



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

---

На правах рукописи

**УСТИНОВ АНДРЕЙ АНАТОЛЬЕВИЧ**

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ  
КОНСТРУКЦИОННЫХ КЛЕЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ К КРИТИЧЕСКОМУ  
И ДОКРИТИЧЕСКОМУ РОСТУ ТРЕЩИН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
МОДЕЛИ КОГЕЗИОННОЙ ЗОНЫ ПРИ КВАЗИСТАТИЧЕСКОМ  
НАГРУЖЕНИИ**

Специальность 2.6.17 – Материаловедение

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор технических наук  
Козлов Николай Алексеевич

Москва 2021

## Оглавление

Введение .....	4
1. Состояние вопроса .....	12
1.1 Конструкционные клеевые соединения и клеи, применяемые в авиационной и ракетно-космической технике .....	12
1.1.1 Конструкционные клеевые соединения.....	12
1.1.2 Полимерные конструкционные клеи и технологии склеивания.....	17
1.1.3 Дефекты конструкционных клеевых соединений .....	26
1.2. Методы оценки и прогнозирования критической и докритической трещиностойкости ККС в рамках ЛУМР .....	29
1.2.1 Аналитические макромеханические модели и методы ЛУМР .....	29
1.2.2 Аналитические микромеханические модели и методы ЛУМР .....	34
1.2.3 Аналитические подходы и методы оценки кинетики докритического роста трещин и долговечности ККС в рамках ЛУМР.....	37
1.2.4 Подходы и методы численного моделирования и оценки трещиностойкости ККС .....	40
1.3 Экспериментальные исследования и численное моделирование критической и докритической трещиностойкости ККС.....	43
1.3.1 Устойчивость ККС к критическому росту трещин .....	43
1.3.2 Устойчивость ККС к докритическому росту трещин .....	48
1.4 Заключение по литературному обзору и постановка задач.....	55
2. Объекты и методы исследования .....	58
2.1 Объекты исследования .....	58
2.2 Методы исследования.....	60
3. Определение параметров трещиностойкости и кинетики докритического роста трещин.....	63

3.1	Определение критического параметра трещиностойкости ( $G_{IC}$ ) .....	63
3.2	Определение кинетических параметров докритического роста трещины..	68
3.3	Определение критических параметров когезионной зоны .....	75
4.	Численное моделирование критического роста трещины и оценка трещиностойкости образцов ККС типа ДКБ.....	80
4.1	Принцип моделирования в пакете прикладных программ ANSYS .....	80
4.2	Численное моделирование .....	87
4.3	Сравнение экспериментальных и расчётных результатов.....	96
5.	Численное моделирование докритического роста трещины в образцах ККС типа ДКБ и построение G-V диаграммы .....	101
5.1	Разработка методики моделирования докритического роста.....	101
5.2	Проведение расчётов и сравнение с экспериментальными данными .....	106
	Выводы .....	113
	Перечень сокращений .....	116
	Список литературы .....	117

## Введение

### Актуальность работы:

В настоящее время прочные (конструкционные) полимерные клеи всё чаще применяются для соединения листовых конструкционных материалов (металлов и композитов) в производстве и ремонте аэрокосмических конструкций, длительно работающих в жестких условиях. В отличие от механических клеевые соединения обеспечивают существенный выигрыш в весе и герметичности конструкций. Однако, при длительной эксплуатации, особенно в условиях космического пространства, клеевые соединения на основе конструкционных клеев склонны к разрушению вследствие критического или докритического роста дефектов (трещин) под воздействием внешних нагрузок и факторов окружающей среды. Это обуславливает необходимость в разработке методов эффективной оценки и прогнозирования несущей способности и долговечности конструкционных клеевых соединений (ККС) при заданной их геометрии и моде нагружения, конфигурации и размерах дефекта. Наилучшие возможности для этого обеспечивает использование аналитических и экспериментальных методов линейной упругой механики разрушения (ЛУМР), позволяющих определять критические значения энергетических и силовых параметров нагрузки на дефект (трещину) как показатели трещиностойкости и кинетику докритического подрастания трещины, определяющую долговечность конструкционных клеевых соединений. Такие методы применимы только при наличии заданной, четко выраженной трещины при сравнительно простой геометрии конструкционных клеевых соединений и дефектов в них и не могут быть использованы для оценки ее зарождения и роста в местах концентрации напряжений. Эта проблема, в рамках применимости линейной упругой механики разрушения, решается разработкой численных методов моделирования инициирования и роста трещин путем имплантации в метод конечных элементов (МКЭ) модели когезионной зоны (МКЗ), базирующейся на микромеханическом анализе предразрушения

материала вблизи кончика трещины или любом месте концентрации напряжения, называемом процессной или когезионной зоной (КЗ). При имплантации в метод конечных элементов модели когезионной зоны между двумя частями твердотельной конечно-элементной модели вводится связанный с ними тонкий промежуточный (интерфейсный или когезионный) слой с отдельной сеткой специальных конечных (интерфейсных) элементов, механическое поведение которого подчиняется определённому закону - закону когезионной зоны (ЗКЗ). Современные программные пакеты ANSYS® и ABAQUS® позволяют создавать такие модели применительно к инициированию и росту трещин в конструкционных клеевых соединениях, в том числе геометрически сложной конфигурации, но для этого необходимо знать форму и параметры закона когезионной зоны, а сами модели требуют экспериментальной проверки корректности на стандартных образцах.

#### **Степень разработанности темы:**

Проведенный аналитический обзор литературы показал, что на данный момент накоплен достаточно большой объём данных о методах и результатах экспериментальных исследований, численного моделирования и расчетов критической трещиностойкости жестких конструкционных клеевых соединений с использованием стандартных конфигураций образцов, чаще всего в виде двойной консольной балки (ДКБ) с заданной краевой трещиной, нагружаемой раскрытием по моде I, и энергетического параметра трещиностойкости – критической интенсивности высвобождения упругой энергии при росте трещины ( $G_{IC}$ ). При этом в экспериментальных исследованиях оценивается влияние на трещиностойкость конструкционных клеевых соединений природы субстрата и клея, режимов отверждения (температуры и времени) и условий испытания (температуры, скорости нагружения и воздействия внешней среды), геометрии образцов, толщины клеевого слоя и др. Для численного моделирования и оценки параметров трещиностойкости конструкционных клеевых соединений, помимо метода имплантации в метод конечных элементов модели когезионной зоны,

используется также основанный на имплантации в метод конечных элементов, в рамках линейной упругой механики разрушения, модели виртуального закрытия трещины - VCCT. С точки зрения решения материаловедческих проблем оценки и прогнозирования трещиностойкости конструкционных клеевых соединений имплантация в метод конечных элементов модели когезионной зоны значительно более обоснована и эффективна и используется значительно шире, чем такая же имплантация VCCT. При моделировании имплантацией в метод конечных элементов модели когезионной зоны образцов конструкционных клеевых соединений типа ДКБ, нагружаемых по моде I, наибольшее внимание уделяется определению влияния формы и параметров закона когезионной зоны на точность расчетов с выявлением перспектив применения этого метода для конструкционных клеевых соединений более сложных конфигураций.

Экспериментальных исследований и численного моделирования кинетики докритического роста трещин для определения обобщенной диаграммы, описывающей зависимость скорости роста трещины от нагрузки на нее ( $G-V$  диаграммы), применительно к конструкционным клеевым соединениям проведено значительно меньше, чем критических параметров трещиностойкости. Большинство имеющихся в литературе данных относится к экспериментальной и численной оценке кинетики усталостного роста трещин при циклических нагрузках, амплитудные значения которых меньше критических, в образцах конструкционных клеевых соединений типа ДКБ, нагружаемых по моде I. Имеются немногочисленные экспериментальные данные о кинетике докритического роста трещин в конструкционных клеевых соединениях при квазистатических нагрузках. Кроме длительности экспериментов при таких нагрузках возникают проблемы их практической реализации. Если при оценке критических параметров трещиностойкости конструкционных клеевых соединений обычно используют монотонное нагружение приложением растягивающей силы к краям трещины с построением диаграммы разрушения нагрузка-раскрытие, то определить кинетику докритического подрастания

трещины приложением к ее краям заданной постоянной нагрузки не представляется возможным. Данных о применении численных методов для оценки устойчивости межслоевых трещин к квазистатическому усталостному нагружению в литературе не найдено.

**Цель работы:** разработка экспериментальной и численной методик и оценка квазистатических критических и кинетических параметров трещиностойкости образцов конструкционных клеевых соединений типа ДКБ на основе листов алюминиевого сплава с использованием микромеханической модели и экспоненциального закона когезионной зоны.

### **Задачи:**

1. Анализ конструкционных клеевых соединений, применяемых в авиационной и ракетно-космической технике, дефектов в них, подходов и методов линейной упругой механики разрушения к оценке устойчивости к статическому критическому и усталостному докритическому псевдохрупкому росту трещин.
2. Экспериментальное определение параметров квазистатической критической и усталостной трещиностойкости конструкционных клеевых соединений на основе листов алюминиевого сплава и трех типов эпоксидных клеев.
3. Разработка численной модели, полученной имплантацией в метод конечных элементов модели когезионной зоны для анализа критической трещиностойкости конструкционных клеевых соединений и отработка методик экспериментального определения необходимых параметров.
4. Разработка, на основе микромеханической модели и экспоненциального закона когезионной зоны, алгоритма и методики численной оценки кинетики докритического подрастания трещины при длительном квазистатическом нагружении с использованием экспериментально определённых параметров закона когезионной зоны.
5. Проверка модели критического роста и методики оценки кинетики докритического подрастания трещины сопоставлением экспериментальных

и расчетных данных о параметрах квазистатической критической и усталостной трещиностойкости конструкционных клеевых соединений на основе листов алюминиевого сплава и трех типов эпоксидных клеев.

**Научная новизна:**

1. Экспериментально определены локальные деформационно-прочностные свойства когезионной зоны при разрыве по моде нагружения I (максимальное напряжение  $\sigma_c$ , максимальное раскрытие  $\delta_{\max}$  и рассчитанная по ним длина  $l_{K3}$ ) и критический параметр трещиностойкости  $G_{Ic}$  клеевых соединений на основе пластин алюминиевого сплава Д-16 и трех типов конструкционных эпоксидных клеев марок ВК-9, ЭПК-1 и К-300-61. Получены кинетические зависимости изменения локальных свойств и докритического роста трещин в лабораторных условиях при длительном нагружении (до 104 суток) клеевых соединений Д-16/ВК-9. Установлено, что наиболее высокую трещиностойкость клеевых соединений обеспечивает клей ВК-9, причем в решающей степени величина  $G_{Ic}$  и кинетика докритического роста трещины определяются деформационными параметрами когезионной зоны ( $\delta_{\max}$  и  $l_{K3}$ ).
2. Разработана оригинальная 3D модель критического роста трещины в конструкционных клеевых соединениях, полученная имплантацией в метод конечных элементов модели когезионной зоны, позволяющая, с использованием ее экспоненциального закона и экспериментально определённых локальных параметров, выбирать оптимальное количество интерфейсных элементов и рассчитывать нагрузку начала расслоения с достаточно высокой требуемой точностью при минимальном объеме вычислений. Проверкой модели на адекватность показано хорошее совпадение расчетных и экспериментально полученных данных для трех типов конструкционных клеевых соединений.
3. Разработаны алгоритм и расчетная методика оценки кинетики докритического роста трещин в конструкционных клеевых соединениях при длительных квазистатических нагрузках суммированием микроступенчатых



подрастаний трещины на длину когезионной зоны, с имплантацией в метод конечных элементов ее модели и с использованием экспериментально определенных параметров. Полученные расчетные кинетические кривые и обобщенная  $G-V$  диаграмма докритического роста трещины в конструкционных клеевых соединениях на основе алюминиевого сплава и эпоксидного клея ВК-9 хорошо совпадают с экспериментальными данными, в том числе, полученными ранее в длительных космических экспериментах.

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

1. Усовершенствованные методики применения модели когезионной зоны в методе конечных элементов позволяет проводить выбор клея при проектировании и расчете клеевых соединений в элементах конструкций авиационной и ракетно-космической техники с целью увеличения устойчивости к росту как существующих трещин, так и к их инициированию в любых концентраторах напряжений или дефектах при критических нагрузках. Одновременно с этим удаётся минимизировать объём вычислений для получения достоверных результатов о критической трещиностойкости конструкционных клеевых соединений в элементах конструкций даже со сложной геометрией.
2. Разработанные алгоритм и методика оценки докритической трещиностойкости конструкционных клеевых соединений различной природы и геометрии позволяют резко сократить длительность и объем необходимых экспериментов и вычислений. Полученные кинетические  $G-V$  диаграммы позволяют проводить прогнозирование статической долговечности ККС с дефектами заданного типа, длительно эксплуатируемые в заданных климатических условиях.
3. Установлена аналогия между экспоненциальной формой закона когезионной зоны и производной потенциала Леннарда-Джонса для адгезионных связей при псевдохрупком адгезионном росте трещины по

границе клей-субстрат в конструкционном клеевом соединении и обоснован микроступенчатый термофлуктуационный механизм докритического подрастания трещины.

### **Методология и методы исследования:**

Методологической основой исследования послужили работы ведущих российских и зарубежных ученых, государственные стандарты РФ.

При выполнении работы были использованы современные методы исследования: метод определения удельной работы расслоения в условиях отрыва, метод определения локальной межслоевой когезионной прочности, моделирование методом конечных элементов.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Экспериментально определенные значения локальных параметров (прочности при растяжении  $\sigma_C$ , максимального раскрытия  $\delta_{max}$  и длины  $l_{KЗ}$ ) когезионной зоны для клеевых соединений на основе листов алюминиевого сплава и трех типов конструкционных эпоксидных клеев.
2. Численная модель с имплантацией в метод конечных элементов модели когезионной зоны и результаты расчетов критических параметров трещиностойкости образцов трех типов конструкционных клеевых соединений в виде двойной консольной балки (ДКБ).
3. Физическое обоснование, численная с имплантацией в метод конечных элементов модели когезионной зоны модель и результаты расчета кинетики докритического подрастания трещины и построения G-V диаграмм для образцов конструкционных клеевых соединений в виде ДКБ на основе листов алюминиевого сплава и одного типа конструкционного эпоксидного клея.

**Степень достоверности результатов:**

Все результаты получены на поверенном оборудовании и с использованием лицензионного программного обеспечения, испытания и измерения проводились в соответствии с требованиями ГОСТ, достоверность результатов подтверждается хорошим согласием полученных экспериментальных данных с теоретически ожидаемыми и имеющимися в литературе.

**Апробация результатов:** научные и практические результаты исследования докладывались и обсуждались на международных молодёжных научных конференциях «Гагаринские чтения» (2016, 2017, 2018, 2019), Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине (2016, 2018), Туполевские чтения (2017), Новые материалы и перспективные технологии (2018).

По результатам исследований опубликовано 12 работ, из них 2 в изданиях, входящих в перечень ВАК.

**Структура и объем работы:** Диссертация состоит из введения, пяти частей, выводов и общего списка литературы.

# 1. Состояние вопроса

## 1.1 Конструкционные клеевые соединения и клеи, применяемые в авиационной и ракетно-космической технике

### 1.1.1 Конструкционные клеевые соединения

Конструкционные клеевые соединения (ККС) на основе полимерных клеев (клеевых композиций), состоящие из адгезионно связываемых прочным эластичным тонким клеевым слоем конструкционных материалов, главным образом, алюминиевых и титановых сплавов и полимерных композитов, играют в настоящее время важную роль в производстве и ремонте авиационной и ракетно-космической техники (АРКТ), обеспечивая возможности развития новых технологий сборки и ремонта, требуемую несущую и герметизирующую способность при существенном выигрыше в весе по сравнению с механическими соединениями и сваркой [1, 2, 3].

В отличие от заклепочных и болтовых соединений ККС, не считая выигрыша в весе, обеспечивают в конструкции равномерное распределение напряжений (без учета краевых эффектов) при действии сдвиговых сил (Рис.1.1).

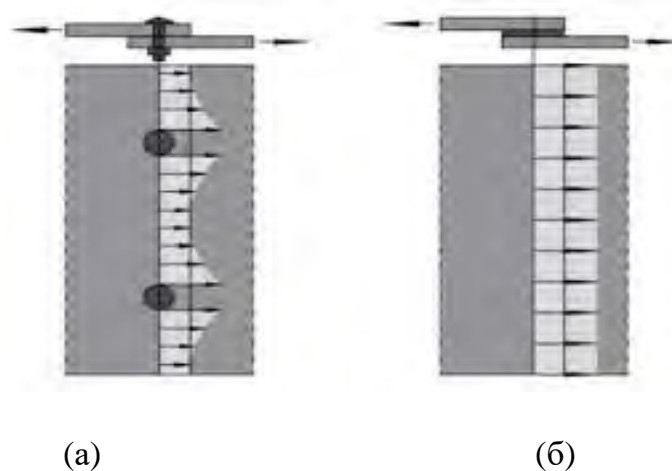


Рисунок 1.1 – Распределение напряжений при действии сдвиговых сил в болтовом (а) и клеевом (б) соединении [4].

На рис.1.2 показаны примеры аэрокосмических конструкций с широким использованием ККС.



(a)



(б)

Рисунок 1.2 – Примеры аэрокосмических конструкций с широким использованием конструкционных клеевых соединений: международная космическая станция (а) и среднемагистральный пассажирский самолет Fokker F28, Нидерланды (б) [5].

На Российском сегменте МКС ККС применены в конструкциях, таких как крепления метеоритной защиты, узлы соединения солнечных батарей и т.д. Наиболее ответственными элементами несущей конструкции крыла самолета Fokker F28, которые имеют опыт 30-летней эксплуатации, являются клееные лонжероны из алюминиевого сплава с соединением внахлест, обеспечивающим повышенную долговечность и ресурс.

Разработанные в ВИАМе и ОАО «Композит» конструкционные клеи и соединения на их основе применяются практически во всех типах современных отечественных самолетов, вертолетов и изделий авиакосмической и ракетной техники [6]. С использованием конструкционных клеев разработаны высокоэффективные технологии изготовления клееных конструкций, что обеспечивает сохранение прочностных и эксплуатационных характеристик в течение всего срока работы изделий. Они широко внедрены на предприятиях: ОАО «МВЗ им. М.Л. Миля» – все боевые и гражданские вертолеты (Ми-6, Ми-8, Ми-24, Ми-24В, Ми-26, Ми-26Т, Ми-28, Ми-34 и их модификации), ОАО «ОКБ Сухого» (Су-27, Су-29, Су-30МКИ). Существует много других элементов конструкций авиакосмической техники, в производстве которых предпочтительнее использование ККС. Эффективность применения клеев и технологий склеивания подтверждена многолетней эксплуатацией клееных конструкций в составе изделий АРКТ.

Широкое применение ККС находят в производстве трехслойных сотовых и пенопластовых конструкций и гибридных металл-полимерных композитных листовых материалов типа СИАЛ [1, 7, 8]. Работы по созданию СИАЛов явились логическим продолжением работ по созданию технологии получения и применения в авиации слоистых клеевых соединений и конструкций из алюминиевых сплавов, обладающих повышенными надежностью и ресурсом. В зависимости от назначения слоистого материала возможно регулирование их свойств за счет количества, толщины и соотношения толщин слоев, состава и состояния поверхности полимерных композитных и алюминиевых листов.

СИАЛы отличаются пониженной плотностью и превосходят по сопротивлению усталости, вязкости разрушения, статическим механическим свойствам, ударостойкости монолитные листы из традиционных алюминиевых сплавов Д16-АТ, 1163-АТ, В95о.ч.-Т2, которые в настоящее время применяются в авиации (табл. 1.1).

Таблица 1.1. Уровень свойств СИАЛов и основных конструкционных алюминиевых листов [1].

Наименование показателя	СИАЛ	1163-АТ	В950.ч.-Т2
Структура	2/1; 3/2	1	1
Толщина, мм:			
общая	0,8-2,5	1,5	1,5
металл	0,3-0,5		
Плотность, г/см <sup>3</sup>	2,4-2,5	2,78	2,8
Прочность при растяжении, МПа	600-1200	450	520
Модуль упругости, ГПа	55-65	71,5	72

По сравнению с монолитными листами из алюминиевых сплавов одна из последних разработок в этой области - СИАЛ-3-1 имеет пониженную плотность и повышенную прочность, высокую трещиностойкость, обусловленную торможением роста трещины (рис.1.3) и, соответственно, чрезвычайно низкую скорость развития усталостных трещин и повышенную долговечность.

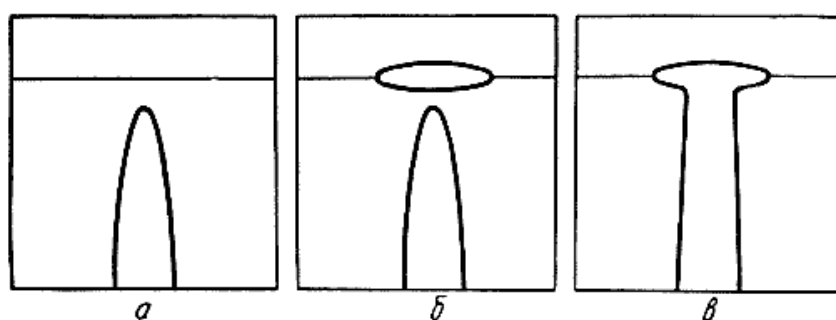


Рисунок 1.3. Схема торможения трещины по Куку-Гордону: а — трещина приближается к слабой границе раздела; б — граница раздела перед трещиной разрушается; в — затупление трещины. [9].

Все эти преимущества определяют надежность и ресурс самолетных конструкций из таких материалов. По сравнению с зарубежным аналогом GLARE-3 алюмопластик СИАЛ-3-1 за счет применения тонких листов (до 0,3 мм) из высокомодульного алюминиево-литиевого сплава 1441 пониженной плотности

имеет следующие преимущества: пониженную до 8% плотность, что значительно повышает весовую эффективность; повышенный на 10% модуль упругости, что обеспечивает увеличение жесткости конструкции.

Клеи используют также при изготовлении клеесварных конструкций и комбинированных клеемеханических соединений: клеезаклепочных, клеевинтовых и клееболтовых. Последние соединения, наряду с повышением несущей способности, обеспечивают повышение герметичности.

