплантированной в метод конечных элементов модели когезионной зоны (МКЗ), осуществляли на основе твердотельной геометрической модели, представленной на рис. 2.6 (а и б). Геометрическая модель строится в препроцессоре программного комплекса ANSYS с помощью инструментов создания твердотельных геометрических объектов.





a



б

Рисунок 2.6 - Задание параметров для геометрической модели (а) и общий вид в изометрии и в профиль 3D модели образца в виде ДКБ с основными размерами модели и заданной начальной трещиной (б).

В процессе создания модели для оценки трещиностойкости ПКМ при нагружении по моде I, задаются основные элементы и параметры материала.

Тип КЭ определяет число степеней свободы, его форму (одномерный, треугольный, четырехугольный и др.), размерность КЭ (линейный, изопараметрический). В конечно-элементной 3D-модели структуры ПКМ используются два элемента из библиотеки элементов: твердотельный (Solid185) и когезионный (Inter205), как представлено на рисунке 2.7 и 2.8.

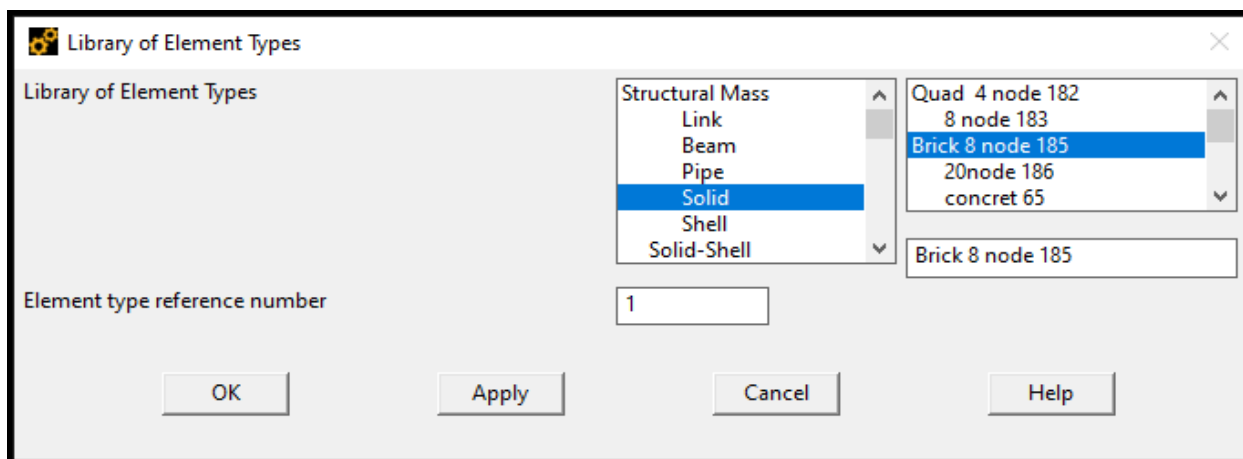


Рисунок 2.7 - Добавление твердотельных элементов.

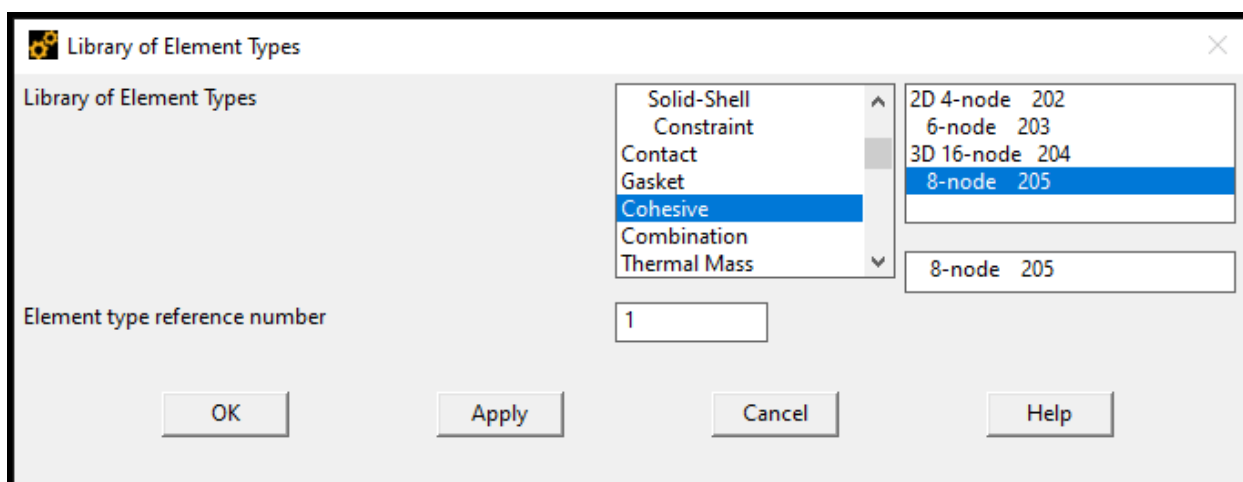


Рисунок 2.8 - Добавление когезионных элементов.

Для решения задачи расслоения применительно к межслоевому росту трещины в слоистых ПКМ используют метод когезионной зоны с применением специальных элементов интерфейса INTER202-205

(когезионные или интерфейсные элементы), которые располагаются между слоями материала в плоскости роста трещины.

После задания твердотельных и когезионных элементов, вводятся необходимые свойства материала, как показано на рисунке 2.9.

Для проведения моделирования процесса расслоения образца в виде ДКБ и расчетов параметров трещиностойкости в КЭ 3D модель импантируется билинейный ЗКЗ, задаются 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  $\nu_{12}$ ,  $\nu_{13}$ ,  $\nu_{23}$ ), параметры ЗКЗ - значения локальной когезионной прочности ( $\sigma_{IC}$ ), локальной деформации ( $\delta_{IC}$ ) (введение данных параметров и рассчитанное значение отношения  $\delta_{IC}/\delta_{I_{max}}$ , а так же безразмерный параметр  $\beta$  представлены на рисунке 2.10).

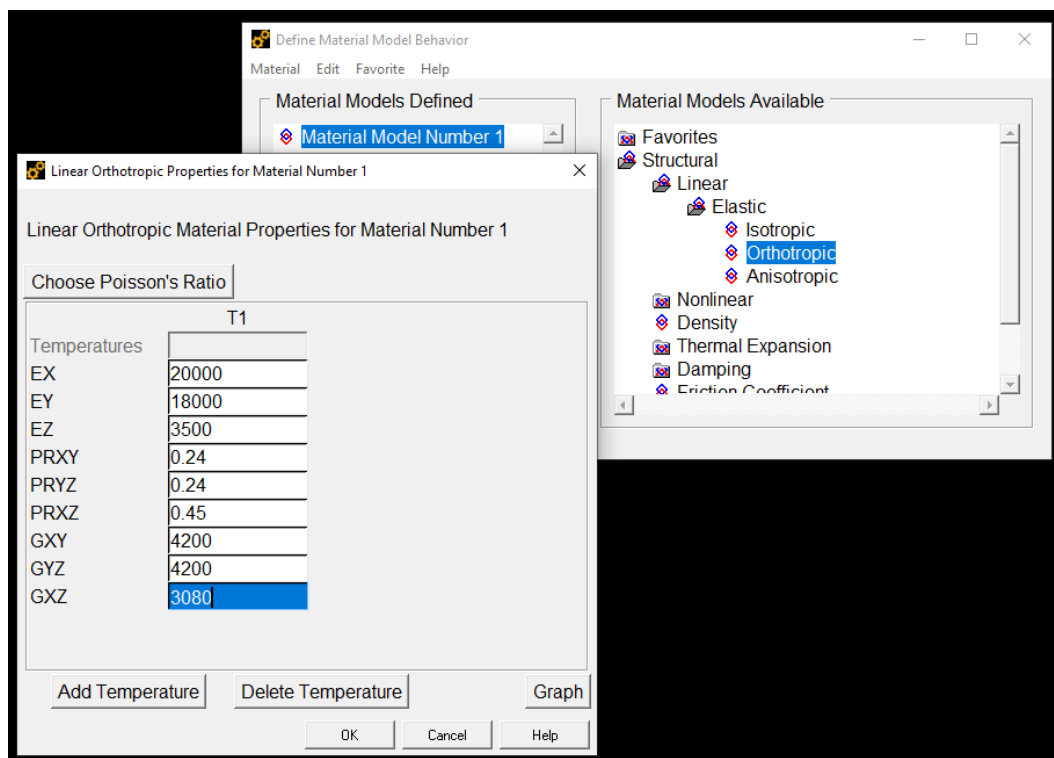


Рисунок 2.9 - Ввод упругих констант материала.

После введения свойств материала, создается когезионный слой, и задаются его свойства.

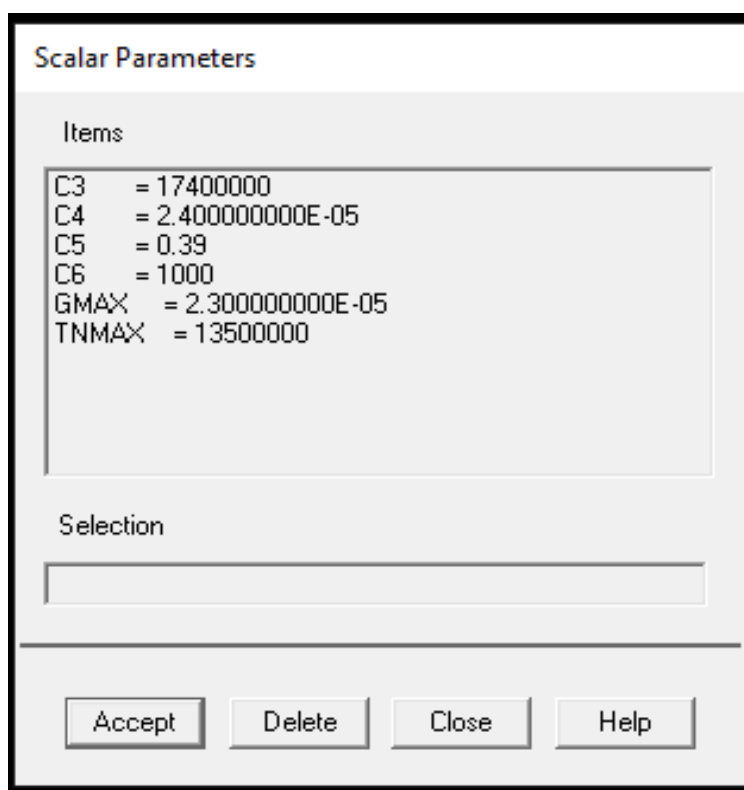


Рисунок 2.10 - Ввод скалярных параметров.

Чтобы разбить когезионный слой на интерфейсные элементы в командной строке прописывается, либо команда E или EGEN, либо команда CZMESH (для удаления элементов команда CZDEL).

Ввод билинейного типа ЗКЗ осуществляется командой:

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

Для проверки параметров материала необходимо войти в раздел главного меню препроцессора и во вкладке свойства материалов проверить наличие второго материала, как показано на рисунке 2.11.

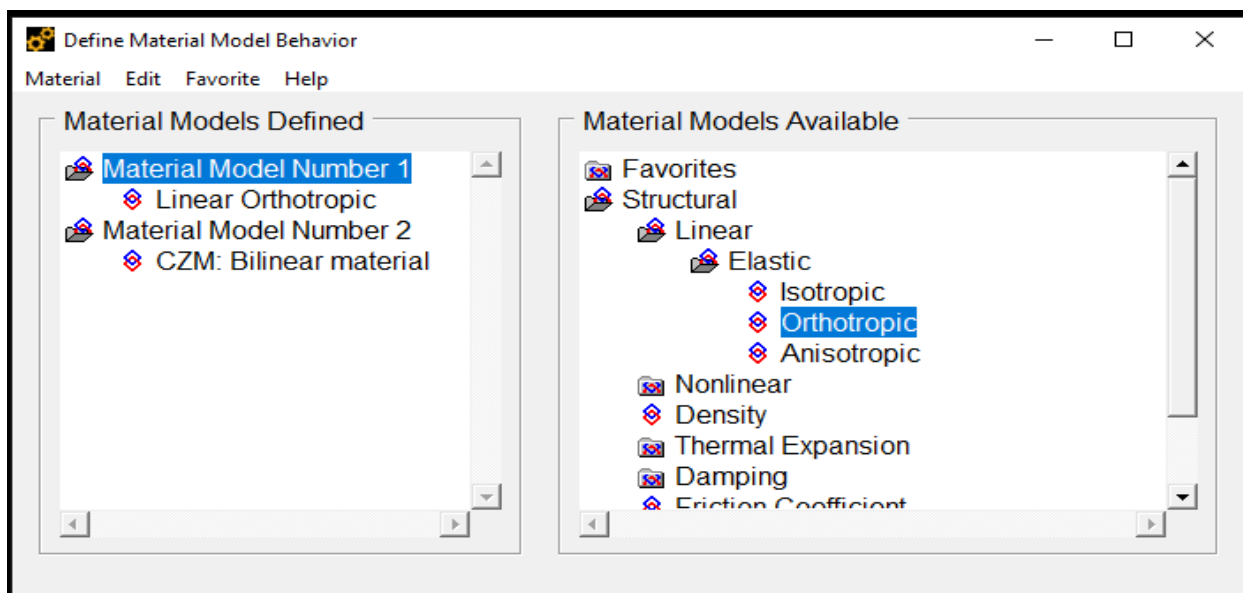


Рисунок 2.11 - Проверки параметров материала.

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 2.12:

- Тип интерфейсного элемента задается только командой ET;
- Закон расслоения задается набором команд TB,CZM,2,,BILI;
- Команда CZDEL удаляет элементы INTER20x из модели.

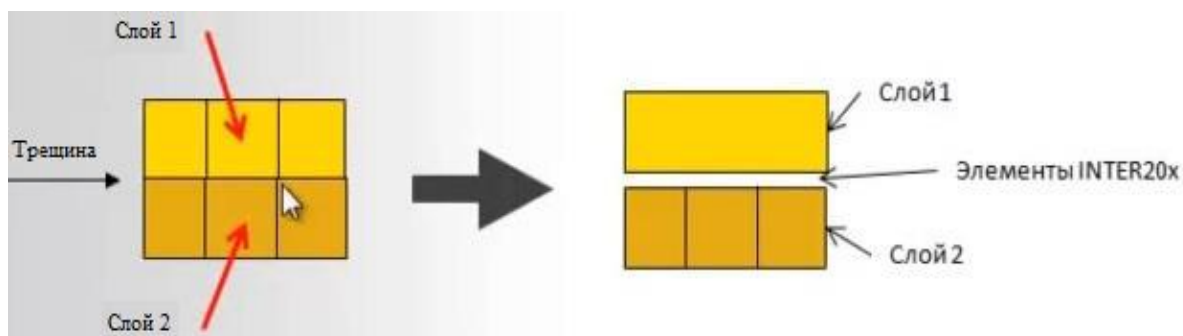


Рисунок 2.12 - Схема формирования интерфейсных элементов.

При моделировании расслоения, т.е. межслоевого роста трещины, в методе МКЗ/МКЭ могут быть применены различные ЗКЗ, чаще всего экспоненциальный и билинейный, причем оба этих метода наиболее физически обоснованы применительно к слоистым ПКМ, поэтому ниже описывается методика расчетов с применением этих ЗКЗ с опцией команды TВОРТ - BIL1 с общим набором команд ТВ,CZM,2,,,BIL1.

Метод МКЗ/МКЭ с билинейным ЗКЗ применяется совместно с интерфейсными элементами INTER20х. При этом требуется задание параметров для элементов INTER20х (TВОРТ - BIL1). Интерфейсные элементы позволяют моделировать зону расслоения, применяя команду ТВ,CZM,,,ВОРТ с командой BIL1 для задания билинейного закона поведения материала и командой ТВDATA для задания параметров, приведенных в таблице 9.

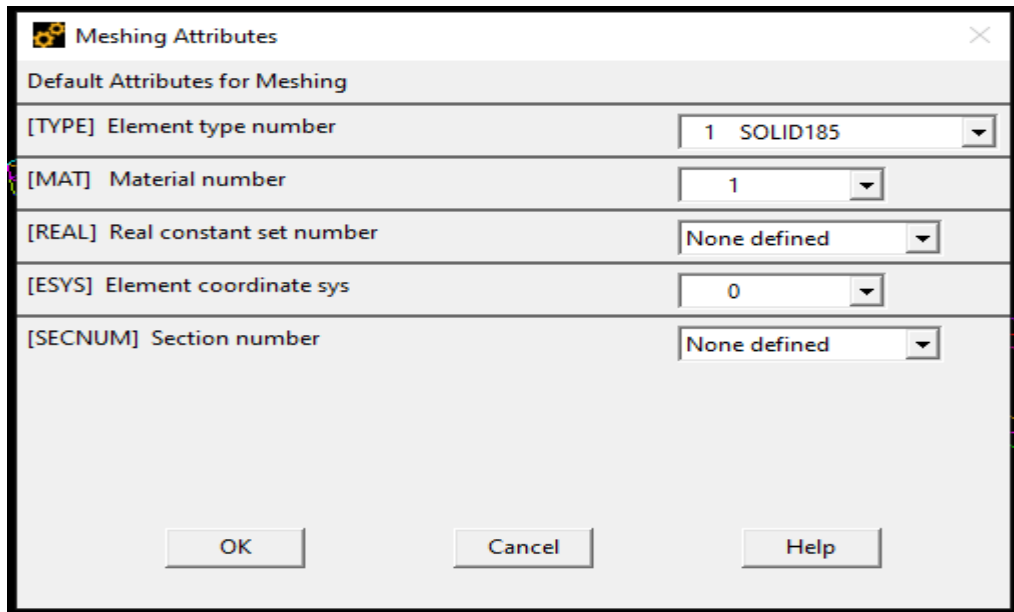
Таблица 9 - Параметры модели с билинейным ЗКЗ

Параметр	Обозначение	Описание
TN <sub>МАХ</sub>	$\sigma_{\max}$	Максимальное нормальное напряжение расслоения, Па
G <sub>МАХ</sub>	$\delta_{I\max}$	Максимальная величина деформации по нормали к поверхности при напряжении, при отсутствии сдвига слоев.
C3	$\tau_{\max}$	Максимальные сдвиговые напряжения расслоения, Па
C4	$\delta_{II\max}$	Максимальная величина деформации сдвига, при отсутствует нормального разрыв слоев, Па
C5	$\alpha$	Отношение $\delta_{IC} / \delta_{I\max}$ или $\delta_{IIC} / \delta_{II\max}$
C6	$\beta$	Безразмерный параметр

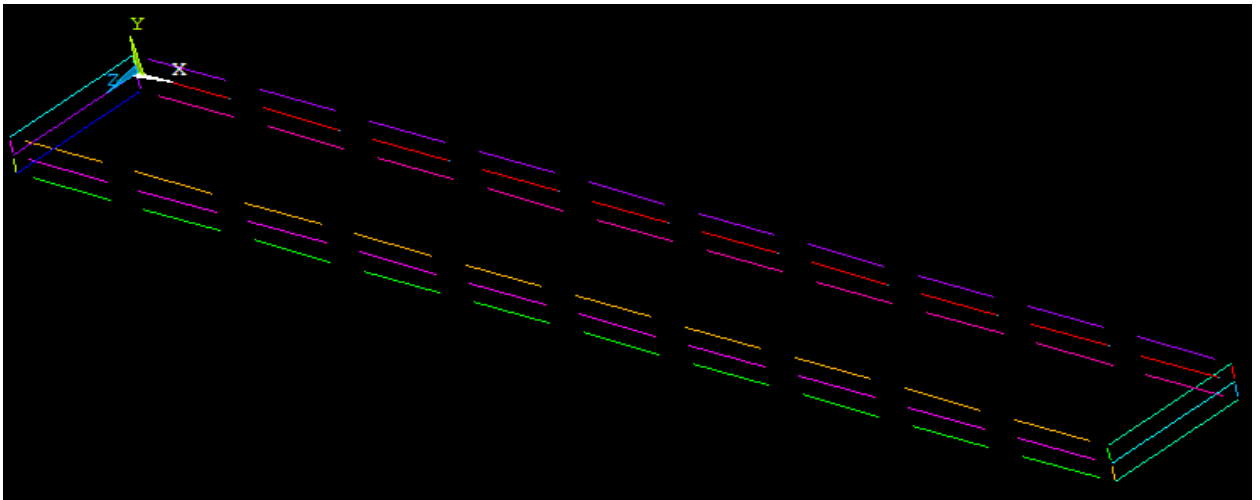
Для расчета использовались экспериментально определенные параметры ЗКЗ для каждого типа ПКМ.

После введения когезионного слоя, необходимо разбить полученную ДКБ и когезионный слой на конечные элементы. Для разбиения ДКБ на необходимое число конечных элементов нужно выделить границы двухконсольной балки с помощью функции Mesh tool в препроцессоре и с

помощью кнопки атрибуты элементов настроить параметры конечно элементной сетки. Данный алгоритм строит элементную сетку на самой модели ДКБ, как представлено на рисунке 2.13а-в.

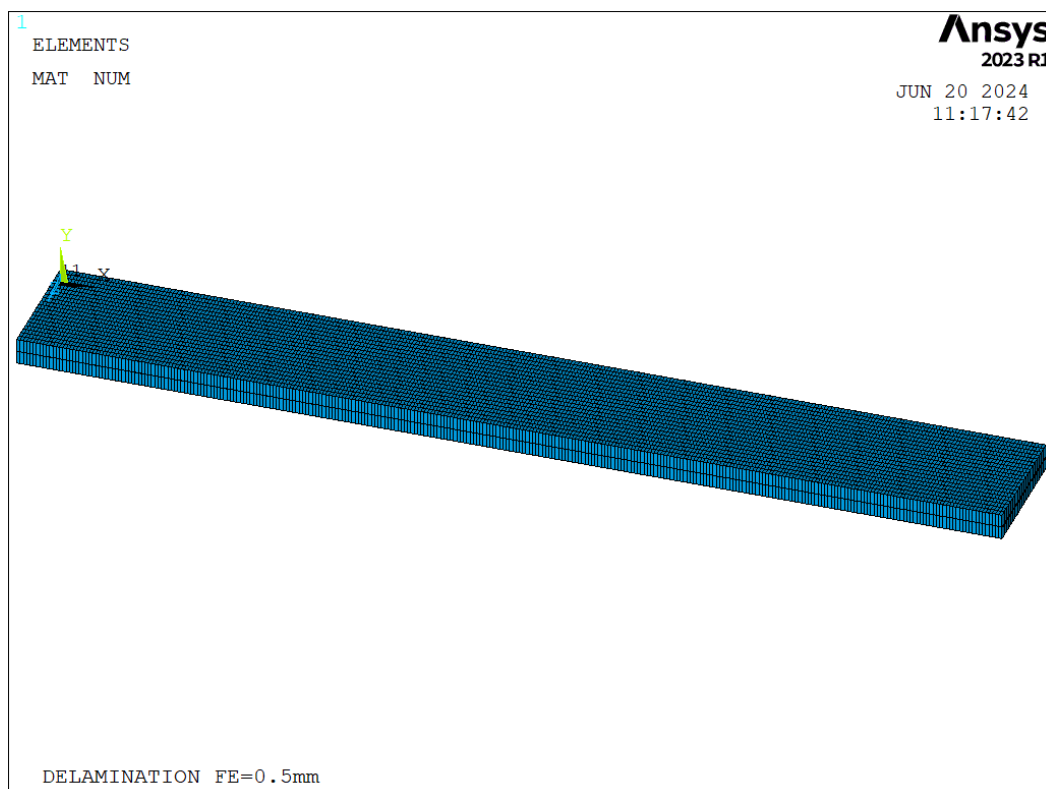


а



б





В

Рисунок 2.13 - Этапы разбиение твердотельных элементов ДКБ на КЭ.

После разбиения полубалок твердотельными элементами Solid 185 необходимо разбить когезионный слой на конечные элементы. С помощью функции Mesh tool выделяется граница контакта верхней и нижней части ДКБ. Следующим этапом является выделение всех узлов на границе двух частей ДКБ, т.е. задается место сцепления двух полубалок, как показано на рисунке 2.14 Теперь модель представляет из себя монолитный конструкт, в зоне сцепления.

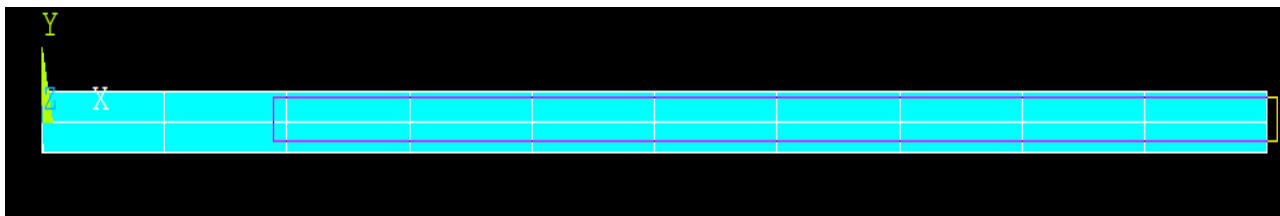
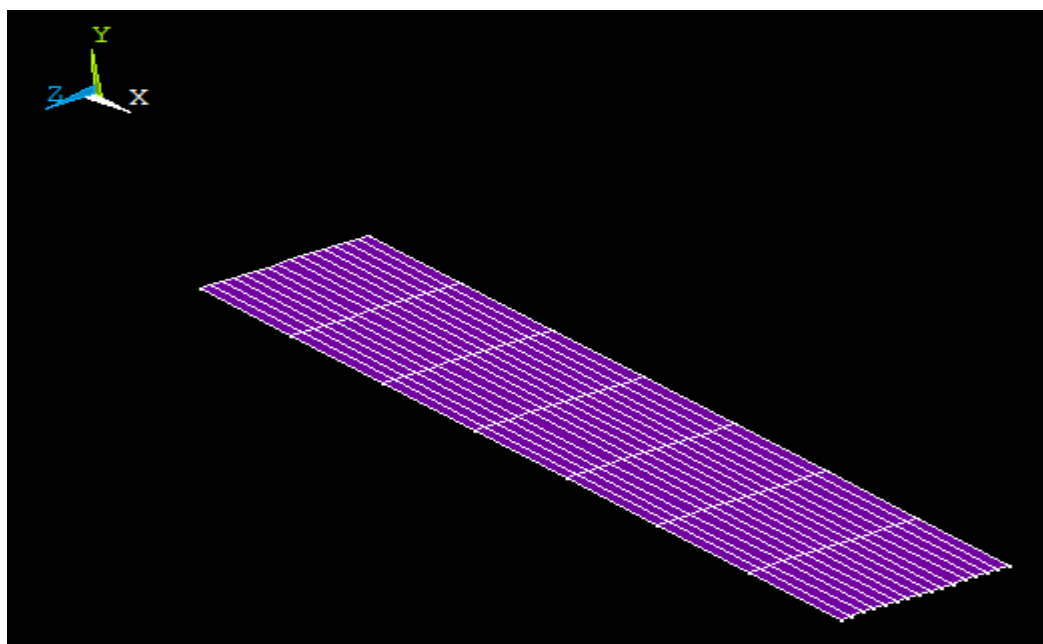


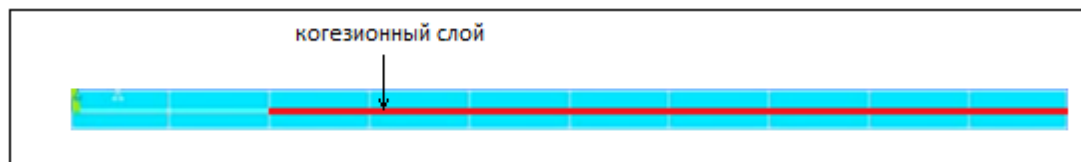
Рисунок 2.14 - Этапы выделения узлов в модели ДКБ.

Следующим этапом является связывание этих узлов с когезионным слоем с помощью функции Numbering ctrl => Merge items. После связывания

узлов и элементов с помощью командной строки задается функция CZMESH,,,1,Y,0, которая позволяет разбить когезионный слой на конечные элементы. В результате, задается взаимодействие между внутренними поверхностями геометрической модели и расположенным между ними когезионным слоем с разбивкой слоя на конечные интерфейсные элементы, как показано на рисунке 2.15а и б.



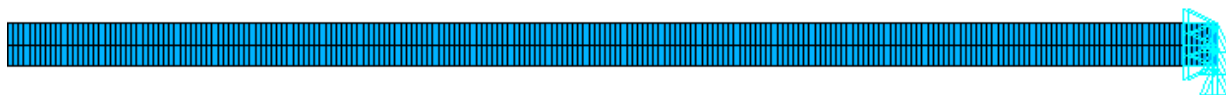
а



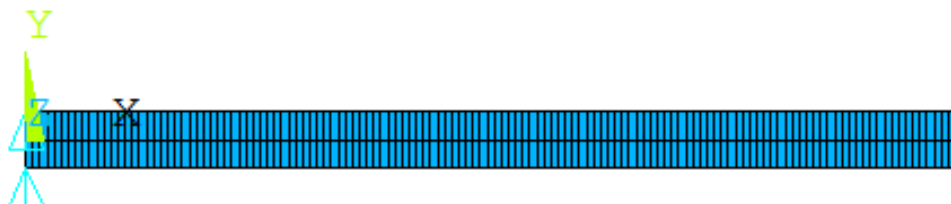
б

Рисунок 2.15 - Разбивка на конечные интерфейсные (когезионные) элементы (ИЭ) когезионного слоя (а) и его общий вид в модели образца типа ДКБ (б).

Следующим этапом является задание граничных условий и приложение нагрузок. Все эти функции реализованы с помощью вкладки Solution. В разделе Solution выбирается функция Define loads и части ДКБ, к которым прикладывается нагрузка и те части, которые фиксируются. Поэтапный процесс приложения нагрузок и фиксации конца ДКБ представлен на рисунке 2.16.