Клеесварные конструкции производят путем контактной точечной сварки и склеивания. Наибольшее применение находят конструкции из алюминиевых сплавов, которые составляют более 95% общего объема клеесварных конструкций. Такие соединения имеют более высокие прочностные характеристики и лучшие антикоррозионные свойства, чем сварные и клеевые. Кроме того, при их производстве не требуется дорогостоящее оборудование для обеспечения давления при использовании только склеивания. Клей в клеесварном соединении воспринимает значительную часть напряжений при нагружении соединения, и, следовательно, разгружает сварные точки. Перераспределение напряжений уменьшает их концентрацию в опасном сечении сварного соединения и повышает прочность комбинированного соединения, особенно при циклических нагрузках. В свою очередь, сварные точки улучшают работу клеевого соединения в условиях неравномерного отрыва, отдирающих и циклических нагрузок, повышая общую работоспособность и долговечность. Долговечность клеесварных соединений примерно в 2 раза превышает долговечность сварных соединений аналогичной конструкции, особенно при воздействии акустических нагрузок [1].

Устойчивость к повторным статическим нагрузкам механических соединений часто недостаточна из-за того, что отверстия под заклепки, винты или болты являются концентраторами напряжений, вызывающими преждевременное возникновение усталостных трещин в соединяемых материалах. В случае армированных полимерных композитов механическое нарезание отверстий нарушает также эффективность армирования. При этом комбинированные



клеезаклепочные, клеевинтовые или клееболтовые соединения обеспечивают более высокую (в 1,5-2 раза) прочность, чем клеевые, большую надежность и долговечность. Механические крепежные элементы в таких соединениях выдерживают растягивающие напряжения, а клеевые – перераспределяют напряжения и обеспечивают герметичность соединений.

Клеи применяют также для стопорения и герметизации резьбовых соединений любого диаметра. Это простой, надежный и экономичный способ придания устойчивости болтов и гаек к действию вибрации и ударных нагрузок, вызывающих самоотвинчивание соединений. Полностью заполняя пространство между витками резьбы, отвержденная клеевая композиция способствует равномерному распределению нагрузки по всей ее длине, устраняет утечку газа или жидкости.

Важнейшим направлением использования клеевых технологий в последнее время являются ремонтные работы. Ведущие отечественные и зарубежные авиационные фирмы активно ведут исследования в области создания новых технологических процессов ремонта авиационных конструкций, позволяющих обеспечивать тот же ресурс и долговечность отремонтированного участка, что определен для всей конструкции.

### ***1.1.2 Полимерные конструкционные клеи и технологии склеивания***

Клеевые соединения в изделиях авиационной и ракетно-космической техники (АРКТ) подвергаются воздействию вибрационных, ударных и других нагрузок при перепаде температур от криогенных (-196 °С) до повышенных (150-200 °С). В этих условиях работоспособность клеевых соединений можно обеспечить, создавая клеевые прослойки, которые сочетают достаточно высокую адгезию и механическую прочность с повышенной эластичностью. Последняя необходима склеивающим слоям в соединениях материалов с резко

различающимися температурными коэффициентами линейного расширения (КЛТР), так как они позволяют нивелировать напряжения в клеевом шве, возникающие при изменениях температуры [1, 10].

Основой классификации полимерных конструкционных клеев служат типы их основных компонентов - полимеров или полимеробразующих мономеров и олигомеров (смола), в первую очередь, отверждающихся феноло-формальдегидных и эпоксидных смол (соответственно, фенольные и эпоксидные клеи), мономер-олигомерных композиций, образующих полиуретаны (полиуретановые клеи), полиимиды (полиимидные клеи) и других типов полимеров. При этом клеи, помимо основного компонента, содержат отвердители, наполнители и многочисленные модифицирующие добавки. Термопластичные полимеры значительно реже используются в качестве основы конструкционных клеев, но часто служат в качестве модификаторов отверждающихся смол.

Помимо классификации по составу полимерные конструкционные клеи подразделяются также:

- *по состоянию исходных композиций*: на вязко-текучие (жидкие и пастообразные, порошкообразные и пленочные клеи, а также на армированные клеевые препреги;
- *по температуре отверждения*: на клеи холодного (при комнатной температуре) и горячего отверждения;
- *по деформационной тепло- или термостойкости*, т.е. по температуре эксплуатации: на низко- и высокотемпературные клеи.

Первыми полимерными конструкционными клеями, предназначенными для склеивания металлов, стали фенольно-каучуковые клеи, созданные на основе смесей термореактивных феноло-формальдегидных смол и химически взаимодействующих с ними каучуков, а для склеивания неорганических стекол в остеклении самолетов - клеи на основе феноло-формальдегидных смол и поливинилацеталей, в частности, поливинилбутираля (клеи БФ). Комбинированием типа и соотношения основных компонентов удалось получить

клеи с различными физико-механическими и технологическими свойствами, отвечающими основным показателям технических требований к клеевым соединениям АРКТ. Отличительной особенностью этих классов клеев является высокая эластичность в сочетании с высокой прочностью при сравнительно низкой стоимости и доступности компонентов.

Создание фенольно-каучуковых и полиацетальных клеев положило начало применению новых технологий склеивания в производстве и ремонте АРКТ, прежде всего, в создании слоистых клееных конструкций, описанных в предыдущем разделе литературного обзора. Такие конструкции проявляют высокую устойчивость к усталостному разрушению от вибрационных и акустических нагрузок, а также к ударным нагрузкам, затрудняя рост сквозных трещин. Весьма эффективно применение склеивания взамен химического фрезерования при изготовлении деталей переменной толщины. цельнометаллических конструкций на слоистые листовые позволяет снижать расход металла на 15-20% и повышать производительность труда в 1,5-2 раза. Слоистые детали, выполненные способом склеивания, имеют минимальные напряжения в местах переменной толщины.

Первоначально для изготовления слоистых металлических конструкций применяли фенольно-каучуковый клей ВК-40 и клеи последующих разработок ВК-51А и ВК-36. Для слоистых оптических стекол («триплексов») использовали прозрачные фенольно-поливинилбутиральные прозрачные клеи.

Использование фенольно-каучуковых клеев положило также начало применению в АРКТ технологий клееных трехслойных (сэндвичевых) конструкций, состоящих из обшивок (металлических или композитных) и сотового или пенопластового наполнителя. Слой клея, расположенный между обшивками и сотовым наполнителем, одновременно выполняет функции соединительного и демпфирующего элемента, а также защищает обшивки от коррозии. Наполнитель воспринимает напряжения, возникающие при местном

изгибе обшивок, и обеспечивает совместную работу несущих слоев, как при изгибе, так и при воздействии нормальных и касательных напряжений.

Заполнители обеспечивают необходимую жесткость листовых панелей при изгибающих нагрузках и устойчивость при сжатии. Их применение дает экономию в весе, которая в некоторых деталях достигает 15-20%. Срок службы этих конструкций при усталостных нагрузках значительно больше, чем у обычных конструкций. Сэндвичевые конструкции, благодаря отсутствию шпангоутов и нервюр, проще и экономичнее при массовом производстве. Общая устойчивость сэндвичевых конструкций во много раз превышает устойчивость входящих в них листов. Использование сэндвичевых клееных конструкций при изготовлении лопастей несущего винта вертолетов наряду с усовершенствованием конструкций позволило продлить срок их службы с 200 до 2000 ч, увеличить надежность и аэродинамические характеристики при одновременном снижении трудоемкости изготовления в 1,5 - 2 раза.

Несмотря на большой набор положительных качеств, фенольно-каучуковые и фенольно-бутиральные клеи имеют ряд недостатков, к которым, в первую очередь, относятся высокие температуры отверждения (150-200°C) и выделение летучих продуктов при отверждении, что требует приложения высокого давления при склеивании (до 1 МПа). Эти клеи отличаются также сравнительно низкой водо- и влагостойкостью

В настоящее время наиболее распространенными конструкционными клеями для АРКТ являются эпоксидные клеи на основе эпоксидных смол с добавками других компонентов, лишенные многих недостатков фенол-формальдегидных клеев. Эпоксидные клеи характеризуются широкими возможностями варьирования температуры отверждения по реакциям полиприсоединения, т.е. без выделения низкомолекулярных продуктов, в том числе при комнатной температуре, и, соответственно, не требуют использования повышенного давления при склеивании. Отечественные эпоксидные клеи марок ВК-9, ЭПК-1 и К-300-61 удовлетворяют требованиям по прочности и рабочим

температурам получаемых с их помощью соединений, а также по режимам склеивания. Они обладают водостойкостью, грибостойкостью и не вызывают коррозии металлов. Эти клеи обеспечивают прочность при сдвиге клеевого соединения не менее 15 МПа в сочетании с достаточной эластичностью. Они обеспечивают также минимальные показатели газовыделения в отвержденном состоянии.

Одним из существенных недостатков отвержденных эпоксидных полимеров являются их сравнительно невысокие ударо- и трещиностойкость в значительной мере ограничивают применение в условиях воздействия ударных и вибрационных нагрузок, температурных перепадов. Для повышения этих характеристик с обеспечением требуемых технологических свойств, в первую очередь, вязкости и смачивающей способности, в рецептуру ККС вводят олигомерные добавки с концевыми реакционноспособными группами - так называемые жидкие каучуки с концевыми карбоксильными группами и олигоэфир с концевыми эпоксидными группами (олигоэфирэпоксиды).

В работах [11, 12] показано, что применение в составе клея каучука СКД-КТРА позволяет повысить его когезионную прочность, трещиностойкость, водостойкость и адгезию к различным материалам. Предложен способ введения каучуков в композицию путем предварительного проведения реакции этерификации между каучуком и олигомером ЭД-20 при 433 К в течение 1 ч. Сравнительные испытания соединений, выполненных с использованием эпоксидных пастообразных клеев марок ВК-9 и ВК-27, показали, что соединения на основе клея ВК-27, модифицированного жидким каучуком, имеют повышенную работоспособность при воздействии климатических условий морских субтропиков и нагрузки, равной 30 % от исходной прочности, в то время как для соединений на основе клея ВК-9 имело место разрушение отдельных образцов под нагрузкой, составляющей 5 % от исходной прочности [13].

Для модификации эпоксидных полимеров и клеев на их основе с успехом применяют высокомолекулярные ароматические полисульфоны [14],

позволяющие повысить влагостойкость, теплостойкость, прочность при разрыве и ударную прочность и получать конструкционные клеи с высокими физико-механическими и адгезионными характеристиками.

Для обеспечения работоспособности эпоксидных клеев от  $-196$  до  $+200^{\circ}\text{C}$  при сохранении их соответствия эксплуатационным и технологическим требованиям к вибро-, ударопрочным конструкционным клеям в ОАО «Композит» проведены исследования по разработке композиций на основе эпоксидных смол, модифицированных олигоэфирэпоксидами, выпускаемыми НПП «Макромер» под торговой маркой Лапроксид, с направленно регулируемые реологическими, физико-механическими и релаксационными свойствами [10]. В результате были разработаны конструкционные клеи ЦМК-5, ЭЛК-5 ЦМК-25, ЦМК-27 различного назначения на основе эпоксидных диановых смол типа ЭД-20, ЭД-22, ЭД-16, модифицированных смесью одно- и трехфункциональных Лапроксидов и сочетающих после отверждения достаточную эластичность с высокой адгезионной и когезионной прочностью.

Механические испытания клеевых соединений для клеев ЦМК-5, ЭЛК-5, ЦМК-25, ЦМК-27 показали, что они пригодны для высокопрочного в широком интервале температур (от  $-196$  до  $+250^{\circ}\text{C}$ ) соединения, как металлов, так и полимерных композиционных материалов. Сочетание высокого предела прочности при отрыве, сдвиге и растяжении с достаточной эластичностью (2,5-5,0) обеспечивают высокую вибро-, ударо- и трещиностойкость материалов ЭЛК-5, ЦМК-5, ЦМК-25, ЦМК-27.

Использованием для модификации эпоксидных диановых смол олигоэфирциклокарбоната марки Лапролат были разработаны конструкционный клей марки ЦМК-21 с повышенной прочностью склеивания алюминиевых сплавов и цветных металлов, а также клей-герметик КГЭ-3/16, сочетающий высокую конструкционную прочность клеевых соединений при сдвиге и отрыве со значительным удлинением при растяжении (более 10% при толщине слоя 0,15-0,3 мм).

Клеи ЦМК-5, ЭЛК-5, ЦМК-25, ЦМК-27, ЦМК-21, КГЭ-3/16 готовятся непосредственно перед применением смешением трех-четырех компонентов. Они легко наносятся на соединяемые поверхности кистью или валиком; в навеске 100-200 г, имеют жизнеспособность 2-4 ч. При нормальных условиях клеи отверждаются в течение 2-3 суток.

Разработаны теплопроводящие эпоксидные клеи с коэффициентом теплопроводности не менее 2,0 Вт/м/К, работоспособные при температурах от -196 до +120°C (кратковременно до +200°C), предназначенные для крепления нагреваемых элементов аппаратуры с одновременным отводом тепла. В качестве полимерной основы таких клеев использованы эпоксидные композиции, содержащие низкомолекулярные разбавители марки Лапроксида, с хорошей смачивающей способностью наполнителей.

В условиях производства сложных технических изделий, в том числе АРКТ, всегда есть потребность в быстроотверждающихся клеевых составах, набирающих конструкционную прочность (>10 МПа) при нормальных условиях в течение 1-3 часов. Без таких клеев нельзя обойтись при проведении ремонтных работ на крупногабаритных изделиях, в полевых условиях. Быстроотверждающиеся клеи нужны при сборке с применением сложной оснастки, которая должна быстро высвободиться после отверждения клеев и использоваться на следующих операциях сборки.

Потребностью в таких клеевых материалах объясняется большой интерес к ремонтным технологиям типа «холодной сварки». При этом используется отверждающаяся за 3-5 ч двухкомпонентная эпоксидная клеевая мастика «Маком-1», предназначенная для заделки дефектов, усиления поверхностей из металлов, керамики, пластика, для пломбирования приборов.

Клей-мастика «Маком-1» может применяться для склеивания деталей из сталей, алюминиевых сплавов, стеклопластиков, керамики, наносится на

поверхности любой влажности и отверждается при температурах, начиная от -10°C. Жизнеспособность мастики в массе 200-250 г не менее 25 мин.

Технологическое отверждение мастики при температуре 20-25°C происходит в течение 3-5 ч, полное отверждение – в течение 18 ч. В отвержденном состоянии мастика имеет плотность ~ 2,2 г/см<sup>3</sup>, работоспособна в интервале температур от -196 до +200°C в условиях повышенной влажности, бензина, масел, легко поддается механической обработке.

Разработанные конструкционные клеи (эпоксидный ЦМК-26 и полиуретановый ЦМК-31) обеспечивают прочность на сдвиг более 10 МПа при склеивании алюминиевого сплава АМгб, угле-, органо- и стеклопластиков при температурах от -196 до +20 °С через 3 часа после склеивания. Клеи готовятся непосредственно перед применением из трех составляющих и при температуре 18-25°C имеют жизнеспособность до 15 мин. При нагревании образцов до 120°C и выше прочность клеевых соединений значительно снижается (особенно сильно для полиуретанового клея ЦМК-31). Клей ЦМК-26 обеспечивает прочность 20-57 МПа при отрыве соединений из АМгб при температуре 20°C в зависимости от наполнителя и предварительной подготовки компонентов клея.

В настоящее время для ремонта АРКТ при отсутствии специализированного оборудования, позволяющего обеспечивать в зоне ремонтируемого участка требуемые температуру и давление, используют, в основном, жидкие и пастообразные клеи холодного отверждения, такие как ВК-9, ВК-27, К-153. Такие клеи используют для заполнения пустот в агрегатах при небольших механических повреждениях, а также для заполнения небольших объемов в сотовом наполнителе при ремонте отслоений обшивки-наполнитель. Однако ресурс работы участков, отремонтированных таким образом, ограничен [15].

Использование высокопрочных пленочных клеев, в том числе, вспенивающихся и, особенно, клеевых препрегов позволяет существенно повысить эффективность как производственных, так и ремонтных технологий.



Пленочные клеи на основе модифицированных эпоксидных олигомеров являются высокопрочными клеями с улучшенными технологическими свойствами. Они не требуют жидкого подслоя или подогрева при прикатывании пленки к субстратам, при их отверждении выделяется не более 2 % летучих соединений. При ремонте пленочные клеи рекомендуются для приклеивания компенсирующих заплат к конструкциям из алюминиевых сплавов и композиционных материалов.

Вспенивающиеся пленочные клеи используют при изготовлении сотовых конструкций в сочетании с высокопрочными пленочными клеями. Они предназначены для соединения блоков сотового заполнителя между собой и с элементами каркаса: при отверждении их толщина увеличивается в 1,5-3 раза, за счет чего они заполняют неровности между соединяемыми элементами. Прочность клеевых соединений сотовой конструкции, выполненных вспенивающимися клеями, составляет ~ 5 МПа, что во многих случаях превышает прочность сотового заполнителя.

Использование клеевых препрегов создает новые возможности в производстве и ремонте АРКТ. Клеевые препреги представляют собой армирующие системы, чаще всего угле- и стеклоткани, пропитанные высокопрочными модифицированными эпоксидными клеями типа ВК-51 и ВК-36 по безрастворной технологии (пропиткой ткани расплавом клея). Тип, толщина ткани и количество наносимого клея в клеевых препрегах могут быть различны. Обычно клеевые препреги имеют длительный срок хранения.

Применение клеевых препрегов позволяет изготавливать или соединять элементы конструкций, в том числе сэндвичевых, сложной конфигурации за одну технологическую операцию, что обеспечивает сокращение технологического цикла производства, снижение его трудоемкости и энергоемкости, массы сэндвичевой панели, количества используемой оснастки. При этом достигается повышение трещиностойкости соединяемых элементов на 40-50%, прочности при межслойном сдвиге на 20-35%, усталостной и длительной прочности с

сохранением на высоком уровне прочностных характеристик после воздействия различных климатических факторов (воды, влаги, топлива, масел, повышенных температур). Отремонтированные с использованием клеевых препрегов конструкции из ПКМ приближаются по свойствам к изделиям в исходном состоянии и имеют высокие надежность и ресурс работы.

Важное значение в клеевых технологиях имеют способы подготовки поверхностей под склеивание. Для алюминиевых сплавов обычно используется химическая обработка различными составами или, в том числе, местное анодное окисление в электролите на основе фосфорной кислоты, что позволяет значительно повысить прочность и коррозионную стойкость клеевых соединений. Для ремонтных технологий в ВИАМе разработана технологическая рекомендация ТР 1683-2000 «Применение клеев и композиционных материалов клеевых для ремонта изделий авиакосмической техники».

### ***1.1.3 Дефекты конструкционных клеевых соединений***

При проектировании конструкционных клеевых соединений стремятся к равномерному распределению усилий по площади склеивания, когда прочность соединения определяется удельными показателями, и разрушение при нагружении должно происходить одновременно по всему сечению [16]. Произведение площади этого сечения на сопротивление материала разрушению дает величину несущей способности соединения. Однако на практике разрушение обычно происходит в опасной области, в первую очередь в результате роста трещины - внешнего (поверхностного, наружного) или внутреннего (объемного) дефекта со свободными поверхностями (собственно трещины) или любого концентратора напряжения, где локальное напряжение равно или превышает допустимое, т.е. минимальное значение сопротивления разрушению. Поэтому очевидно, что устойчивость к разрушению ККС определяется не только

геометрической формой (типом) соединения, схемой его нагружения, природой и свойствами склеиваемых материалов и клея, но и, в решающей степени – типом и размером дефектов в нем [17].

Самыми распространенными типом ККС являются соединения плоских листовых материалов по всей поверхности контакта или только по ее краям (внахлестку). Такие соединения наиболее устойчивы к действию сдвиговых и наименее – растягивающих напряжений, действующих при нормальном отрыве или возникающих при изгибе и вследствие краевых эффектов при действии сдвиговых напряжений. Чувствительность ККС к действию растягивающих (нормальных) напряжений обусловлена, в первую очередь, низкой прочностью адгезионных и когезионных связей и, соответственно, наименьшей устойчивостью дефектов (трещин) к такому их нагружению (по моде I).

Основными типами дефектов со свободными поверхностями, возникающими на стадии создания или в условиях эксплуатации ККС, являются [15]:

- непрочности - отсутствия соединений склеиваемых поверхностей друг с другом, возникающие при неполном смачивании клеем соединяемых поверхностей вследствие их загрязненности или при неправильном выборе способа подготовки и обработки их поверхностей, а также при применении некачественного клея (с плохой смачивающей способностью), при недостаточном давлении, неравномерном нанесении клея и его высокой вязкости, большой разнотолщинности склеиваемых деталей и плохой их пригонки друг к другу;
- поры в клеевом слое, возникающие вследствие выделения летучих компонентов клея или сорбированной влаги при отверждении клея и термообработки при недостаточном давлении, а также за счет воздушных включений, образовавшихся при нанесении клея;
- расслаивания и отслаивания вследствие больших усадочных (внутренних или остаточных) напряжений, возникающих при отверждении клея, из-за

несоблюдения режима склеивания, больших перепадов температуры при термообработках или в условиях эксплуатации, воздействия воды, локальных ударных нагрузок [18].

В настоящее время при создании силовых элементов конструкций АРКТ, в том числе на основе ККС, с заданной несущей способностью и ресурсом с точки зрения устойчивости к повреждениям, усталостной и остаточной прочности необходима комплексная (многоуровневая) расчетно-экспериментальная методология, так называемая «пирамида» расчетно-экспериментальной оценки и прогнозирования их основных свойств по уровням образцов, элементов, деталей и компонентов конструкции (Рис.1.4).

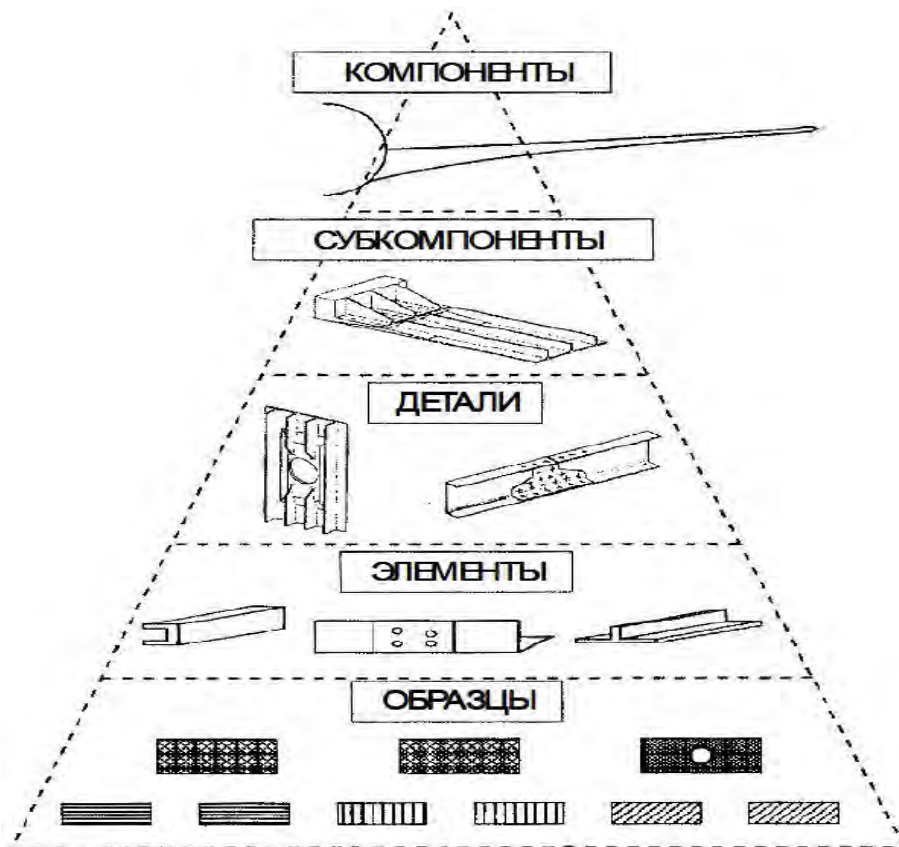


Рисунок 1.4 - Обобщенная многоуровневая пирамида расчетно-экспериментальной оценки и прогнозирования свойств конструкций АРКТ [19].

В основе этой пирамиды лежат аналитические, экспериментальные и численные методы оценки свойств стандартизованных образцов. Применительно

к оценке и прогнозированию трещиностойкости ККС как устойчивости к критическому и докритическому росту дефектов (трещин) при квазистатических и усталостных нагрузках, наиболее эффективными являются методы, базирующиеся на макро- и микромеханических подходах линейной упругой механики разрушения (ЛУМР) [20].

## **1.2. Методы оценки и прогнозирования критической и докритической трещиностойкости ККС в рамках ЛУМР**

### ***1.2.1 Аналитические макромеханические модели и методы ЛУМР***

Линейная упругая механика разрушения (ЛУМР) определяет на макроуровне условия инициирования и роста существующего макроскопического дефекта со свободными поверхностями (трещины), как одного из основных механизмов разрушения материала или конструкции, при достижении критических условий преимущественно для простой геометрии образцов и трещин. Хотя она разработана применительно к гомогенным изотропным линейно-упругим телам, в которых макроскопический дефект (трещина) распространяется самоподобно, но она применима также для оценки трещиностойкости ККС, обладающих резко выраженной гетерогенностью и анизотропией структуры и свойств, если соединяемые материалы обладают близкой к линейной упругостью, клеевой слой - малой толщиной и достаточной жесткостью, а трещина расположена и распространяется самоподобно в межслоевой плоскости (в клеевой прослойке, по границе раздела или в межфазной области) [21 - 24].

Основным типом трещины, анализируемым в ЛУМР, служит эллиптическая центральная или пролуэллиптическая краевая трещина в упруго-деформируемом теле, являющаяся концентратором локальных напряжений при трех типах (модах) нагрузок, вызывающих рост трещины (Рис.1.5).

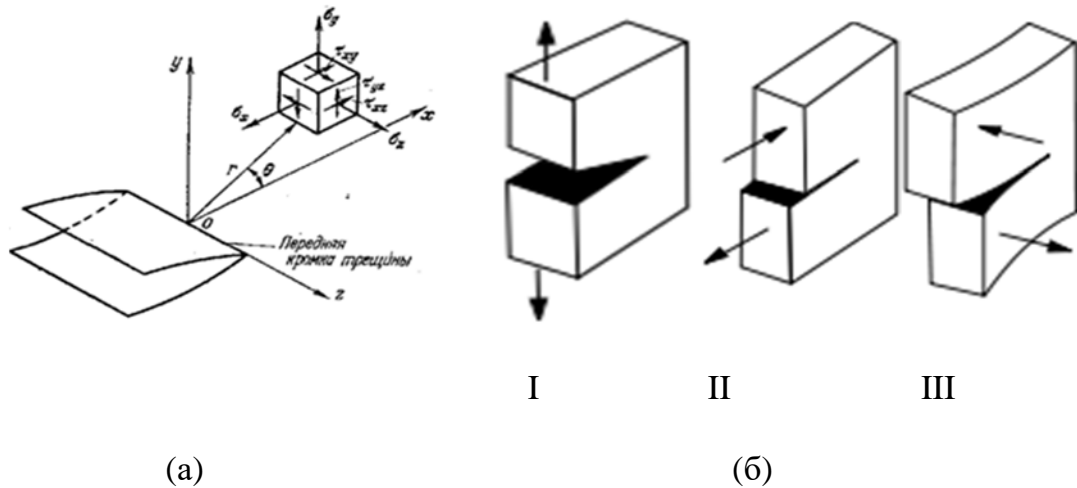


Рисунок 1.5 - Схема локальных напряжений у края трещины (а) и типы (моды) нагрузки на трещину и ее роста: I – при растяжении (раскрытии, отрыве); II – при сдвиге в плоскости; III – при сдвиге в антиплоскости (срезе) (б).

Поскольку мода нагружения I является наиболее опасной и играет основную роль при межслоевом росте трещины в ККС, то далее в данном обзоре и в работе в целом рассматривается поведение трещин только при этой моде нагрузки на нее.

*Макромеханические подходы ЛУМР* базируются на равенстве накапливаемой упругой энергии деформирования и энергии, затрачиваемой на образование трещины (энергетический подход), а также на анализе распределения напряжений при нагружении тела с трещиной до начала (инициирования) роста трещины (силовой подход). При этом аналитически, с учетом геометрии (формы и размеров) тела и трещины, упругих свойств материала и прикладываемых внешних сил по моде I, определяются, соответственно, энергетические ( $G_I$ ) и силовые ( $K_I$ ) параметры нагрузки на трещину (*трещиноподвижущие силы, ТДС*) и их предельные (критические) значения ( $G_{IC}$  и  $K_{IC}$  соответственно) как параметры устойчивости к росту трещины (*трещиностойкости, ТС*). Силовые параметры трещиноподвижущих сил и трещиностойкости более удобны при инженерных расчетах элементов и конструкций в целом, так как, являясь векторными величинами, позволяют с применением сравнительно простых формул оценивать

допустимые нагрузки для изделий сложной конфигурации, содержащих дефекты известного размера, или, наоборот, определять допустимые размеры дефектов при заданных условиях нагружения изделий. Однако, их физическая (материаловедческая) интерпретация затруднена по сравнению с энергетическими параметрами, которые, являясь скалярными величинами, подчиняются закону сохранения энергии, что облегчает их теоретические расчеты с учетом состава и структуры материала. Поэтому далее в работе используются преимущественно энергетические параметры трещинодвижущих сил и трещиностойкости. Эти параметры введены в ЛУМР на основе концепции Гриффитса, в соответствии с которой обратимый самоподобный процесс распространения равновесный трещины в идеально упругом теле в изотермических условиях при отсутствии влияния окружающей среды возможен, если энергия, накапливаемая при упругом деформировании твердого тела достаточна для компенсации затрат энергии на образование новых поверхностей при распространении трещины. Условие энергетического баланса соответствует равенству уменьшения накопленной энергии упругого деформирования  $U$  затрачиваемой работе  $W$  при бесконечно малом увеличении длины трещины  $a$ :

$$dU/(da)=dW/da \quad (1.1)$$

Для центральной эллиптической трещины длиной  $2a$  или краевой трещины длиной  $a$  в *полубесконечной тонкой* пластине величина:

$$\frac{dU}{da} = \pi a \sigma^2 / E \quad (1.2)$$

где  $\sigma$  – глобальное напряжение в пластине;  $E$  - модуль Юнга материала.

При этом:

$$dW/da = 2\gamma_F \quad (1.3)$$

где  $\gamma_F$  – удельная работа на единицу площади поверхности.

Так как при росте трещины образуются две поверхности, то затрачиваемая работа удваивается. В случае идеально хрупкого тела  $\gamma_F$  соответствует его поверхностной энергии  $\gamma_T$ . Позднее величина  $-\frac{dU}{da}$  была названа *интенсивностью высвобождения энергии упругой деформации* при обратимом развитии равновесной трещины и введена в качестве обобщенной трещиноводящей силы (ТДС) -  $G$ -параметра с размерностью в системе СИ [Дж/м<sup>2</sup>]. При моде нагружения  $I$  на трещину в тонкой пластине трещиноводящая сила рассчитывается по формуле:

$$G_I = Y\kappa \frac{a\sigma^2}{E} \quad (1.4)$$

где  $Y$  - геометрический фактор, учитывающий форму и размеры пластины;  $\kappa$  - константа, учитывающая эффект Пуассона: при плоском напряженном состоянии образца (в тонких пластинах) она равна 1, а при плоской деформации  $1-\nu^2$ , где  $\nu$ - коэффициент Пуассона. Для бесконечной пластины с эллиптической трещиной  $Y=2/\pi$ . Для других конфигураций тел и трещин расчеты геометрического фактора  $Y$  значительно усложняются.

Инициирование (начало) линейно-упругого роста трещины происходит, когда ТДС ( $G_I$ ) достигнет или превысит ТС ( $G_{IC}$ ) - предельное (критическое) значение, равное, в рамках ЛУМР, сопротивлению материала росту трещины - удвоенной работе, затрачиваемой на образование единицы площади поверхности при росте трещины. Величина  $G_{IC}=2\gamma_F$  служит энергетическим *параметром трещиностойкости (ТС)* материала, зависящим только от природы материала, т.е. являющимся материальной константой. При этом условием критического роста трещины является неравенство:

$$G \geq G_{IC} \quad (1.5)$$

Теоретический анализ и экспериментальное определение энергетических параметров трещиноводящей силы ( $G_I$ ) и трещиностойкости ( $G_{IC}$ ) в рамках линейной упругой механики разрушения обычно проводятся на простых образцах



с заданной трещиной. Для моды нагружения  $I$  чаще всего используют образцы в виде двухконсольной балки (ДКБ) с модулем упругости субстрата  $E$ , полувысотой  $h$ , шириной  $b$  и длиной краевой трещины  $a$  с определением усилия  $P$ , прикладываемого к краям трещины, или предельного ее раскрытия  $\Delta$ .

Экспериментально установлено, что в реальных упругих телах при росте трещин затраты энергии на образование новых поверхностей значительно превышают удвоенную поверхностную энергию ( $G_{IC} \gg 2\gamma_T$ ). Это объясняется тем, что трещиностойкость реальных материалов определяется не только затратами энергии на упругий разрыв связей при образовании поверхности, но и, главным образом, на развитие неупругих деформаций вблизи края трещины, где напряжения максимальны.

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

В случае псевдохрупких или псевдопластичных материалов, в том числе при межслоевом росте трещины в ККС, вблизи кончика трещины развивается небольшая локальная зона неупругих деформаций, размеры которой значительно меньше, чем размеры самой трещины, и образец на макроуровне сохраняет линейную упругость. При этом не накладываются существенные ограничения на расчеты трещиноподвижущих сил и параметров трещиностойкости в рамках ЛУМР, и при моде нагружения  $I$  параметры  $J_I$  и  $J_{IC}$  равны  $G_I$  и  $G_{IC}$  соответственно.

При достижении критических условий трещина в идеально хрупком теле прорастает мгновенно, так как нагрузка на нее резко возрастает с увеличением

длины трещины, а сопротивление росту трещины остается постоянным и не зависит от ее длины. В случае псевдохрупкого роста трещины с развитием даже небольшой неупругой зоны вблизи кончика трещины сопротивление росту с увеличением ее длины может изменяться (возрастать или снижаться) вследствие протекания процессов ослабления или упрочнения материала в локальной зоне вблизи вершины трещины.

### ***1.2.2 Аналитические микромеханические модели и методы ЛУМР***

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

Впервые такую модель предложили Ирвин и Орован для упруго-пластичных материалов с пределом текучести  $\sigma_y$  [22, 23]. В таких материалах у вершины трещины образуется близкая к сферической форме пластическая зона. При плоском напряженном состоянии (трещина в тонкой пластине) предельный радиус зоны при критической нагрузке рассчитывается по формуле:

$$r_y = \left( \frac{G_I E}{2\pi\sigma_y^2} \right) \quad (1.6)$$

Наиболее важными микромеханическими аналитическими моделями роста трещины, развитыми в рамках ЛУМР применительно к псевдопластическому и псевдохрупкому разрушению, являются, соответственно, модели Дагдейла и Баренблатта. В модели Дагдейла описывается поведение кончика трещины в бесконечной пластине, нагружаемой по моде  $I$  удаленным напряжением  $\sigma$  при плоском напряженном состоянии, способном к деформациям с пределом текучести  $\sigma_y$ . При этом мгновенные упруго-пластические деформации материала локализованы в тонкой зоне вблизи ее кончика (края), которая моделируется увеличением длины исходной трещины на фиктивную величину  $\Delta a_y$  с равномерным распределением сил сцепления (когезионного связывания), равных пределу текучести материала  $\sigma_y$ . Длина пластической зоны при нагрузке до критической рассчитывается по формуле:

$$\Delta a_y = \frac{\pi K^2_{IC}}{8 \sigma_y^2} = \frac{\pi G_{IC} E}{8 \sigma_y^2} \quad (1.7a)$$

А ее раскрытие  $\delta$  в поперечном направлении (перпендикулярном плоскости трещины) – по формуле:

$$\delta_C = \frac{K^2_{IC}}{\sigma_y E} = \frac{G_{IC}}{\sigma_y} \quad (1.7b)$$

Применительно к псевдохрупкому межслоевому разрушению, особенно к адгезионному разрушению ККС, наиболее эффективной является модель Баренблатта [25]. Эта модель в общем виде в рамках ЛУМР описывает устойчивость равновесной трещины в упругом теле за счет формирования у кончика трещины локальной зоны предразрушения или когезионной зоны (КЗ), в которой действуют атомно-молекулярные связи (когезионные силы), сдерживающие противоположные стороны (берега) трещины и которая исключает сингулярность напряжений в кончике трещины.

Математический анализ модели Баренблатта [25] базируется на двух основных гипотезах:

1. Продольные размеры зоны, где действуют силы сцепления, т.е. длина в направлении роста трещины  $l_{КЗ}$ , значительно меньше размеров внутренней области трещины в этом направлении, хотя в принципе эта модель может быть применена и к очень узким начальным трещинам, в которых размеры когезионной зоны соизмеримы с общим размером трещины или равны им. При этом длина когезионной зоны  $l_{КЗ}$  значительно больше атомно-молекулярных размеров, например, постоянной кристаллической решетки, так что на расстояниях порядка  $l_{КЗ}$  можно пользоваться методами механики сплошных сред, в том числе ЛУМР.

2. Форма КЗ при сечении ее плоскостью, нормальной к контуру трещины, и локальная диаграмма разрушения  $\sigma(\delta)$  (ЗКЗ) не зависят от прилагаемых внешних сил и для данного материала при данных условиях (температура, давление, состав) является материальной константой.

В КЗ связь локального напряжения, равного сопротивлению сил сцепления, с межмолекулярным смещением описывается как закон когезионной зоны (ЗКЗ). Основными характеристиками ЗКЗ как функции  $\sigma(\delta)$  относятся:

- максимальное значение силы когезионного сцепления, т.е. локальная прочность материала или связей в КЗ, теоретически примерно равной:

$$\sigma_C \approx \frac{E}{\pi} \approx \sqrt{\frac{E\gamma_T}{b}} \quad (1.8)$$

где  $E$  и  $\gamma_T$  – модуль Юнга и поверхностная энергия материала соответственно,  $b$  – межатомное или межмолекулярное расстояние (величина порядка  $10^{-7}$  мм);

- предельное упругое ( $\delta_C$ ) и максимальное ( $\delta_{max}$ ) раскрытие КЗ, разность которых ( $\delta_{max} - \delta_C$ ) характеризует величину неупругого раскрытия.

Общая площадь под кривой ЗКЗ равна удельной работе образования новых поверхностей при разрушении КЗ:

$$\gamma_F = \int_0^{\delta^{max}} \sigma(\delta) d\delta \quad (1.9a),$$

удвоенная величина которой равна критическому значению интенсивности высвобождения упругой энергии при росте трещины ( $G_{IC}$ ), используемому в ЛУМР в качестве глобального параметра сопротивления росту трещины - трещиностойкости (ТС):

$$G_{IC} = 2\gamma_F = 2 \int_0^{\delta^{max}} \sigma(\delta) d\delta \quad (1.9б)$$

Таким образом, модель Баренблатта является материаловедческой основой для понимания и учета физических (микромеханических) представлений о поведении трещины и ее КЗ при заданных условиях нагружения. При этом, в соответствие с постулатами Баренблатта, все перечисленные характеристики КЗ (ЗКЗ в целом и его основные параметры) являются материальными константами, не зависящими от длины трещины и нагрузки на нее.

Так как рост трещины в ККС возможен по границе раздела клеевого слоя и подложки (субстрата), т.е. весьма вероятно адгезионное разрушение, когда поведение зоны предразрушения должно определяться действием адгезионных сил, то такая зона может быть названа также *адгезионной зоной (АЗ)*.

### ***1.2.3 Аналитические подходы и методы оценки кинетики докритического роста трещин и долговечности ККС в рамках ЛУМР***

Теоретически в случае идеально упругого роста при нагрузке ниже критической или при докритическом раскрытии трещина в принципе не должна прорасти, а после достижения критических условий она прорастает практически мгновенно (критически). Однако, при достаточно длительной выдержке во времени при докритических условиях экспериментально установлено медленное (докритическое) подрастание трещины вследствие уменьшения сопротивления ее росту в результате ослабления во времени когезионных (или адгезионных) сил,

развития предельных деформаций и достижения микромеханического критерия разрушения - критических локальных условий роста неупругой (когезионной или адгезионной) зоны. Вероятнее всего это может быть связано с накоплением разрывов межатомных или межмолекулярных связей по термофлуктуационному механизму, описываемому в теории долговечности и длительной прочности полимеров уравнением Журкова [26-30]:

$$t_p = \tau_0 \exp \left[ \frac{U_0 - \gamma \sigma}{RT} \right] \quad (1.10),$$

где  $t_p$  – статическая долговечность (время до разрушения);  $\tau_0$  – временная константа порядка периода тепловых колебаний атомов;  $U_0$  – энергия активации разрыва связей;  $\gamma$  – константа материала, характеризующая распределение нагрузки на связи и зависящая от структуры полимера;  $\sigma$  – напряжение;  $R$  – константа Больцмана;  $T$  – температура.

При этом кинетика подрастания трещины, зависящая от характера приложения докритической нагрузки на неё (квазистатического с постоянным напряжением или циклического знакопеременного) и факторов внешней среды, определяет долговечность (статическую или усталостную соответственно как время или число циклов соответственно, за которое начальное сопротивление росту трещины уменьшится до начальной докритической нагрузки).

Для определения долговечности в рамках ЛУМР необходимо знать кинетику изменения длины трещины от времени ( $da/dt$ ) или от числа циклов нагружения ( $da/dN$ ) при заданной докритической статической или циклической нагрузке ( $G < G_C$ ). Время ( $t_p$ ) или число циклов нагружения ( $N_p$ ) до разрушения при этом определяется как время, за которое трещина подрастет от начальной длины  $a_0$  до критической  $a_C$  для заданной нагрузки и может быть рассчитана по следующим соотношениям:

- при статическом нагружении  $t_p = \int_{a_0}^{a_C} da/V$  (1.11a), где  $V = (da/dt)$ ;

- при циклическом нагружении:  $N_p = ft_p = \int_{a_0}^{a_c} da/V$  (1.115), где  $f$  – частота нагружения,  $V = (da/dN)$ .

На практике для определения долговечности в рамках ЛУМР получают так называемые  $G$ - $V$  диаграммы, обычно в двойных логарифмических координатах  $lgV$ - $lgG$ , где  $V = (da/dt)$  или  $V = (da/dN)$ , соответственно, для статических и циклических нагрузок ( $a$  – длина трещины;  $t$  – время,  $N$  – число циклов) (рис.1.6).

Обобщённая кинетическая диаграмма докритического роста трещины в координатах  $lgV$  -  $lgG$  состоит из трёх участков: резкого уменьшения скорости роста трещины с уменьшением нагрузки (I), линейного участка (II) и резкого увеличения скорости роста при приближении к критической нагрузке  $G_c$  (III).

Линейный участок диаграммы (при моде нагружения I) описывается степенной функцией (уравнением Пэриса):

$$V = A \cdot G_I^n \quad (1.12),$$

где:  $A$  и  $n$  – константы, определяемые по пересечению линейного участка диаграммы с осью  $V$  и по его наклону соответственно.

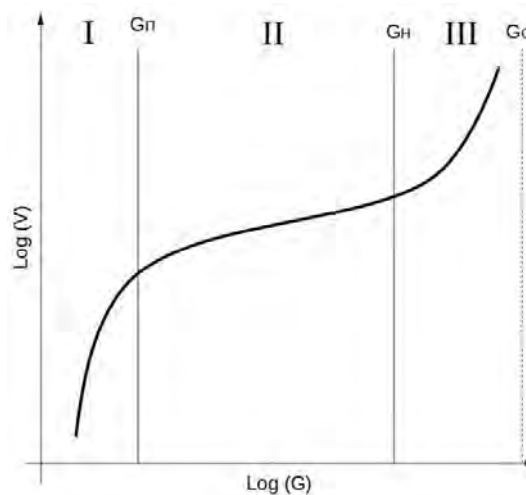


Рисунок 1.6 - Обобщенное схематическое изображение  $G$ - $V$  диаграммы в координатах  $lgV$  —  $lgG$ : I - область медленного докритического подрастания трещины,  $G_p$  – пороговое значение нагрузки на трещину; II – линейная область стабильного подрастания,  $G_n$  – нагрузка начала достаточно быстрого подрастания трещины; III - область быстрого роста,  $G_c$  – критическая нагрузка на трещину.