а



б

Рисунок 2.16 - Фиксация ДКБ (а) и приложение нагрузок к верхней и нижней части (б) ДКБ.

Заключительным этапом создание конечно-элементной модели является задание параметров расчета: количество шагов моделирования, частота сохранения результатов и варианты анализа, как представлено на рисунке 2.17.

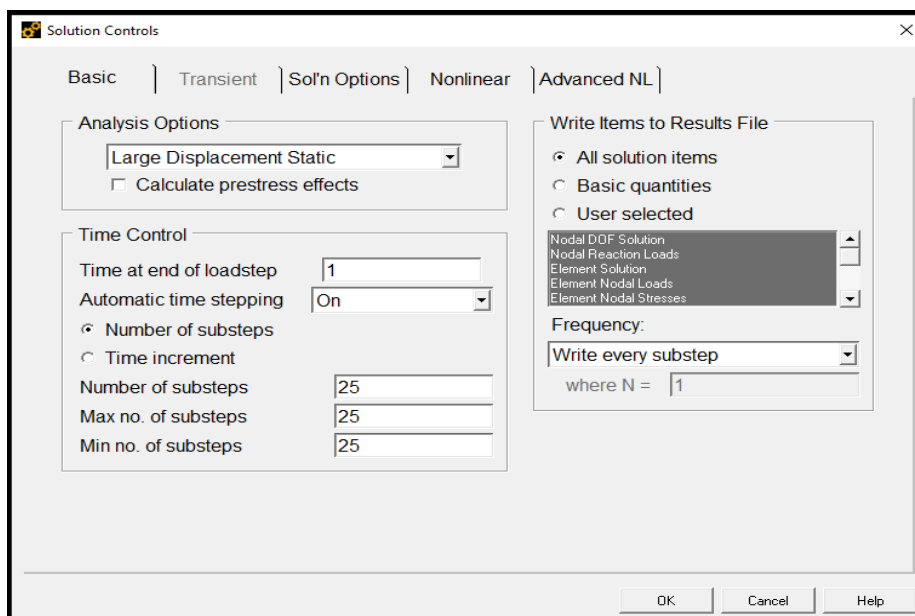
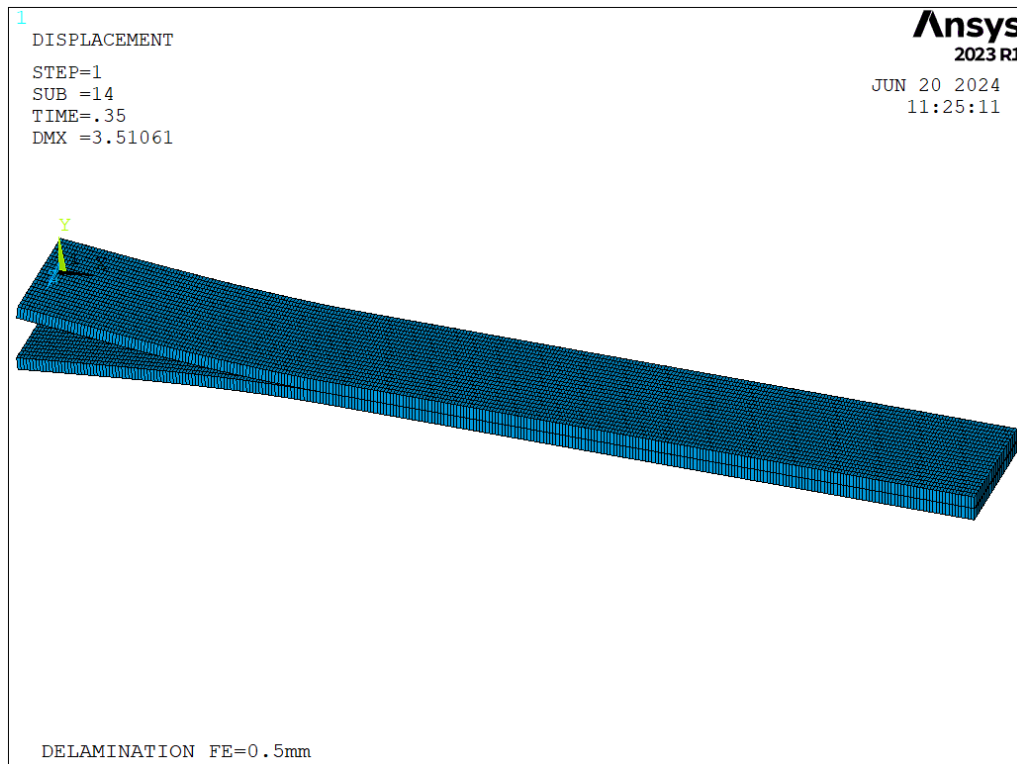


Рисунок 2.17 - Параметры расчета процесса расслоения ДКБ.

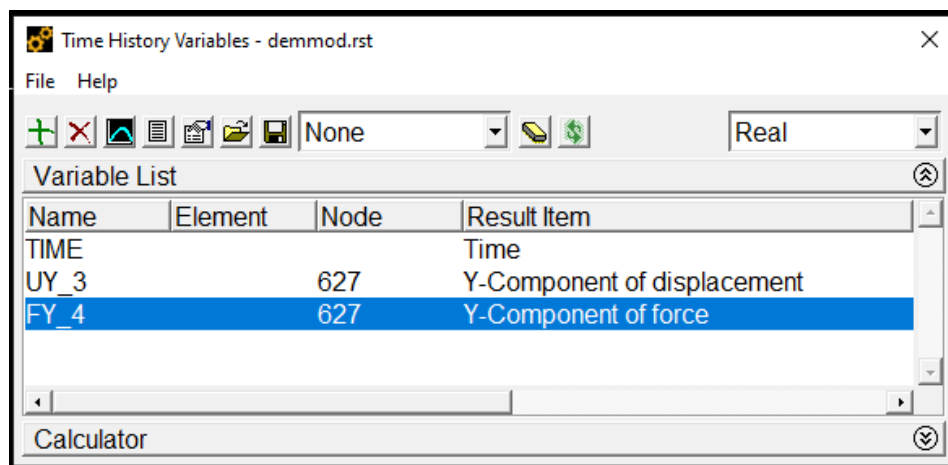
После введения всех необходимых параметров запускается процесс расчета модели расслоения ДКБ с когезионным слоем. Объем расчетов и

скорость моделирования зависят от количества КЭ и ИЭ, заложенных в модель. Соответственно, чем большее количество элементов используется в модели, тем точнее результаты и больше время счета. Поэтому необходимо найти оптимальное количество элементов в модели, достаточное для адекватного результата.

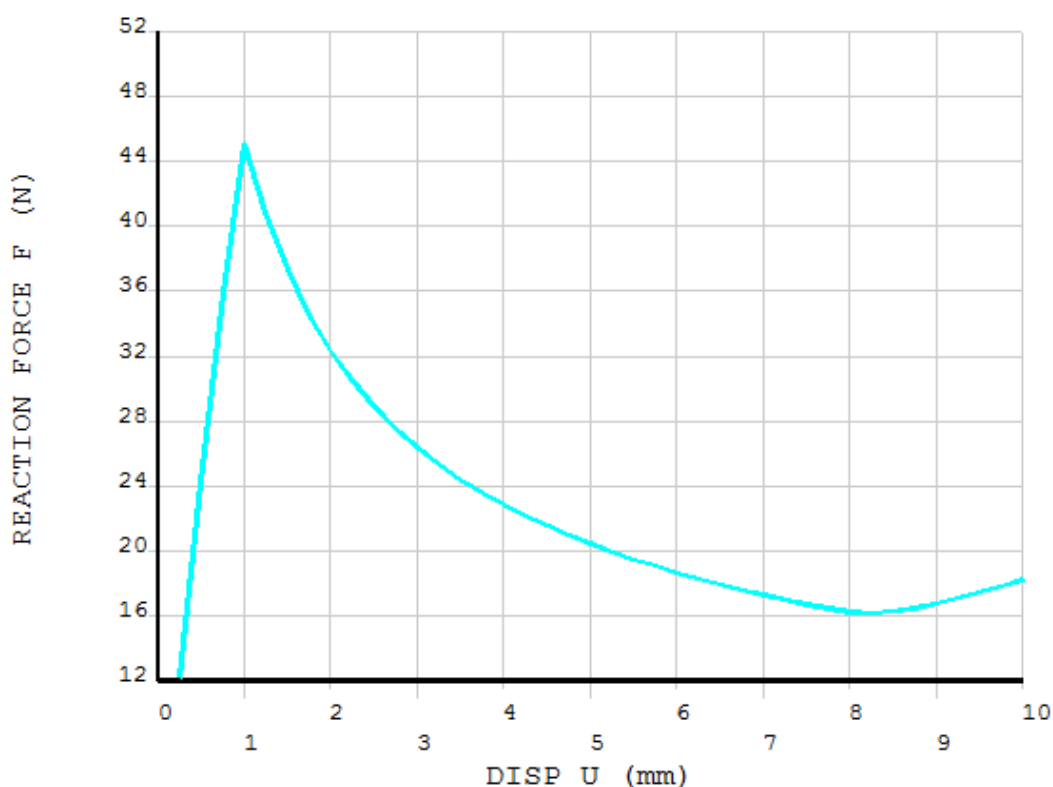
После завершения моделирования виртуального расслоения ДКБ (рисунок 2.18а) в постпроцессоре программного комплекса анализируются результаты вычислений. После того как модель снова собрана в изначальное нераскрытое состояние, необходимо построить график зависимости нагрузки на края трещины от величины раскрытия трещины (рисунок 2.18б). При выбранном размере (длине) и, соответственно, количестве конечных интерфейсных элементов, которые располагаются впереди фронта трещины в зоне концентрации напряжений, строится расчетная кривая в координатах усилие-раскрытие трещины (P- $\Delta$ ) рисунок 2.18в.



а



б

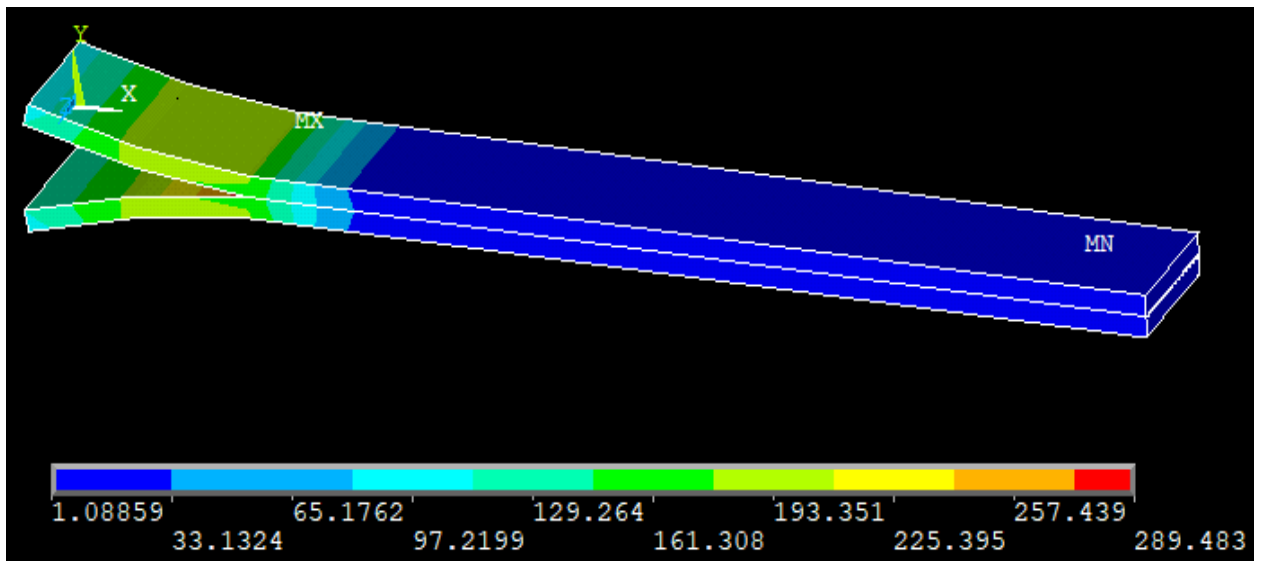


в

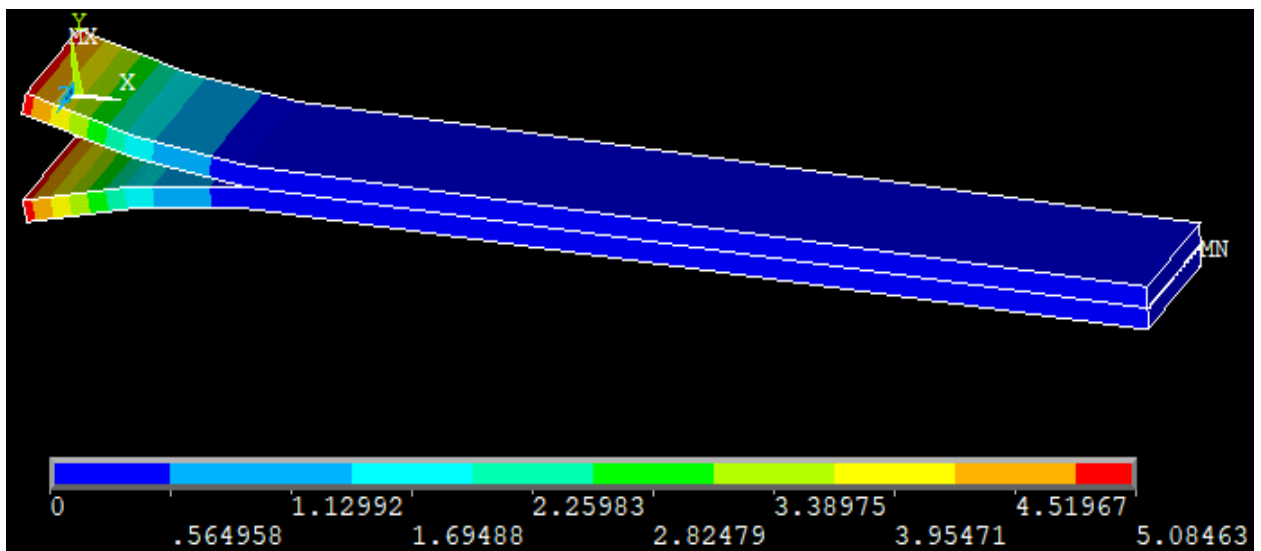
Рисунок 2.18 - Виртуальное расслоение ДКБ (а), окно вывода параметров графика (б), расчетная зависимость усилие-раскрытие трещины (в).

Визуализация результатов расчета на элементах INTER20x достигается просмотром нормальных напряжений в /POST1 или /POST26 SS, X и SS, XY рисунок 2.19а. Деформированное состояние ДКБ, представлено на рисунке 2.19б.

Узнать численное значение напряжения в когезионной зоне в любой точке, можно с помощью постпроцессора программы и функции результаты на участке ДКБ (для вывода изображения используются команды PLxSOL, PRxSOL или ESOL.), затем выбирается когезионный элемент и выводится распределение напряжений в когезионном слое. На рисунке 2.20 представлено распределение нормальных напряжений на элементах INTER205, расположенных по длине когезионной зоны, где разрушенные элементы - с нулевыми напряжениями.



а



б

Рисунок 2.19 - Распределение нормальных напряжений по оси Y (а) и деформирование состояние ДКБ (б).

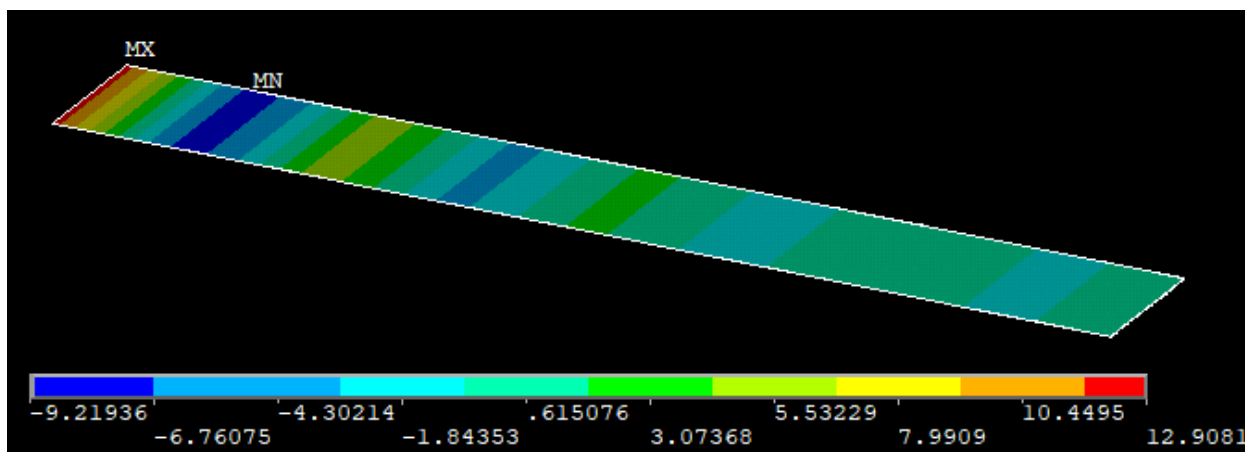


Рисунок 2.20 - Распределение напряжений в когезионном слое по оси X.

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

Для элементов INTER20x, работа по расслоению принимается одной и той же для режимов Mode I и Mode II. Элементы INTER20x не учитывают повреждаемость, в случае циклических нагрузок.

#### **б) Методика конечно-элементного численного моделирования процесса расслоения по моде II.**

Для численного моделирования процесса расслоения по моде II образца типа БКН и расчета параметров трещиностойкости слоистых ПКМ с помощью, импантированной в метод конечных элементов модели когезионной зоны, использовали такую же геометрию модели и свойства ПКМ, как и для моделирования расслоения по моде I (рис. 2.6).

Численное моделирование процесса расслоения по моде II отличается заданием граничных условий и приложением нагрузки. Процесс приложения нагрузки и фиксации опор БКН при трехточечном изгибе представлен на рисунке 2.21.

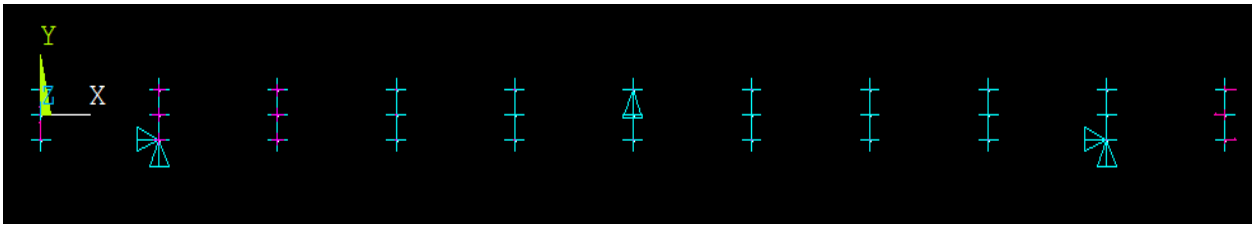
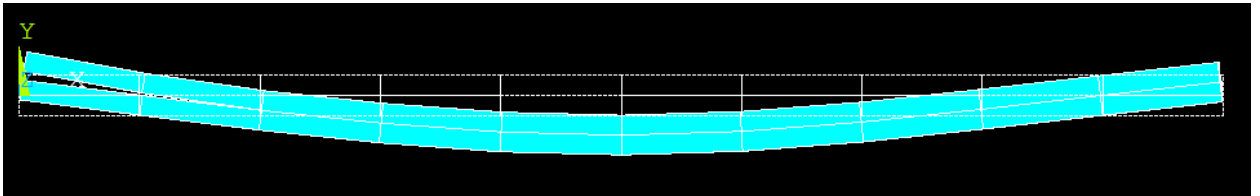
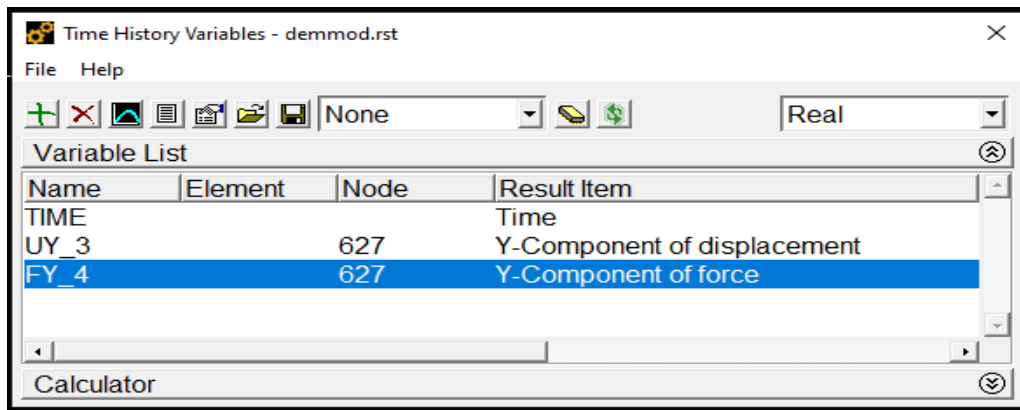


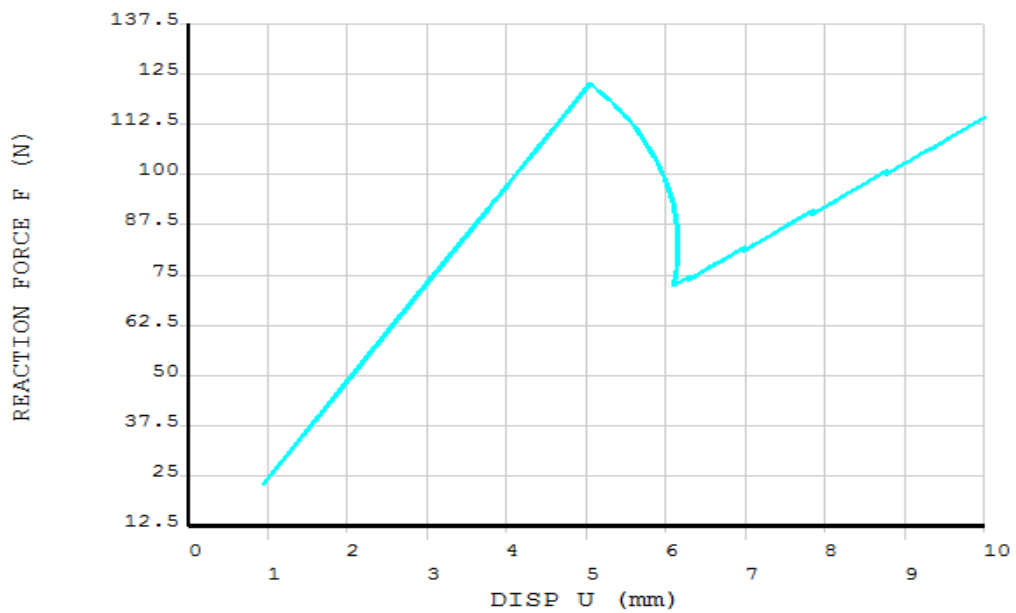
Рисунок 2.21 - Фиксация опор и приложение нагрузок к БКН.



а



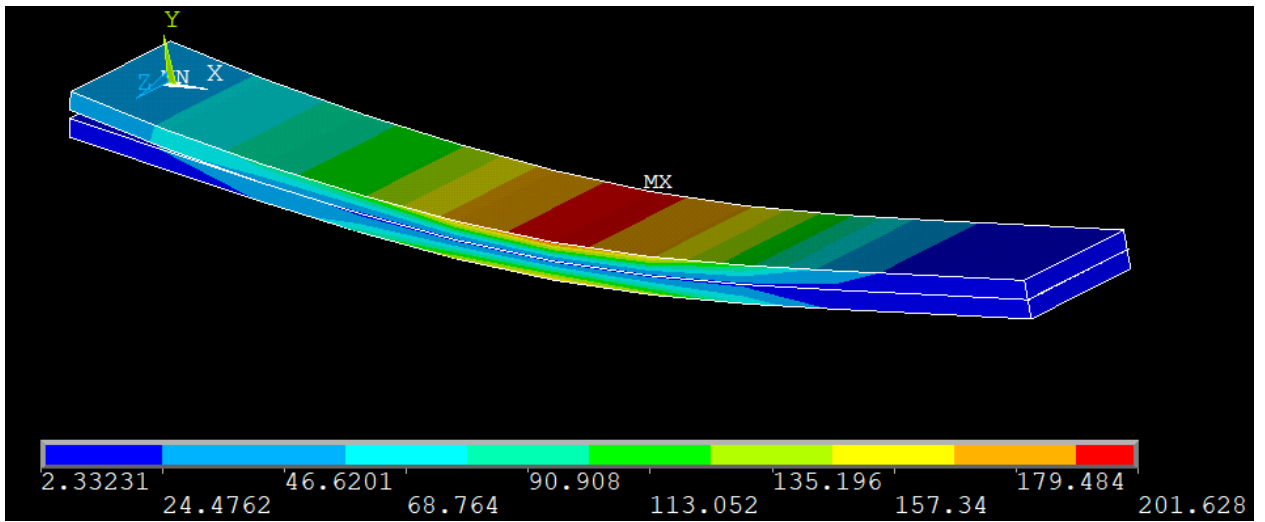
б



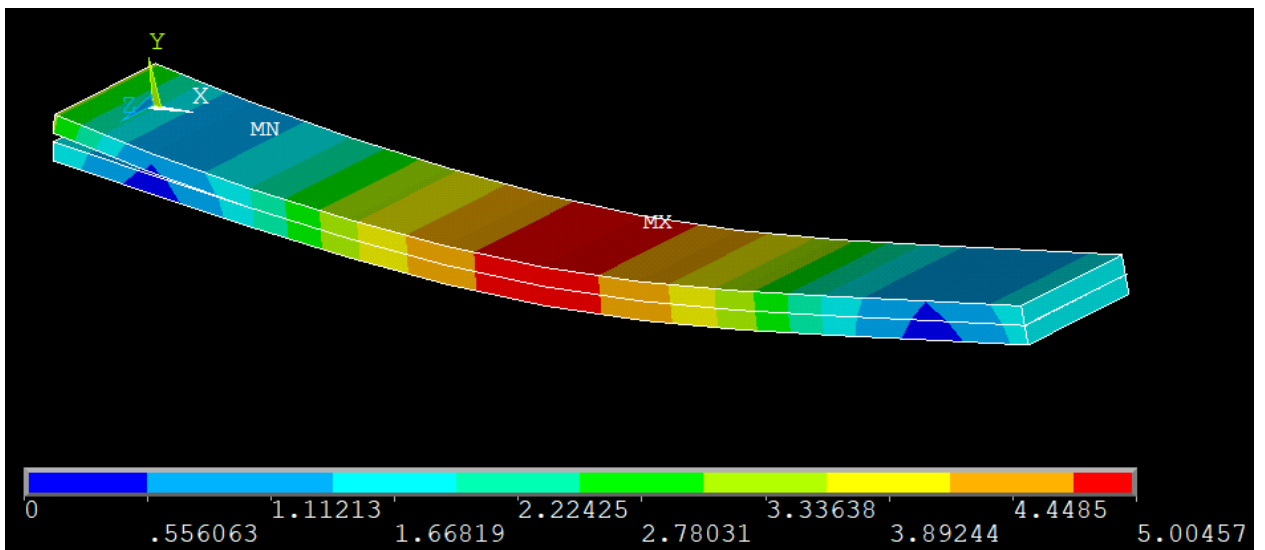
в

Рисунок 2.22 - Виртуальное расслоение БКН (а), окно ввода параметров усилие-раскрытие (б), расчетная зависимость усилие-раскрытие трещины (в).





а



б

Рисунок 2.23 - Распределение нормальных напряжений по оси Y (а) и деформирование состояние БКН (б).