Интегрирование этого участка диаграммы дает следующие соотношения для расчета  $t_p$  и  $N_p$ . По параметрам уравнения (1.12) для образцов в виде полубесконечной пластины с трещиной долговечность ( $t_p$  и  $N_p$ ) может быть рассчитана следующим образом:

$$t_p = \frac{N_p}{f} = \frac{(G_{I0}^{1-n} - G_{IC}^{1-n})}{A(n-1)\sigma_0 Y} \quad (1.13),$$

где:  $f$  – частота циклического нагружения,  $G_{I0}$  и  $G_{IC}$  – начальная докритическая нагрузка на трещину и трещиностойкость соответственно;  $\sigma_0$  – напряжение на образец,  $Y$  – геометрический фактор.

#### ***1.2.4 Подходы и методы численного моделирования и оценки трещиностойкости ККС***

Как следует из выше рассмотренного, глобальные подходы ЛУМР являются важнейшей основой аналитических расчетов и экспериментальных методов определения характеристик трещиностойкости ККС, в первую очередь, критического значения интенсивности высвобождения упругой энергии  $G_{IC}$  при наиболее опасном виде нагружения - нормальном отрыве противоположных поверхностей трещины (моды нагружения I). Обычно при этом используются простые конфигурации образцов с заданной трещиной – для моды нагружения I обычно в виде двойной консольной балки (ДКБ). Однако, при сложной конфигурации конструкции и дефекта аналитическая и экспериментальная оценка трещиностойкости и прогнозирование условий роста трещин в рамках ЛУМР затруднена или невозможна из-за трудности учета геометрических факторов - формы и размеров конструкций и дефектов. Кроме того, методы и параметры ЛУМР, оценивающие устойчивость к началу (инициированию) критического роста существующей трещины, не позволяют определять условия зарождения и роста трещины в местах концентрации напряжений при отсутствии свободных



поверхностей. Для решения этих проблем в настоящее время разрабатываются и широко используются численные модели инициирования и роста трещин, имплантированные в метод конечных элементов (МКЭ), являющийся основным способом численного решения различных задач механики материалов и конструкций, с помощью пакетов прикладных программ, в частности, ANSYS® и ABAQUS®. Наибольшее распространение при этом получили метод виртуального закрытия трещин (VCCT – Virtual Crack Closure Technique) и метод или модель когезионной зоны (МКЗ) – Cohesive Zone Model (CZM).

#### a) Метод VCCT

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

Метод VCCT была разработан еще в 1977 г [31] для расчета критического коэффициента интенсивности напряжений в псевдохрупких материалах. С тех пор он достаточно широко используется также для расчета критического значения интенсивности высвобождения упругой энергии [32, 33].

Этот метод базируется на основных постулатах ЛУМР: 1) энергия, высвобождающаяся при росте трещины, равна энергии, необходимой для ее закрытия; 2) рост трещины не изменяет состояние материала в вершине трещины; 3) рост трещины происходит вдоль заранее заданной траектории. При моделировании роста трещин в методике VCCT в математическую модель вводятся дополнительные допущения: 1) траектория роста трещины задается интерфейсными элементами; 2) расчет является квазистатическим и не учитывает переходные эффекты; 3) материал считается линейно-упругим изотропным, ортотропным или анизотропным. В методике VCCT трещина помещается вдоль

интерфейса между одним и тем же материалом или между двумя материалами (рис.1.7). Можно задавать составные трещины (Multiple cracks).

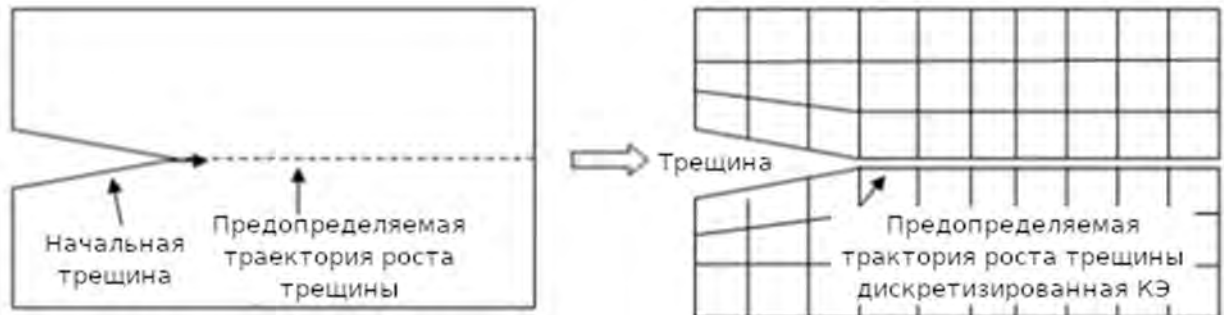


Рисунок 1.7. Предопределяемая траектория роста трещины при моделировании на основе интерфейсных элементов [34].

#### б) Метод когезионной зоны (МКЗ)

МКЗ разработан на основе и в развитие микромеханических моделей Баренблатта и Дагдейла, описывающих неупругое поведение кончика трещины – образования зоны псевдохрупкого предразрушения или пластического деформирования, в которой действуют сдерживающие (когезионные) силы сцепления берегов трещины, так называемой когезионной зоны (КЗ). Поведение КЗ, т.е. ее локальные деформационно-прочностные свойства (связь между локальным напряжением и деформацией или раскрытием КЗ) подчиняются определенному закону – закону когезионной зоны (ЗКЗ). Имплементация МКЗ, базирующегося на модели Баренблатта, в метод конечных элементов (МКЭ) в пакетах прикладных программ типа ANSYS® и ABAQUS® позволила получить более физически обоснованный метод численного моделирования и расчета параметров роста трещин при псевдохрупком разрушении материалов как при наличии фактической трещины, так и при возможности ее зарождения в месте концентрации напряжений. Впервые имплантация МКЗ в МКЭ была реализована в работе [35], и в настоящее время этот метод получил очень широкое

распространение для численной оценки трещиностойкости различных материалов, в том числе при межслоевом росте трещин в слоистых ПКМ и конструкционных клеевых соединениях (ККС).

В целом, в настоящее время численные методы МКЭ/МКЗ применительно к ККС и слоистым ПКМ активно используются, преимущественно для оценки критических параметров трещиностойкости при предельных нагрузках.

На данный момент метод МКЗ/МКЭ может быть реализован в следующих программных пакетах - ANSYS Mechanical, MSCMARC; ABAQUS, MSCPatran и др.

### **1.3 Экспериментальные исследования и численное моделирование критической и докритической трещиностойкости ККС**

#### ***1.3.1 Устойчивость ККС к критическому росту трещин***

В настоящее время в элементах конструкций АРКТ достаточно широко применяются ККС алюминиевых сплавов и армированных полимерных композиционных материалов с помощью отверждающихся эпоксидных клеев, отличающихся большим многообразием составов и марок. Соответственно, в литературе, по большей части в англоязычной, имеется большое количество аналитических обзоров и данных о методах и результатах экспериментальных исследований, численного моделирования и расчетов трещиностойкости жестких ККС, базирующихся на подходах ЛУМР с использованием простой (стандартизованной) конфигураций образцов, чаще всего в виде двойной консольной балки (ДКБ) с заданной краевой трещиной, нагружаемой раскрытием по моде  $I$ , и энергетического параметра трещиностойкости – критической интенсивности высвобождения упругой энергии при росте трещины ( $G_{IC}$ ) [21 - 23, 28, 36 - 41]. Описываемые в этих работах экспериментальные исследования

посвящены выявлению влияния на характер разрушения и величину  $G_{IC}$  природы субстрата и клея, режимов отверждения (температуры и времени) и условий испытания (температуры, скорости нагружения и воздействия внешней среды), геометрии образцов, толщины клеевого слоя и др. Имеющее важнейшее значение с точки зрения применимости ЛУМР исследования влияния эластичности и толщины клеевой прослойки на параметры критической трещиностойкости эпоксидных ККС показало, что такое влияние практически отсутствует в случае тонких (порядка 0,1 мм) как жестких, та и эластичных клеевых слоев и заметно проявляется только в случае эпоксидно-каучуковых дисперсно-эластифицированных клеев при толщине слоя порядка 1 мм [21, с. 337; 22, с. 198]. С повышением эластичности клеевой прослойки значения  $G_{IC}$  возрастают, причем эти значения при нагружении по типу I значительно меньше, чем по типу II [21, с. 354-367].

Существенный вклад в выявлении факторов, влияющих на устойчивость к критическому росту трещин ККС листов алюминиевого сплава и армированных ПКМ на основе известных отечественных марок эпоксидных клеев (ЭПК-1, ВК-9, К-300-61) внесли систематические исследования, проведенные с 1998 г. по 2010 г. сотрудниками кафедры ТКМКиМ (тогда - «Физика и химия композиционных материалов» МАТИ имени К.Э. Циолковского), при подготовке и проведении космического эксперимента «Компласт» на МКС. В работах исследовали три группы образцов ККС на основе трех типов клеев и двух типов пластин в различном сочетании после 12 лет экспозиции в космических условиях и после 12 лет хранения на Земле [42, 43]. Наибольшее снижение энергетического параметра трещиностойкости ( $G_{IC}$ ) наблюдалось после 12 лет экспозиции в космических условиях у образцов на основе клеев К-300 и ВК-9 и наименьше - на основе клея ЭПК-1: остаточное значение трещиностойкости в случае клеев К-300 и ВК-9 составляет 30 – 40 %, а клея ЭПК-1 60 - 75%. от значения параметра трещиностойкости, образцов непосредственно после их получения в 1998 г. Образцы - аналоги, хранившиеся в земных условиях, на основе клеев К-300, ЭПК-

1 и ВК-9 сохранили значения энергетического параметра трещиностойкости в 46, 66 и 42 % от значений параметров трещиностойкости, полученных в 1998 г. Причем скорость снижения энергетического параметра трещиностойкости с течением времени заметно снижается.

В последнее время основные публикации посвящены разработкам и применению методов численного моделирования для оценки устойчивости к критическому росту трещин в слоистых системах (армированных ПКМ и ККС) и экспериментальному подтверждению адекватности этих методов. При этом основные подходы численного моделирования заключаются в имплантация подходов и методов ЛУМР в метода конечных элементов с помощью пакетов прикладных программ ANSYS® и ABAQUS® с использованием описанных выше моделей виртуального закрытия трещины (метод МКЭ/VCCT) и когезионной зоны (метод МКЭ/МКЗ) и стандартных образцов типа ДКБ при моде нагружения I с выявлением перспектив применения этих методов для ККС более сложных конфигураций. С точки зрения решения материаловедческих проблем повышения трещиностойкости ККС метод МКЭ/МКЗ значительно более эффективен и поэтому используется значительно шире, чем МКЭ/VCCT.

При разработке метода МКЭ/МКЗ особое внимание уделяется точности расчетов механических параметров закона когезионной зоны (ЗКЗ). Так, в работе [44] использовали теории коррекции сдвига при изгибе для учета сдвиговых деформаций субстрата при нагружении образца типа ДКБ по моде I, а также коррекции длины трещины с помощью экспериментально выведенного поправочного коэффициента при оценке  $G_{IC}$ . В качестве объектов исследования использовали образцы ККС из пластин алюминиевого сплава AA6060-TA16, соединённых эпоксидным клеем Hysol 9466. Для перекрестной проверки полученных значений использовали моделирование роста трещин методом МКЭ/МКЗ и последующее сравнение экспериментальных и смоделированных кривых нагрузка-раскрытие трещины ( $P-\Delta$ ). При моделировании с использованием различных значений  $G_{IC}$  и  $\sigma_C$  и трапецеидального ЗКЗ было

установлено, что восходящая часть кривой  $P-\Delta$  зависит от когезионной прочности  $\sigma_c$ , а после максимальной нагрузки – от  $G_{IC}$  (рис. 1.8).

Из этого следует, что для корректного моделирования и расчета кривых  $P-\Delta$  необходимо знать основные параметры ЗКЗ – локальную прочность и работу разрушения. Соответствующим подбором оптимальных значений этих параметров ( $G=2,7\text{кДж/м}^2$ ) и ( $\sigma_c=14\text{МПа}$ ) удалось достичь хорошего соответствия ( $\pm 8\%$ ) между экспериментальными данными и результатами моделирования (рис. 1.9).

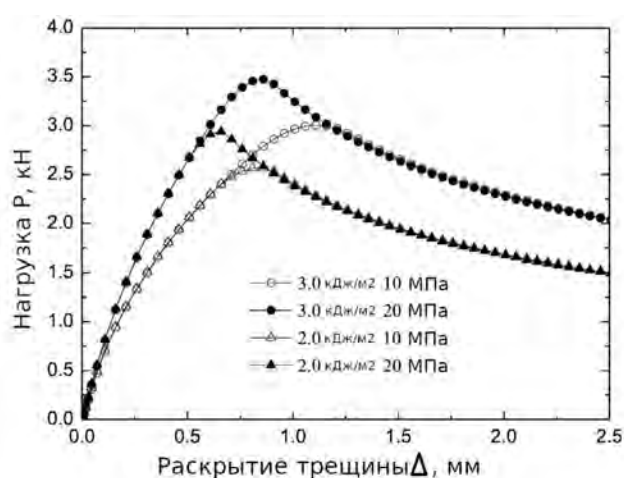


Рисунок 1.8. Полученные с использованием МКЗ кривые  $P-\Delta$ , соответствующие различным значениям энергии разрушения и когезионной прочности [44].

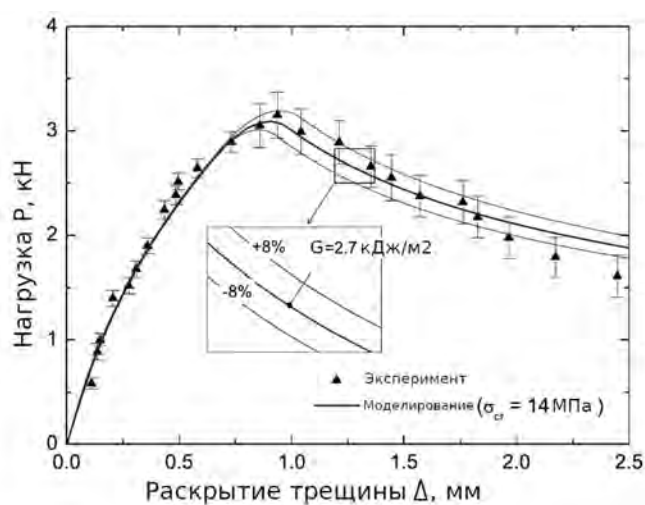
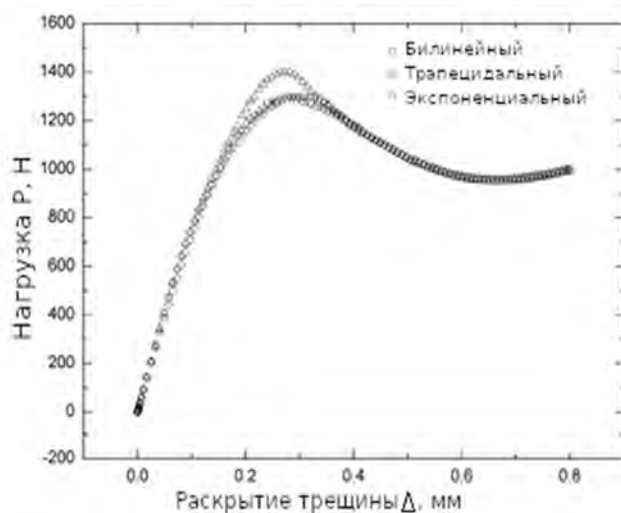
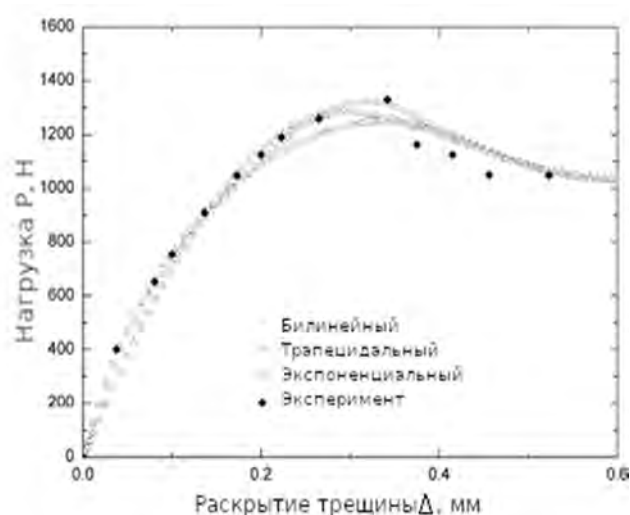


Рисунок 1.9. Сравнение экспериментальных данных и полученной моделированием методом МКЭ/МКЗ кривой  $P-\Delta$  при оптимальных значениях локальной прочности и работы разрушения КЗ [44].

Исследование влияния типа ЗКЗ (билинейного, трапецеидального и экспоненциального), проведенное в работе [45], где моделировали также расслоение образцов ККС в форме ДКБ, показало, что тип использованного ЗКЗ мало влияет на результаты моделирования критического роста трещин в клеевых соединениях, за исключением того, что в случае использования трапецеидального закона получаются большие значения критической нагрузки (рис. 1.10а-б).



(а)



(б)

Рисунок 1.10 – Кривые  $P-\Delta$ , полученные при моделировании образцов ККС типа ДКБ с использованием билинейного, трапецеидального и экспоненциального ЗКЗ с одинаковыми значениями  $G_c = 500$  Н/м и  $\sigma_c = 5$  МПа (а) и сравнение таких кривых, полученных при различных значениях  $\sigma_c$  и одинаковой  $G_c$ , с экспериментальными данными (б) [45].

Интересные исследования по оценке влияния коэффициента смешения режимов нагружения трещины по моде I (растяжение) и II (сдвиг), то есть доли сдвиговой нагрузки в общей нагрузке на трещину, на соответствие рассчитанных методом МКЭ/МКЗ и экспериментальных данных проведены в работе с однонаправленным углеродно-эпоксидным композитом Hexcel IM7/8552, соединенным пленочным клеем Cytec FM 300 M [46]. Целью работы было определение критерия, который учитывает зависимость энергетического параметра трещиностойкости от коэффициента смешения мод нагрузки. С этой

целью было проведены экспериментальные оценки  $G_C$  для моды I, моды II и смешанного режима I/II с определенными соотношениями мод. Также как в работе [44], сравнивали экспериментально определенные кривые  $P-A$  и рассчитанные моделированием методом МКЭ/МКЗ с подбором значений работы разрушения и локальной прочности ЗКЗ. Такой комбинированный численно/экспериментальный подход дает базу данных дискретных значений  $G_C$  для разных мод нагружения, которые позволяют рассчитать критические параметры трещиностойкости для любого заданного коэффициента смешивания режимов нагружения.

### ***1.3.2 Устойчивость ККС к докритическому росту трещин***

Экспериментальные и численные методы применительно к ККС разработаны и используются преимущественно для оценки и расчета критических параметров трещиностойкости при предельных нагрузках. Исследований кинетики докритического роста трещин в жестких полимерных ККС значительно меньше, так как для экспериментального определения обобщенной диаграммы, описывающей зависимость скорости роста трещины от нагрузки на нее ( $G-V$  диаграмм) требуются длительные эксперименты по контролю за кинетикой роста трещины при заданной докритической нагрузке на образец с трещиной [47, 48]. Однако получаемые при этом  $G-V$  диаграммы являются основой прогнозирования долговечности конструкций при заданных условиях эксплуатации.

Большинство имеющихся в литературе данных по исследованию кинетики докритического роста трещин в жестких полимерных ККС относится к усталостному росту трещин при циклических нагрузках, амплитудные значения которых меньше критических. На рис. 1.11 приведена одна из первых найденных в литературе кинетических  $G-V$  диаграмм для эпоксидных клеевых соединений алюминиевого сплава при различных частотах циклических нагрузок - [21, с.381].



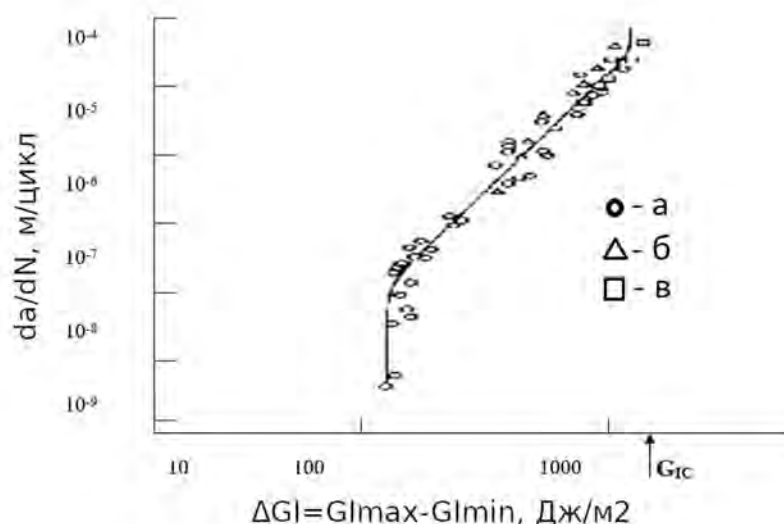


Рисунок 1.11 – Экспериментально полученная усталостная  $G$ - $V$  диаграмма адгезионного соединения алюминиевого сплава и эпоксидного адгезива при длительном динамическом нагружении с частотой 3 Гц (а), 0,25 Гц (б), и 0,01 Гц (в) и влажности 20 % [21].

Еще меньше в литературе имеется данных о кинетике докритического роста трещин в ККС при квазистатических нагрузках. Кроме длительности экспериментальной оценки кинетики докритического роста трещин при таких нагрузках возникает еще одна проблема. Если при оценке критических параметров трещиностойкости ККС обычно используют монотонное нагружение приложением растягивающей силы к краям трещины с построением диаграммы разрушения нагрузка-раскрытие ( $P$ - $\Delta$ ), то при определении кинетических параметров докритического подрастания трещины нагружение приложением заданной постоянной нагрузки неприменимо. Это обусловлено тем, что при приложении заданной растягивающей силы  $P$  к краям трещины нагрузка на нее пропорциональна квадрату длины, и поведение трещины соответствует нестабильному состоянию ( $dGI/da > 0$ ), т.е. любое подрастание нагруженной трещины приводит к резкому возрастанию ТДС и к быстрому росту трещины [49, 50].

При задании квазистатической нагрузки разведением концов трещины на заданную величину  $\Delta$  трещиновдвигущая сила (ТДС) обратно пропорциональна

длине трещины в 4-й степени, и поведение трещины соответствует ее стабильному состоянию ( $dG_I/da < 0$ ), так как подрастание нагруженной трещины приводит к уменьшению ТДС. Так, в [41] описаны исследования кинетики докритического роста трещин в ККС стали Ст.3 и стеклоткани, пропитанной клеевой композицией Спрут Плюс, на воздухе и в воде. Такая стеклоткань наклеивается на поверхность емкостей для восстановления их несущей способности без вывода из эксплуатации. В исследовании использовали образцы типа ДКБ с расклиниванием краевой трещины. Полученные  $G$ - $V$  диаграммы приведены на рис. 1.12.

Как видно из приведенного рисунка предварительная выдержка в воде более резко снижает скорость продвижения трещины при высоких нагрузках на нее ( $G_I$ ) и в меньшей степени - при низких.

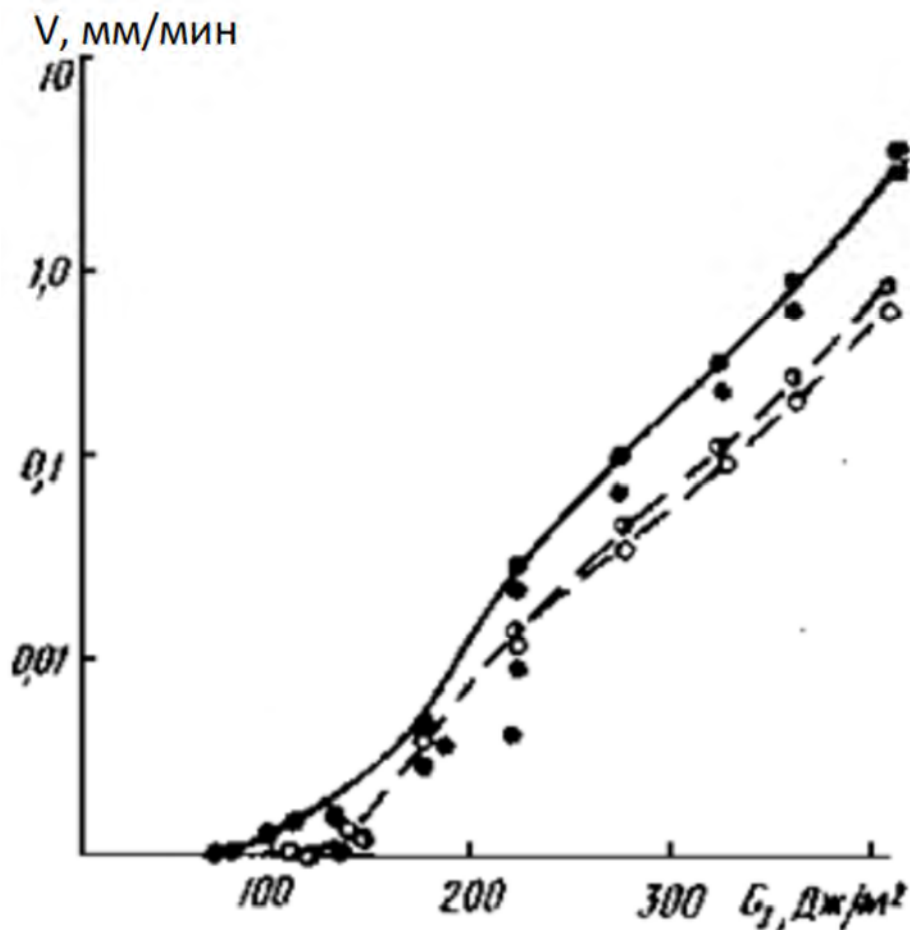


Рисунок 1.12.  $G$ - $V$  диаграмма клеевого соединения стеклокомпозита и стали 3 после предварительной выдержки на воздухе 10 дней (сплошная линия) и после предварительной выдержкой 10 дней на воздухе и 30 дней в воде (штриховая линия) [41].

Важные данные об устойчивости ККС алюминиевого сплава и эпоксидных клеев получены сотрудниками кафедры ТКМКиМ в 1998-2012 гг в результате подготовки и проведения «активного» космического эксперимента «КРТ» за бортом МКС, параллельного с «пассивным» экспериментом «Компласт», описанным выше [42, 43, 51]. В рамках эксперимента «КРТ» была разработана методика дистанционного контроля докритического роста трещины при заданном докритическом раскрытии трещины по моде  $I$  в образцах типа ДКБ с помощью наклеиваемого датчика сопротивления.

В данных экспериментах использовали образцы ККС листов алюминиевого сплава Д-16 и стеклокомпозита, склеенных тремя типам клеев: ЭПК-1, ВК-9, К-300-61. В таблице 1.2 приведены типы и характеристики образцов ККС алюминиевого сплава, использованных в эксперименте «КРТ», а на в таблице 1.3 полученные за 25 месяцев для этих образцов параметры  $G-V$  диаграмм.

Таблица 1.2. Типы и характеристики образцов ККС алюминиевого сплава, использованных в эксперименте «КРТ».

№ п/п	Обозначение образца	Тип клеевого соединения	Исходная длина трещины $a_0$ , мм	$G_{IC}$ , Дж/м <sup>2</sup>
1	КРТ-4	Al- ВК-9 - Al	13	330
2	КРТ-8	Al- К-300 - Al	12	335
3	КРТ-14	Al- ЭПК-1 - Al	12	390

Таблица 1.3. Средние значения коэффициентов уравнения Пэриса, описывающего  $G-V$  диаграммы образцов, экспонированных в космических условиях, и наземных образцов-аналогов.

Клей	Средние значения коэффициентов			
	Образцы, экспонированные в космосе		Образцы-аналоги	
	k	n	k	n
К-300	6E-13	12,0	4E-15	14,5
ВК-9	7E-12	7,1	7E-14	13,0
ЭПК-1	4E-10	5,4	7E-18	8,3

Данные о применении численных методов для оценки устойчивости межслоевых трещин к квазистатическому усталостному нагружению в литературе не найдены. Имеются сравнительно немногочисленные данные о разработке и применении метода МКЭ/МКЗ для оценки устойчивости межслоевых трещин к усталостному циклическому нагружению на основе теории накопления повреждений в КЗ ККС и слоистых ПКМ с оценкой приращения некоторой формальной степени поврежденности КЗ от 0 (в исходном состоянии) до 1 (при критическом разрушении) двумя методами. В первом методе поведение модели анализируется в каждом цикле нагружения, рассматриваемом как монотонное возрастание нагрузки от нуля до максимального для данного цикла, но не критического, значения, а во втором – с использованием имитирующей квазистатические условия так называемой огибающей нагрузки, учитывающей только максимальные ее значения в каждом цикле. Применение первого метода ограничивается малоцикловыми нагрузками из-за резкого возрастания объема вычислений с ростом числа циклов. Второй подход эффективен при многоцикловых нагрузках, но не учитывает весь спектр действующих на трещину нагрузок. В обоих подходах формальному параметру повреждаемости КЗ не придается какого-либо физического смысла с точки зрения процессов, вызывающих повреждение КЗ [14, 52 - 56].

В качестве примера использования второго подхода может служить работа [57]. В ней проводили моделирование роста расслоения однонаправленного армированного волокнами композита, в квазистатической постановке на ДКБ в пакете программ Ansys. Сначала к модельному образцу с КЗ прикладывалась нагрузка, линейно возрастающая от нуля до максимального значения  $P_{max}$ , меньшего, чем критическое. Затем при предельной нагрузке активировался алгоритм накопления усталостных повреждений (рис. 1.13).

Для расчёта параметра повреждаемости  $D$ , используется формула, связывающая его с максимальным раскрытием  $\Delta_{max}$  расслоения (трещины), достигнутым за всю предысторию нагружения (1.14).

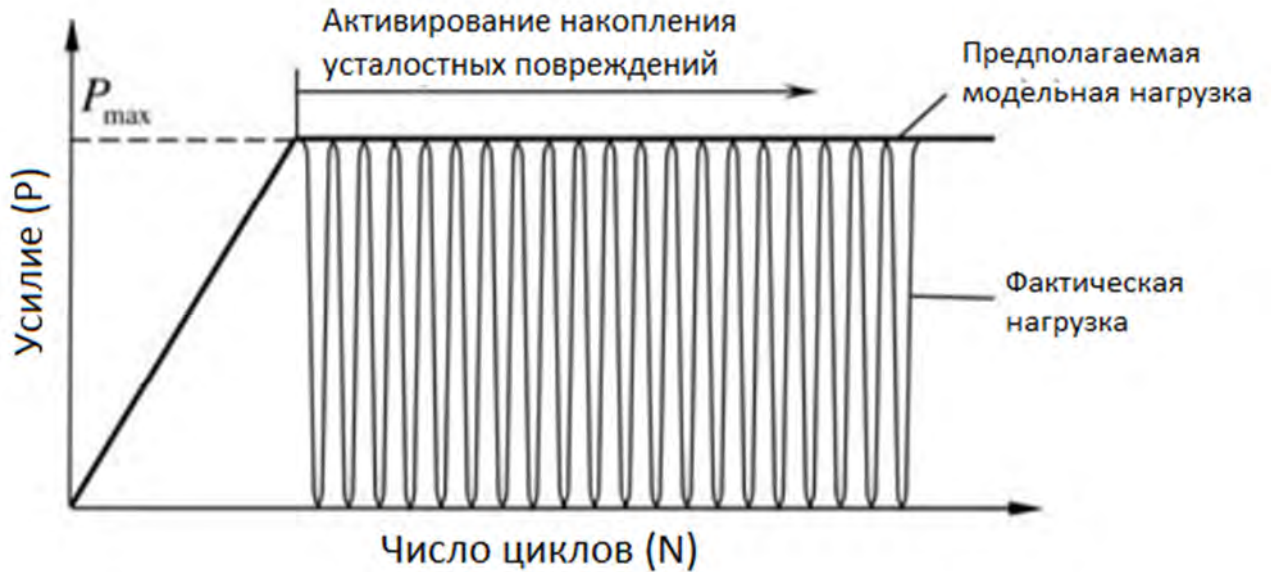


Рисунок. 1.13. Схема моделирования усталостного циклического нагружения в виде огибающей кривой.

$$D = \frac{\Delta_C}{\Delta_{max}} \cdot \frac{\Delta_{max} - \Delta_0}{\Delta_C - \Delta_0} \quad (1.14)$$

Подставляя в формулу (1.14) уравнение Пэриса для описания поцикловой скорости роста дефекта, получают формулу (1.15), которая позволяет оценивать приращение параметра повреждения в рассматриваемом элементе  $e$  в зависимости от заданного увеличения числа циклов  $\Delta N$  [57]:

$$dD^e(dN) = \frac{\Delta_C \cdot \Delta_0}{(\Delta_{max}^e)^2 \cdot l_{FPZ}} C \left( \frac{G_{max}^e}{G_C} \right)^{\frac{b}{1-R^2}} dN \quad (1.15)$$

где:  $l_{FPZ}$  – длина когезионной зоны во время роста расслоения;  $C$  и  $b$  – постоянные материала, определяемые экспериментально по кинетической диаграмме усталостного разрушения;  $R = P_{min}/P_{max}$  – коэффициент асимметрии цикла;  $P_{min}$  и  $P_{max}$  – минимальное и максимальное значения циклической нагрузки;  $G_{max}$  – значение интенсивности высвобождения энергии, соответствующее нагрузке  $P_{max}$ .

На рис.1.14 и 1.15 приведены примеры усталостных  $G-V$  диаграмм образцов ККС на основе алюминиевого сплава и эпоксидных клеев, полученные на образцах типа ДКБ аналитическим методом и численным моделированием каждого цикла нагружения с использованием экспериментальных данных, взятых из литературных источников (рис.1.14), а также численным моделированием методом огибающей нагрузки при различных заданных значениях наклона линейного участка ЗКЗ ( $K_0$ ) при одинаковом значении других его параметров ( $G_c=0.26$  Н/мм,  $\sigma_0=30$  МПа и  $\delta_c=0.0173$  мм) и при перепаде нагрузки в цикле  $\Delta G=0.06$  Н/мм (рис. 1.15).

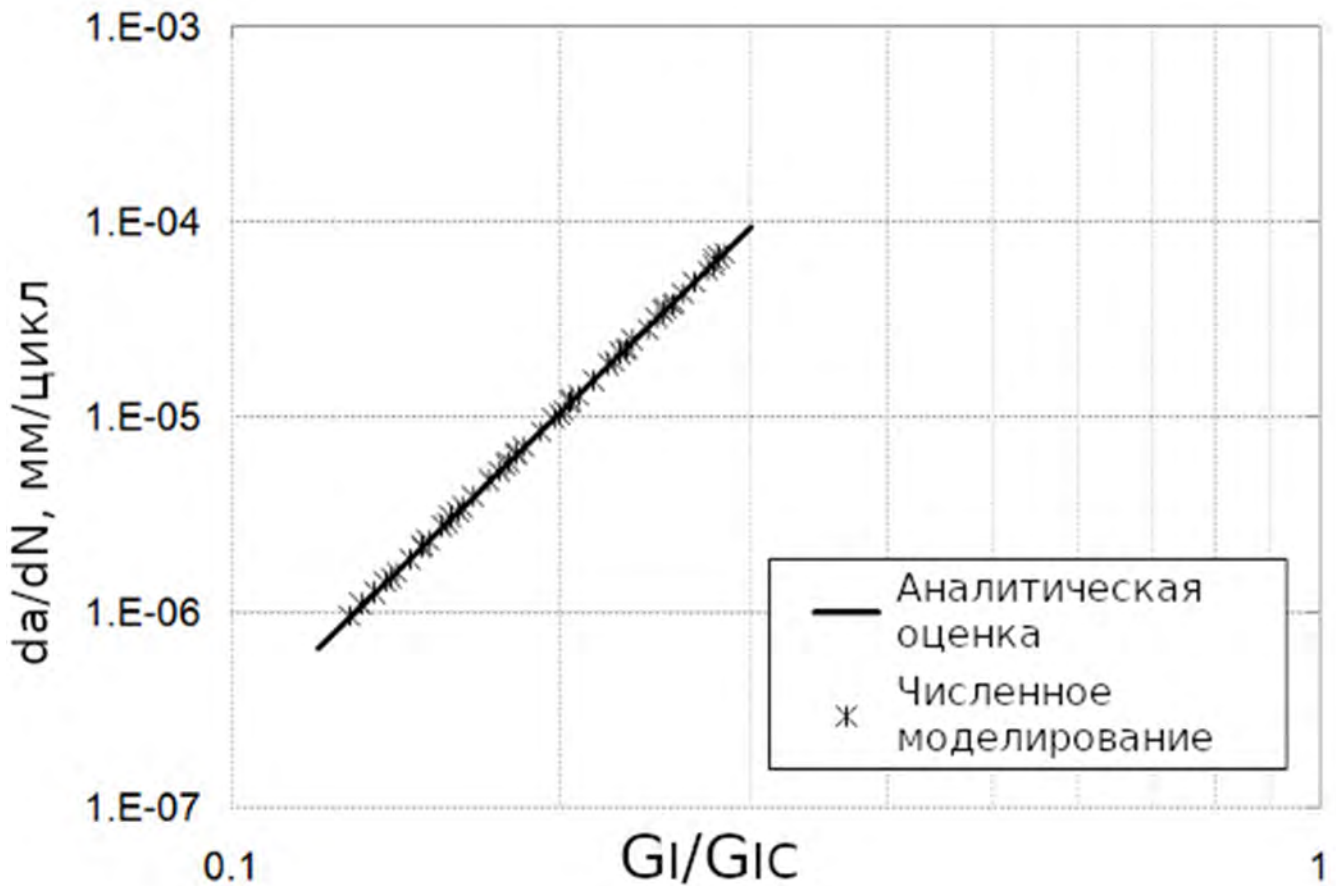


Рисунок 1.14 – Усталостная  $G-V$  диаграмма образцов ККС тип ДКБ из алюминиевого сплава и эпоксидного клея, полученная аналитическим методом и численным моделированием каждого цикла нагружения [54].

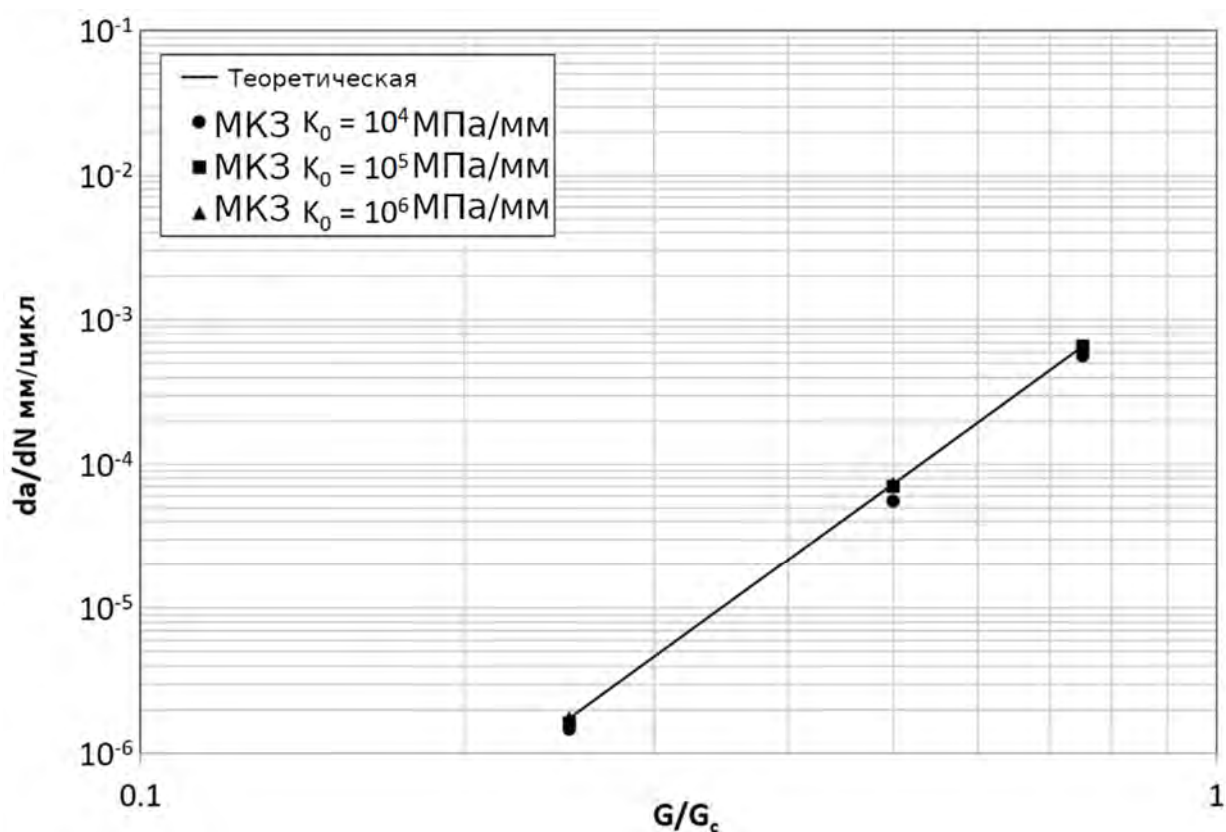


Рисунок 1.15 - Усталостная  $G$ - $V$  диаграмма образцов ККС тип ДКБ из алюминиевого сплава и эпоксидного клея, полученная численным моделированием методом огибающей нагрузки при различных заданных значениях наклона линейного участка ЗКЗ ( $K_0$ ) при одинаковом значении других его параметров ( $G_c=0.26$  Н/мм,  $\sigma_0=30$  МПа и  $\delta_c=0.0173$  мм) и при перепаде нагрузки в цикле  $\Delta G=0.06$  Н/мм [58].

Таким образом, моделирование докритического нагружения ККС активно проводится в условиях усталостного циклического нагружения, но, по литературным данным, ещё не применялось для условий длительной статической нагрузки.

#### 1.4 Заключение по литературному обзору и постановка задач

Анализ литературных данных показал, что подходы и методы ЛУМР применимы и очень эффективны при оценке и прогнозировании несущей способности и долговечности ККС в различных условиях эксплуатации (нагрузках и средах). На данном этапе активно применяются микромеханические модели, в частности МКЗ, которая успешно импортирована в МКЭ. Использование МКЗ/МКЭ в программных пакетах Ansys и Abaqus позволяет

эффективно прогнозировать несущую способность и долговечность ККС при сложной геометрии таких соединений. Однако применение такого подхода требует корректного экспериментального определения параметров ЗКЗ, учета возможных погрешностей и общей оценки соответствия результатов моделирования и реальных испытаний на примере стандартных образцов для конкретных типов ККС. Данных о проведении такой работы в условиях критического нагружения для активно используемых при постройке долговременных космических конструкций эпоксидных конструкционных клеёв не найдено. Поэтому разработка численной модели на основе МКЭ/МКЗ для анализа критической трещиностойкости ККС и модели для оценки кинетики докритического подрастания трещины и построения G-V диаграмм ККС при условии длительного квазистатического нагружения являются актуальными.

На основании вышеизложенного цель настоящей работы состояла в разработке экспериментальной и численной методик и оценке квазистатических критических и кинетических параметров трещиностойкости образцов конструкционных клеевых соединений типа ДКБ на основе листов алюминиевого сплава с использованием микромеханической модели и экспоненциального закона когезионной зоны.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Экспериментально определить параметры квазистатической критической и усталостной трещиностойкости конструкционных клеевых соединений на основе листов алюминиевого сплава и трех типов эпоксидных клеев.
2. Разработать численную модель, получаемую имплантацией в метод конечных элементов модели когезионной зоны для анализа критической трещиностойкости конструкционных клеевых соединений и отработать методику экспериментального определения необходимых параметров.
3. Разработать, на основе микромеханической модели и экспоненциального закона когезионной зоны, алгоритм и методику численной оценки кинетики



докритического подрастания трещины при длительном квазистатическом нагружении с использованием экспериментально определённых параметров закона когезионной зоны.