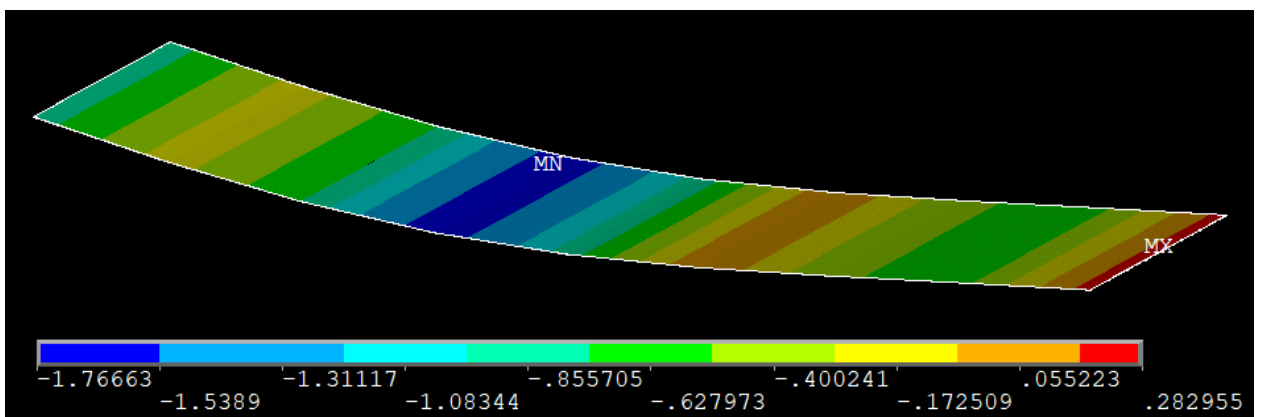
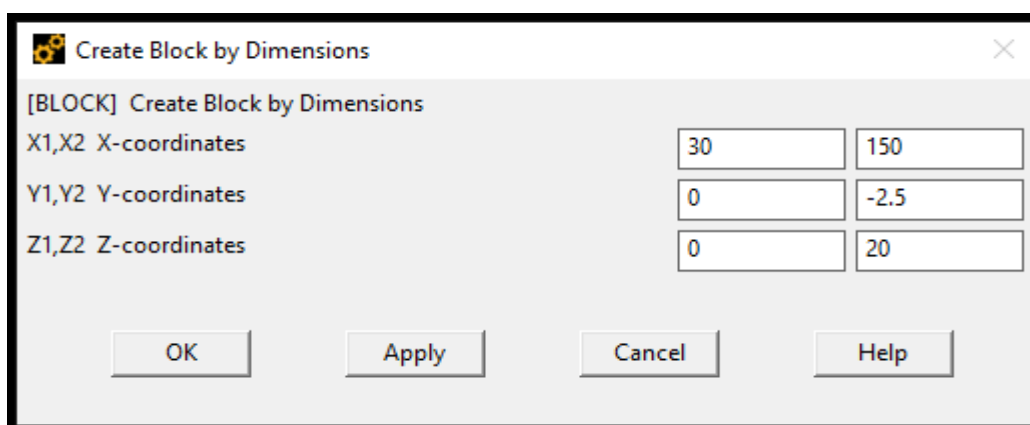
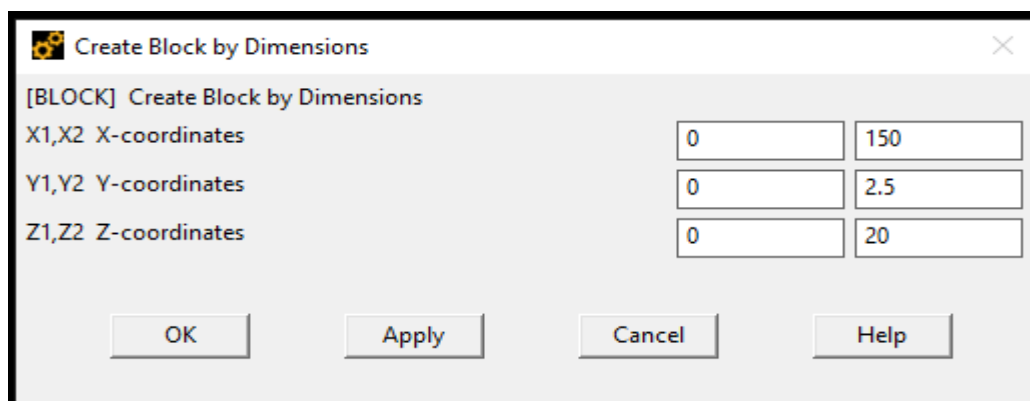


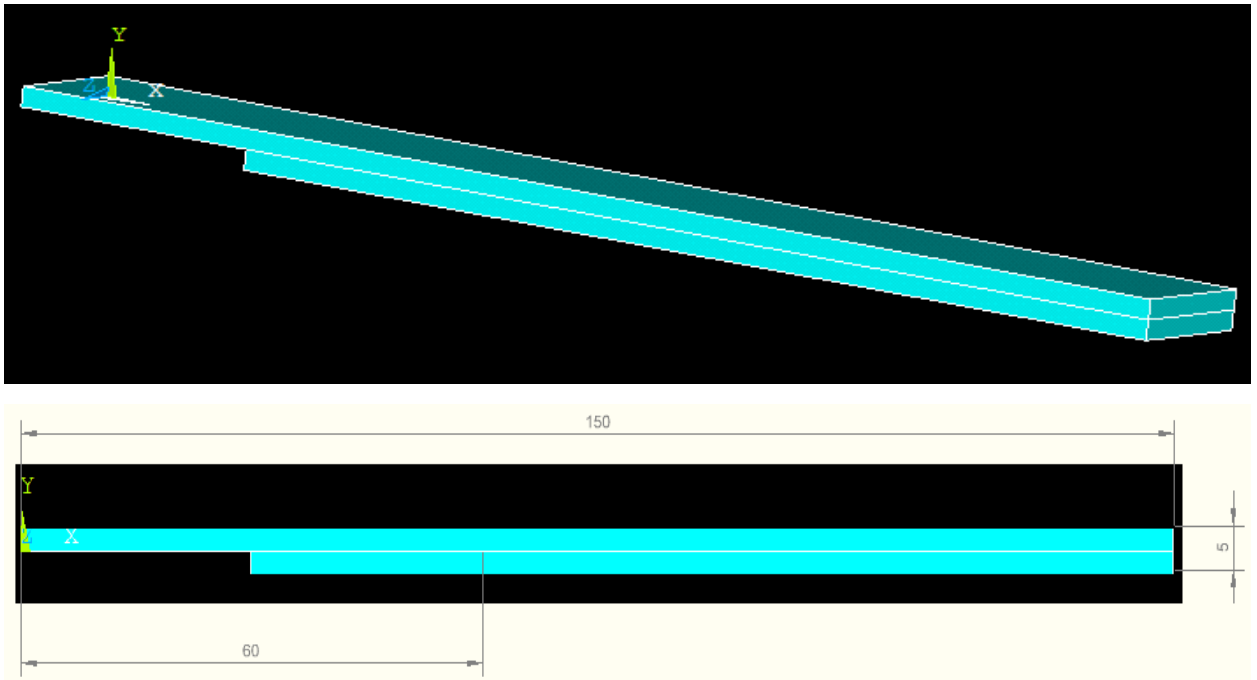
Рисунок 2.24 - Распределение напряжений в когезионном слое по оси X.

**в) Методика конечно-элементного численного моделирования процесса расслоения при комбинированном нагружении по модам I/II.**

Для численного моделирования процесса расслоения при комбинированном нагружении по модам I/II образцов типа OLB и SLB и расчета параметров трещиностойкости слоистых ПКМ с помощью, имплантированной в метод конечных элементов (МКЭ) модели виртуального закрытия трещины (ВЗТ) использовали геометрическую модель образца (рисунок 2.25а и б). Создание геометрической модели осуществлялось в препроцессоре программного комплекса ANSYS с помощью инструментов геометрического моделирования.



a



б

Рисунок 2.25 - Задание параметров геометрической модели (а) и общий вид 3D модели образцов в виде OLB и SLB с основными размерами и заданной начальной трещиной (б).

В процессе создания модели для оценки трещиностойкости ПКМ при комбинированном нагружении, задаются основные элементы и параметры материала. В отличие от моделей с индивидуальными модами нагружения в данном случае используется только один твердотельный Solid185 элемент из библиотеки элементов (рисунок 2.26).

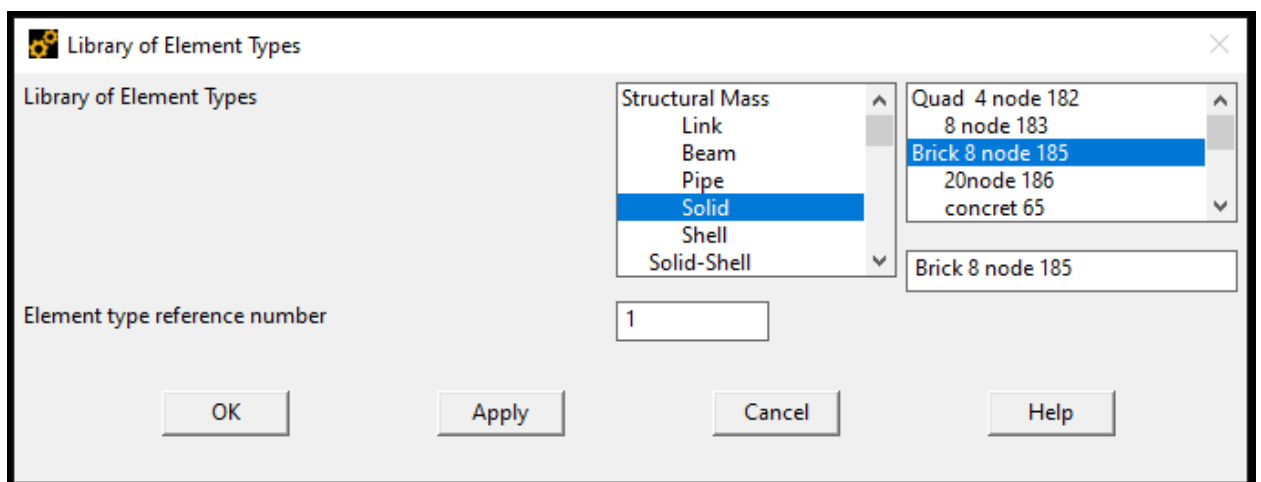


Рисунок 2.26 - Выбор твердотельного объёмного элемента Solid 185.

В данной модели ВЗТ скалярные параметры относятся не к отдельной когезионной зоне, как в МКЗ, а к основному материалу и включают в себя показатели его ТС по моде I ( $G_{IC}$ ) II ( $G_{IIC}$ ) и материальную константу в уравнении критерия разрушения. В ANSYS доступны несколько критериев разрушения, в том числе критерий Бензегга-Кеннана (Б-К), который выбирается для данной модели и подробно рассмотрен в подразделе 1.2.1 гл.1 (уравнения 1.2 г,е). Материальной константой в этом критерии служит показатель степени в уравнении Б-К  $\eta$  (уравнение 1.2ж).

Моделирование роста трещины при смешанной моде нагружения в МВЗТ осуществляется по алгоритму и с допущениями, изложенными разделе 1.2.3а, показанными на рис.1.16 и 1.17 в гл.1, с помощью объединенной команды CZ MESH или стороннего инструмента, который генерирует элементы интерфейса.

После задания свойств материала полученная твердотельная геометрическая модель разбивается на конечные элементы. На рисунке 2.27 представлена конечно-элементная (КЭ) модель образца с укороченной ножкой (нижней частью края трещины) для обоих типов приложения изгибающей нагрузки УПБ (OLB) и ОПБ (SLB).

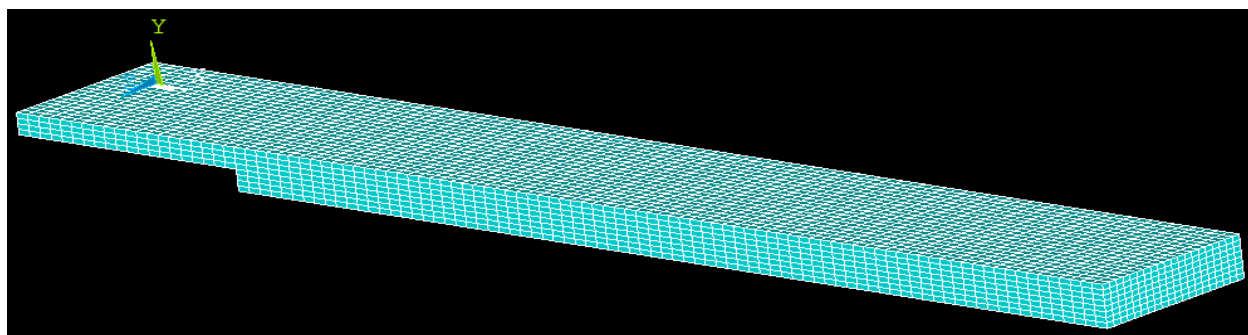


Рисунок 2.27 - КЭ модель образца с укороченной ножкой.

Следующим этапом является выделение всех узлов двух частей моделей образцов OLB и SLB, т.е. задается место сцепления двух полубалок, как показано на рисунке 2.28. Теперь модель представляет собой монолитную структуру, в зоне сцепления.

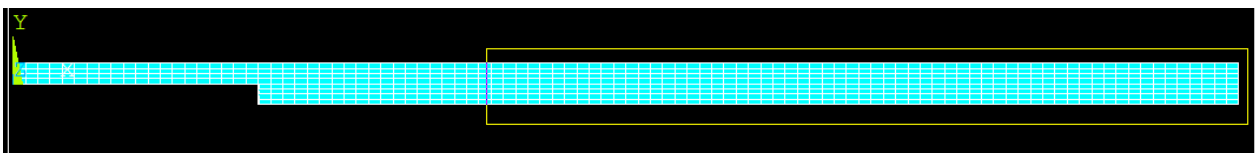
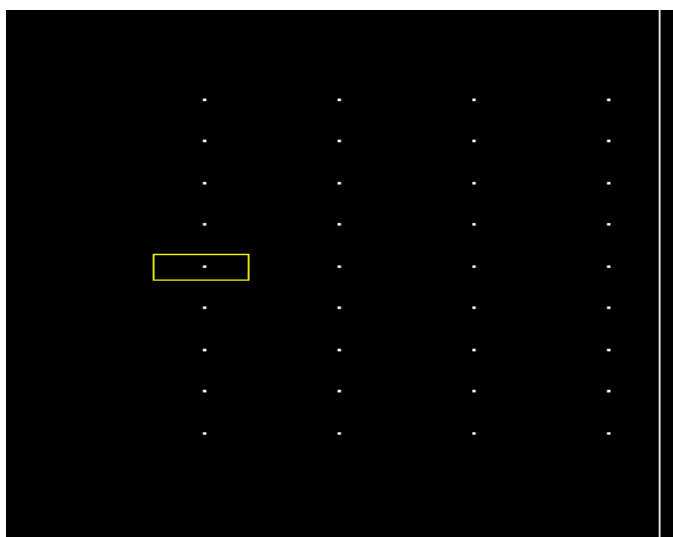
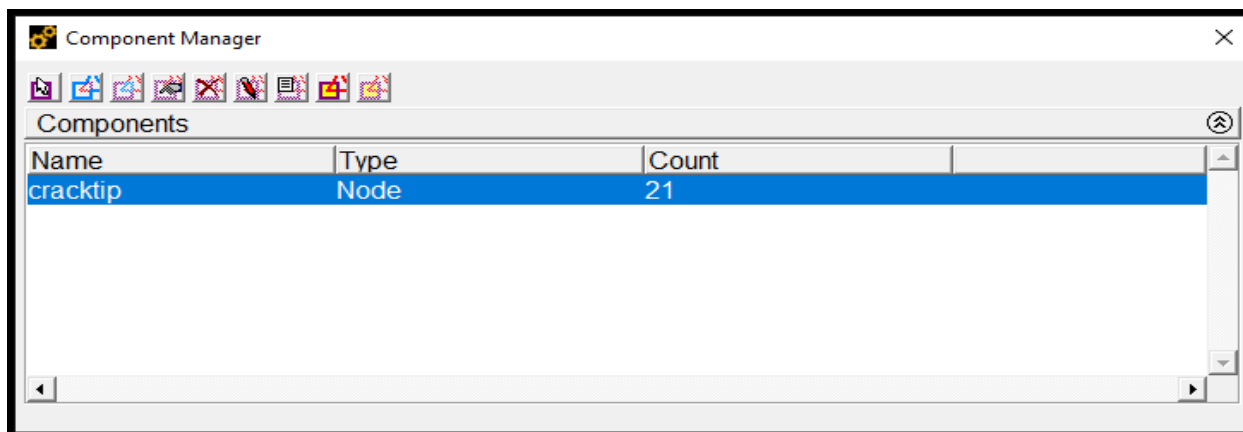


Рисунок 2.28 - Этап выделения зоны сцепления КЭ в модели образца.

Следующим этапом является задания вершины трещины и добавление узлов, соответствующих вершине трещины в окно компонентов, как показано на рисунке 2.29а и б.



а



б

Рисунок 2.29 - Этап задания начальной трещины: выбор числа узлов (а) и выделение узлов (б).

Следующим этапом является задания граничных условий и приложение нагрузок. Все эти функции реализованы с помощью вкладки Solution. В окне Solution выбирается функция Define loads и прикладывается

нагрузка, т.е. имитируется процесс испытаний на изгиб с поэтапным приложением нагрузки в заданном месте для образцов типа УПБ (SLB) и ОПБ (OLB) и SLB при фиксации концов на опорах (рис. 2.30).

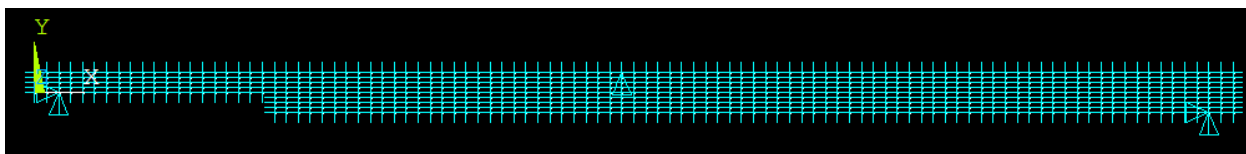
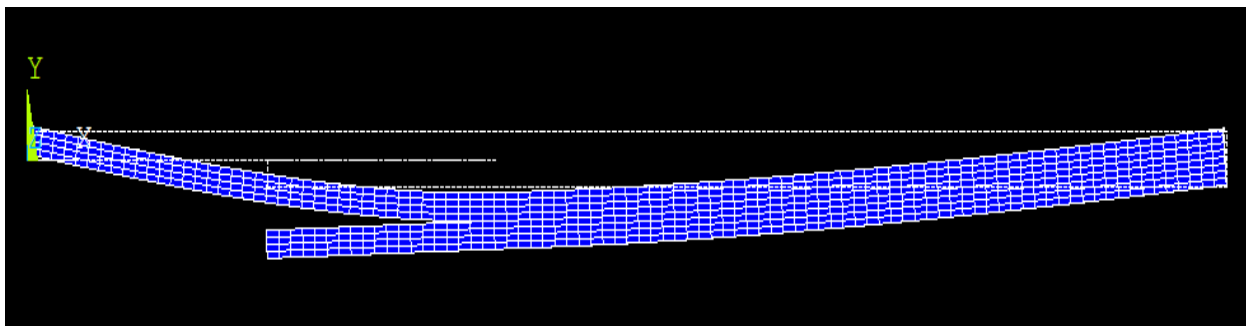


Рисунок 2.30 - Пример фиксации на опорах и приложение нагрузки к образцу типа УПБ (SLB).

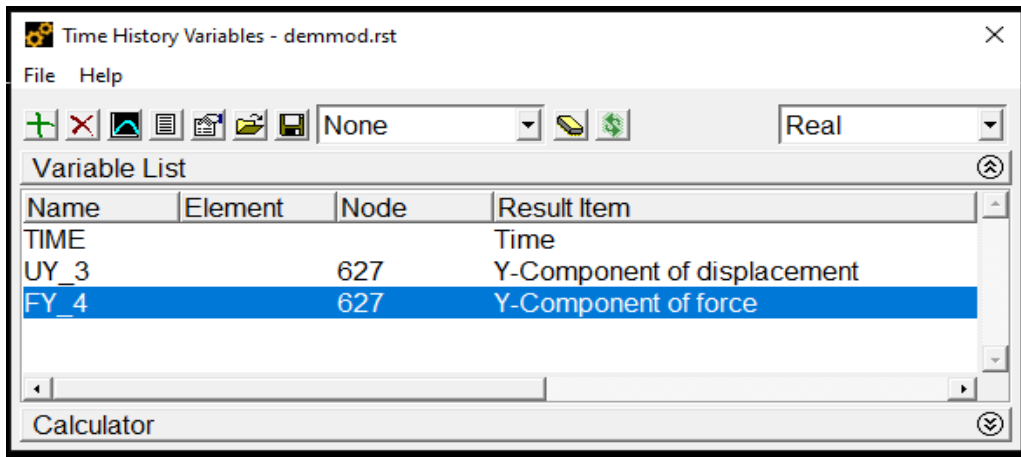
Следующим этапом является ввод группы команд спецификации MB3T (VCCT): `CINT,NEW,1>CINT,TYPE,VCCT>CINT,CTNC,CRACKTIP>CINT,SYMM,OFF>CINT, NORMAL` с помощью которых после введения всех необходимых параметров запускается процесс моделирования расслоения образцов.

После завершения моделирования виртуального расслоения образца в постпроцессоре программного комплекса анализируются результаты вычислений. Ниже приведены примеры основных результатов моделирования расслоения при комбинированном нагружении.

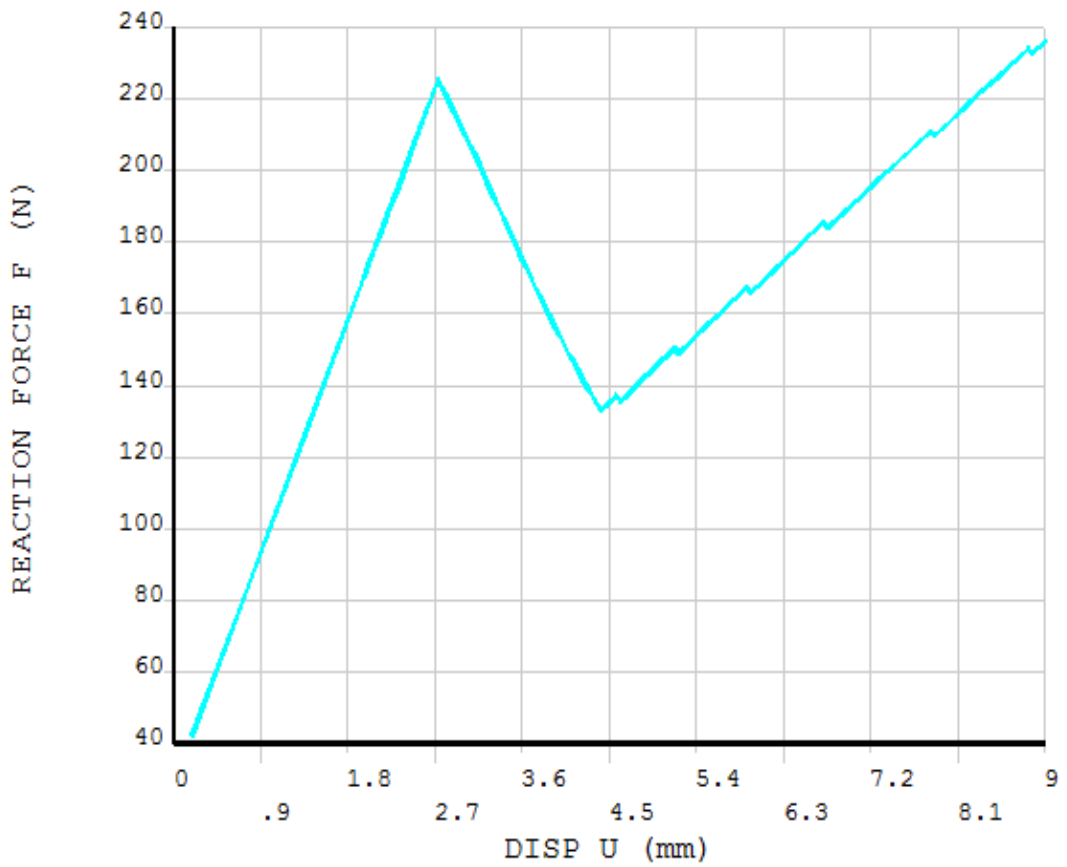
На рис. 2.31а-г показаны изображение виртуального расслоения образца типа УПБ (SLB) или ОПБ (OLB) (а), окно ввода параметров графика усилие-смещение (б) и примеры рассчитанных графиков зависимости усилие-смещение (прогиб) образцов типа УПБ (SLB) или ОПБ (OLB) (в).



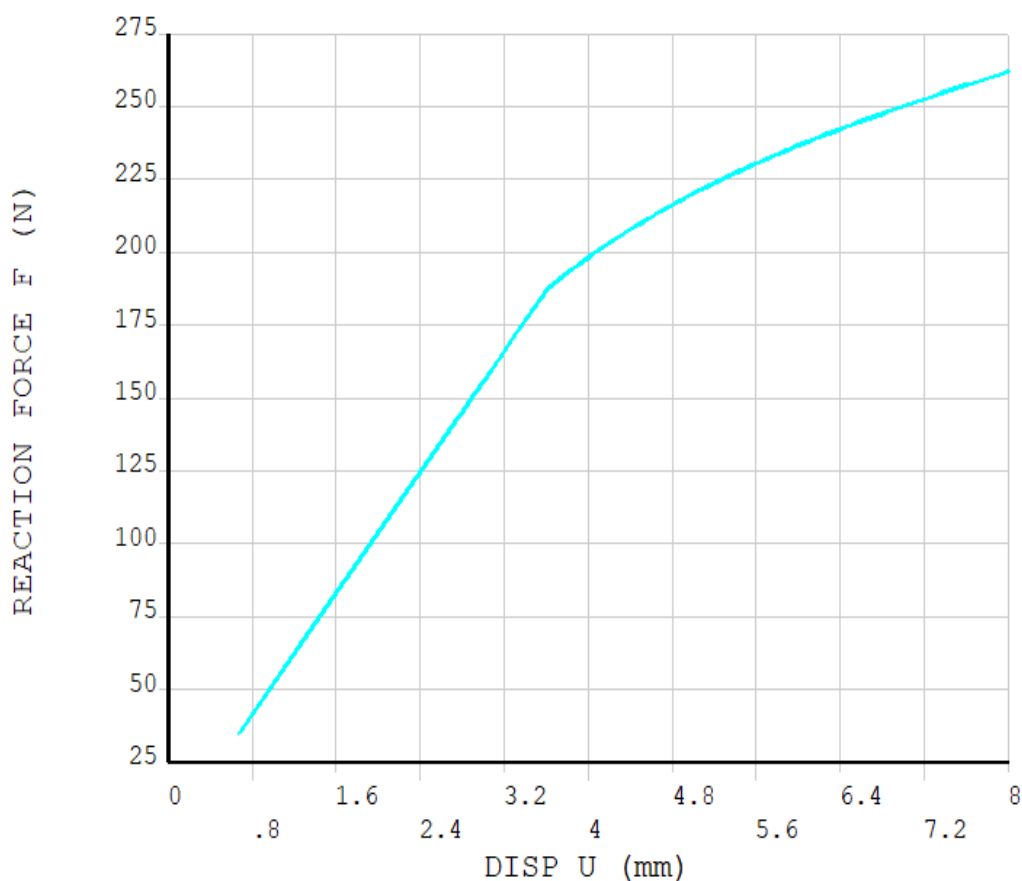
а



6



B

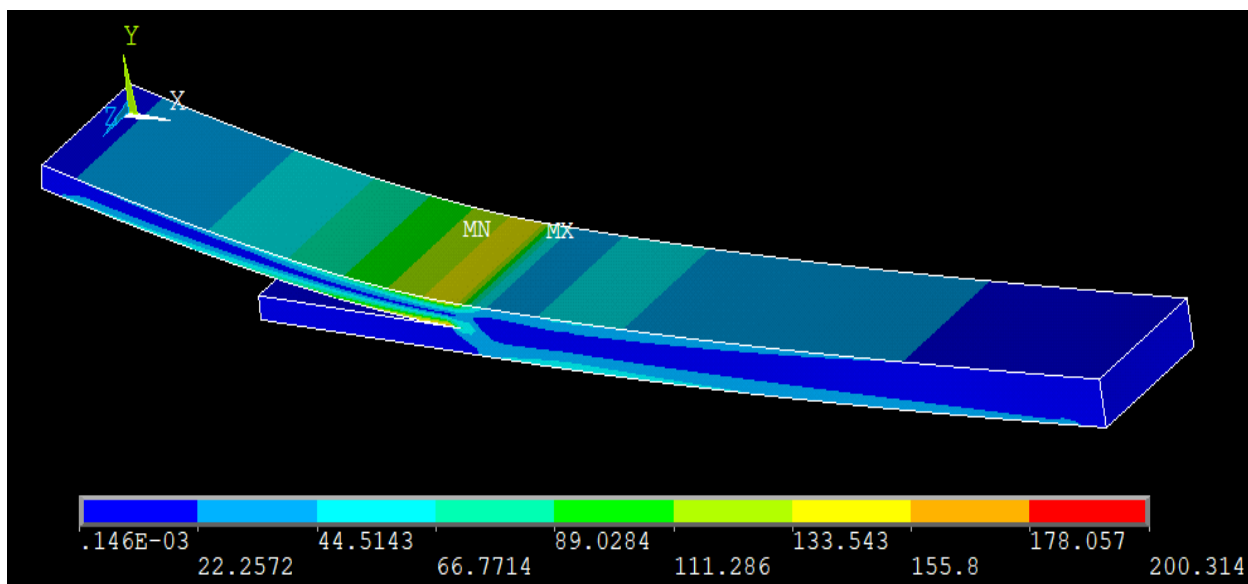


Г

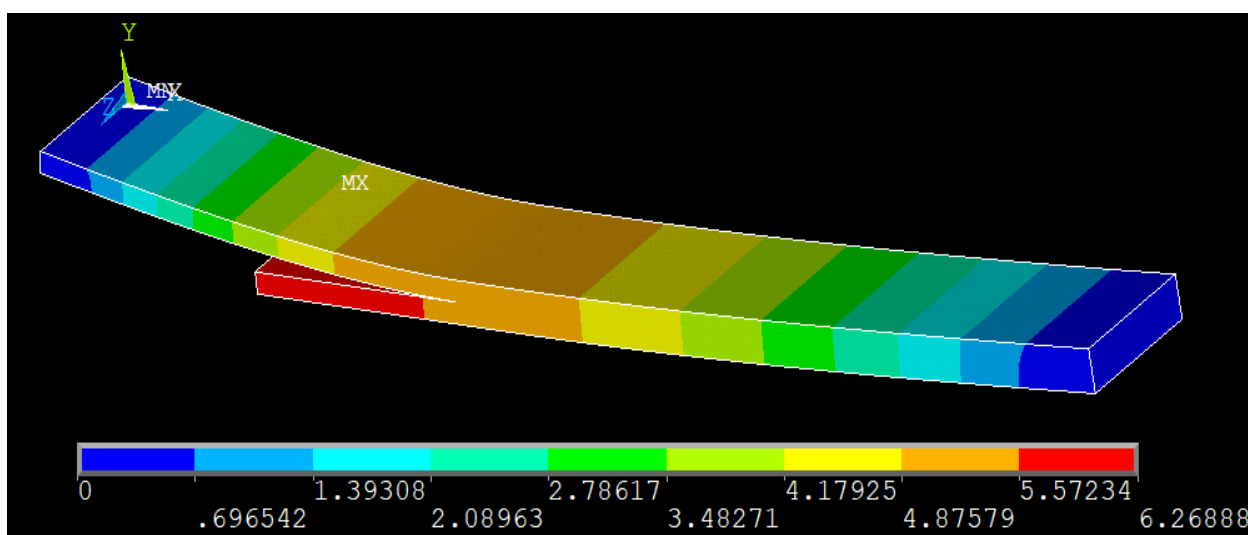
Рисунок 2.31 - Изображение виртуального расслоения образца типа УПБ (SLB) или ОПБ (OLB) (а), окно ввода параметров графика усилие-смещение (б) и примеры рассчитанных графиков зависимости усилие-смещение (прогиб) образцов типа УПБ (SLB) (в) и ОПБ (OLB) (г).