4. Проверить модели критического роста и методики оценки кинетики докритического подрастания трещины сопоставлением экспериментальных и расчетных данных о параметрах квазистатической критической и усталостной трещиностойкости конструкционных клеевых соединений на основе листов алюминиевого сплава и трех типов эпоксидных клеев.

## 2. Объекты и методы исследования

### 2.1 Объекты исследования

Объектами исследований в данной работе служили клеевые соединения листов алюминиевого сплава Д-16 (толщина листов 2 мм, модуль упругости сплава 72 ГПа) и трех марок промышленных эпоксидных клеев (ЭПК-1, ВК-9 и К-300-61), состав которых приведен в таблице 2.1.

Таблица 2.1. Состав клеев.

Компоненты	Марка клея		
	ЭПК-1	ВК-9	К-300-61
	Марка /содержание компонента		
Эпоксидная смола	ЭД-20/35 м.ч.	ЭД-20/60 м.ч.	«Декалит-6»/65 м.ч.
Отвердитель	ПО-300/40 м.ч.	ПО-300/40 м.ч.	Л-20 / 35
Разбавитель	Э-181/25 м.ч.	-	-
Наполнитель	Стеглосферы МС-9/30 м.ч. на 100 м.ч. связующего	Алюминиевая пудра/5 м.ч. на 100 м.ч. связующего	Порошок NiB/10 м.ч. на 100 м.ч. связующего

Для определения критического параметра трещиностойкости и кинетики докритического роста трещины использовали образцы ККС типа ДКБ с предварительно заданной трещиной (рис.2.1 а). Для получения таких образцов использовали вырезанные из листов сплава Д-16 пластины шириной 20 мм и длиной 110 мм.

Перед склеиванием пластин их поверхность подвергали механической обработке (зашкуриванию) и обезжириванию ацетоном. Толщину клеевой прослойки между пластинами задавали с помощью закладных фторопластовых

плёнок толщиной 100 мкм (см. рис. 2.1а), которые использовали также для задания искусственной трещины в клеевом соединении. Отверждение клеев после их нанесения на склеиваемые пластины и закрепления последних в струбцинах под давлением примерно  $0,5 \text{ кгс/см}^2$  проводили при комнатной температуре в течение 24 часов с последующей термообработкой при  $120^\circ\text{C}$  в течение 2 часов. На склеенные пластины для повышения их жесткости образом наклеивали дополнительные металлические пластины толщиной 5 мм.

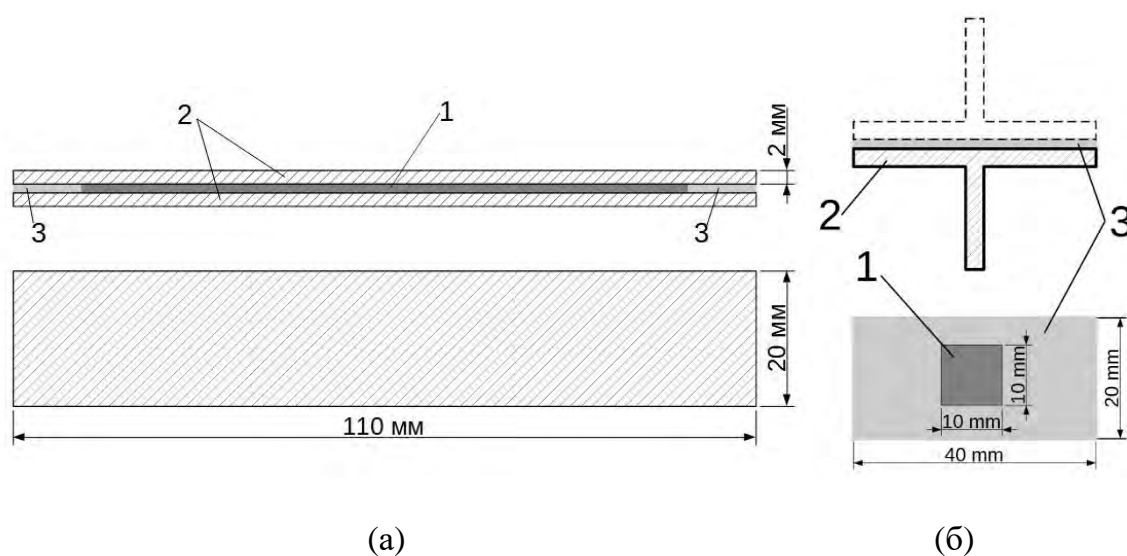


Рис. 2.1. Схематические изображения образцов клеевых соединений для испытаний на критическую и докритическую трещиностойкость (а) и на локальную прочность (б): 1 – клеевой слой, 2 - склеиваемые пластины, 3 – закладная фторопластовая плёнка.

Для экспериментального определения локальной прочности ККС, соответствующей прочности когезионной зоны, развиваемой у кончика трещины, нами предложено использовать образцы, получаемые склеиванием двух пластин алюминиевого сплава размером  $40 \times 20 \text{ мм}$  на малом участке размером  $10 \times 10 \text{ мм}^2$ , имитирующем КЗ. Для получения такого соединения между склеиваемыми поверхностями после нанесения на них клеевого слоя прокладывали фторопластовую плёнку толщиной 100 мкм с вырезанным посередине квадратом  $10 \times 10 \text{ мм}$  (рис. 2.1б) для ограничения зоны склеивания.

Подготовку поверхности пластин перед склеиванием и отверждение клеёв после закрепления пластин в струбцинах осуществляли по тем же режимам, что и при получении образцов типа ДКБ.

## 2.2 Методы исследования

Для экспериментального определения критического параметра трещиностойкости  $G_{IC}$  образцов типа ДКБ трех типов ККС, описанных в подразделе 2.1, использовали метод, описанный в ГОСТ 28966.1-91, ГОСТ Р 56815-2015 и ASTM D 5528 – 01 [20, 59, 60]. Для этого к образцам прикреплялись алюминиевые уголки для закрепления в захватах разрывной машины (рис. 2.2 а).

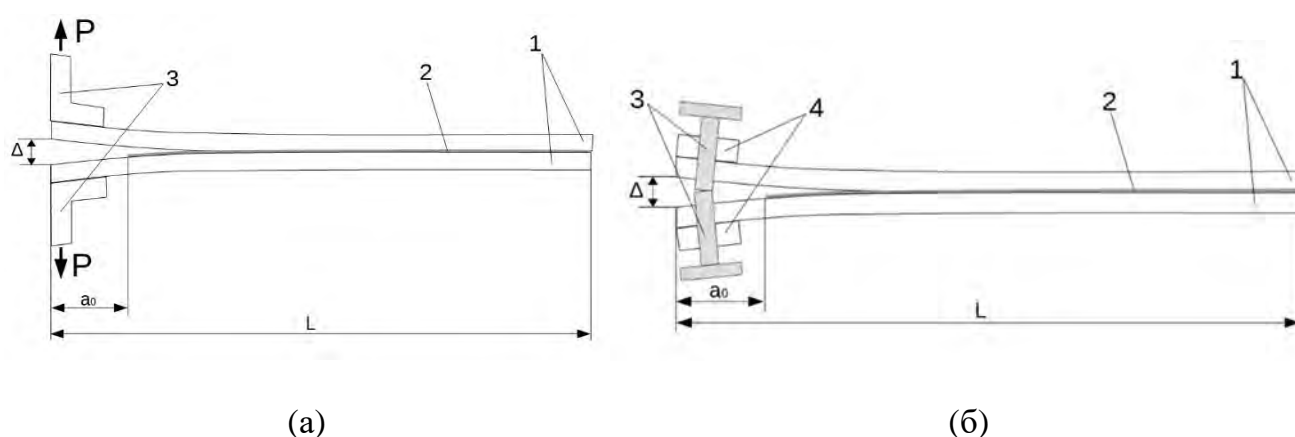


Рисунок 2.2 - Схематическое изображение образцов в виде двухконсольной балки (ДКБ) с концевой трещиной, нагружаемой по моде I усилием  $P$

(а) и раскрытием  $\Delta$  (б).

Энергетическая нагрузка на трещину  $G_I$  в образце типа ДКБ рассчитывается через податливость образца с трещиной:

При нагружении образца силой:

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

При нагружении раскрытием трещины:

$$G_I = \frac{3\Delta^2 E h^3}{16a^4} \quad (2.16)$$

Параметр трещиностойкости  $G_{IC}$  соответствует критическому значению трещиноподвижной силы и рассчитывается по экспериментально определенному предельному значению силы  $P=P_C$  (при монотонном нагружении силой  $P$ ) по уравнению (2.1а) или по предельному глобальному раскрытию трещины  $\Delta=\Delta_C$  (при монотонном раскрытии) по уравнению (2.1б). В первом случае трещина находится в нестабильном состоянии ( $dG/da > 0$ ), а во втором - в стабильном ( $dG/da < 0$ ).

С поправкой на толщину слоев, учитывающей возникновение сдвиговых деформаций в вершине трещины вследствие крутящего момента при монотонном нагружении, выражение (1.6а) принимает вид:

$$G_I = \frac{4P^2}{Eb^2} \left( \frac{3a^2}{h^3} + \frac{1}{h} \right) \quad (2.1в)$$

где  $E$  - модуль упругости субстрата,  $h$  - полувысота,  $b$  - ширина и  $a$  - длина краевой трещины.

Методика оценки кинетики докритического роста трещины детально не стандартизирована, поэтому в данной работе были использованы упомянутые выше методики [20, 59, 60], с поправкой на создание докритических условий нагружения, для чего к образцам ДКБ приклеивали опорные накладки со сквозной резьбой, в которую ввинчивали соосные винты, задающие ее раскрытие  $\Delta$  (см. рис. 2.2 б).

Для экспериментального определения локальной межслоевой прочности при нормальном отрыве была использована методика, впервые описанная в работе [61] (рис. 2.3). Для этого использовали образцы, описанные в подразделе 2.1 (рис. 2.1б). Данные образцы закрепляли в захватах разрывной машины и разрывали со скоростью 0,5 мм/мин [64, 65].

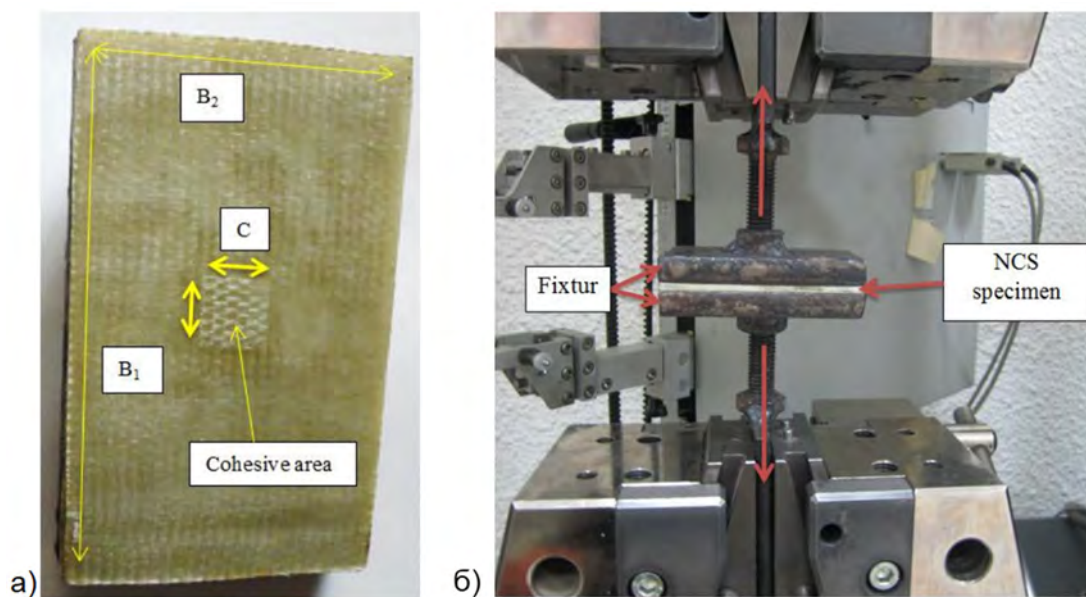


Рисунок 2.3 – Метод определения нормальной когезионной прочности: образец после испытания (а) и образец закреплённый в разрывной машине (б) [61].

Фотографии образцов и их поверхностей разрушения получали с помощью цифрового фотоаппарата Canon IXUS 134с увеличением до 4-х кратного.

Для КЭ-моделирования использовали программную среду ANSYS® Mechanical APDL Release 19R2.

### 3. Определение параметров трещиностойкости и кинетики докритического роста трещин

#### 3.1 Определение критического параметра трещиностойкости ( $G_{Ic}$ )

Определение критического параметра трещиностойкости проводили с использованием стандартного метода (ГОСТ 28966.1-91, ГОСТ Р 56815-2015 и ASTM D 5528 – 01) [20, 59, 60]. Для этого к поверхности образцов на одном из краев, где расположена закладная пленка, приклеивали алюминиевые уголки для закрепления в захватах разрывной машины (рис. 3.1).



Рисунок 3.1 – Образец типа ДКБ для определения  $G_{Ic}$ .

Перед испытанием в образцах задавали начальную трещину расклиниванием с одного конца в зоне клеевого слоя (месте расположения закладной плёнки), извлекая пленку и заостря лезвием бритвы кончик трещины. Для улучшения визуального контроля длины трещины торцевую поверхность образцов покрывали тонким слоем хрупкой белой краски.

Образец закрепляли за уголки в зажимы разрывной машины. Измеряли расстояние от линии приложения нагрузки до конца начальной трещины, которое

принимали за  $a_0$ . Начальную длины трещины и ее изменение определяли с помощью катетометра В630.

Испытания проводили при постоянной скорости ( $V_{нагр} = 0,5$  мм/мин) при нормальных условиях с помощью универсальной испытательной машины WDW-10E, оснащённой электронной аппаратурой для измерения усилий и перемещений (деформаций). В процессе испытания с помощью самописца разрывной машины записывали диаграмму разрушения в координатах  $P-\Delta$  ( $P$  – усилие;  $\Delta$  – раскрытие трещины). Далее полученные диаграммы обрабатывались и по ним определялась критическая нагрузка начала роста трещины –  $P_c$ .

На рисунках 3.2 – 3.4 показаны примеры кривых разрушения образцов в виде ДКБ для 3-х типов ККС.

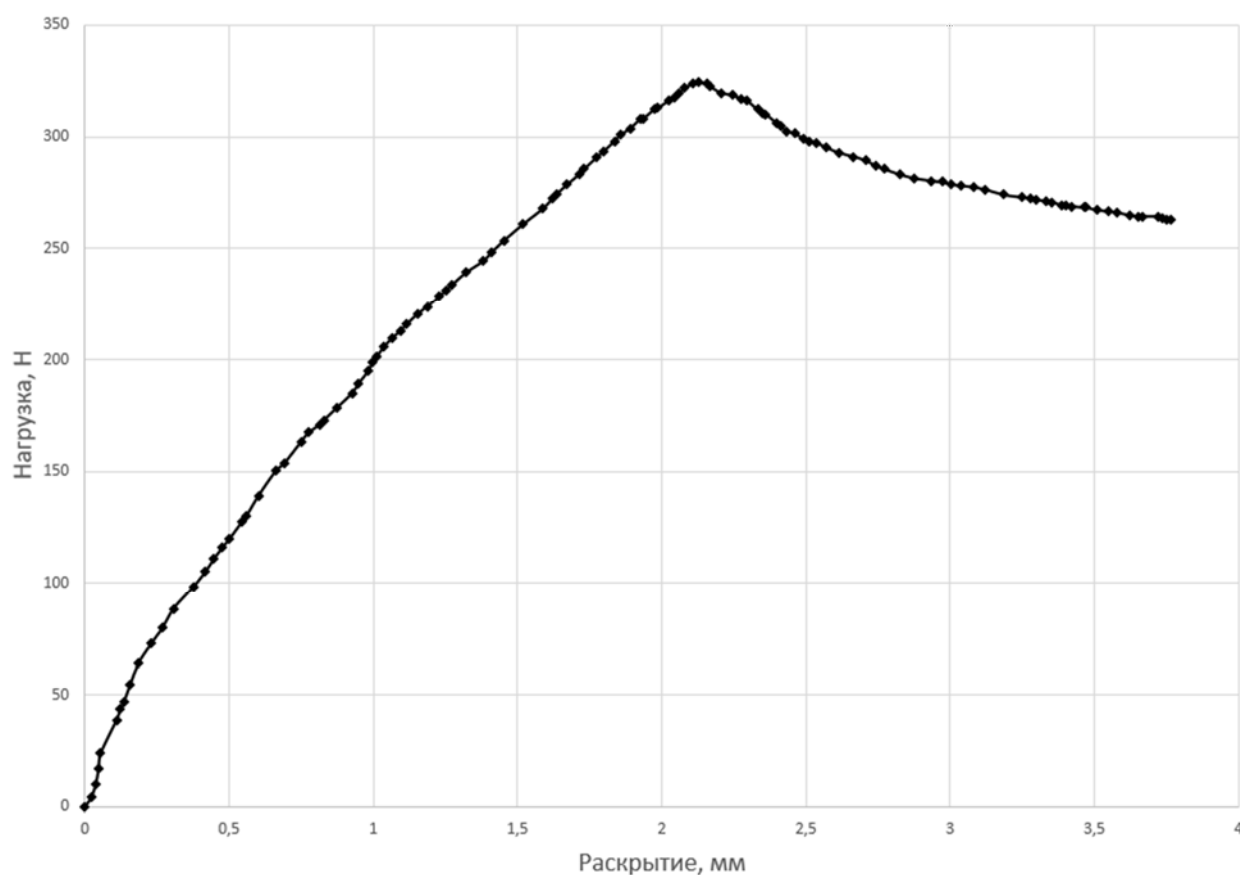


Рисунок 3.2 – Пример экспериментально полученной диаграммы усилие-раскрытие трещины ( $P-\Delta$ ) в процессе расслоения образцов типа ДКБ из ККС на основе клея ВК-9 при нормальных условиях.



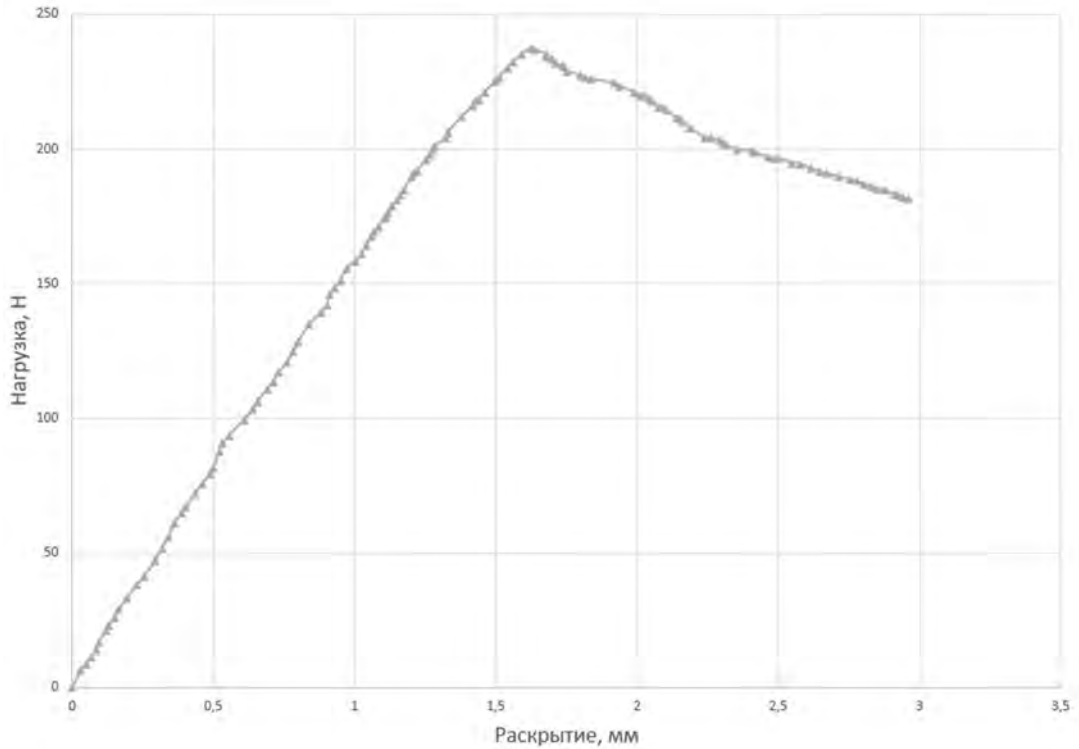


Рисунок 3.3 – Пример экспериментально полученной диаграммы усилие-раскрытие трещины ( $P$ - $\Delta$ ) в процессе расслоения образцов типа ДКБ из ККС на основе клея К-300-61 при нормальных условиях.