На рис.2.32а-б показаны примеры визуальных изображений геометрической модели с распределением напряжений (а) и деформаций (б) при изгибе образца типа УПБ (SLB).





а



б

Рисунок 2.32 - Визуальные изображения распределение по оси Y нормальных напряжений (а) и деформаций (б) для образца типа УПБ (SLB).

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

Глава посвящена анализу результатов систематических экспериментальных исследований межслоевой трещиностойкости и локальной прочности тонколистовых пластин слоистых УК и СК, полученных методом вакуумного формования из клеевых препрегов КМКУ и КМКС на основе связующего ВСК-14-2м, однонаправленной углеродной ленты и стеклянной ткани полотняного плетения соответственно при индивидуальном и комбинированном растяжении (нормальном отрыве) и сдвиге. Результаты получены с использованием объектов и методик, описанных в гл.2.

Данные о толщине, компонентном составе, плотности и пористости пластин обобщены в таблице 10.

Таблица 10 – Общие характеристики исследуемых пластин СК и УК

Характеристика	Пластина из	
	УК	СК
Толщина, мм	5,6	4
Содержание связующего, масс.%	40	36
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,45	1,8
Пористость, масс.%	< 1	< 1

#### **3.1 Межслоевая трещиностойкость УК и СК из клеевых препрегов при нагружении по моде I**

Образцы для испытаний размером 150×20 мм и толщиной 5,6 мм в случае КМКУ и 4 мм в случае КМКС вырезали из полученных пластин.

Краевая трещина задавалась заложённой фторопластовой пленкой. К поверхности образцов со стороны, где расположена закладная пленка, приклеивали алюминиевые уголки для закрепления в захватах разрывной машины, свободная часть образца оставалась в свободном состоянии.

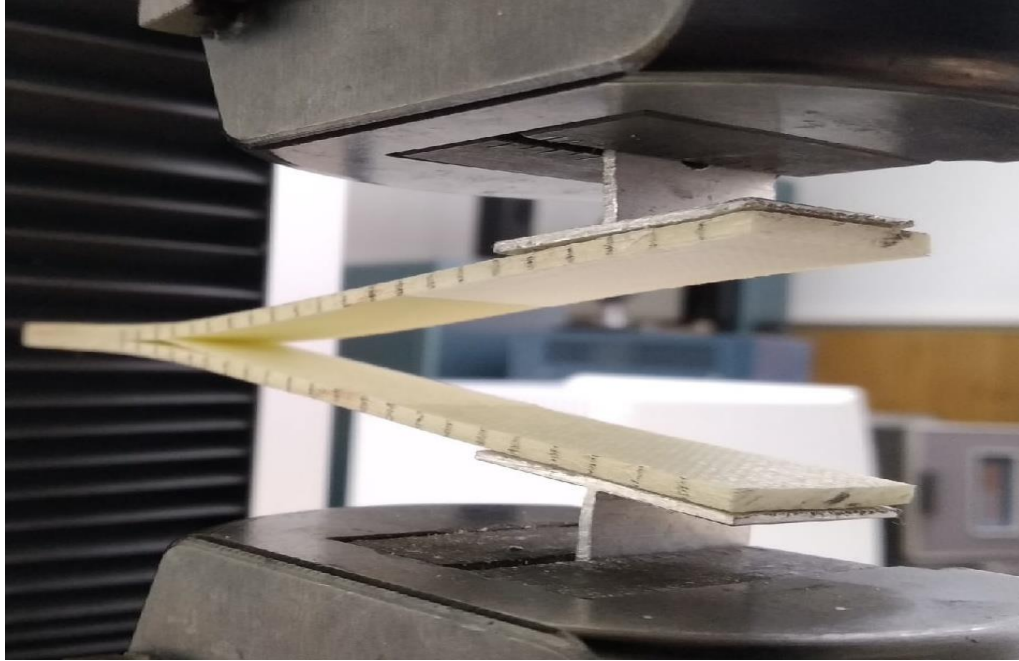
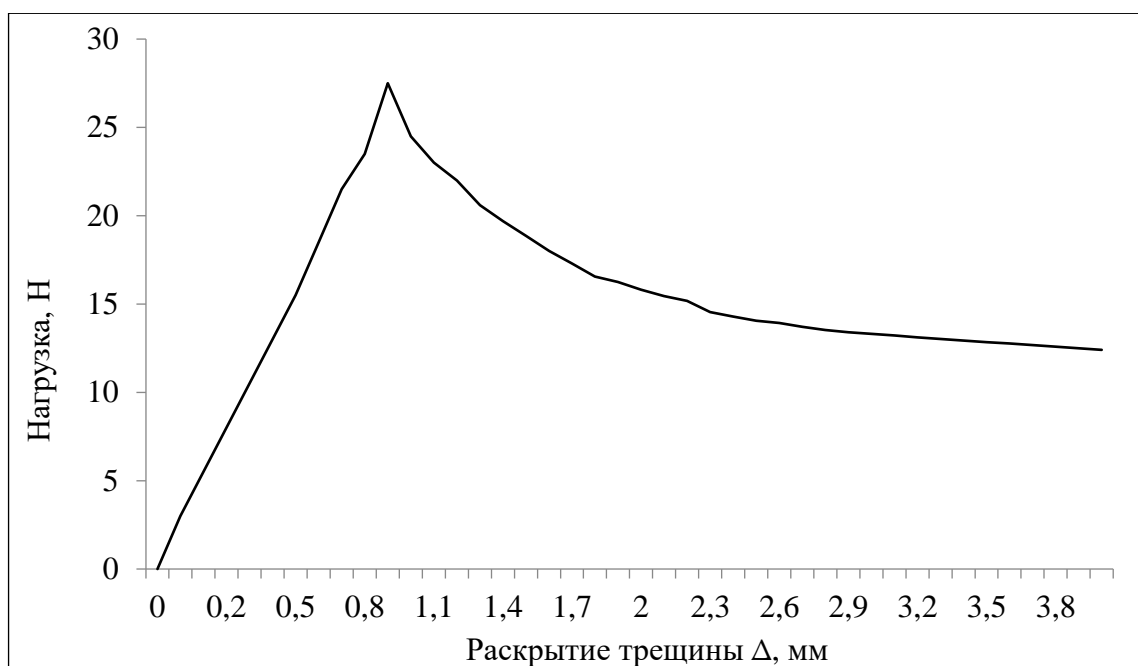


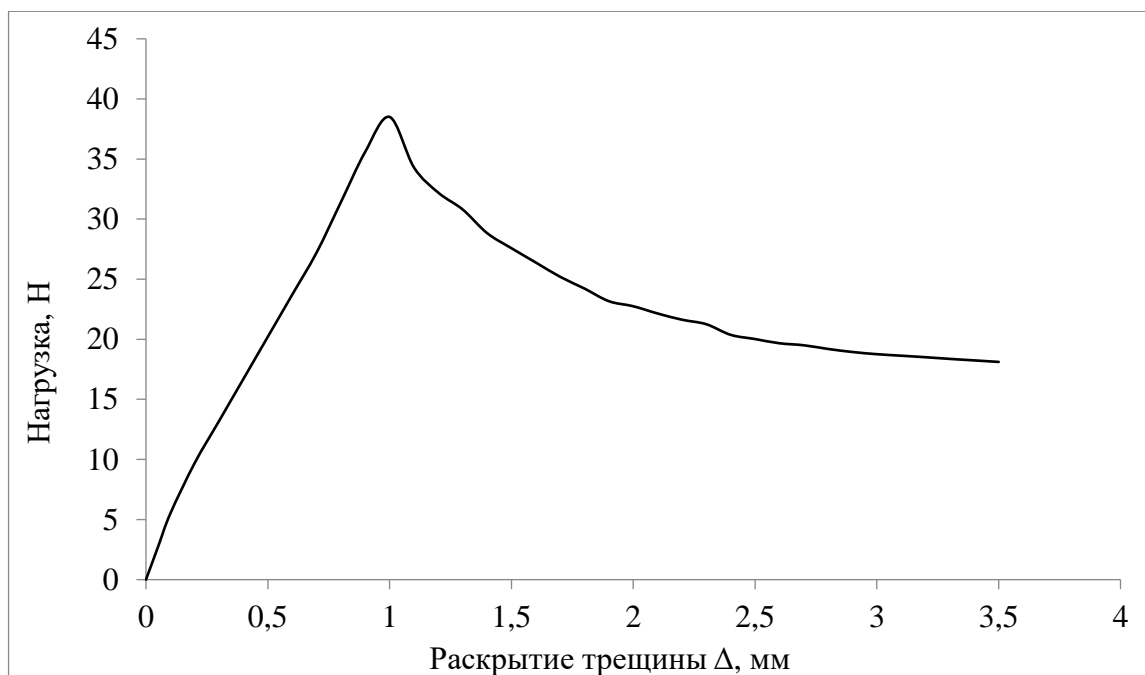
Рисунок 3.1 - Образец для определения  $G_{IC}$  в процессе испытания.

По максимальному усилию  $P_C$  расслаивания и начальной длине трещины «а» по формуле 2.1 рассчитывали параметр межслоевой трещиностойкости как критического значения интенсивности высвобождения упругой энергии при росте трещины по моде I ( $G_{IC}$ ).

На рисунке 3.2 представлены обработанные диаграммы усилие-раскрытие трещины (P-Δ) в процессе расслоения образцов типа ДКБ для двух исследуемых типов слоистых ПКМ.



а



б

Рисунок 3.2 - Экспериментально полученные обобщенные кривые нагрузка-раскрытие образцов ДКБ СК (а) и УК (б).

В таблице 11 представлены результаты испытаний по определению параметра трещиностойкости при нагружении по моде I для обоих типов ПКМ.

Таблица 11 - Экспериментально полученные значения параметра трещиностойкости  $G_{IC}$  для каждого типа ПКМ при нагружении по моде I.

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

### 3.2 Локальная межслоевая прочность УК и СК из клеевых препрегов при нагружении по моде I

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

На рисунке 3.3 представлены фотографии общего вида образца во время испытания на когезионную прочность. На рисунке 3.4 представлена контактная площадка после межслоевого разрыва образца СК.

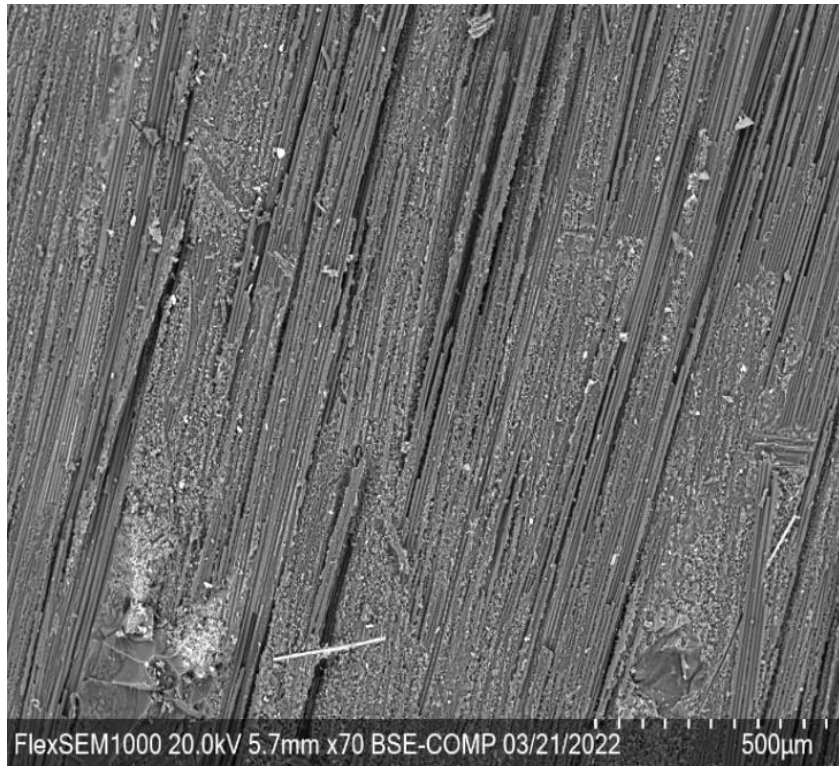


Рисунок 3.3 - Образец для определения  $\sigma_{IC}$  в процессе испытания.

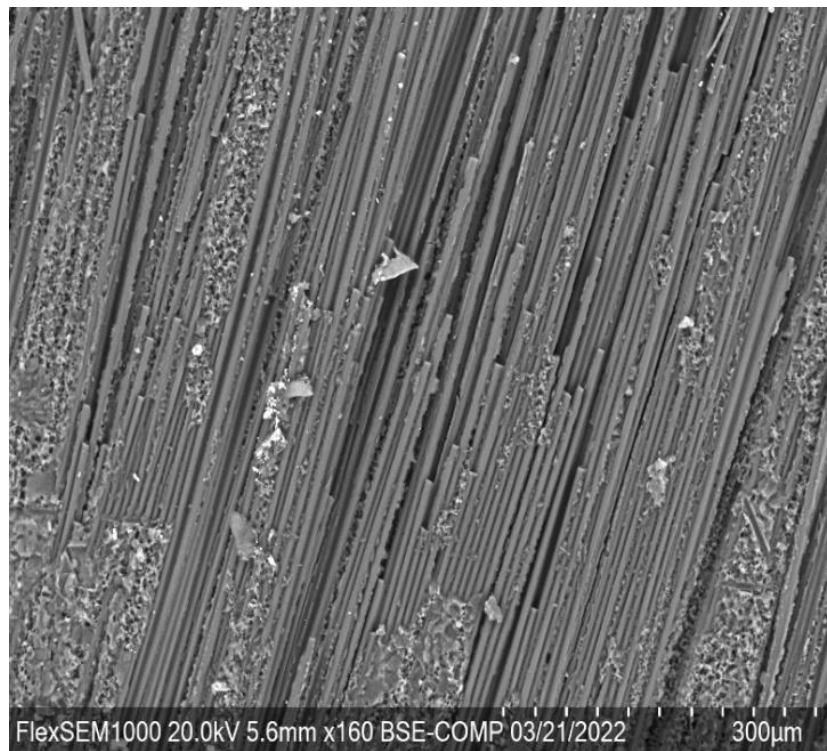


Рисунок 3.4 - Фотография поверхности образца КМКС поверхностей после испытания на когезионную прочность.

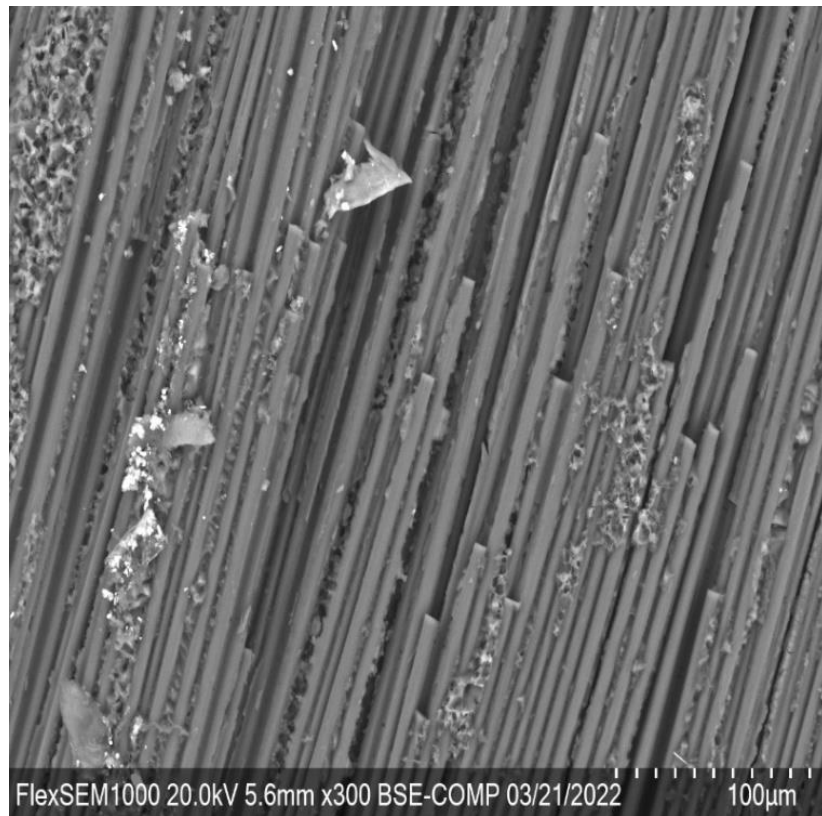
На рисунках 3.5 и 3.6 представлены микрофотографии поверхности разрушения, полученные после испытаний образца для определения межслоевой когезионной прочности по моде I из КМКУ и КМКС соответственно. Анализ микрофотографий показал, что разрушение носит смешанный характер. Отрыв матрицы от волокна и разрушение матричного слоя являются доминирующими видами разрушения рис. 3.5 (а) и рис. 3.6 (а), однако также локально наблюдается разрыв армирующих углеродных и стеклянных волокон, соответственно рис 3.5 (б, в) и рис. 3.6 (б, в). Обнаруженный сложный характер разрушения, доказывает правомерность использования нестандартного метода определения локальной прочности КЗ, т.к. свойства ненаполненного матричного полимера, полученные стандартными методами испытаний на разрыв, не учитывают разнообразие механизмов разрушения, происходящих в КЗ и, следовательно, не могут быть использованы в расчетах параметров КЗ.



a

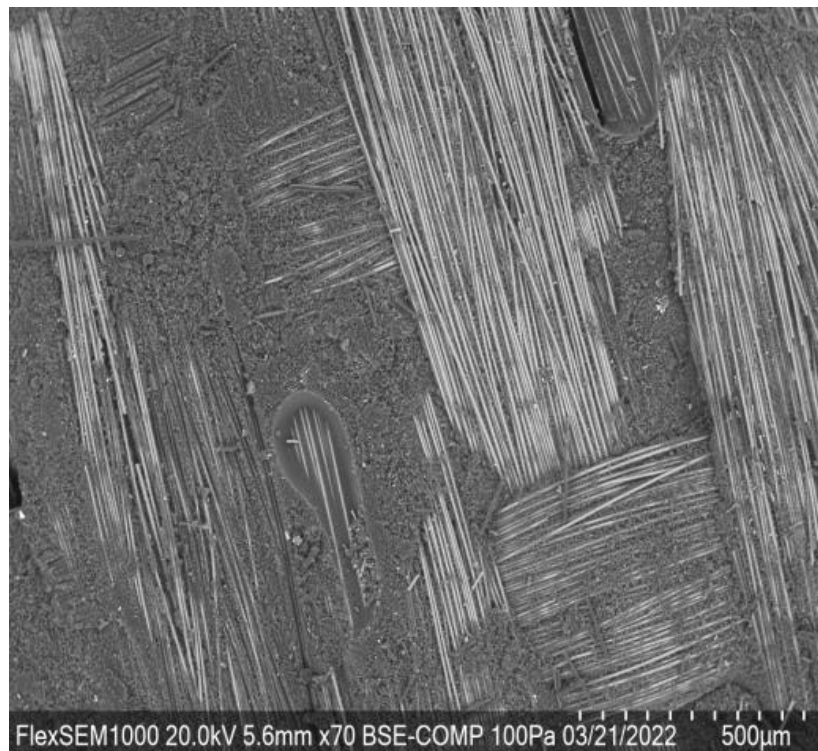


b



в

Рисунок 3.5 - Микрофотографии поверхности разрушения, полученные после испытаний образца для определения межслоевой когезионной прочности по моде I из КМКУ при увеличении 70 (а), 160 (б) 300 (в).

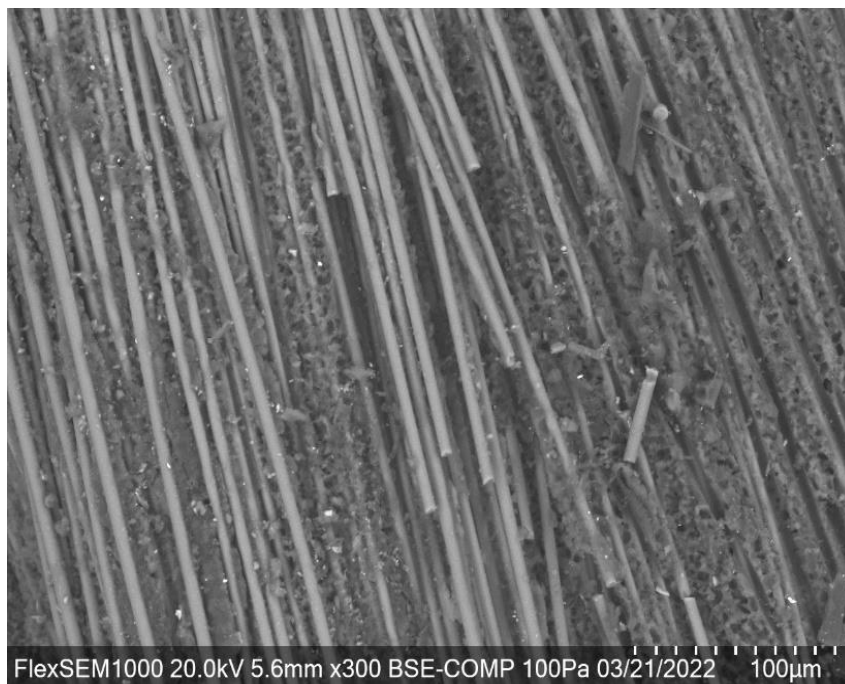


а





б



в

Рисунок 3.6 - Микрофотографии поверхности разрушения, полученные после испытаний образца для определения межслоевой когезионной прочности по моде I из КМКС при увеличении 70 (а), 150 (б) 300 (в).

В таблице 12 приведены результаты испытаний при локальном межслоевом разрушении (максимальное напряжение  $\sigma_{IC}$ , деформация при максимальной нагрузке  $\delta_{IC}$ , максимальное раскрытие  $\delta_{max}$  для обоих типов ПКМ.

Таблица 12 - Экспериментально полученные значения локальной межслоевой прочности для каждого типа ПКМ при нагружении по моде I.

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

### **3.3 Межслоевая трещиностойкость УК и СК из клеевых препрегов при нагружении по моде II**

Образцы для испытаний размером 150×20 мм и толщиной 5,6 мм в случае КМКУ и 4 мм в случае КМКС вырезали из полученных пластин. Краевая трещина задавалась заложенной фторопластовой пленкой. Образец представлен на рисунке 3.7. На рис. 3.8 приведены фотографии образца БКН во время испытания.



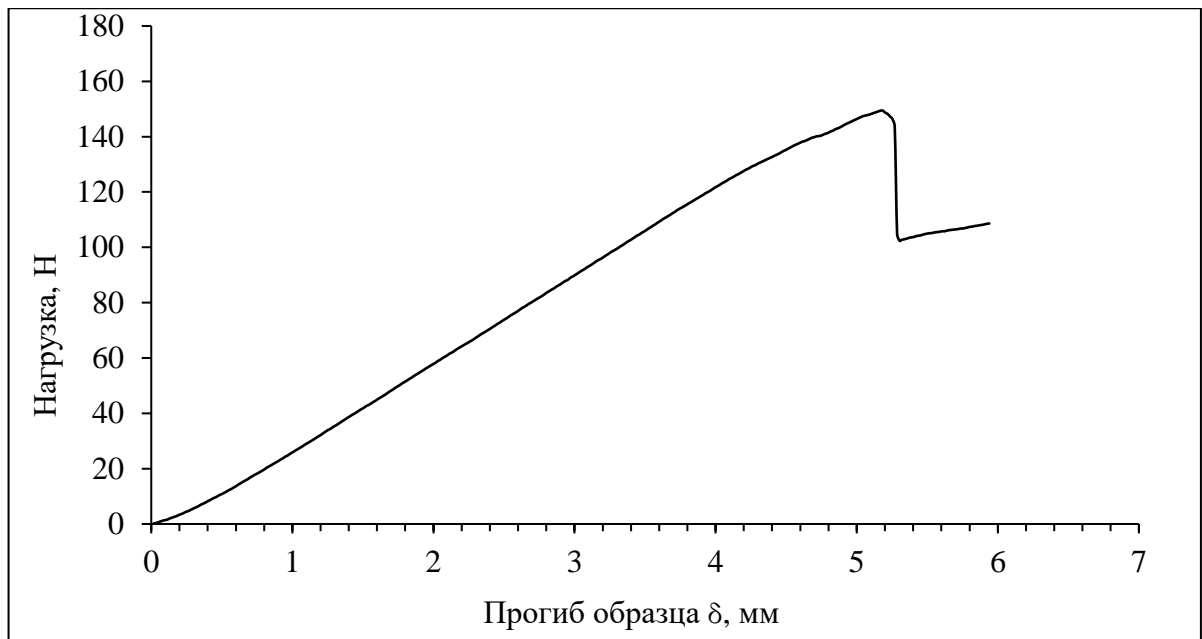
Рисунок 3.7 - Образец для испытаний на  $G_{IIc}$ .



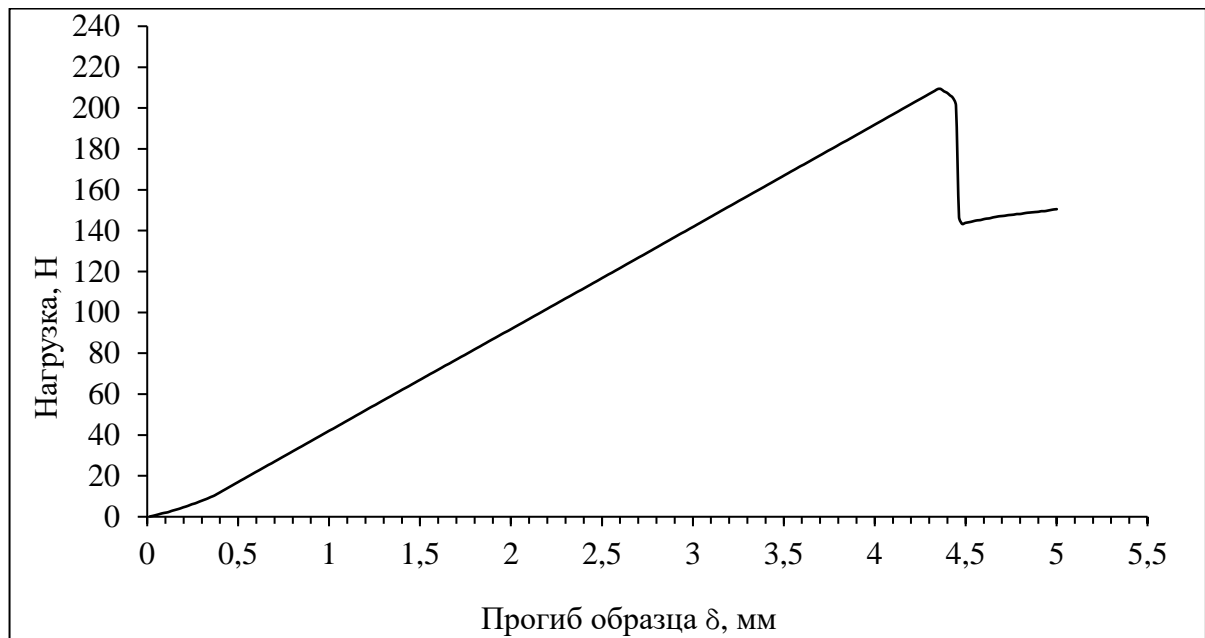
Рисунок 3.8 - Образец для определения  $G_{IIc}$  в процессе испытания.

По максимальному усилию  $P_C$  расслаивания и начальной длине трещины 43 и 66 мм по формуле 2.2 рассчитывали параметр межслоевой трещиностойкости как критического значения интенсивности высвобождения упругой энергии при росте трещины по моде II ( $G_{IIc}$ ).

На рисунке 3.9 представлены обработанные диаграммы усилие-раскрытие трещины ( $P-\Delta$ ) в процессе расслоения образцов типа БКН из обоих исследуемых типов слоистых ПКМ.



а



б

Рисунок 3.9 - Экспериментально полученные обобщенные кривые нагрузка-прогиб образцов БКН СК (а) и УК (б).

В таблице 13 представлены результаты испытаний по определению параметра интенсивности высвобождения упругой энергии при росте трещины по моде II для обоих типов ПКМ.

Таблица 13 - Экспериментально полученные значения параметра трещиностойкости  $G_{IIc}$  для каждого типа ПКМ при нагружении по моде II.

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

### 3.4 Локальная межслоевая прочность УК и СК из клеевых препрегов при нагружении по моде II

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

На рисунке 3.10 представлены фотографии общего вида образца во время испытания на когезионную прочность. На рисунке 3.11 представлена контактная площадка после межслоевого разрыва образца СК.