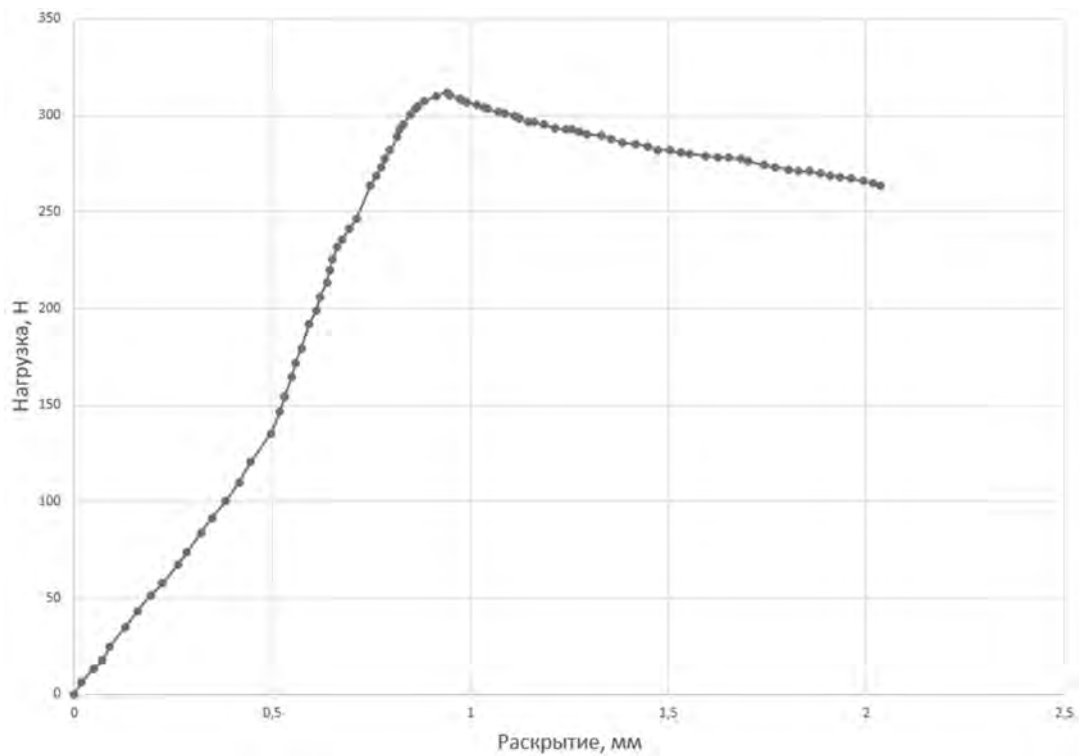


Рисунок 3.4 – Пример экспериментально полученной диаграммы усилие-раскрытие трещины ( $P$ - $\Delta$ ) в процессе расслоения образцов типа ДКБ из ККС на основе клея ЭПК-1 при нормальных условиях.

Разрушение ККС происходит преимущественно по адгезионному механизму - расслаиванию по границе раздела субстрат-клеевая пленка с переходом от одной поверхности к другой (Рис.3.5).



Рисунок 3.5 - Фотографии поверхностей разрушения при нагружении по моде I образцов ККС типа ДКБ на основе клея ВК-9.

По максимальной нагрузке  $P_C$  на кривых ( $P-\Delta$ ), соответствующей началу критического роста трещины, с учетом ее начальной длины и геометрических параметров образца ДКБ рассчитывали критическое значение сопротивления росту трещины  $G_{IC}$  по формуле ЛУМР:

$$G_{IC} = \frac{4P_C^2}{Eb^2} \left( \frac{3a_0^2}{h^3} + \frac{1}{h} \right) \quad (3.1)$$

где  $E$  - модуль упругости субстрата,  $h$  - полувысота,  $b$  - ширина и  $a$  - длина краевой трещины.

Было испытано по три образца для каждого типа клея (таблицы 3.1 – 3.3).

Таблица 3.1. Образцы ККС сплава Д-16 и клея ВК-9 для определения  $G_{IC}$ .

Номер образца	$a$ , м	$P_{\text{МАКС}}$ , Н	$G_{IC}$ , Дж/м <sup>2</sup>
1	0,013	344	323
2	0,014	318	319
3	0,015	301	328

Среднее значение  $G_{IC}$  для ККС сплава Д-16 и клея ВК-9 – 323 Мпа. Среднеквадратическая погрешность полученных значений прочности составила  $\pm 4$  Дж/м<sup>2</sup>.

Таблица 3.2. Образцы ККС сплава Д-16 и клея К-300 для определения  $G_{IC}$ .

Номер образца	$a$ , м	$P_{\text{МАКС}}$ , Н	$G_{IC}$ , Дж/м <sup>2</sup>
1	0,015	223	180
2	0,015	228	188
3	0,014	240	182

Среднее значение  $G_{IC}$  для ККС сплава Д-16 и клея К-300 – 183 Мпа. Среднеквадратическая погрешность полученных значений прочности составила  $\pm 4$  Дж/м<sup>2</sup>.

Таблица 3.3. Образцы ККС сплава Д-16 и клея ЭПК-1 для определения  $G_{IC}$ .

Номер образца	а, м	$R_{МАКС}$ , Н	$G_{IC}$ , Дж/м <sup>2</sup>
1	0,012	305	217
2	0,015	241	210
3	0,014	261	215

Среднее значение  $G_{IC}$  для ККС сплава Д-16 и клея ЭПК-1 – 214 Мпа. Среднеквадратическая погрешность полученных значений прочности составила  $\pm 3$  Дж/м<sup>2</sup>.

Полученные средние критические значения интенсивности высвобождения упругой энергии ( $G_{IC}$ ) для ККС алюминиевого сплава и трёх типов клеев обобщены в таблице 3.4.

Таблица 3.4. Экспериментально определённые средние значения  $G_{IC}$  ККС сплава Д-16 и трех типов клеев.

Клей	$G_{IC}$ , Дж/м <sup>2</sup>
ВК-9	323
К-300-61	183
ЭПК-1	214

Среднеквадратическая погрешность полученных критических значений интенсивности высвобождения упругой энергии не превышала  $\pm 4$  Дж/м<sup>2</sup>.

### 3.2 Определение кинетических параметров докритического роста трещины

Для экспериментальной оценки кинетики докритического подрастания трещины в образцах типа ДКБ в квазистатических условиях стандартный способ нагружения по моде I – приложение растягивающего докритического усилия к

краям трещины не применим. При таком нагружении трещинодвижущая сила (ТДС)  $G_I$  пропорциональна квадрату длины трещины  $a$  (см. уравнение 2.1а), и трещина находится в нестабильном состоянии ( $dG_I/da > 0$ ). Любое подрастание нагруженной таким образом трещины приводит к резкому возрастанию ТДС и к быстрому критическому разрушению образца. Это было подтверждено экспериментально при разработке метода дистанционного контроля докритического роста трещин в образцах типа ДКБ при нагружении по моде I для космического эксперимента КРТ [42, 43]. Было установлено, что при начальной нагрузке  $P$ , обеспечивающей ТДС меньше критической ( $G_I \leq G_{IC}$ ), после определенного индукционного периода трещина прорастает с ускорением, и образец быстро разрушается.

Этого не наблюдается при задании статической нагрузки на трещину по моде I ее докритическим раскрытием, т.е. разведением концов трещины на заданную докритическую величину  $\Delta$ . В этом случае ТДС обратно пропорциональна длине трещины  $a$  в 4-й степени (см. уравнение 2.1б) и, следовательно, трещина находится в стабильном состоянии ( $dG_I/da < 0$ ). Поэтому для экспериментальной оценки кинетики подрастания трещины в ККС при статических условиях длительного докритического нагружения нужно использовать постоянное раскрытие трещины.

Прямые экспериментальные данные о кинетических параметрах докритического подрастания трещины, использованные для сравнения с расчетными, были получены при контрольных наземных испытаниях образцов клеевых соединений в виде ДКБ из листов алюминиевого сплава и различных типов промышленных клеевых композиций, в том числе ВК-9, в рамках пассивного («Компласт») и активного («КРТ») космических экспериментов (КЭ) по оценке и прогнозированию долговечности ККС и ПКМ в околоземных космических условиях [62-63]. В пассивном КЭ экспериментальные образцы ККС подвергались длительной выдержке в условиях околоземной орбиты с последующим определением на Земле параметров трещиностойкости и оценкой

характера разрушения ККС и изменения структуры и свойств клеевых слоев и поверхности разрушения. В активном КЭ дистанционно контролировали кинетику докритического подрастания трещины (ДКПТ) в процессе длительной выдержки образцов при квазистатической докритической нагрузке.

В обоих экспериментах проводились контрольные наземные испытания в лабораторных условиях с использованием аналогичных образцов типа ДКБ, нагружаемых заданным раскрытием трещины (см. рис. 2.5). Для этого на конце образца для определения трещиностойкости ККС, где задается трещина, приклеивали опорные накладки со сквозной резьбой, в которую ввинчивали соосные винты, задающие ее раскрытие  $\Delta$  (рис. 3.6).

С помощью винтов задавали подрастание исходного надреза с фиксацией начальной длины трещины  $a(0)$  и ее раскрытия  $\Delta$ . Начальную нагрузку на трещину  $G_I$  рассчитывали по формуле (2.1б).

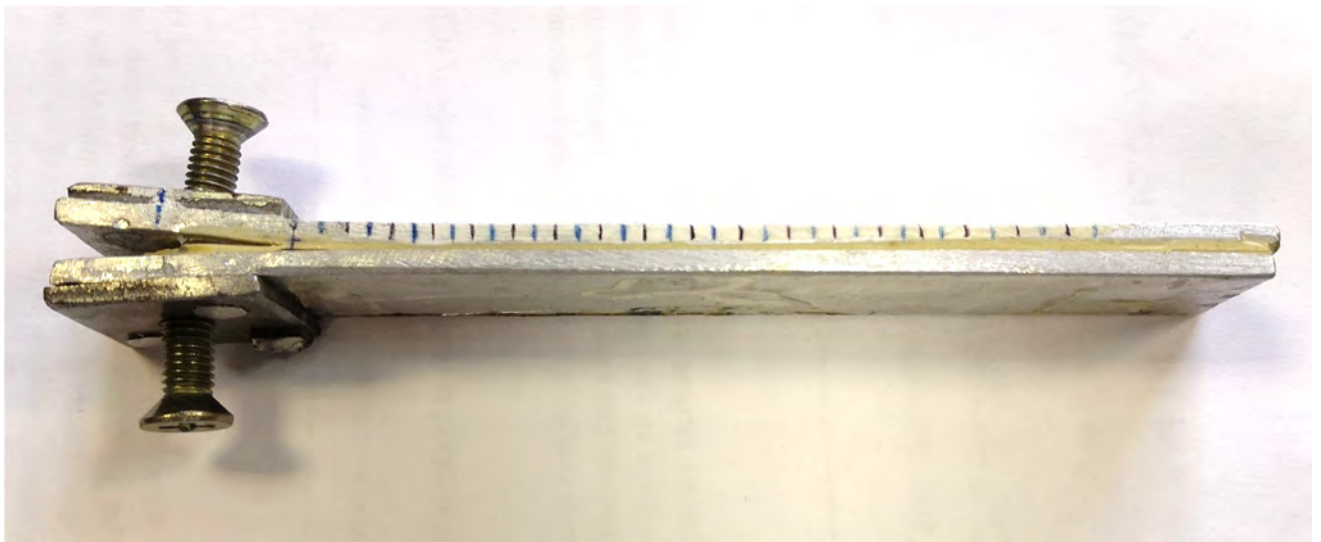


Рисунок 3.6 – Фотография образца ККС на основе клея ВК-9 для оценки кинетики подрастания трещины в ККС при статических условиях длительного докритического нагружения.

Нагруженные образцы выдерживали длительное время в лабораторных условиях в эксикаторе, и фиксировали через определенные промежутки времени

изменение длины трещины с помощью катетометра. Заметный докритический рост трещины при нагрузке не более 0,8 от предельной ( $G_{IC}$ ) наблюдался во временном интервале  $9 \cdot 10^6$ с (примерно 4 месяца), после чего он существенно замедлялся. Полученные данные приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5. Экспериментально определённые изменения с течением времени значений длины трещины  $a$  и рассчитанной нагрузки на неё  $G$  в ДКБ образце ККС сплава Д-16 и клея ВК, при постоянном раскрытии трещины.

t, секунды	a, мм	G, Дж/м <sup>2</sup>
0	13	330
85000	17,2	320
425000	21,5	314
595000	28,2	302
850000	31	298
1020000	38,6	294
1190000	39,9	284
1360000	45,2	282
1701408	51	268
2053521	58	255
2335211	61,2	245
2900000	65	220
3464789	67	200
4029577	67	170
4594366	70	155
5159155	72	135
7000000	71	130
8900000	73	120

При докритическом подрастании трещины, как и при критическом росте, разрушение клеевого соединения протекало по адгезионному механизму (см. рис.3.5).

По полученным данным строили временные зависимости приращения длины трещины  $\Delta a(t)$  (рис 3.7).

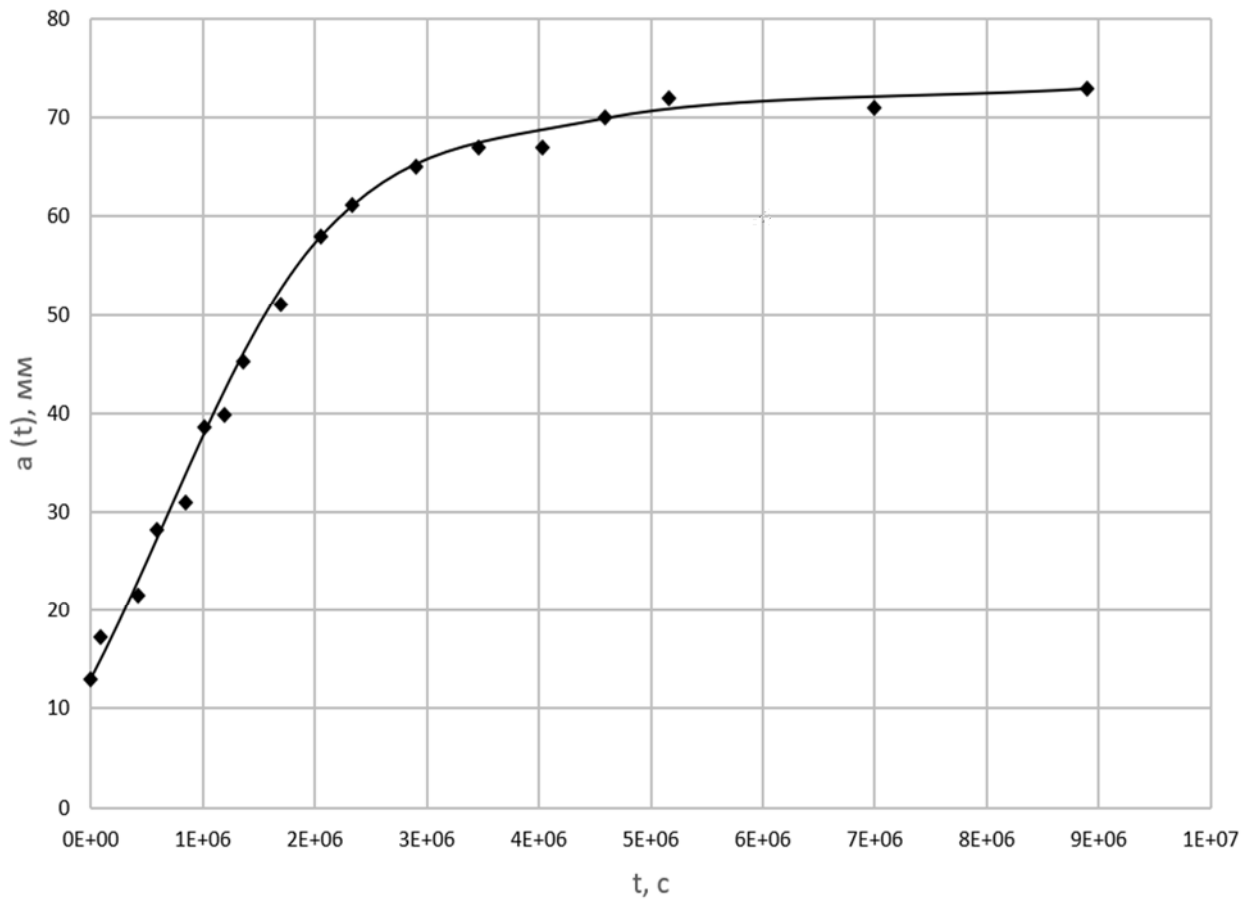


Рисунок 3.7 – Кинетическая кривая изменения длины трещины  $a(t)$  при заданном раскрытии трещины полученная экспериментально при нормальных условиях.

Кривые  $\Delta a(t)$  перестраивали во временную зависимость скорости докритического подрастания трещины  $V_{mp}(t)$  как производной приращения длины по времени (рис. 3.8).

Также строили кривые изменения нагрузки на трещину  $G_I(t)$  вследствие ее подрастания при заданном раскрытии (рис. 3.9).



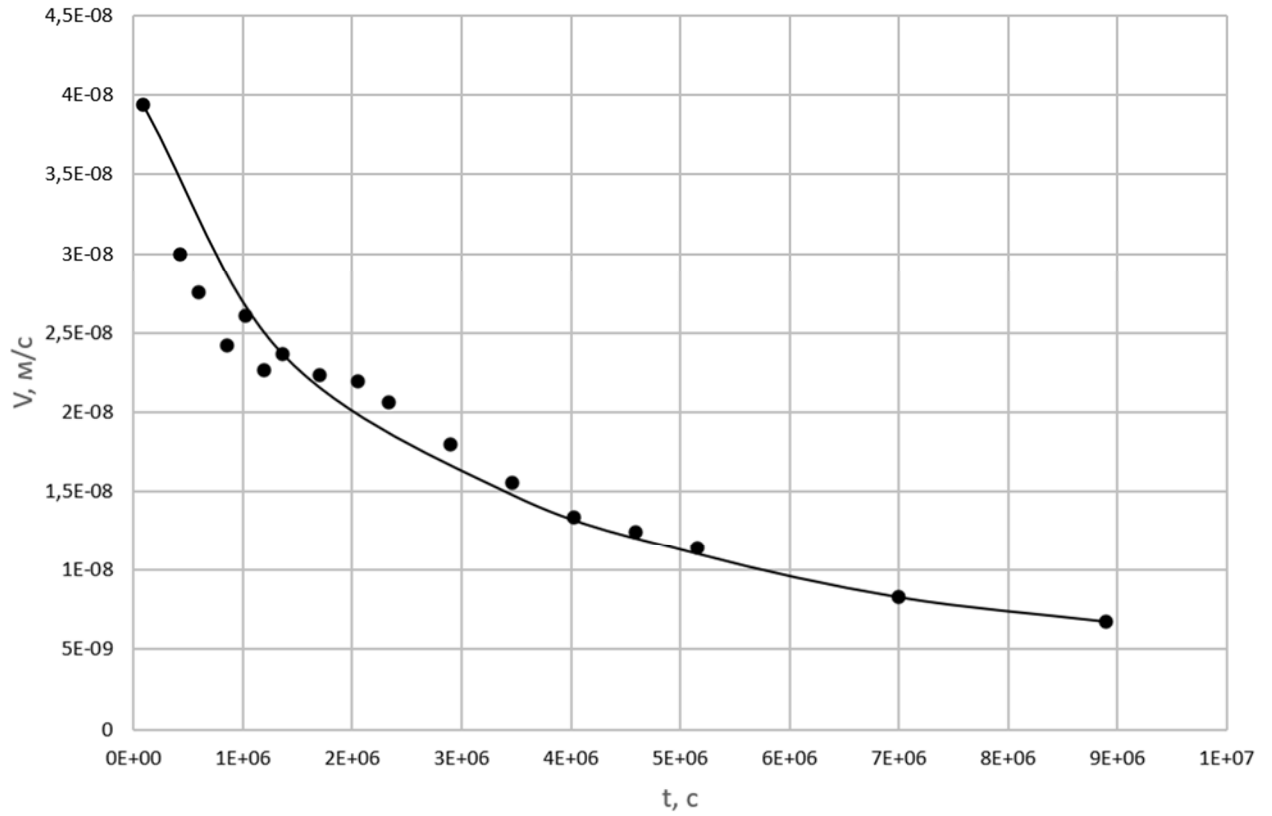


Рисунок 3.8 – Кинетическая кривая изменения скорости роста трещины при заданном её раскрытии, полученная экспериментально при нормальных условиях.

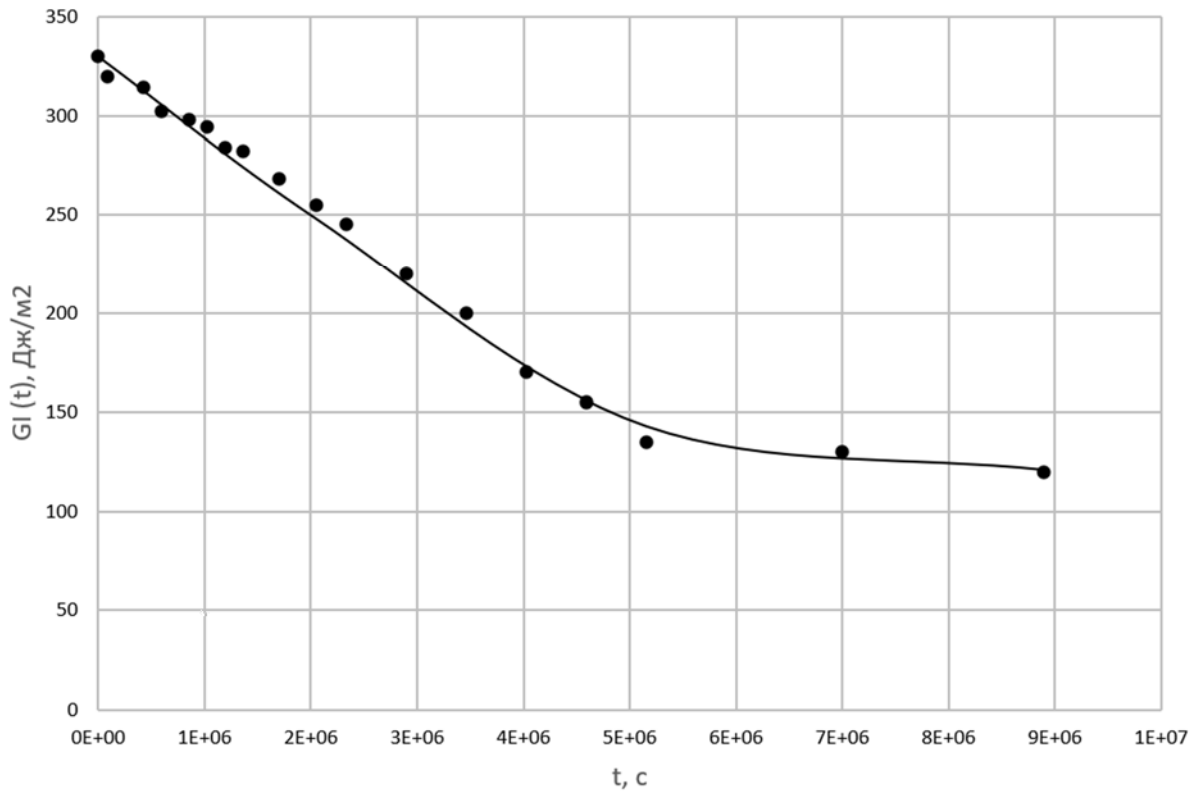


Рисунок 3.9 – Кинетическая кривая изменения нагрузки на трещину  $G_I(t)$  при заданном раскрытии трещины полученная экспериментально при нормальных условиях.