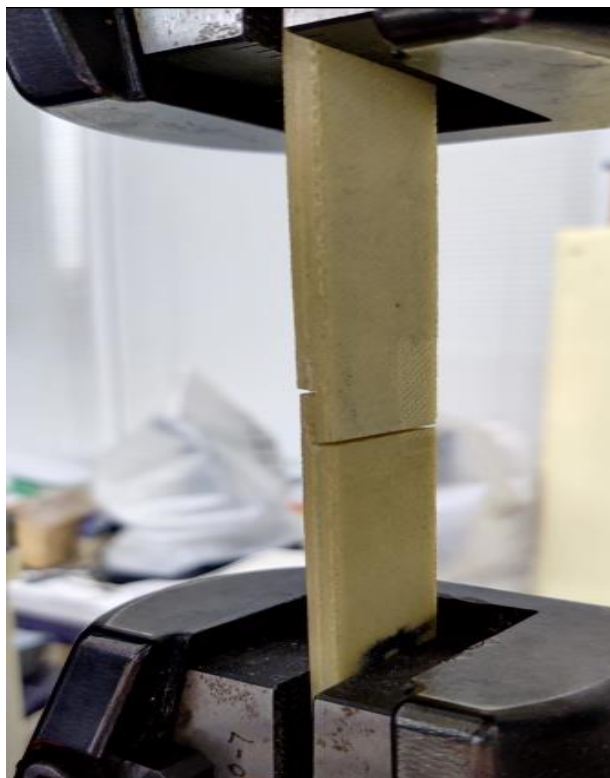
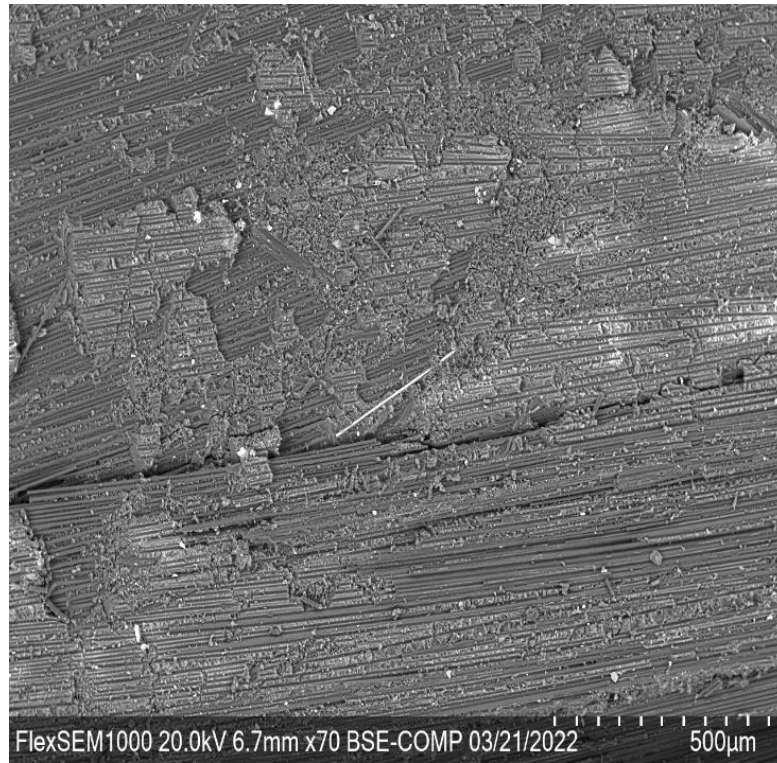


Рисунок 3.10 - Фотографии образца при испытании на межслоевой сдвиг.

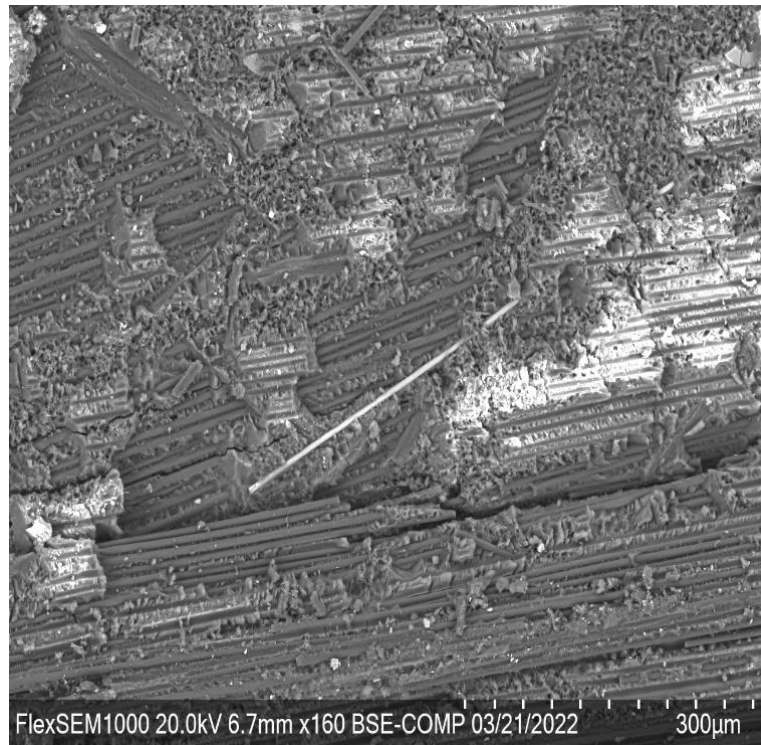


Рисунок 3.11 - Фотография поверхности образца КМКС поверхностей после испытания на когезионную прочность.

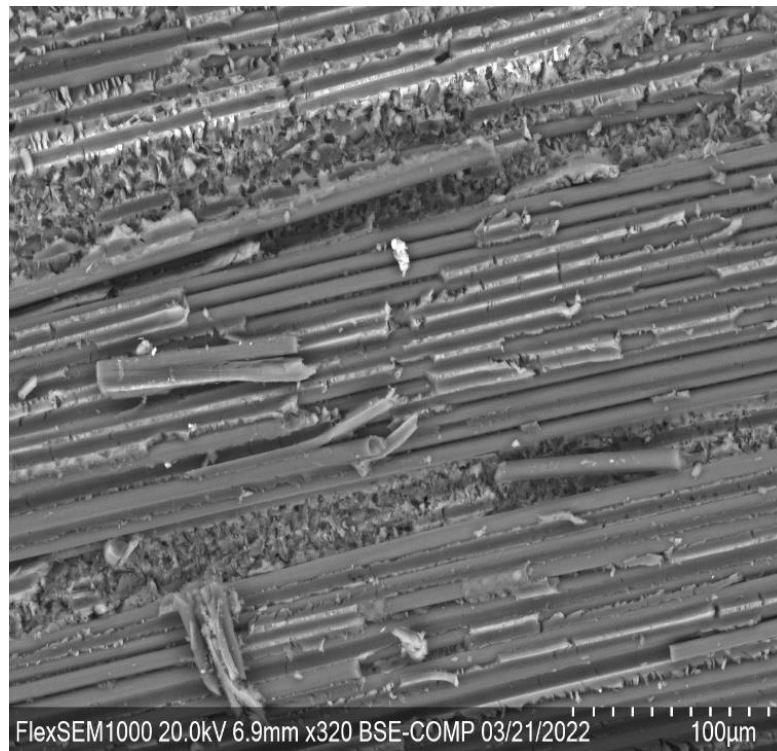
На рисунках 3.12 и 3.13 представлены микрофотографии поверхности разрушения, полученные после испытаний образца для определения межслоевой когезионной прочности по моде II из КМКУ и КМКС соответственно. Анализ микрофотографий показал, что разрушение носит смешанный характер. Отрыв матрицы от волокна является доминирующим видом разрушения рис. 3.12 (а) и рис. 3.13 (а), однако также наблюдаются разрушение матричного слоя и разрыв армирующих углеродных волокон рис 3.12 (б, в) и рис. 3.13 (б, в). Аналогично анализу микрофотографий, приведенных на рис. 3.5 и рис. 3.6 для испытаний на отрыв по моде I, для испытаний на сдвиг по моде II так же обнаружен сложный характер разрушения, доказывающий правомерность использования нестандартного метода определения локальной прочности КЗ при сдвиге.



a

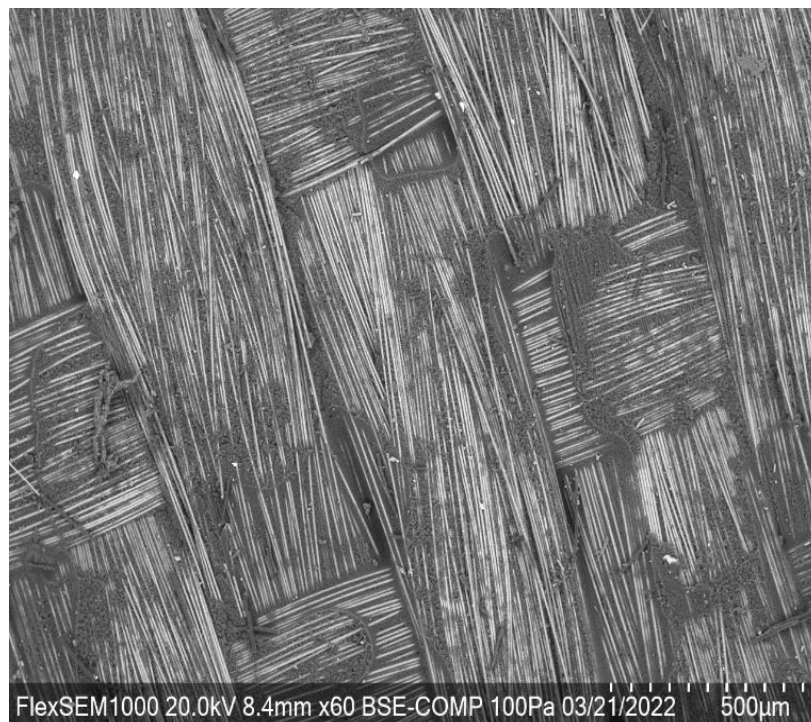


6



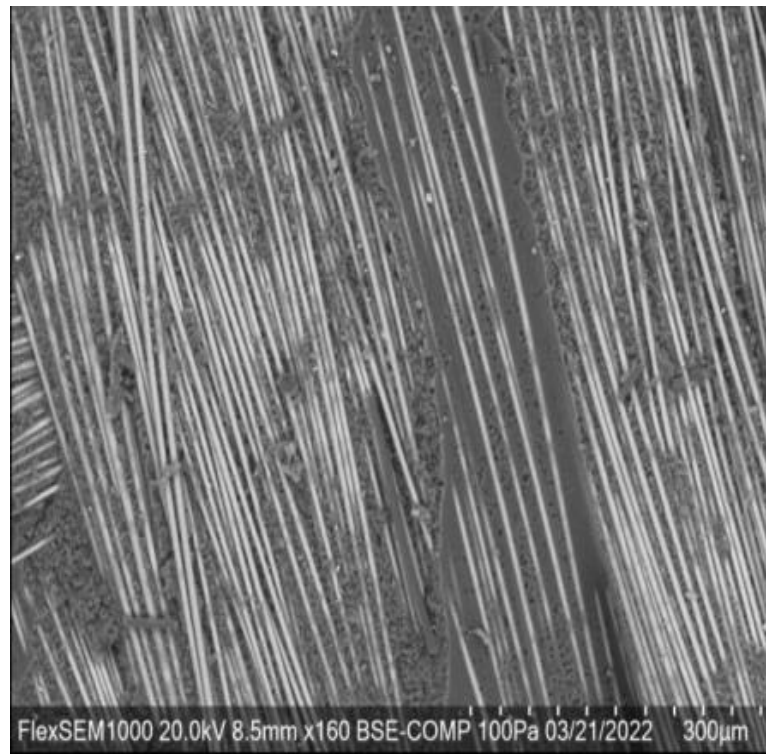
в

Рисунок 3.12 - Микрофотографии поверхности разрушения, полученные после испытаний образца для определения межслоевой когезионной прочности по моде II из КМКУ при увеличении 70 (а), 160 (б) 320 (в).

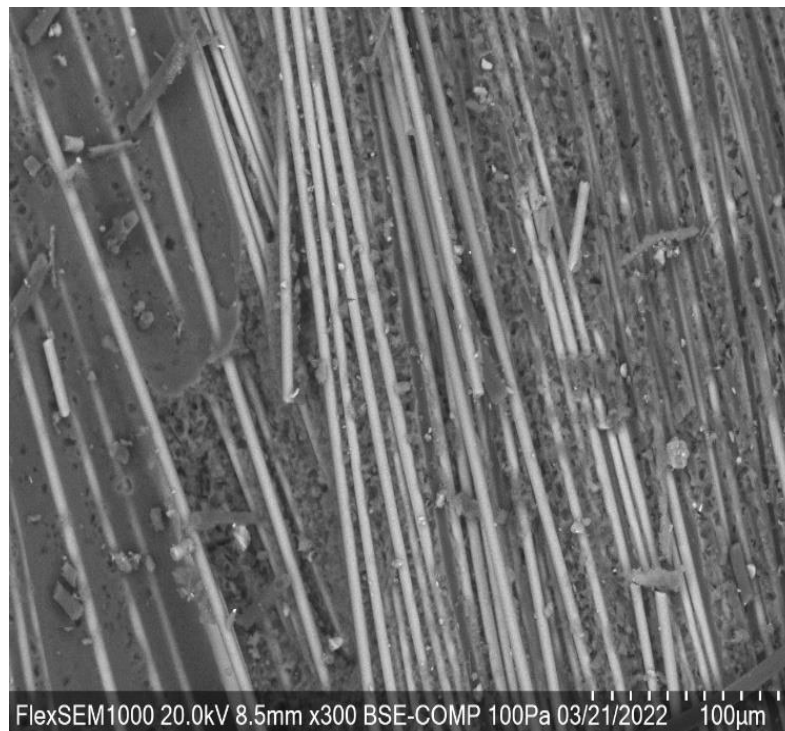


а





б



в

Рисунок 3.13 - Микрофотографии поверхности разрушения, полученные после испытаний образца для определения межслоевой когезионной прочности по моде II из КМКС при увеличении 60 (а), 160 (б) 300 (в).

В таблице 14 приведены результаты испытаний при локальном межслоевом разрушении (максимальное напряжение  $\sigma_{IIc}$ , деформация при максимальной нагрузке  $\delta_{IIc}$ , максимальное раскрытие  $\delta_{II\max}$  для обоих типов ПКМ.

Таблица 14 - Экспериментально полученные значения локальной межслоевой прочности для каждого типа ПКМ при нагружении по моде II.

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

### 3.5 Трещинодвижущие силы и критерии межслоевого роста трещины при комбинированном нагружении по модам I/II

Для экспериментального определения трещинодвижущих сил при комбинированном нагружении ( $G_I$  и  $G_{II}$ ) использовали нестандартные методы испытаний SLB и OLB.

Для определения  $G_I$  и  $G_{II}$  из УК и СК прессовали пластины из 40 слоев клееного препрега, которые последовательно укладывали в форму и прессовали под давлением и повышенной температуре. Дефект в виде межслоевой трещины обеспечивался фторопластовой пленкой с заданными геометрическими размерами толщиной 0,01 мм, которая помещалась при выкладке образцов между серединными слоями препрега с торцевой стороны. Образцы для испытаний размерами 150×20 мм и толщиной 5,6 мм в случае КМКУ и 4 мм в случае КМКС вырезались из отформованных пластин.

На рис.3.14 приведены фотографии образца SLB во время испытания.



Рисунок 3.14 - Образец для определения трещиноводвижущих сил при комбинированной моде нагружения методом SLB в процессе испытания.

На рис. 3.15 приведены фотографии образца OLB во время испытания.

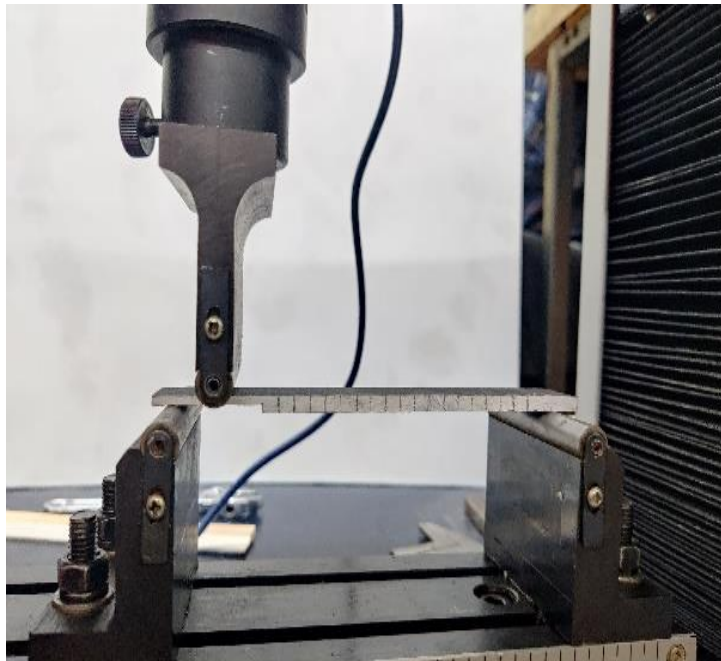
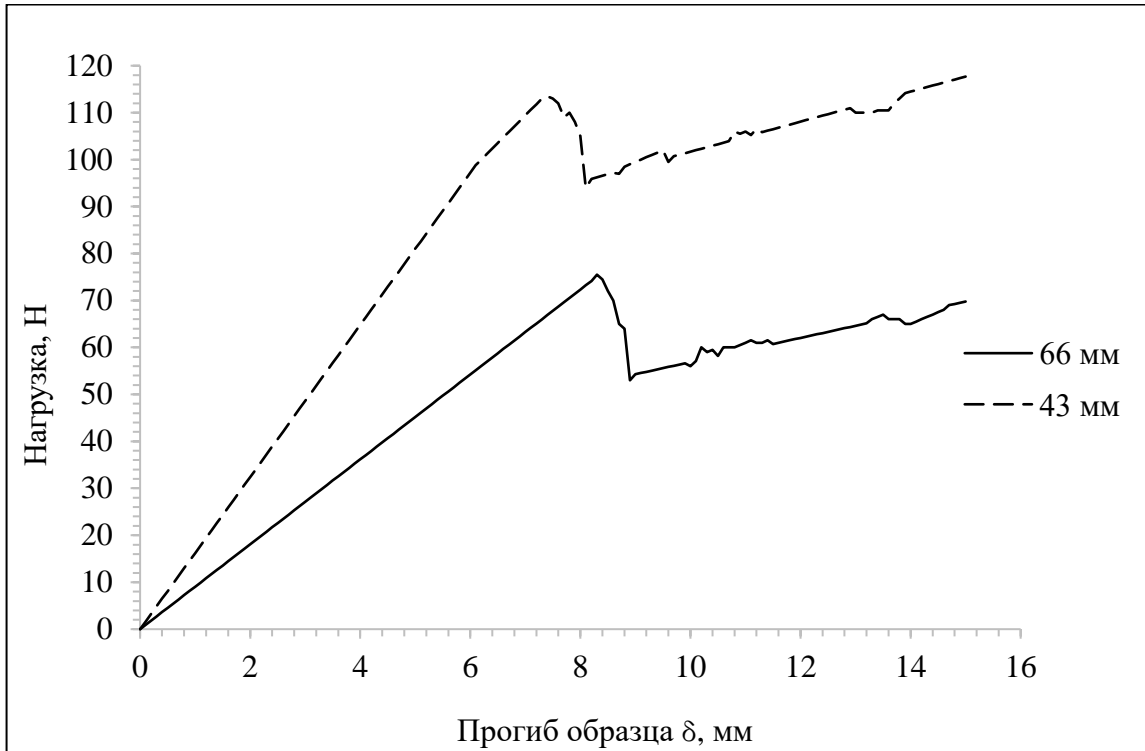
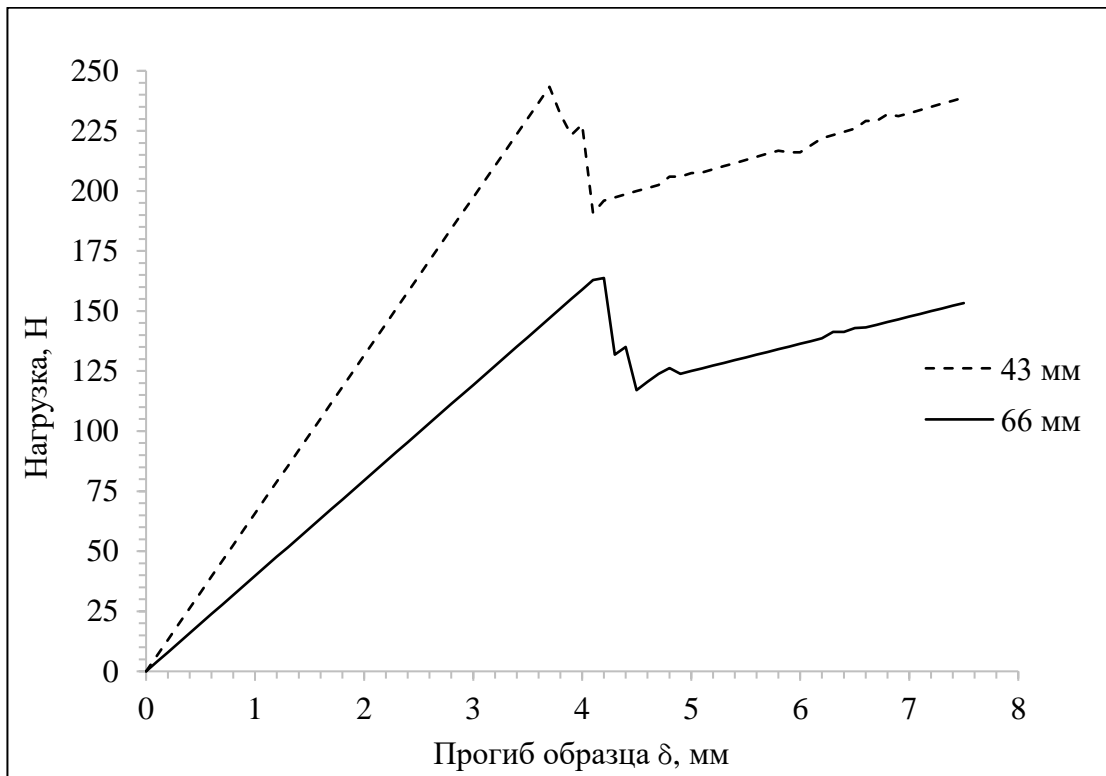


Рисунок 3.15 - Образец для определения трещиноводвижущих сил при комбинированной моде нагружения методом OLB в процессе испытания.

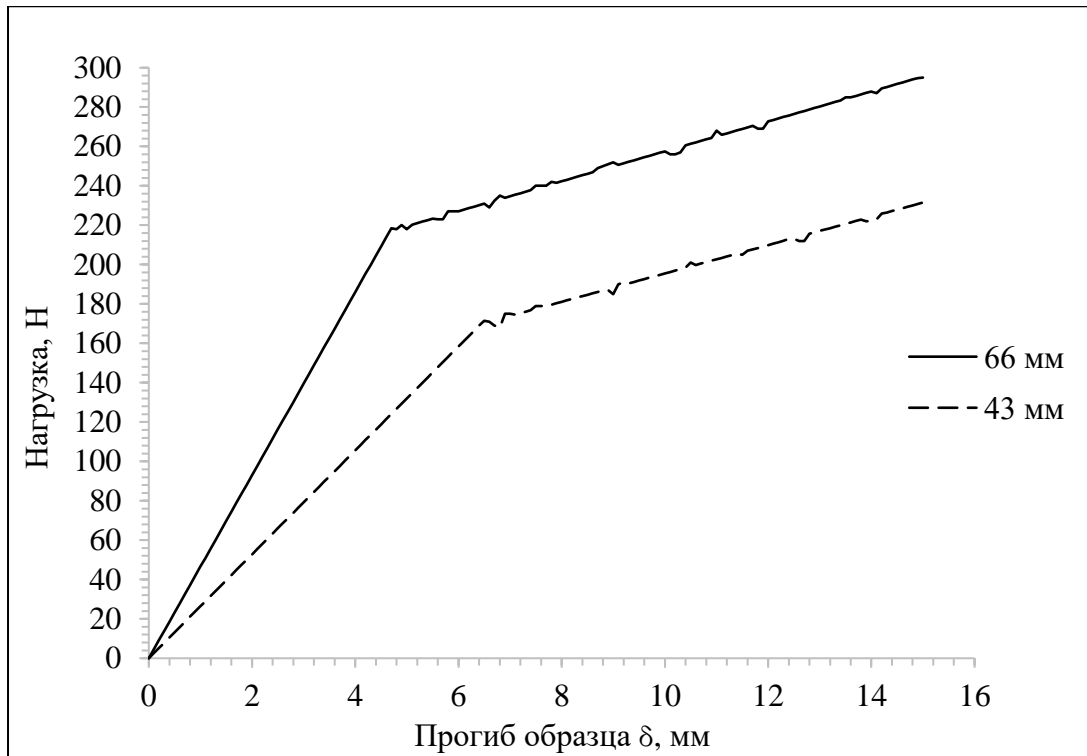
На рисунке 3.16 (а-г) приведены примеры экспериментально полученных графиков (кривых) нагрузка-прогиб для образцов SLB и OLB, соответственно.



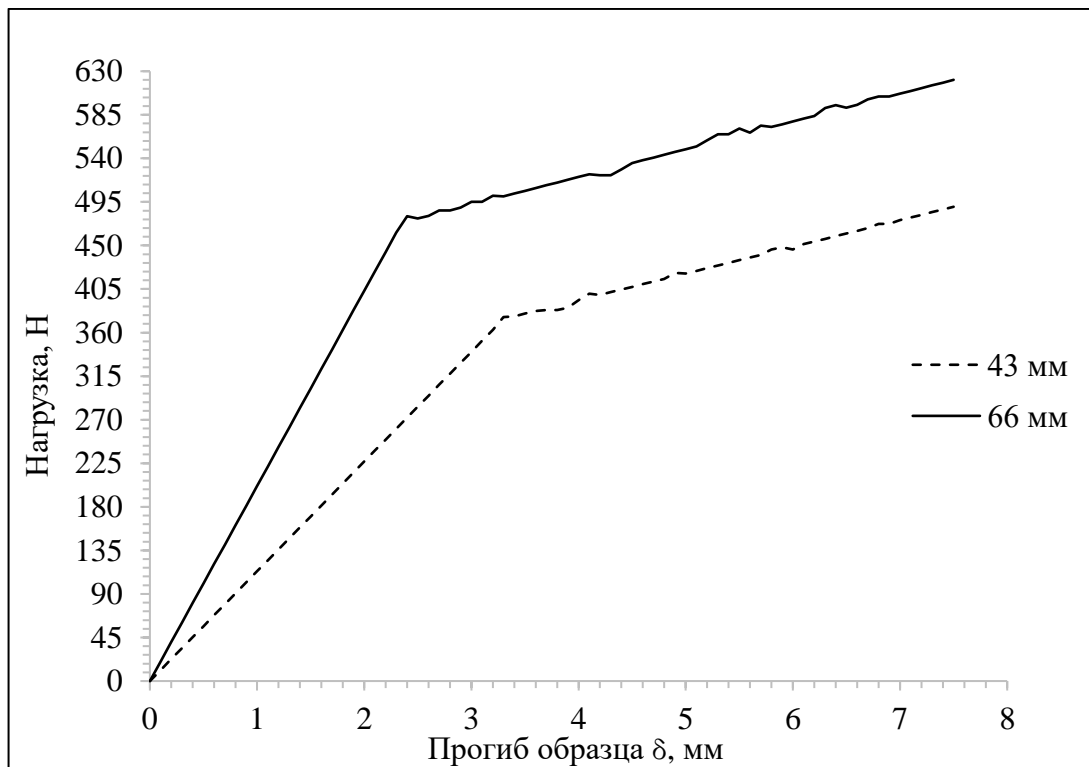
а



б



В



Г

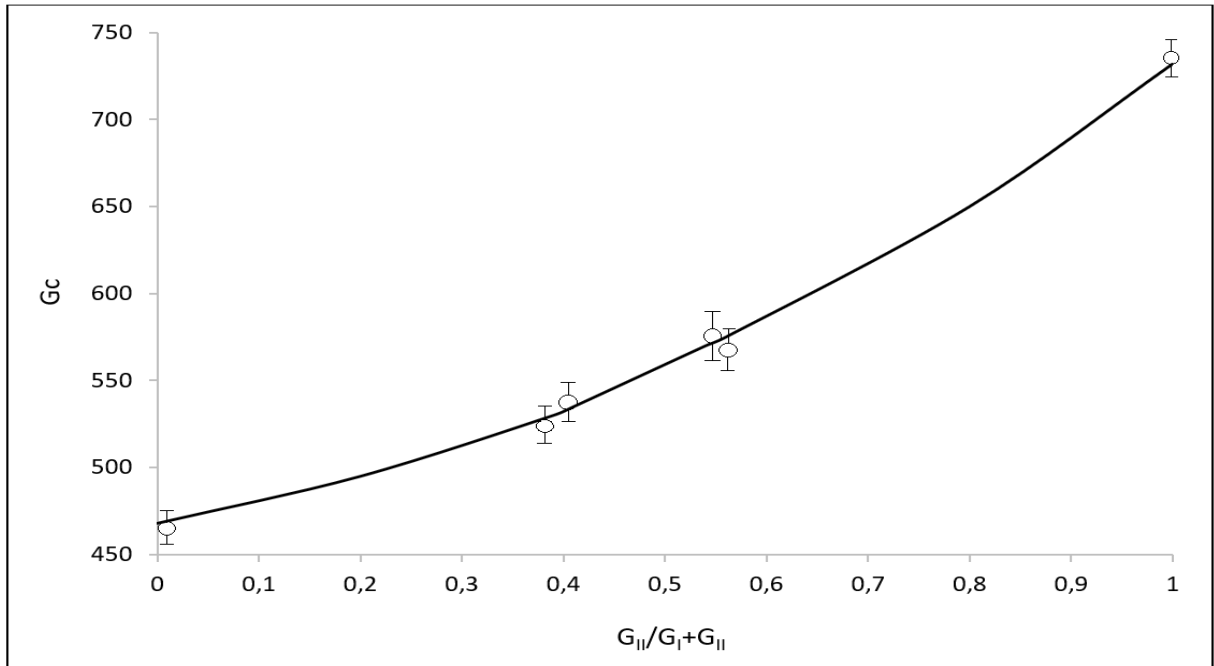
Рисунок 3.16 - Экспериментально полученные обобщенные кривые нагрузка-прогиб при изгибе образцов SLBCK (а), УК (б) и OLBCK (в), УК (г) при заданных длинах начальной трещины (43мм и 66 мм), соответственно.

В таблице 15 обобщены определенные по экспериментальным данным значения параметров интенсивности высвобождения упругой энергии для обоих типов образцов исследуемых материалов при двух длинах начальных трещин и нагрузке  $P_C$ , а также доли вклада в эти параметры сдвиговой моды ( $\varphi_{II} = G_{II}/G_T$ ).

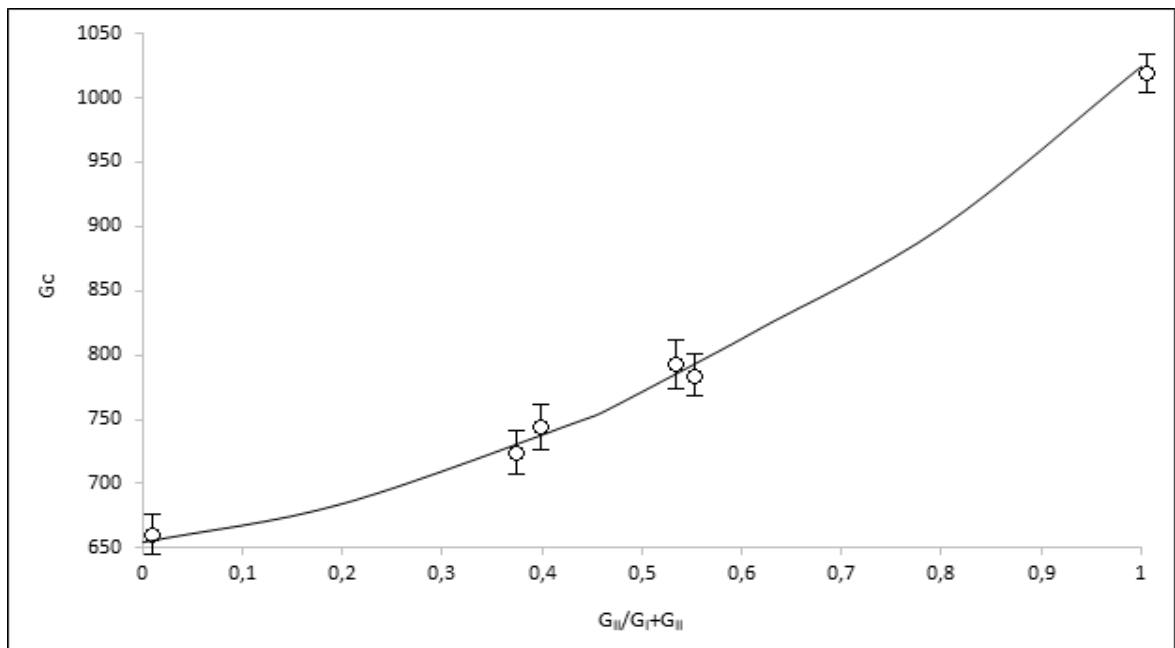
Таблица 15 - Значения параметров интенсивности высвобождения упругой энергии для образцов СК и УК типа SLB и OLB при заданных длинах начальной трещины и экспериментально определенных значениях  $P_C$ .

Материал	Образец	Длина начальной трещины а, м	Предельная нагрузка при изгибе $P_C$ , Н	Критические значения $G$ , Дж/м <sup>2</sup>		$\varphi_{II} = \frac{G_{II}}{(G_{II} + G_I)}$
				$G_I$	$G_{II}$	
СК	SLB	0,043	113,5±5,7	317,3±5%	214,9±5%	0,39
		0,066	75,5±3,8	316,6±5%	221,9±5%	0,41
	OLB	0,043	171,5±8,6	259,9±7%	311,5±7%	0,54
		0,066	218,5±10,1	263,7±7%	312,5±7%	0,56
	ДКБ	0,045	28,0±1,4	468,0±6%	-	0
	БКН	0,045	149,0±7,5	-	732,0±6%	1
УК	SLB	0,043	243,0±12,2	462,3±6%	287,8±6%	0,38
		0,066	163,5±8,2	456,0±6%	301,8±6%	0,4
	OLB	0,043	376±18,8	373,8±8%	431,6±8%	0,54
		0,066	480,5±24,0	386,1±8%	436,8±8%	0,53
	ДКБ	0,045	38,0±1,9	655,0±7%	-	0
	БКН	0,045	209,0±10,5	-	1025,0±7%	1

Обобщенные графические зависимости критического значения интенсивности высвобождения упругой энергии (критерия межслоевого роста трещины) от соотношений мод I/II при комбинированном нагружении для СК и УК представлены на рисунке 3.17 (а, б).



а



б

Рисунок 3.17 - Зависимости критического значения интенсивности высвобождения упругой энергии  $G_c$  от вклада моды II при комбинированном нагружении СК (а) и УК (б).

По полученным экспериментальным данным рассчитаны константы материала  $\eta$  в уравнении критерия разрушения Benzeggagh-Kenane (Бензегга-Кенан), формула 1.24 [87], значение которой для СК равно 1,4, а для УК - 1,5.

### Выводы по главе III

1. Выполнен комплекс экспериментальных исследований и получены новые данные о влиянии состава ПКМ на трещиностойкость слоистых ПКМ. Экспериментально получены зависимости: нагрузка-раскрытие трещины образцов типа ДКБ, нагрузка-прогиб образцов типа БКН, нагрузка-прогиб образцов типа SLB и OLB из 2-х типов слоистых ПКМ и по ним рассчитаны критические значения интенсивности высвобождения упругой энергии при росте трещин, кроме этого получены зависимости критического значения интенсивности высвобождения упругой энергии от вклада моды II образцов типа SLB и OLB из 2-х типов слоистых ПКМ и по ним рассчитаны константы материала в уравнении критерия разрушения Бензегга-Кенана.

2. Выявлено, что нагрузка начала расслоения при нагружении по модам I и II для углепластика в 1,4 раза больше, чем для стеклопластика, и составляет 38 Н и 209 Н соответственно. Нагрузка начала расслоения при комбинированном нагружении образцов SLB для углепластика в 2 раза больше, чем для стеклопластика, и составляет 243 при начальной трещине 43 мм. и 163,5 при начальной трещине 66 мм. Для образцов OLB нагрузка начала расслоения составляет 376 Н при начальной трещине 43 мм и 480,5 Н при начальной трещине 66 мм.

3. Установлено, что трещиностойкость углекомпозита при комбинированном нагружении больше в 1,4 раза по сравнению со стеклокомпозитом и составляет 750,1 Дж/м<sup>2</sup> при начальной трещине 43 мм. и 757,8 Дж/м<sup>2</sup> при начальной трещине 66 мм для образцов SLB. Для образцов OLB трещиностойкость составляет 805,4 Дж/м<sup>2</sup> при начальной трещине 43 мм. и 822,9 Дж/м<sup>2</sup> при начальной трещине 66 мм.

4. Впервые экспериментально получены данные о константах материалов  $\eta$  в уравнении критерия разрушения Бензегга-Кенан и о критических параметрах закона когезионной зоны: локальной межслоевой



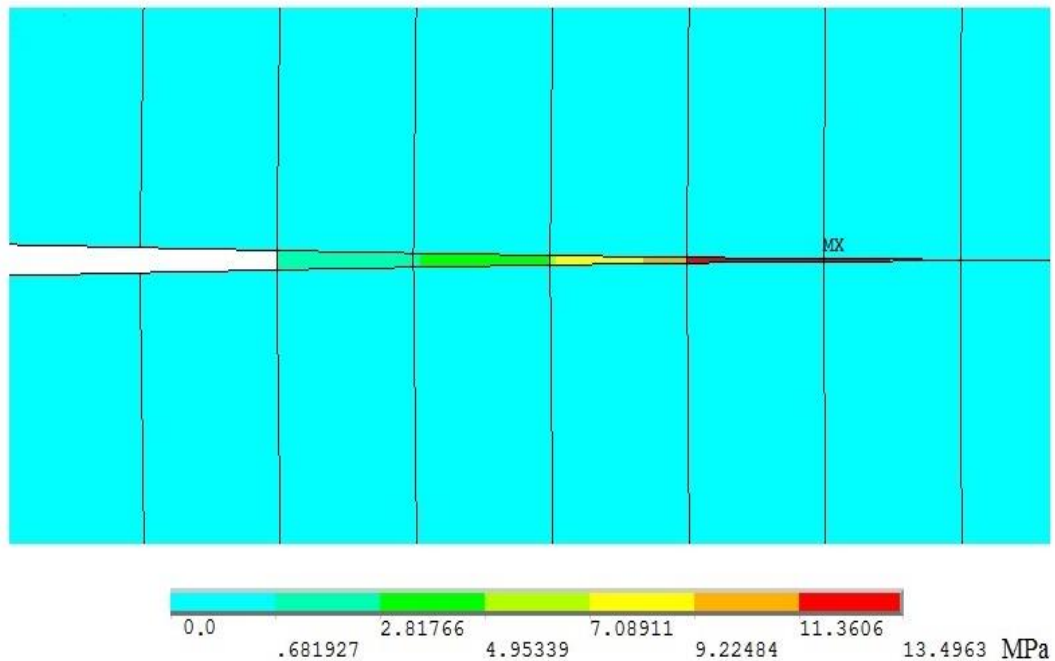
прочности  $\sigma_{1C}$  и деформации при максимальной нагрузке  $\delta_{1C}$  для стекло- и углекомполитов на основе клеевых препрегов КМКС и КМКУ.

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

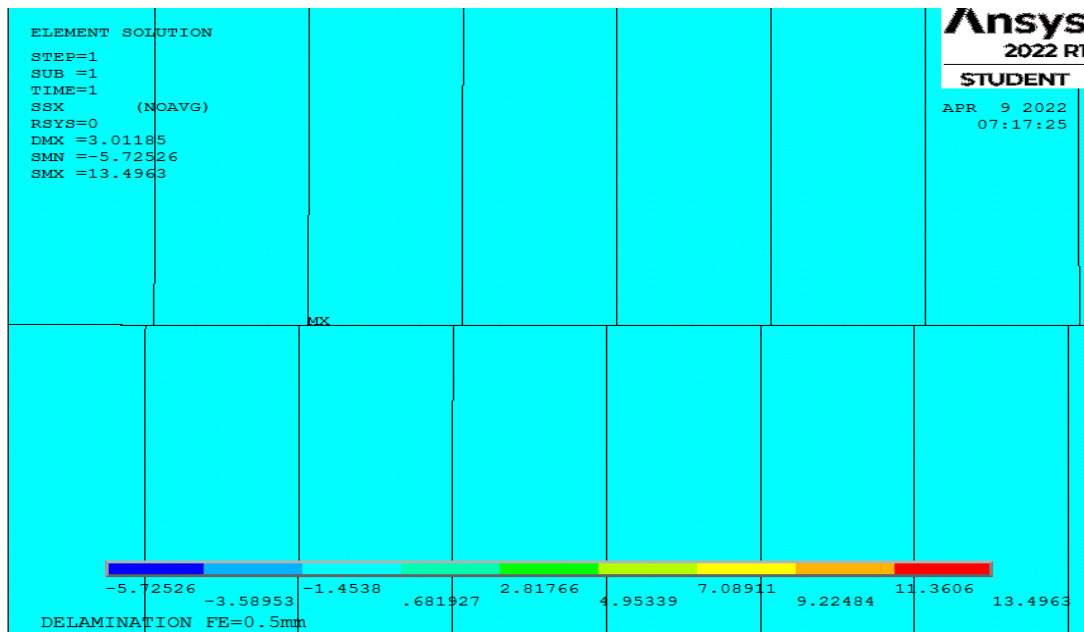
## Глава IV Численная оценка трещиностойкости слоистых стекло- и углекомпозитов с использованием экспериментально определенных параметров при индивидуальном и комбинированном нагружении

### 4.1 Индивидуальные моды нагружения I и II: образцы ДКБ и БКН, метод МКЭ

На рисунке 4.1 представлены примеры количественной визуализации в цвете распределения локальных напряжений в числовой когезионной зоне образцов ДКБ и БКН с заданной длиной интерфейсных элементов, определяющей их число по длине КЗ от начала, где напряжения равны нулю, и до конца, где они достигают предельного значения ( $\sigma_c$  или  $\tau_c$ ), эквивалентного экспериментально определенной прочности межслоевого контакта при отрыве и сдвиге соответственно.



а



б

Рисунок 4.1 - Примеры визуальных изображений распределения напряжений в КЗ при инициировании роста трещины на сетке ИЭ для образцов ДКБ (а) и БКН (б) при заданной длине ИЭ равной 1 мм.

На рис. 4.2 - 4.5 приведены рассчитанные при различной длине ИЭ и экспериментально полученные при испытаниях образцов СК и УК на глобальную трещиностойкость графические зависимости нагрузки на края трещины от величины раскрытия или смещения ее краев при моде I и II соответственно, пиковые значения которых характеризуют устойчивость образцов к инициированию и росту трещины.

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

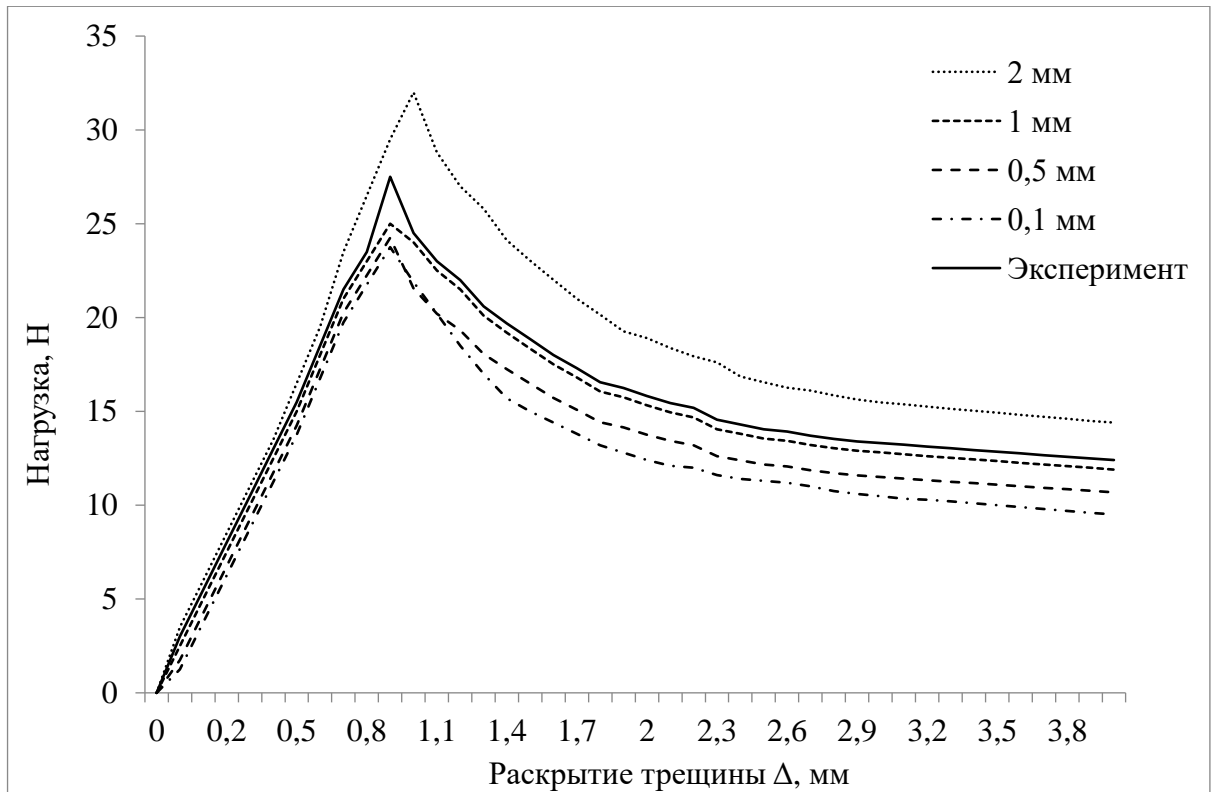


Рисунок 4.2 - Расчетные (при различной длине ИЭ) и экспериментально полученные зависимости нагрузки от раскрытия краев трещины для образцов СК типа ДКБ.

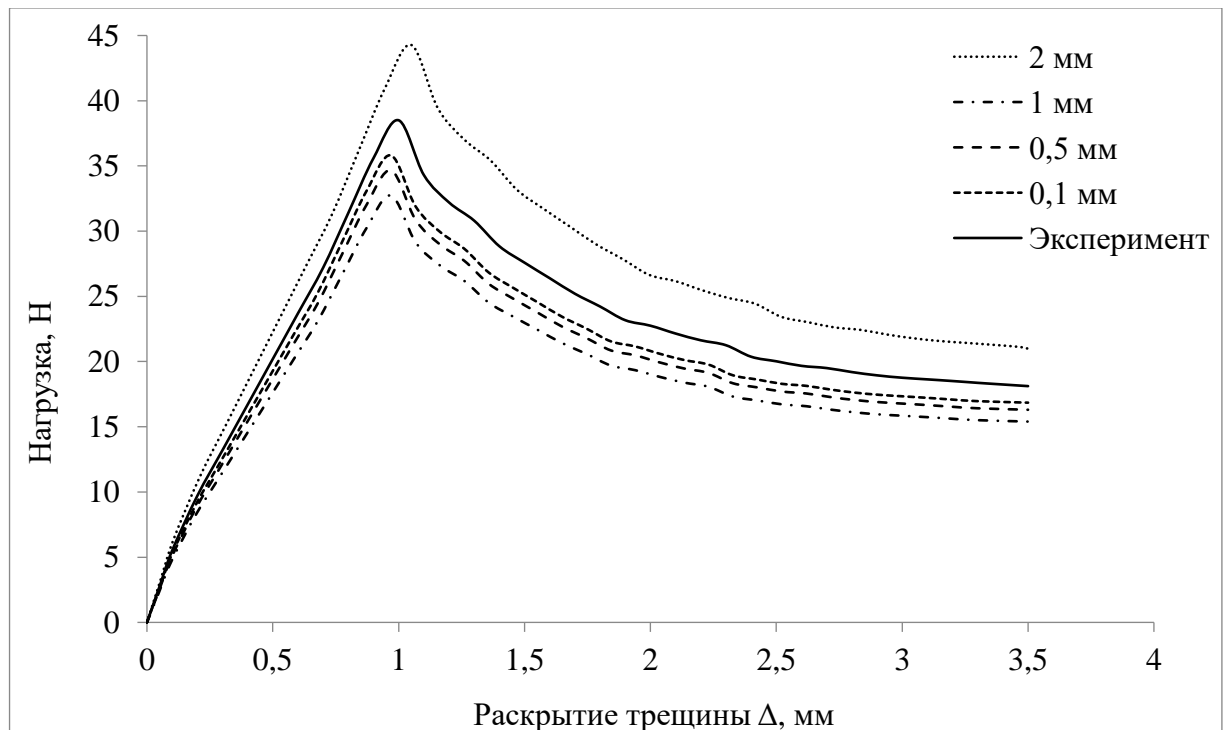


Рисунок 4.3 - Расчетные (при различной длине ИЭ) и экспериментально полученные зависимости нагрузки от раскрытия краев трещины для образцов УК типа ДКБ.

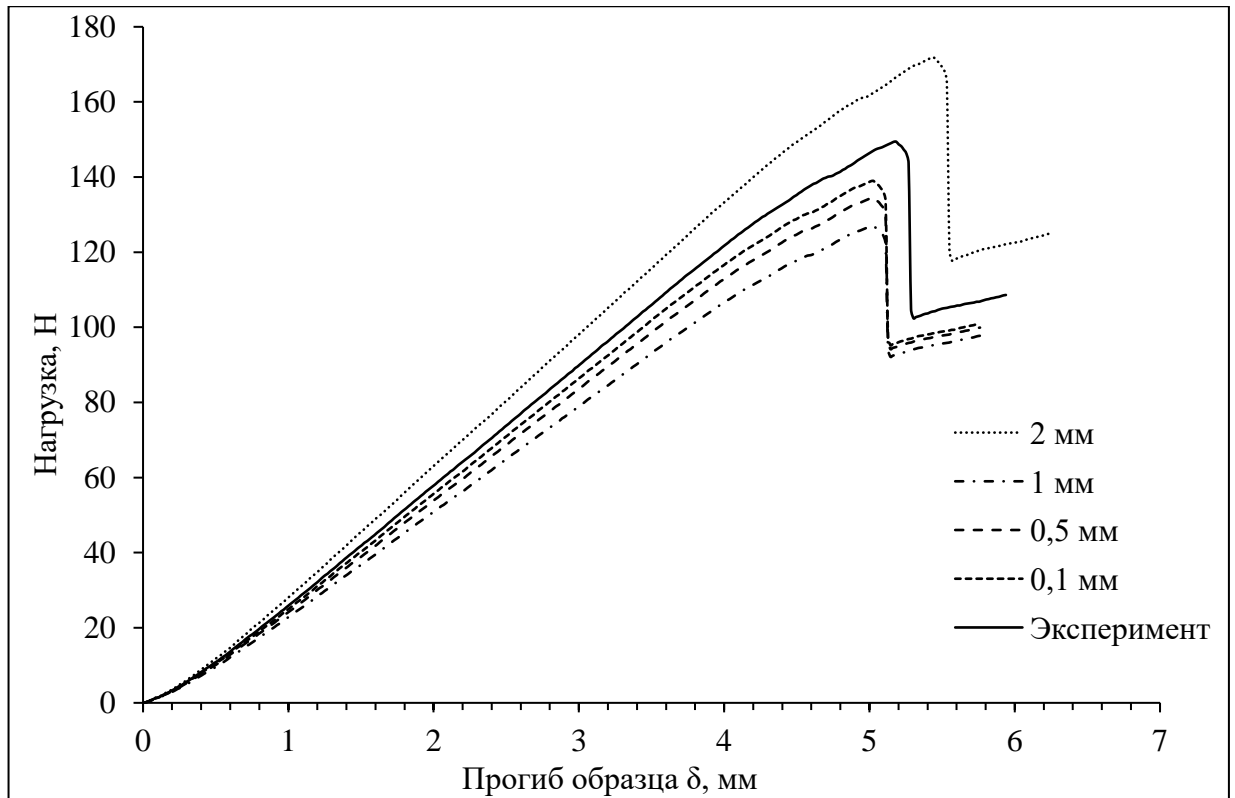


Рисунок 4.4 - Расчетные (при различной длине ИЭ) и экспериментально полученные зависимости нагрузки от смещения краев трещины для образцов СК типа БКН.

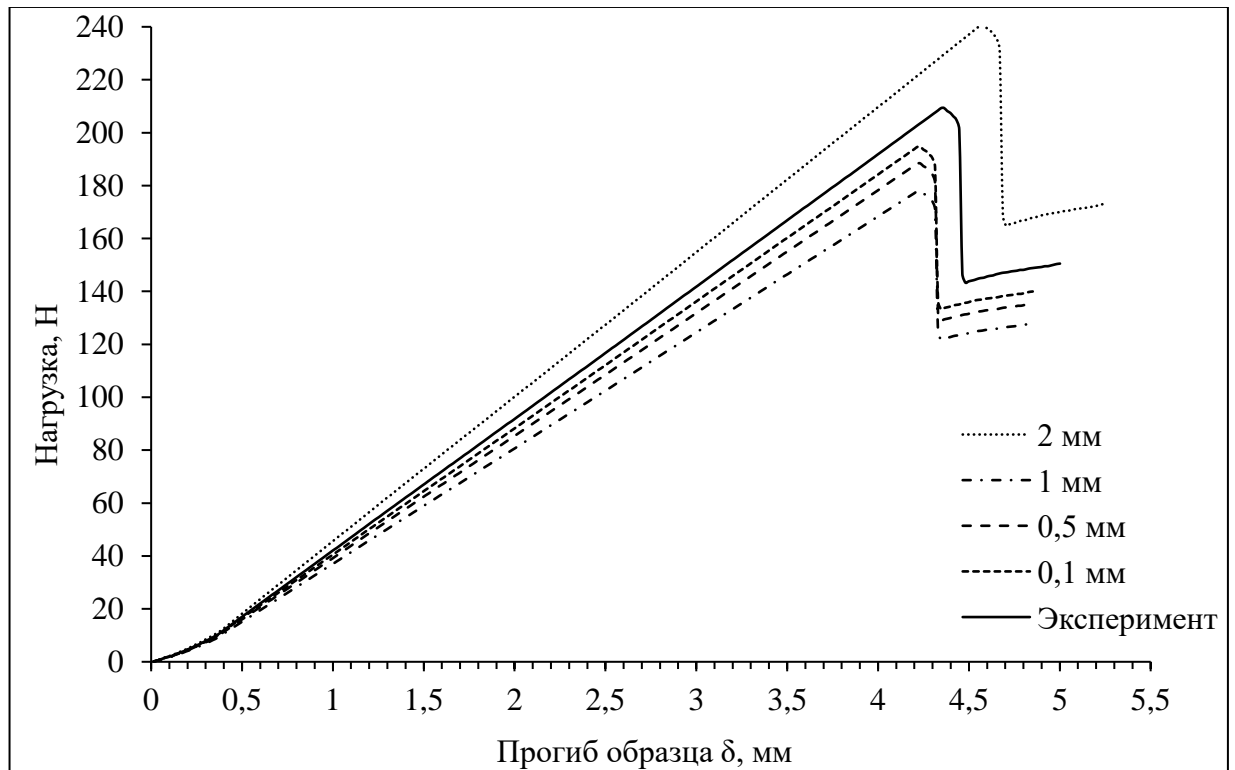


Рисунок 4.5 - Расчетные (при различной длине ИЭ) и экспериментально полученные зависимости нагрузки от смещения краев трещины для образцов УК типа БКН.

## 4.2 Комбинированная (смешанная) мода нагружения I/II: образцы SLB и OLB, метод МВЗТ

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

Данные, полученные в разделе 3, вводились в численные модели SLB и OLB соответствующих образцов ПКМ, нагружаемых комбинированно по модам I/II. Геометрические размеры твердотельных моделей SLB и OLB, соответствуют натуральным размерам SLB и OLB, описанным в разделе 2.

На рис. 4.6 приведены примеры визуальных изображения характера распределения напряжений по длине трещины при комбинированном нагружении образцов типа SLB (а, б) и OLB (в, г) для СК, при заданной длине ИЭ равной 1 мм.

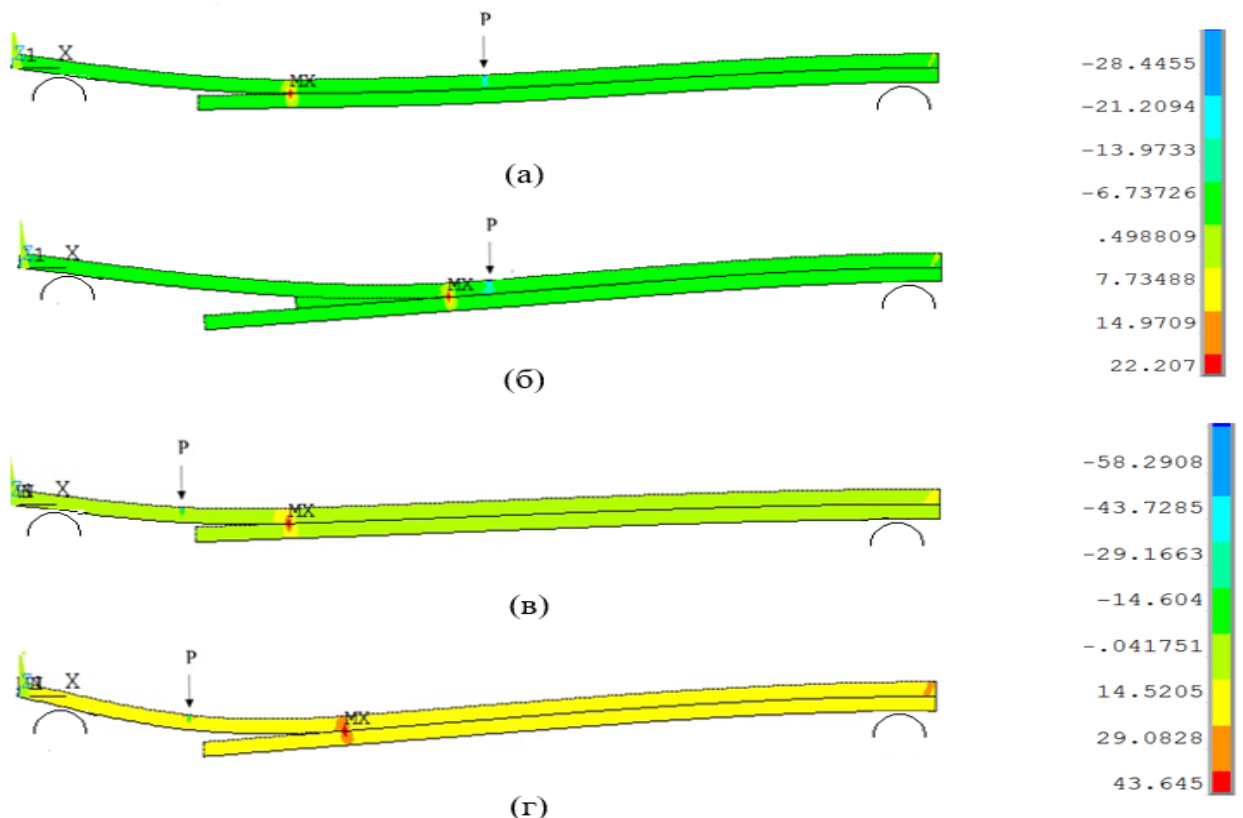
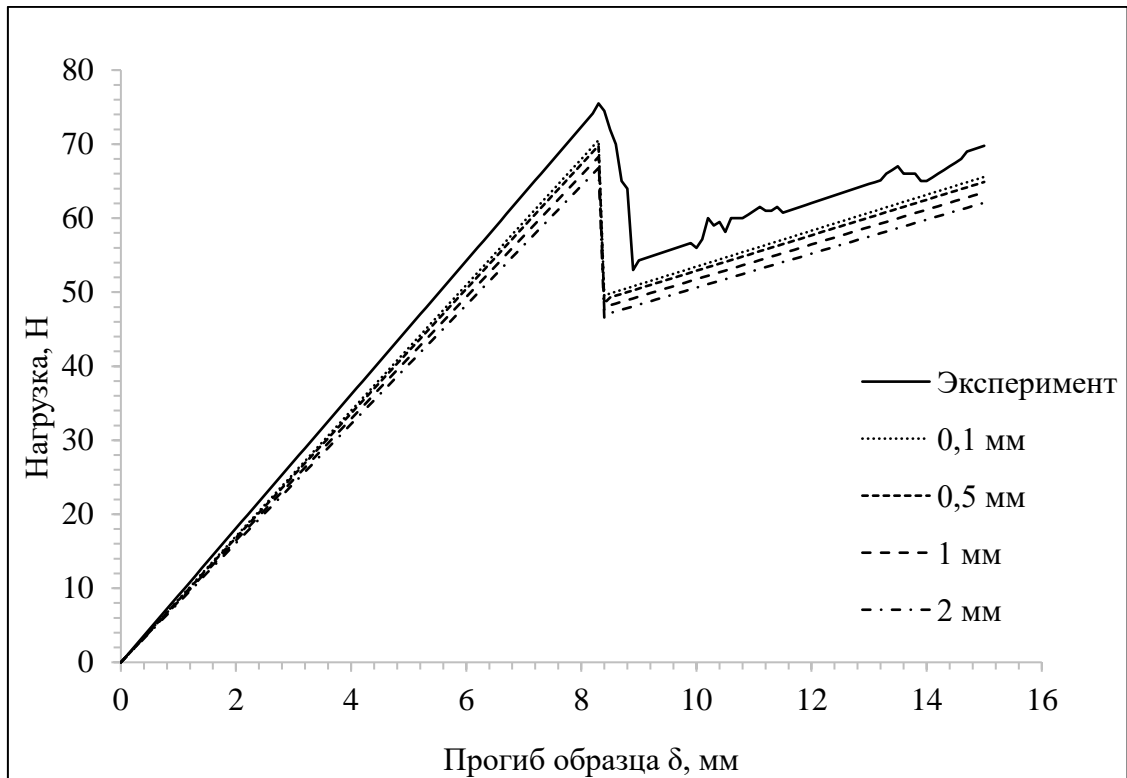


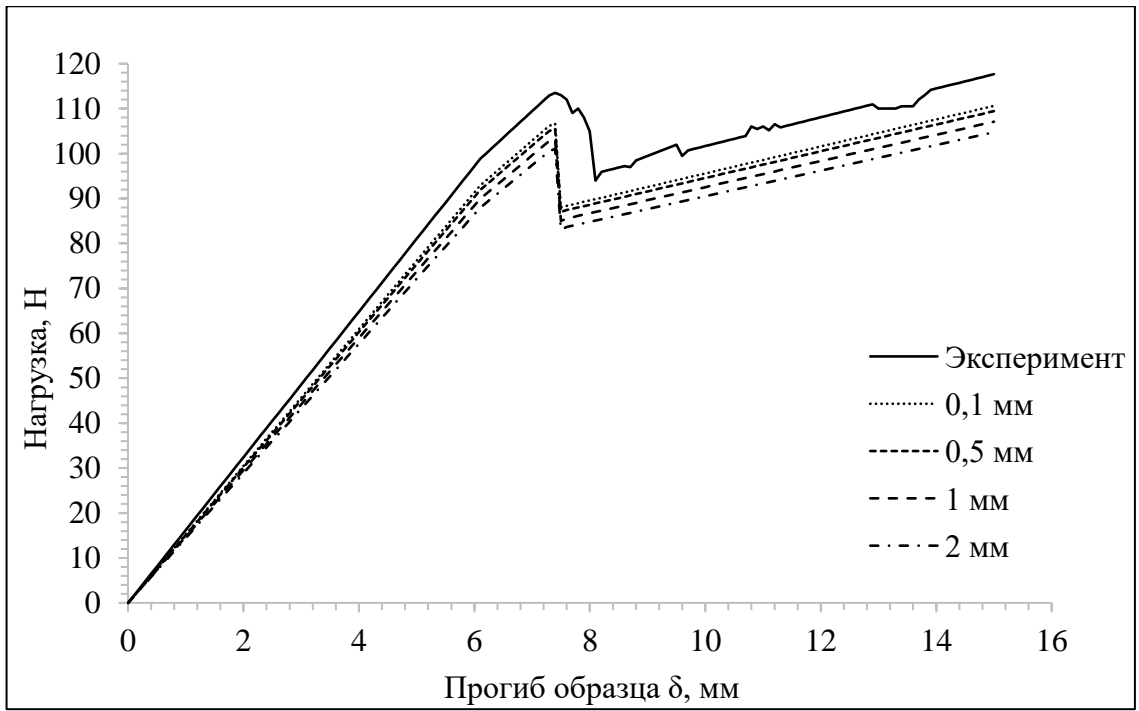
Рисунок 4.6 - Примеры развития цифровой трещины для образцов СК типа SLB (а-б) и OLB (в-г) при длине начальной трещины 43мм и величинах прогиба  $\delta=7,8$ мм (а, в) и  $\delta=12,5$ мм (б, г).

Из этих данных следует, что при изгибе образцов типа OLB вблизи вершины трещины развиваются значительно большие напряжения, чем для образцов типа SLB, а приращение длины трещины после начала ее прорастания, наоборот, значительно больше для SLB, чем OLB при одинаковой начальной длине трещины и одинаковом прогибе. Аналогичные данные о характере распределения напряжений по длине трещины при комбинированном нагружении образцов типа OLB и SLB получены для УК.

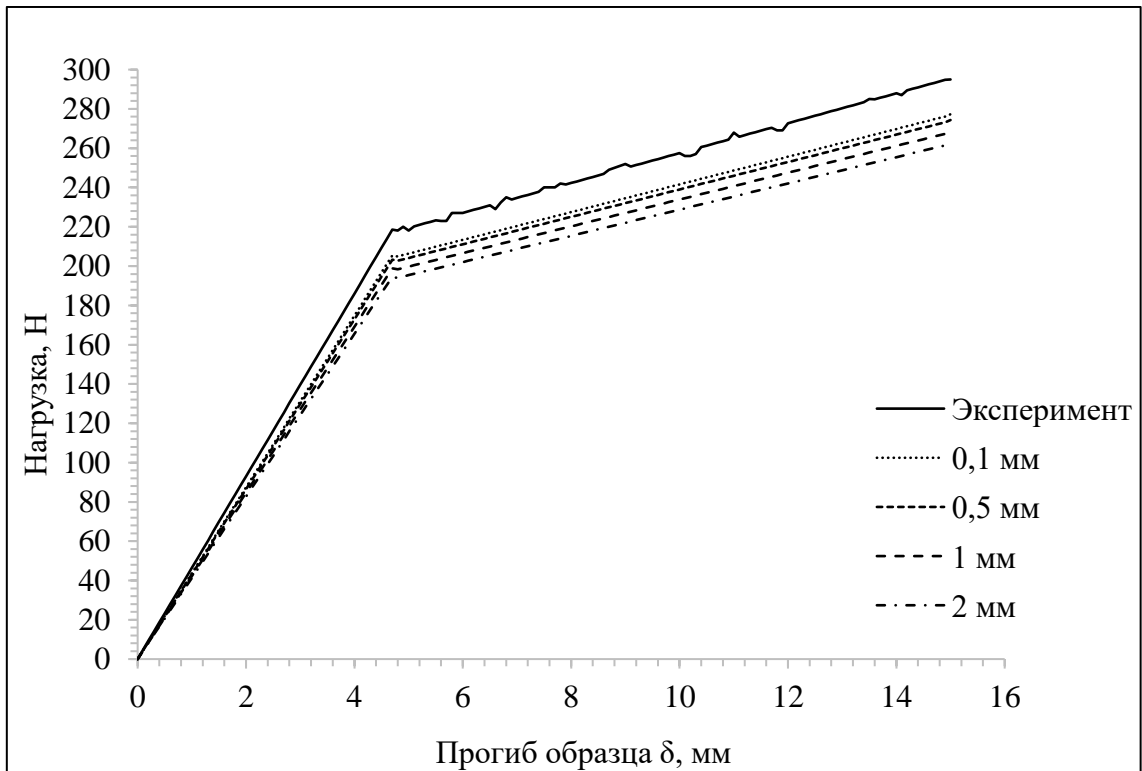
На рис. 4.7 приведены графики нагрузка-прогиб при различной длине ИЭ, полученные численным моделированием и экспериментально определённые при испытаниях образцов СК SLB (а-б) и OLB (в-г) с различной длиной начальной трещины.



а

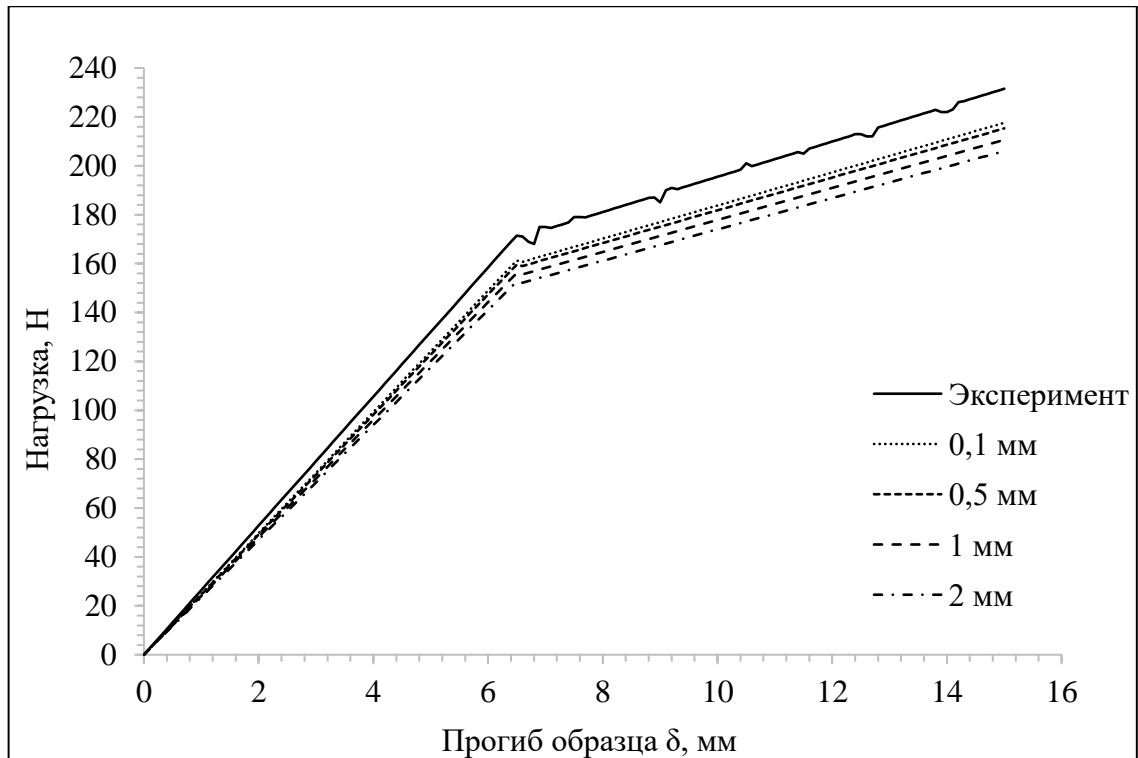


б



в

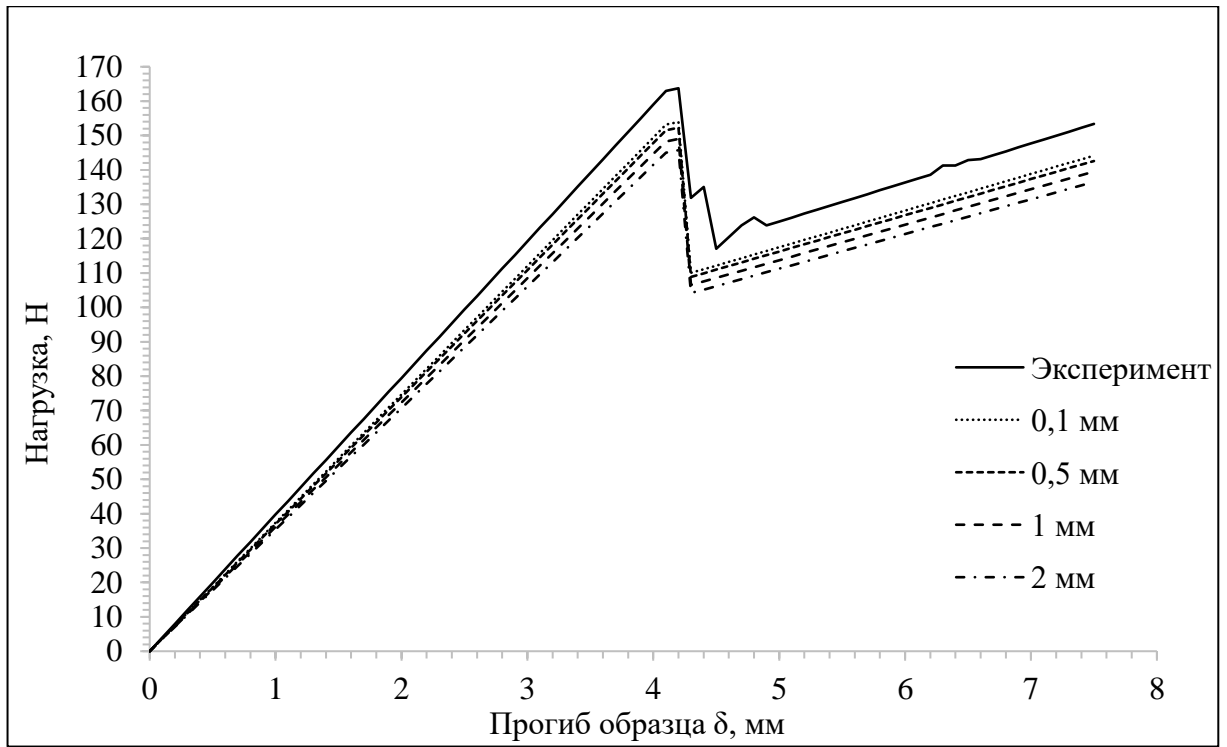




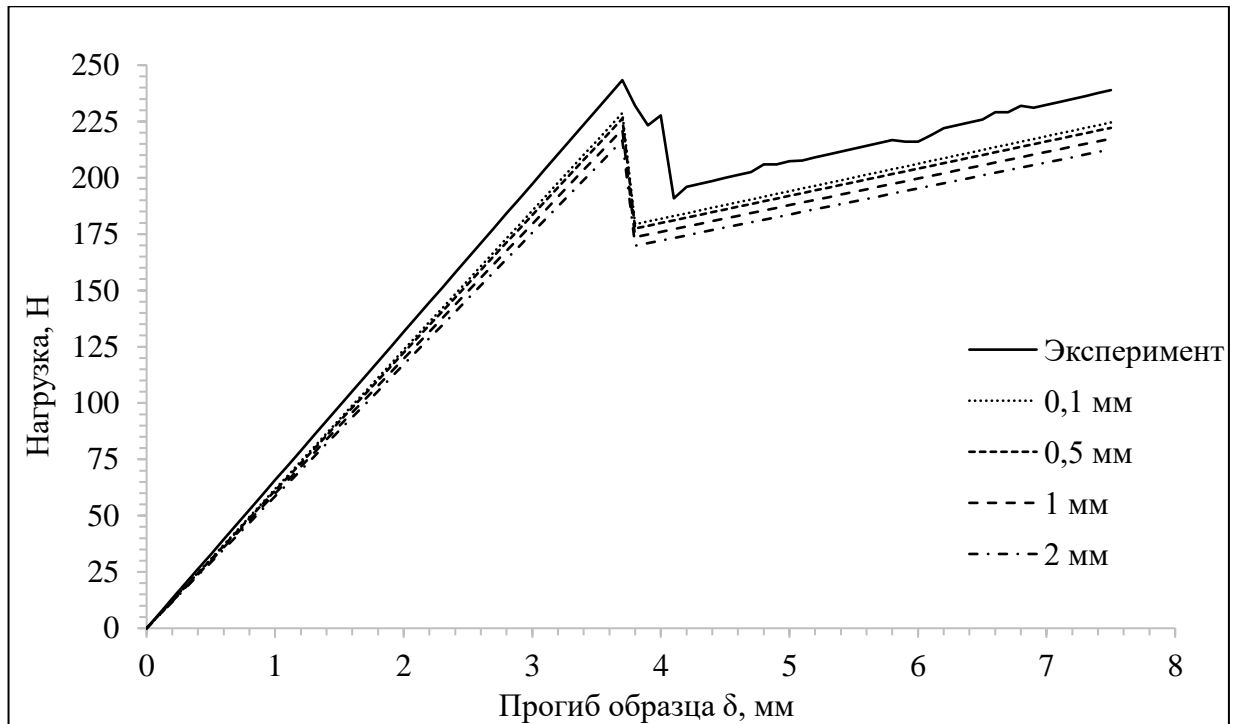
Г

Рисунок 4.7 - Расчетные (при различной длине ИЭ) и экспериментально полученные графики нагрузка-прогиб для образцов СК типа SLB (а-б) и OLB (в-г) при длинах начальной трещины 66 мм (а, в) и 43 мм (б, г).

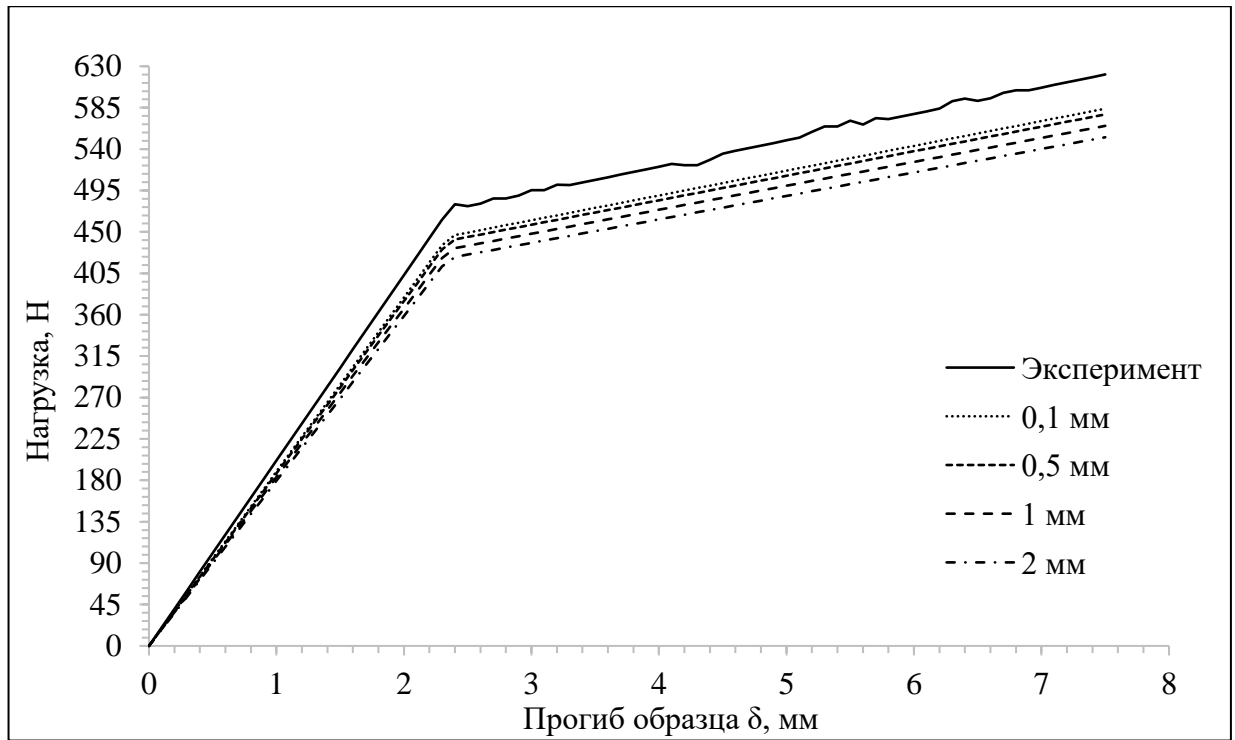
На рис. 4.8 приведены графики нагрузка-прогиб при различной длине ИЭ, полученные численным моделированием и экспериментально определенные при испытаниях образцов УК SLB (а-б) и OLB (в-г) с различной длиной начальной трещины.



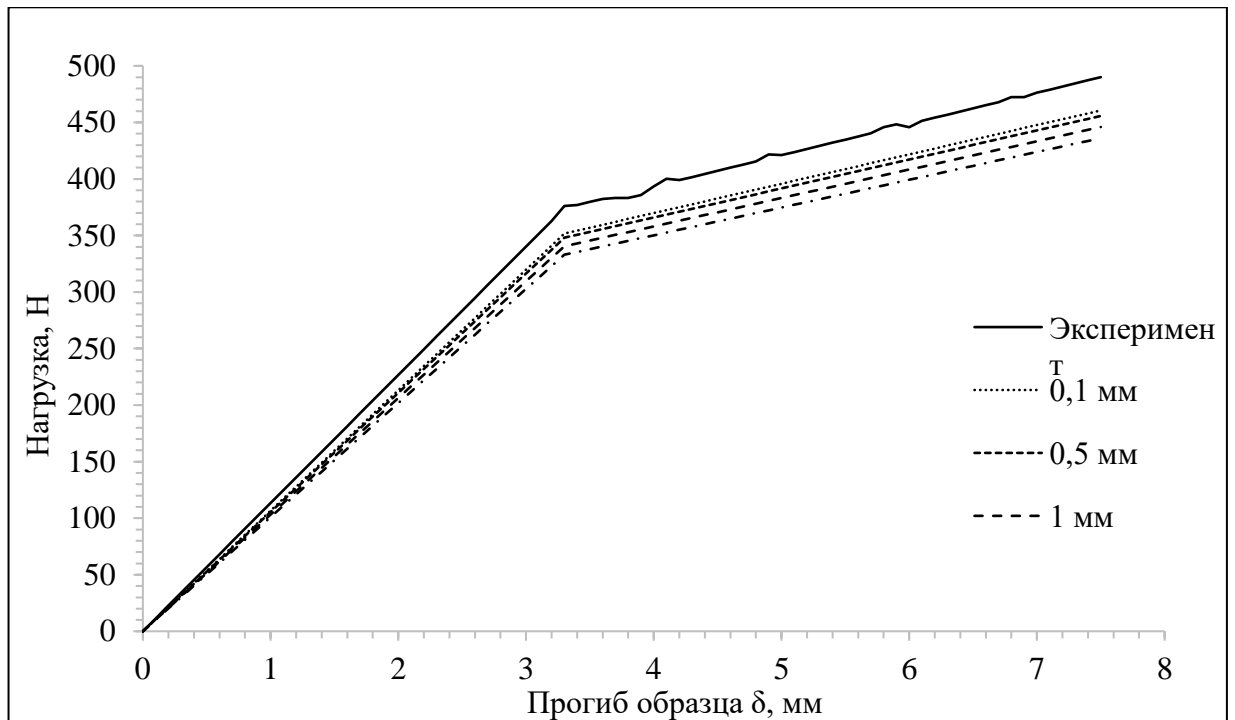
а



б



B



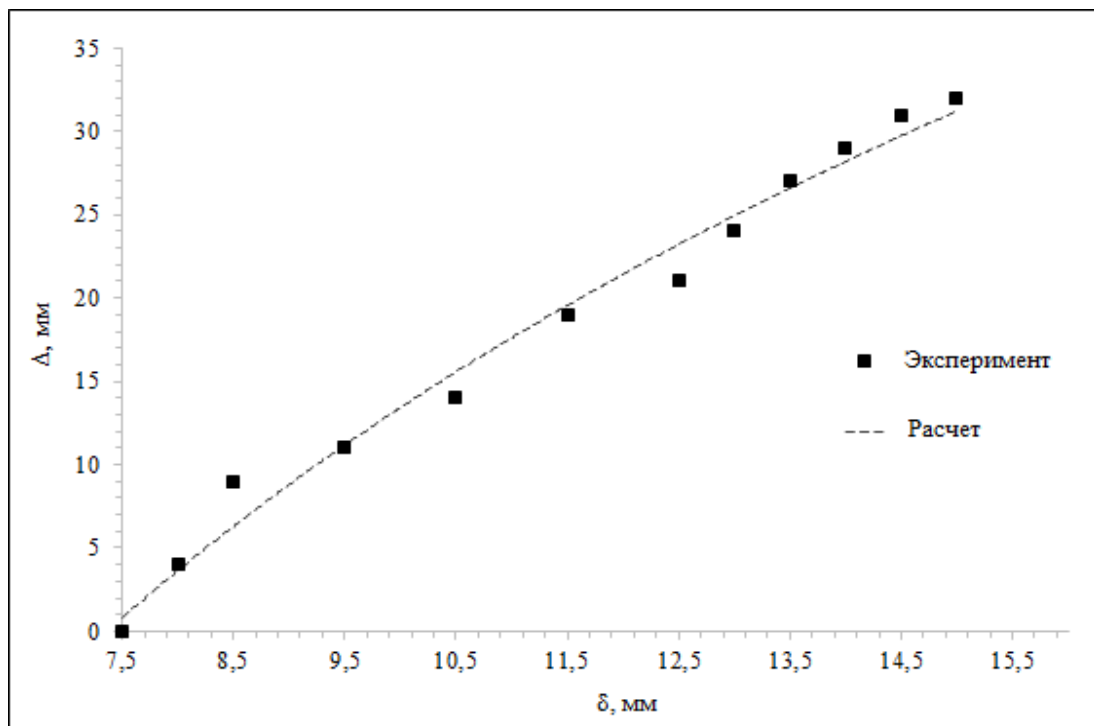
Г

Рисунок 4.8 - Расчетные (при различной длине ИЭ) и экспериментально полученные графики нагрузка-прогиб для образцов УК типа SLB (а-б) и OLB (в-г) при длинах начальной трещины 66 мм (а, в) и 43 мм (б, г).

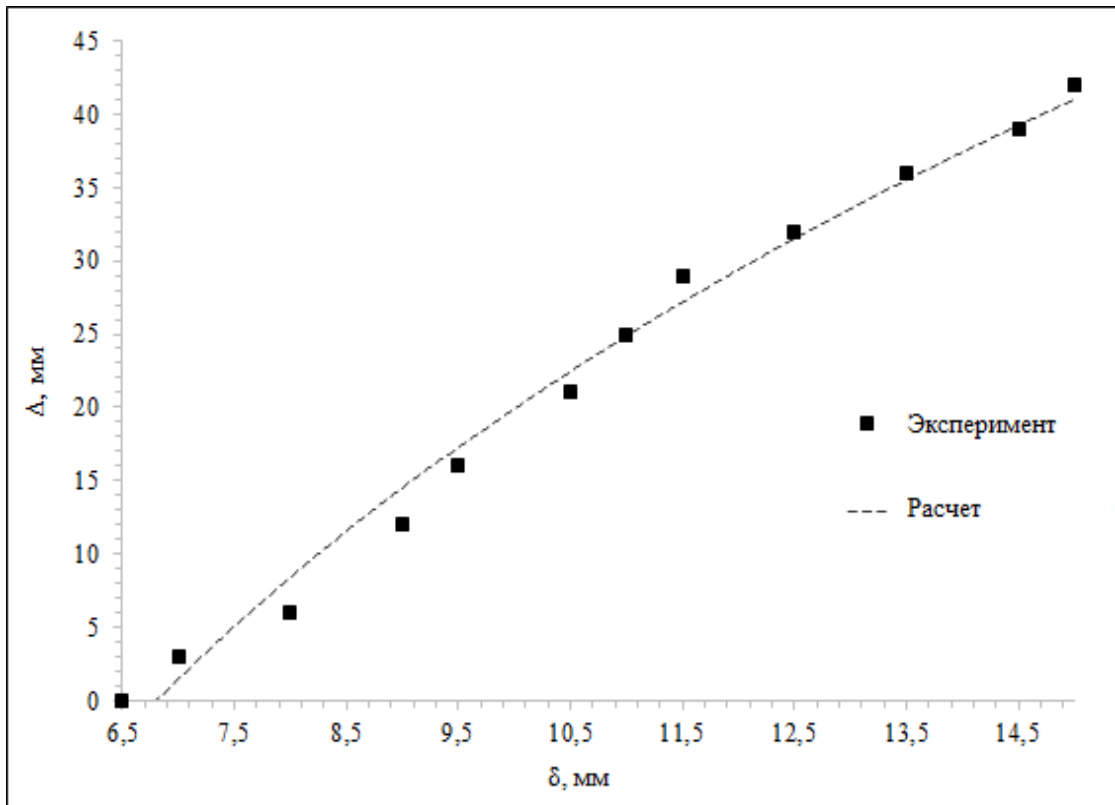
Приведенные графики близки по форме кривых численного моделирования и экспериментально полученных кривых. В обоих случаях

начало роста трещины четко проявляется в изменении характера графиков: уменьшением скачком нагрузки (в случае SLB) и уменьшением наклона графика (в случае OLB) при заданном прогибе образца.

На рис. 4.9 и 4.10 проведено сравнение расчетных и экспериментально полученных данных о прорастании трещины в зависимости от прогиба образца после достижения критической нагрузки, что также подтверждает адекватность моделирования. Расхождение составляет для СК SLB (а) не более 3,5% и OLB (б) не более 5% при длине начальной трещины 43 мм и не более 5% для УК SLB (а) и OLB (б) при длине начальной трещины 66 мм.

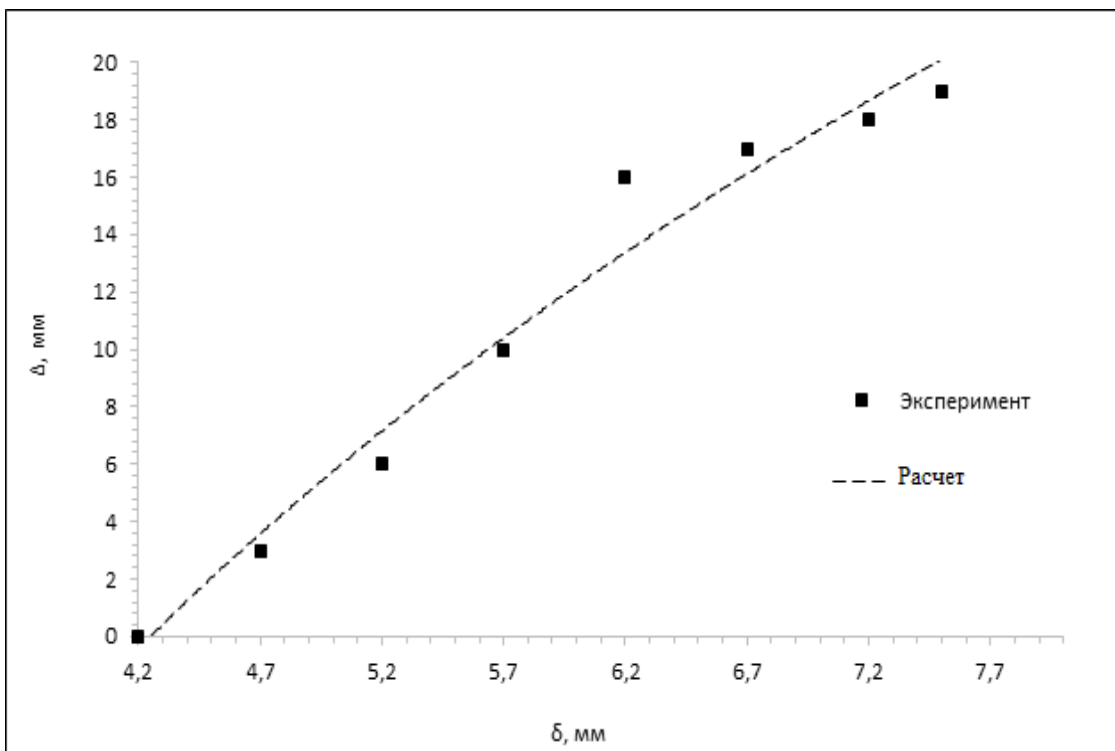


а

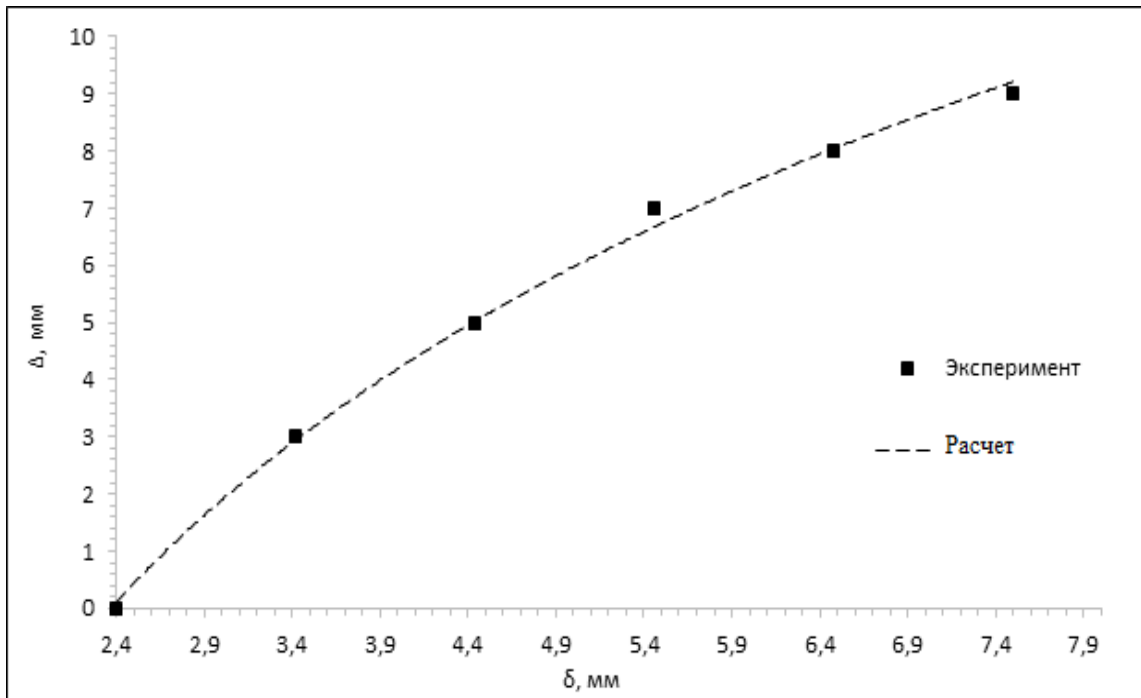


б

Рисунок 4.9 - Экспериментально и численно полученные зависимости увеличения длины трещины ( $\Delta$ ) от прогиба образцов СК ( $\delta$ ) SLB (а) и OLB (б) от длины начальной трещины 43 мм.



а



б

Рисунок 4.10 - Экспериментально и численно полученные зависимости увеличения длины трещины ( $\Delta$ ) от прогиба образцов УК ( $\delta$ ) SLB (а) и OLB (б) от длины начальной трещины 66 мм.

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

## Выводы по главе IV

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

2. Разработаны и исследованы трехмерные конечно-элементные модели критического роста трещины в двухконсольной балке и балке с концевым надрезом с имплантированным билинейным законом когезионной зоны с использованием экспериментально определенных параметров когезионной зоны и упругих констант для 2-х типов ПКМ.

3. Установлены закономерности изменения нагрузки на края трещины от величины ее раскрытия для моделей ДКБ, изменения нагрузки от прогиба для моделей БКН, SLB и OLB, и распределения напряжений по длине моделируемой когезионной зоны для моделей исследуемых слоистых ПКМ.

4. Получены закономерности изменения увеличения длины трещины от прогиба образцов SLB и OLB из стекло- и углекомпозита от длин начальной трещины равных 43 мм и 66 мм.

5. Выявлены закономерности влияния размеров интерфейсных элементов, располагающихся по длине когезионной зоны, на точность расчетов в конечно-элементной модели возникновения и развития трещины для слоистых стекло- и углекомпозитов на основе термореактивной матрицы.

6. Установлены оптимальные длины интерфейсных элементов для билинейного ЗКЗ, их количество по длине когезионной зоны, обеспечивающих низкую погрешность расчета диаграмм роста трещины в координатах нагрузка на края трещины и ее раскрытие при допустимом объеме вычислений.

7. Проведено сравнение результатов численного решения и эксперимента по определению нагрузки начала расслоения для исследуемых случаев. Применение КЭ длиной 1 мм значительно снижает погрешность

численных расчетов. В этом случае диапазон расхождений с экспериментально полученной зависимостью для двух типов исследуемых образцов с вышеуказанными начальными трещинами составляет 5-6,3%, что является достаточной точностью для большинства практических применений. Дальнейшее уменьшение длины КЭ снижает расхождение всего на 1-1,5% при значительном увеличении трудоемкости вычислений.



## Выводы и заключения по диссертационной работе

В диссертационной работе решены задачи, связанные с оценкой межслоевой трещиностойкости слоистых полимерных композитов при комбинированном нагружении и получены следующие выводы:

1. Разработана методология комплексной экспериментально-численной оценки трещиностойкости непрерывно армированных слоистых стекло- и углекомпозитов в условиях нагружения по моде I, моде II и смешанной моде I/II стандартных и нестандартных образцов, основанный на использовании физической модели Баренблатта и критерия Бензегга-Кенана.

2. Выполнен комплекс экспериментальных исследований и получены новые данные о влиянии состава ПКМ на трещиностойкость слоистых ПКМ. Экспериментально получены зависимости: нагрузка-раскрытие трещины образцов типа ДКБ, нагрузка-прогиб образцов типа БКН, нагрузка-прогиб образцов типа SLB и OLB из 2-х типов слоистых ПКМ и по ним рассчитаны критические значения интенсивности высвобождения упругой энергии при росте трещин, кроме этого получены зависимости критического значения интенсивности высвобождения упругой энергии от вклада моды II образцов типа SLB и OLB из 2-х типов слоистых ПКМ и по ним рассчитаны константы материала в уравнении критерия разрушения Бензегга-Кенана.

3. Установлено, что природа армирующего наполнителя влияет на критическое значение интенсивности выделения упругой энергии при индивидуальных модах нагружения I и II. Показано, что трещиностойкость углекомпозита КМКУ при нагружении по моде I в 1,38 раза больше по сравнению со стеклокомпозитом КМКС, а при нагружении по моде II в 1,4 раза и составляет 655 Дж/м<sup>2</sup> и 1025 Дж/м<sup>2</sup> соответственно. Трещиностойкость углекомпозита при комбинированном нагружении больше в 1,4 раза по сравнению со стеклокомпозитом и составляет 750,1 Дж/м<sup>2</sup> при начальной трещине 43 мм и 757,8 Дж/м<sup>2</sup> при начальной трещине 66 мм для образцов SLB.

Для образцов OLB трещиностойкость составляет 805,4 Дж/м<sup>2</sup> при начальной трещине 43 мм и 822,9 Дж/м<sup>2</sup> при начальной трещине 66 мм.

4. Выявлено, что нагрузка начала расслоения при нагружении по модам I и II для углепластика в 1,4 раза больше, чем для стеклопластика, и составляет 38 Н и 209 Н соответственно. Нагрузка начала расслоения при комбинированном нагружении образцов SLB для углепластика в 2 раза больше, чем для стеклопластика, и составляет 243 при начальной трещине 43 мм и 163,5 при начальной трещине 66 мм. Для образцов OLB нагрузка начала расслоения составляет 376 Н при начальной трещине 43 мм и 480,5 Н при начальной трещине 66 мм.

5. Определены параметры когезионной зоны и константы материала в критерии Бензегга-Кенана для стекло- и углекомпозитов на основе клеевых препрегов КМКС и КМКУ экспериментальными методами. Установлено, что константа материала  $\eta$  в критерии Бензегга-Кенана незначительно зависит от природы армирующего наполнителя и составляет 1,4 для стеклокомпозита КМКС и 1,5 для углекомпозита КМКУ. Обобщены экспериментально полученные значения критической интенсивности высвобождения упругой энергии ( $G_{IC}$ ,  $G_{IIC}$ ), локальной когезионной прочности ( $\sigma_{IC}$ ,  $\sigma_{IIC}$ ) и локальной деформации ( $\delta_{I\max}$ ,  $\delta_{II\max}$ ) для 2-х типов армированных слоистых ПКМ.

6. Разработаны и исследованы трехмерные конечно-элементные модели критического роста трещины в двухконсольной балке и балке с концевым надрезом с имплантированным билинейным законом когезионной зоны с использованием экспериментально определенных параметров когезионной зоны и упругих констант для 2-х типов ПКМ. Установлены оптимальные длины интерфейсных элементов для билинейного ЗКЗ, их количество по длине когезионной зоны, обеспечивающих низкую погрешность расчета диаграмм роста трещины в координатах нагрузка на края трещины и ее раскрытие при допустимом объеме вычислений.

7. Разработаны и исследованы трехмерные конечно-элементные модели критического роста трещины для образцов SLB и OLB с

применением метода виртуального закрытия трещины. Показано, что в конечно-элементной модели при смешанной моде нагружения I/II для слоистых стекло-, углекомполитов размер твердотельных конечных элементов (КЭ), располагающихся по траектории роста трещины, влияет на точность расчета усилия возникновения и развития трещины. Установлено, что для стеклокомполита КМКС и углекомполита КМКУ минимально допустимая длина КЭ составляет 1 мм, что обеспечивает расхождение с экспериментально полученной зависимостью нагрузка-прогиб 5% и 6,3% соответственно. Дальнейшее уменьшение длины КЭ снижает расхождение всего на 1 - 1,5 % при значительном увеличении трудоемкости вычислений.

8. Показано, что методы когезионной зоны и виртуального закрытия трещины, имплантированные в метод конечных элементов, могут быть применены с высокой степенью точности для оценки межслоевой трещиностойкости и прогнозирования устойчивости к расслоениям не только на простых образцах, но и на сложных элементах авиационных конструкций.

## Список литературы

1. Л.А. Дементьева, А.А. Серезенков, Л.И. Бочарова, Л.И. Аниховская, Н.Ф. Лукина. Композиционные материалы клеевые на основе стеклянных и углеродных наполнителей. «Клеи. Герметики. Технологии», №1, 2009 г.
2. А.П. Петрова, Л.А. Дементьева, Н.Ф. Лукина, Л.В. Чурсова. Клеевые связующие для полимерных композиционных материалов на угле- и стеклонаполнителях. «Труды ВИАМ», №9, 2015 г.
3. Аниховская Л.И., Минаков В.Т. Клеи и клеевые препреги для перспективных изделий авиакосмической техники /В кн.: Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932-2002: Юбилейный науч.-технич. сб. М.: МИСиС-ВИАМ. 2002. С. 315-326.
4. Каблов Е.Н., Минаков В.Т., Аниховская Л.И. Клеи и материалы на их основе для ремонта конструкций авиационной техники /В сб. Авиационные материалы и технологии. Вып. «Ремонтные технологии в авиастроении». М.: ВИАМ. 2002. №1. С. 61-65.
5. Дементьева Л.А., Серезенков А.А., Бочарова Л.И., Лукина Н.Ф., Куцевич К.Е., Петрова А.П. Свойства композиционных материалов на основе клеевых препрегов //Клеи. Герметики. Технологии. 2012. №6. С. 19-24.
6. Е. Д. Колпачков, А. П. Петрова, А. О. Курносков, И. И. Соколов. Методы формования изделий авиационного назначения из ПКМ (обзор). «Труды ВИАМ», №11, 2019 г.
7. Vorontsov A. N., Murzakhanov G. Kh. and Shchugorov V. N. Delamination failure of composite structure. // *Mechanika Kompositnykh Materialov*. - 1989. - 6. - P. 1007-1023.
8. V.L. Blagonadezhin, A. N. Vorontsov, and G. Kh. Murzakhanov, «Technological problems of the mechanics of composite structures» *Mekh. Kompoz. Mater.*, No. 5, 859-877 (1987).
9. S.S. Wang, «Fracture mechanics for delamination problems in composite materials» *J. Compos. Mater.*, 17, No. 3, 210-223 (1983).

10. G. Kh. Murzakhanov and V. N. Shchugorev, «Growth of technological delamination defects in molded composites» *Probl. Prochn.*, No. 8, 54-57 (1989).
11. V. V. Bolotin, «Interlayer failure of composites in combined loading~» *Mekh. Kompozit Mater.*, No. 3, 410-418 (1988).
12. Wang L., Zheng C., Luo H., Wei S., Wei Z. Continuum damage modelling and progressive failure analysis of carbon fiber/epoxy composite pressure vessel. // *Heavy Castings and Forgings*. - 2015. - P. 475-480.
13. Liu PF, Chu JK, Hou SJ, et al. Micromechanical damage modeling and multiscale progressive failure analysis of composite pressure vessel. *Comput Mater Sci* 2012; 60:137-48.
14. Pineda EJ, Waas AM, Bednarczyk BA, et al. Progressive damage and failure modeling in notched laminated fiber reinforced composites. *Int J Fract* 2009;158(2):125-43.
15. Li S, Thouless MD, Waas AM, et al. Mixed-mode cohesive-zone models for fracture of an adhesively bonded polymer-matrix composite. *Eng Fract Mech* 2006;73(1):64-78.
16. Haj-Ali R. Cohesive micromechanics: a new approach for progressive damage modeling in laminated composites. *Int J Damage Mech* 2008.
17. Yang Q, Cox B. Cohesive models for damage evolution in laminated composites. *Int J Fract* 2005;133(2):107-37.
18. O'Brien T. Kevin. Development of a Composite Delamination Fatigue Life Prediction Methodology. // NASA Technical reports server. - 2009. P. 1-9.
19. MIL-HDBK-17F «The Composite Materials Handbook» Volume 1: Polymer Matrix Composites Guidelines for Characterization of Structural Materials, ASTM International, West Conshohocken PA, 2002.
20. V. Tvergaard, Predictions of Mixed-mode Interface Crack growth using a Cohesive Zone Model for Ductile Fracture, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 52, 2004, pp. 925-940.

21. P. P. Camanho, C. G. Davila, and S. T. Pinho, Fracture Analysis of Composite Co-cured Structural Joints using Decohesion Elements, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 27, 2004, pp. 745-757.

22. Z. H. Jin and C. T. Sun, A Comparison of Cohesive Zone Modeling and Classical Fracture Mechanics Based on Near Tip Stress Field, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 43, 2006, pp. 1047-1060.

23. Bertolini J., Castanié B., Barrau J. J., Navarro J. P. Multi-level experimental and numerical analysis of composite stiffener debonding. Part 1 // Non-specific specimen level *Composite Structures*. - 2009. - v. 90. - P. 381-391; Part2 // Element and panel level. *Composite Structures*. - 2009. - v. 90. - P. 392-403.

24. Minguet PJ, O'Brien TK. Analysis of test methods for characterizing skin/ stringer debonding failures in reinforced composite panels. *Composite materials: testing and design* (vol. 12). ASTM STP 1996;127(4):105-24.

25. Camanho PP, Davilà CG, De Moura MF. Numerical simulation of mixed-mode progressive delamination in composite. *J Compos Mater* 2003; 37:1415-38.

26. Turon A, Camanho PP, Costa J, Davila CG. A damage model for the simulation of delamination in advanced composites under variable-mode loading. *Mech Mater* 2006; 38:1072-89.

27. Blackman BRK, Hadavina H, Kinloch AJ, Williams JG. The use of cohesive zone model to study the fracture of fibre composites and adhesively-bonded joints. *Int J Fract* 2003; 119:25-46.

28. Redder, J.R., An Evaluation of Mixed-Mode Delamination Fracture Criteria. NASA TM 104210, 1992.

29. Singh, S. & Partridge, I. K., Delamination Failure in Unidirectional Carbon Fiber/Epoxy under Mixed-Mode Loading. *Polymer & Polymer Composites*. Vol. 3, No. 1, 1994.

30. Friedrich K. (Ed), 'Application of Fracture Mechanics to Composite Materials', Elsevier, Amsterdam, the Netherlands (1989) chapters 1,3-5.

31. Murri G.B. and Marlin R.H., 'Effect of initial delamination on Mode I and Mode II interlaminar fracture toughness and fatigue fracture threshold', NASA technical memorandum 104079 (1991).

32. Williams J.G., 'Fracture mechanics of composites failure', Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers 204 (1990) 209-218.

33. Crews J.H. and Reeder J.R., 'A mixed-mode bending apparatus for delamination testing', NASA technical memorandum 100662 (1988).

34. Davidson, B. D., and Zhao, W., An Accurate Mixed-Mode Delamination Failure Criterion for Laminated Fibrous Composites Requiring Limited Experimental Input. *Journal of Composite Materials*, vol. 41 no. 6, (2007), pp. 679-702.

35. Kinloch, A.J., Wang, Y., Williams, J.G. and Yayla, P. (1993). The Mixed-Mode Delamination of Fibre Composite Materials, *Composites Science and Technology*, 47(3): 225-237.

36. Singh, S. and Partridge, I.K. (1995). Mixed-Mode Fracture in an Interleaved Carbon-Fiber/Epoxy Composite, *Composites Science and Technology*, 55(4): 319-327.

37. Ducept, F., Davies, P. and Gamby, D. (2000). Mixed-Mode Failure Criteria for a Glass/Epoxy Composite and an Adhesively Bonded Composite/Composite Joint, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 20(3): 233-244.

38. Jose, S., Kumar, R.R., Venkateswara, G.R. and Sriram, P. (2000). Studies on Mixed Mode Interlaminar Fracture Toughness of M55J/M18 Carbon/Epoxy, *Advanced Composites Letters*, 9: 335-340.

39. Benzeggagh, M.L., & Kenane, M., Measurement of Mixed-Mode Delamination Fracture Toughness of Unidirectional Glass/Epoxy Composites with Mixed-Mode Bending Apparatus, *Composites science and technology*, 56 (1996), pp. 439-449.

40. Vanderklev, P. S., Mode I-mode II delamination fracture toughness of a unidirectional graphite/epoxy composite. Master's thesis, Texas, 1981.

41. Ramkumar, R. L. & Whitcomb, J. D., Characterization of mode I and mixed mode delamination growth in T300/5028 graphite epoxy. ASTM STP 876, 1985, pp. 31.5-35.

42. Corleto, C., Bradley, W. & Henriksen, M., Correspondence between stress fields and damage zones ahead of crack tip of composites under mode I and mode II loading. Proc. 6th Int. Conf. on Composite Materials, ZCCM and ECCM. Elsevier, London, 1987.

43. Arcan, L., Arcan, M. & Danieli, M., SEM fractography of pure and mixed mode interlaminar fractures in graphite/epoxy composites. Fractography of Modern Engineering Materials: Composites and Metals, ed. J. E. Masters & J. J. Au. ASTM STP 948, 1987, pp. 41-67.

44. Benzeggagh, M.L., Gong, X, J., Aboura, Z. & Sastra, H. Y., Proceedings of the 9th International Conference on Composite Materials (ICCM9), vol. 6, Madrid, Spain, 1993.

45. Новиков Г.В. Оценка межслоевой трещиностойкости армированных слоистых ПКМ экспериментальными и численным методом // Москва - 2021.

46. Бабаевский П.Г., Кулик С.Г. Трещиностойкость отвержденных полимерных композиций // М., «Химия» 1991 г. С. 336.

47. 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.

48. Расчет эффективной трещиностойкости для упругопластической слоистой среды / Р.Я. Газизов [и др.] // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2014. №2(37). С. 154-171.

49. J. R. Reeder. 3D Mixed-Mode Delamination Fracture Criteria-An Experimentalist's Perspective. NASA Langley Research Center, M/S 188E, Hampton VA 23681-2199, USA.

50. Dugdale, D. S. (1960). «Yielding of steel sheets containing slits» J. Mech. Phys. Solids, 8, 100-104.



51. Eligehausen, R., and Sawade, G. (1985). «Verhalten von Beton auf Zug» Betonwerk und Fertigteil-Technik, 5, 315-322.

52. Mixed-Mode Interlaminar Fracture Toughness of Glass and Carbon Fibre Powder Epoxy Composites - For Design of Wind and Tidal Turbine Blades. C. Floreani, C. Robert, P. Alam, P Davies, C.M. Ó Brádaigh. Materials 2021, 14, 2103. P. 1-21.

53. Tabiei, A.; Zhang, W. Composite Laminate Delamination Simulation and Experiment: A Review of Recent Development. Appl. Mech. Rev. 2018, 70, 030801.

54. Bonhomme, J.; Argüelles, A.; Viña, J.; Viña, I. Fractography and failure mechanisms in static mode I and mode II delamination testing of unidirectional carbon reinforced composites. Polym. Test. 2009, 28, 612-617.

55. Ducept, F.; Davies, P.; Gamby, D. Mixed mode failure criteria for a glass/epoxy composite and an adhesively bonded composite/composite joint. Int. J. Adhes. Adhes. 2000, 20, 233-244.

56. Pereira, A.; de Morais, A. Mixed mode I+II interlaminar fracture of carbon/epoxy laminates. Compos. Part A Appl. Sci. Manuf. 2008, 39, 322-333.

57. LeBlanc, L.R.; LaPlante, G. Experimental investigation and finite element modeling of mixed-mode delamination in a moistureexposed carbon/epoxy composite. Compos. Part A Appl. Sci. Manuf. 2016, 81, 202-213.

58. D7905M-14. Standard Test Method for Determination of the Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959. United States.

59. Mode II interlaminar fracture toughness of woven E-glass/epoxy composites in the presence of mat interleaves. M. Reza Hosseini, F. Taheri-Behrooz, M. Salamat-talab. International Journal of Adhesion and Adhesives. Volume 98, April 2020, 10252.

60. Wood MDK, Sun X, Tong L, Luo Q, Katzos A, Rispler A. A new ENF test specimen for the mode II delamination toughness testing of stitched woven CFRP laminates. *J Compos Mater* 2007; 41:1743-72.

61. Pereira A, de Morais AB. Mode II interlaminar fracture of glass/epoxy multidirectional laminates. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 2004; 35:265-72.

62. Beckermann GW, Pickering KL. Mode I and Mode II interlaminar fracture toughness of composite laminates interleaved with electrospun nanofibre veils. *Compos Part A* 2015; 72:11-21.

63. Shokrieh MM, Zeinedini A, Ghoreishi SM. On the mixed mode I/II delamination Rcurve of E-glass/epoxy laminated composites. *Compos Struct* 2017; 171:19-31.

64. ASTM D6671. Standard Test Method for Mixed Mode I-Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber Reinforced Polymer Matrix Composites. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959. United States.

65. Szekrenyes A, Uj J (2007) Over-leg bending test for mixed-mode I/II interlaminar fracture in composite laminates. *Int J Damage Mech* 16:5-33.

66. Davidson, B.D. and Koudela, K.L. (1999). Influence of the Mode Mix of Pre-cracking on the Delamination Toughness of Laminated Composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 18: 1408-1414.

67. Olsson, R. (1992). A Simplified Improved Beam Analysis of the DCB Specimen, *Composites Science and Technology*, 43: 329-338.

68. Ozdil, F. and Carlsson, L.A. (1999). Beam Analysis of Angle-ply Laminate Mixed-mode Bending Specimens, *Composites Science and Technology*, 59: 937-945.

69. Tracy, G.D., Feraboli, P. and Kedward, K.T. (2003). A New Mixed Mode Test for Carbon/Epoxy Composite Systems, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 34: 1125-1131.

70. Qiao, P., Wang, J. and Davalos, J.F. (2004). Analysis of Tapered ENF Specimen and Characterization of Bonded Interface Fracture under Mode-II Loading, *International Journal of Solids and Structures*, 40: 1865-1884.

71. Mohsen Moslemi<sup>1</sup>, Mohammadreza Khoshravan. Cohesive Zone Parameters Selection for Mode-I Prediction of Interfacial Delamination. *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering* 61(2015)9, 507-516.

72. Hillerborg, A., Modéer, M., Petersson, P.-E. (1976). 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, p. 773-781.

73. Turon, A., Davila, C.G., Camanho, P.P., Costa, J. (2007). An engineering solution for mesh size effects in the simulation of delamination using cohesive zone models. *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 74, no. 10, p. 1665-1682.

74. De Moura, M., Campilho, R., Gonçalves, J. (2008). Crack equivalent concept applied to the fracture characterization of bonded joints under pure mode I loading. *Composites Science and Technology*, vol. 68, no. 10-11, p. 2224-2230.

75. Dávila, C.G., Camanho, P.P., de Moura, M. F. (2001). Mixedmode decohesion elements for analyses of progressive delamination. *Proceedings of the 42nd AIAA/ASME/ASC*.

76. Mohsen Moslemi, Mohammadreza Khoshravan azar. Delamination analysis of woven fabrication laminates using cohesive zone model. *J. Cent. South Univ.* (2016) 23: 27–38.

77. LIU P, YANG Y. Finite element analysis of the competition between crack deflection and penetration of fiber-reinforced composites using virtual crack closure technique [J]. *Applied Composite Materials*, 2014, 21: 759–771.

78. HILLERBORG A, MODÉER M, PETERSSON P E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements [J]. *Cement and Concrete Research*, 1976, 6: 773–781.

79. de MORAIS A. Mode I cohesive zone model for delamination in composite beams [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2013, 109:236–245.

80. CAMANHO P P, DAVILA C, de MOURA M. Numerical simulation of mixed-mode progressive delamination in composite materials [J]. Journal of Composite Materials, 2003, 37: 1415–1438.

81. de MORAIS A. Cohesive zone beam modelling of mixed-mode I-II delamination [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2014, 64: 124–131.

82. Evaluations on VCCT and CZM methods of delamination propagation simulation for composite specimens. Rui Liu, Zhefeng Yu, Fedor Nasonov. Aerospace Systems (2023) 6:621-632.

83. Fawaz SA (1998) Application of the virtual crack closure technique to calculate stress intensity factors for through cracks with an elliptical crack front. Eng Fract Mech 59:327-342.

84. Deng J, Lu TJ, Yin QZ (2021) Analysis on I- II mixed interlaminar crack propagation of composite MMB specimens. Acta Aeronaut Astronaut Sin 42:224241.

85. Samborski S (2016) Numerical analysis of the DCB test configuration applicability to mechanically coupled Fiber Reinforced Laminated Composite beams. Compos Struct 152:477-487.

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

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

88. ГОСТ 28006-23. Лента углеродная конструкционная. Технические условия.

89. ТУ 1-595-14-1034-2008. Связующие клеевые марок ВСК-14.

90. ГОСТ 19170-2001. Стекловолокно. Ткань конструкционного назначения. Технические условия.

91. C Floreani, C. Robert, P. Alam, P. Davies, C. Ó Brádaigh «Mixed-Mode Interlaminar Fracture Toughness of Glass and Carbon Fibre Powder Epoxy

Composites - For Design of Wind and Tidal Turbine Blades. *Materials* 2021, 14, 2103.

92. H.Bae, M.Kang, K.Woo. Test and Analysis of Modes I, II and Mixed-Mode I/II Delamination for Carbon/Epoxy Composite Laminates *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, (2019) V. 20, pp 636-652.

93. Barenblatt G.I. The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture, (1962) *Adv. Appl. Mech.* 7, 55-129.