По кривым  $V_{mp}(t)$  и  $G_I(t)$  строили зависимость  $V_{mp}$  от  $G_I$  в двойных логарифмических координатах, т.е. кинетическую  $G-V$  диаграмму (рис. 3.10).

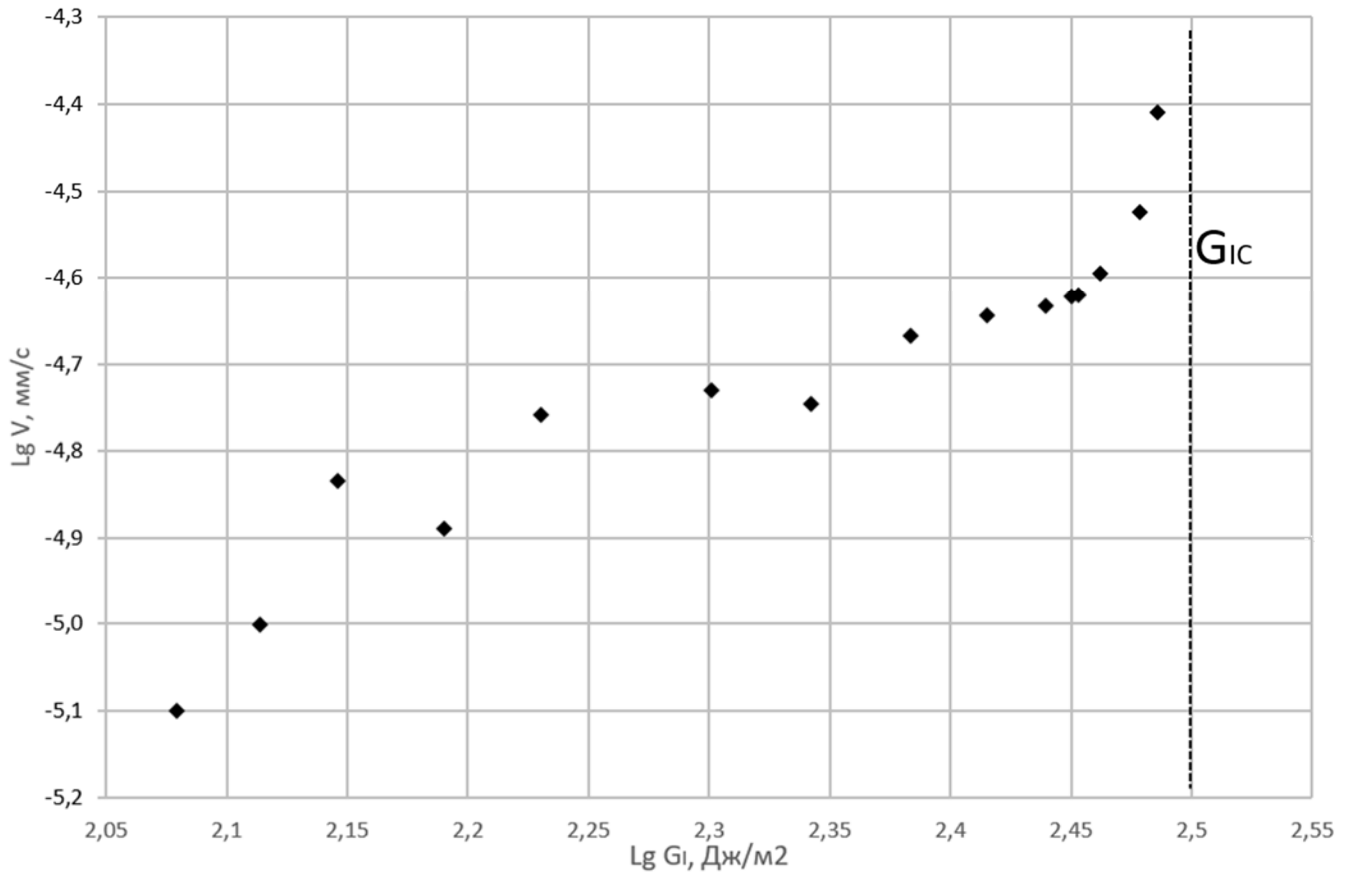
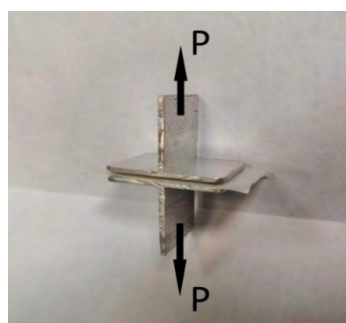


Рисунок 3.10 – Экспериментально определенная  $G-V$  диаграмма для клеевого соединения листов алюминиевого сплава Д-16 и клея ВК-9 при длительной статической нагрузке постоянным раскрытием трещины.

Аналитическая форма линейного участка этой диаграммы описывается степенной функцией (см. уравнение 1.12), характеристики которой (тангенс угла наклона прямолинейного участка  $G-V$  диаграммы  $n$  и предэкспоненциальный множитель  $A$ ) являются материальными характеристиками ККС и могут использоваться для прогнозирования их долговечности в сложных конструкциях.

### 3.3 Определение критических параметров когезионной зоны

Для экспериментального определения локальной межслоевой прочности при нормальном отрыве использовали образцы, описанные в подразделе 2.1 и соответствующую методику из подраздела 2.2. На рис. 3.11 приведены фотографии образца перед испытанием (а) и склеиваемых поверхностей после разрыва (б).



(а)



(б)

Рисунок 3.11 Фотографии образца ККС на основе клея ВК-9 (а) и его поверхностей после разрушения при испытании на растяжение (б).

Испытания образцов на разрыв проводили при скорости движения траверсы разрывной машины 0,5 мм/мин, записывая усилие с помощью динамометра, а абсолютную деформацию - с помощью датчика LVDP. Чтобы избежать возникновения сдвиговых напряжений и обеспечить равномерный нормальный отрыв в зоне сцепления слоев, образцы аккуратно балансировали в горизонтальной плоскости.

Нормальную локальную прочность рассчитывали по формуле (3.2):

$$\sigma_c = \frac{P_{\text{макс}}}{S} \quad (3.2)$$

где  $P_{\text{макс}}$  - максимальное усилие отрыва,  $S$  – площадь зоны разрушения.

Было испытано по десять образцов для каждого типа клея (табл. 3.6 – 3.8), разрушение, как и в подразделе 3.1, происходит преимущественно по адгезионному механизму.

Таблица 3.6. Образцы ККС сплава Д-16 и клея ВК-9 для определения  $\sigma_c$ .

Номер образца	$R_{\text{МАКС}}$ , Н	$\sigma_c$ , МПа
1	608	6,08
2	694	6,94
3	557	5,57
4	577	5,77
5	602	6,02
6	635	6,35
7	602	6,02
8	561	5,61
9	590	5,9
10	697	6,97

Среднее значение  $\sigma_c$  для ККС сплава Д-16 и клея ВК-9 – 6 МПа.

Среднеквадратическая погрешность полученных значений прочности составила  $\pm 0,5$  МПа.

Таблица 3.7. Образцы ККС сплава Д-16 и клея ЭПК-1 для определения  $\sigma_c$ .

Номер образца	$R_{\text{МАКС}}$ , Н	$\sigma_c$ , МПа
1	920	9,2
2	1010	10,1
3	967	9,67
4	850	8,5
5	970	9,7
6	880	8,8
7	840	8,4
8	1005	10,05
9	905	9,05
10	870	8,7

Среднее значение  $\sigma_c$  для ККС сплава Д-16 и клея ЭПК-1 – 9 МПа.

Среднеквадратическая погрешность полученных значений прочности составила  $\pm 0,6$  МПа.

Таблица 3.8. Образцы ККС сплава Д-16 и клея К-300 для определения  $\sigma_c$ .

Номер образца	$R_{\text{МАКС}}$ , Н	$\sigma_c$ , МПа
1	1220	12,2
2	1318	13,18
3	1370	13,7
4	1369	13,69
5	1237	12,37
6	1197	11,97
7	1295	12,95
8	1343	13,43
9	1278	12,78
10	1305	13,05

Среднее значение  $\sigma_c$  для ККС сплава Д-16 и клея К-300 – 13 МПа.

Среднеквадратическая погрешность полученных значений прочности составила  $\pm 0,6$  МПа.

В таблице 3.9 обобщены определённые экспериментально средние значения локальной прочности когезионной зоны ( $\sigma_c$ ).

Таблица 3.9. Экспериментально определённые экспериментально средние значения локальной прочности когезионной зоны ( $\sigma_c$ ) ККС сплава Д-16 и трех типов клеев.

Клей	$\sigma_c$ , МПа
ВК-9	6
К-300-61	13
ЭПК-1	9

Изменение во времени локальной прочности ККС ( $\sigma_c(t)$ ) при длительной выдержке в эксперименте на статическую долговечность определяли с использованием аналогичных образцов, которые выдерживали заданный период времени  $t$  (до 104 суток или до  $9 \cdot 10^6$ с) в лабораторных условиях, определяли остаточную прочность после этой выдержки и строили график ее временной зависимости  $\sigma_c(t)$ . Эти исследования были проведены для одного типа ККС на основе алюминиевого сплава Д-16 и конструкционного клея ВК-9.

Экспериментально определённые изменения во времени  $\sigma_c$  и  $\delta_{max}$  приведены на рис.3.12. – 3.13.

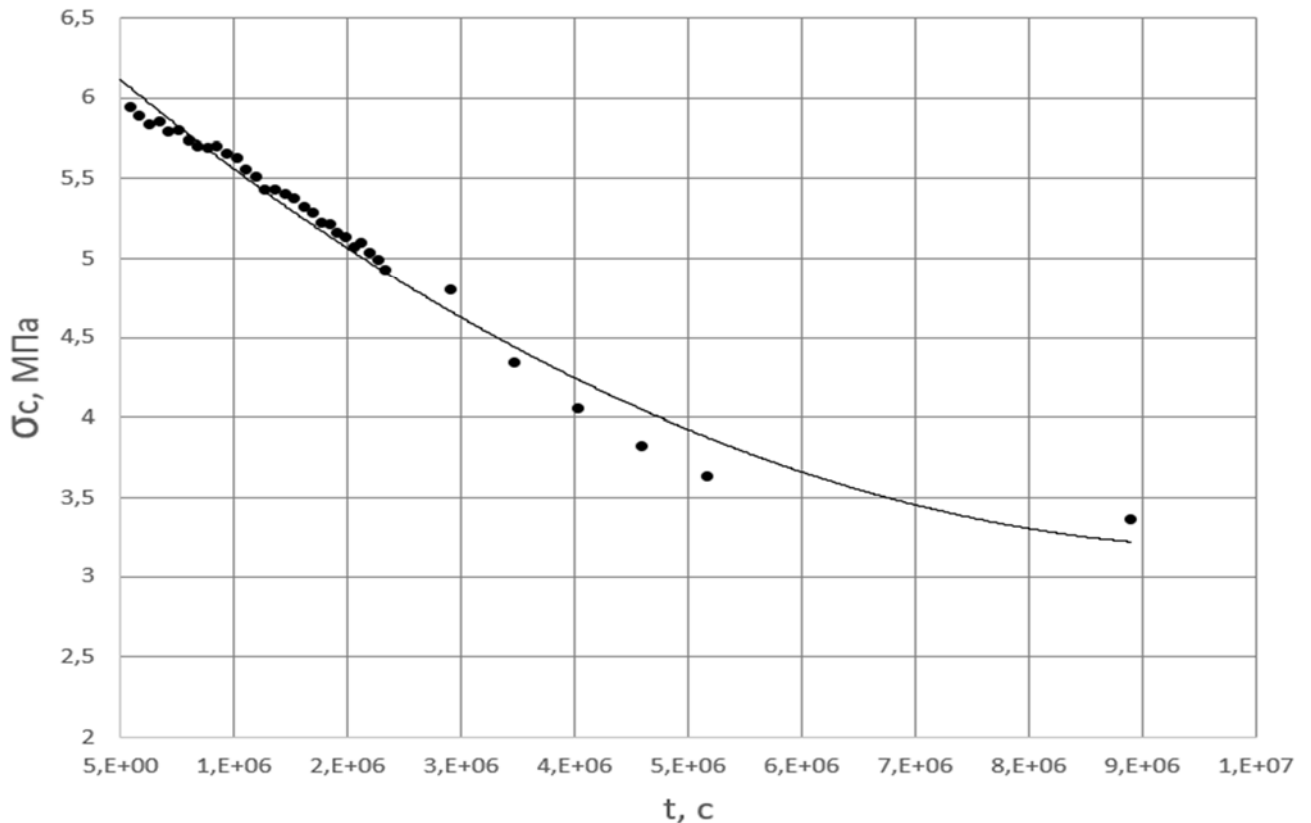


Рисунок 3.12 - Зависимость локальной прочности сцепления  $\sigma_c$  КЗ клеевого соединения Д-16-ВК-9 от длительности выдержки  $t$ .

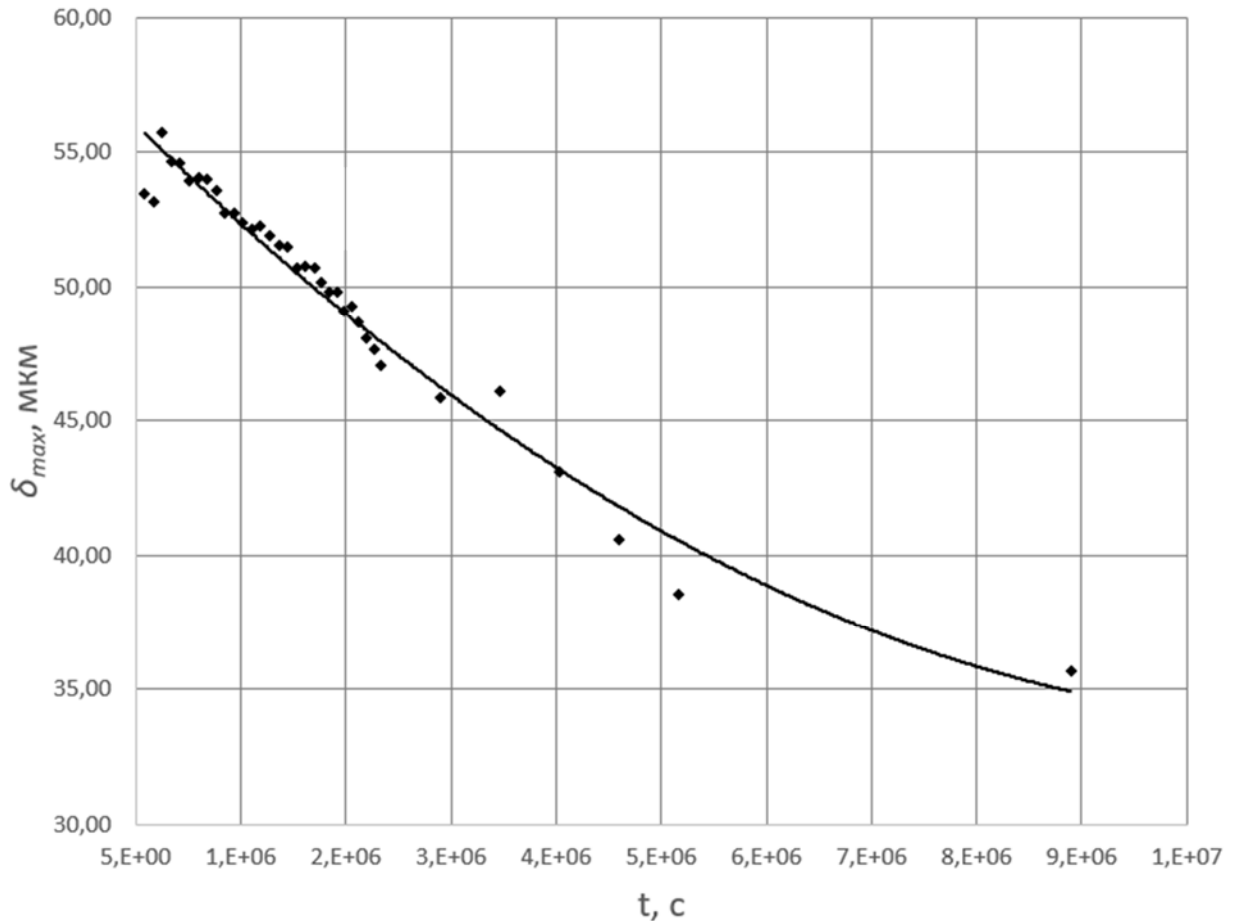


Рисунок 3.13 - Зависимость предельного раскрытия  $\delta_{max}$  КЗ клеевого соединения Д-16-ВК-9 от длительности выдержки  $t$ .

В таблице 3.10 обобщены определённые экспериментально средние критические значения интенсивности высвобождения упругой энергии ( $G_{IC}$ ), значения локальной прочности когезионной зоны ( $\sigma_C$ ) и рассчитанные по ним и модели Баренблатта значения предельного раскрытия ( $\delta_{max}$ ) и предельного упругого раскрытия КЗ ( $\delta_C$ ) и ее длины ( $l_{k3}$ ) для ККС алюминиевого сплава и трёх типов клеев.

Таблица 3.10. Экспериментально определённые средние значения  $G_{IC}$  и  $\sigma_C$ , а также рассчитанные по ним размерные параметры КЗ  $\delta_C$  и  $l_{k3}$  ККС сплава Д-16 и трех типов клеев.

Клей	$G_{IC}$ , Дж/м <sup>2</sup>	$\sigma_C$ , МПа	$\delta_C$ , мкм	$\delta_{max}$ , мкм	$l_{k3}$ , мм
ВК-9	323	6	19,9	53,8	1,70
К-300-61	183	13	8,9	24,1	0,76
ЭПК-1	214	9	10,8	29,3	0,92

## 4. Численное моделирование критического роста трещины и оценка трещиностойкости образцов ККС типа ДКБ

### 4.1 Принцип моделирования в пакете прикладных программ ANSYS

В пакете ANSYS Mechanical существует два метода решения задач расслоения с использованием модели МКЗ (CZM) [34]:

1. На основе специальных когезионных или интерфейсных элементов (КЭ или ИЭ соответственно) серии INTER20x;
2. На основе контактных элементов серии 17x с типом контакта bonded.

Для решения задачи расслоения применительно к межслоевому росту трещины в слоистых ПКМ и ККС используют обычно первый метод с использованием специальных элементов интерфейса INTER202-205, которые располагаются между слоями материала в плоскости роста трещины как показано на рис. 4.1.

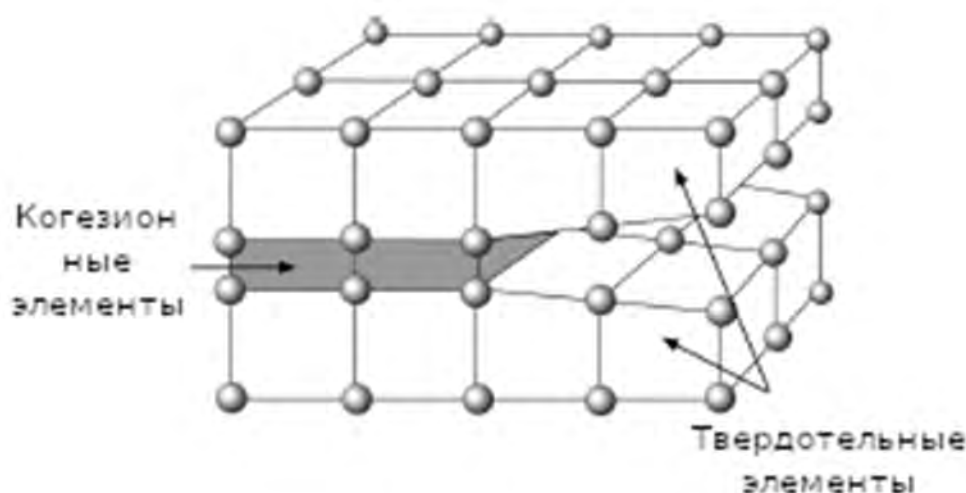


Рисунок 4.1. Расположение когезионных элементов в плоскости роста трещины [68].

При этом:



- Элементы создаются вручную командами E или EGEN, либо командой CZMESH (для удаления элементов команда CZDEL);
- Между слоями материала располагается слой элементов INTER 20x толщиной в один элемент (рис. 4.2). Начальная толщина интерфейсного элемента равна нулю (слои материала в начальный момент времени не расслаиваются);
- Точки интегрирования располагаются на срединной плоскости элементов;
- Для элементов второго порядка в начальный момент времени при нулевой толщине интерфейсного элемента на серединах ребер нет дополнительных узлов в направлении расслоения.

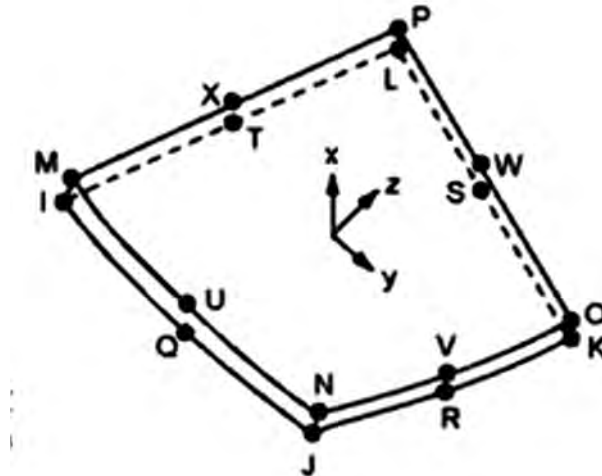


Рисунок 4.2. Вид когезионных элементов [68].

На рис. 4.3 представлены 2D (а, б) и 3D (в, г) конечные интерфейсные элементы в плоско напряженном состоянии, плоско-напряженном состоянии по толщине, осе-симметричные и в плоско-деформированном состоянии (plane stress, plane stress with thickness, axisymmetric, plane strain): (а,б) - 2D 4-х узловой элемент первого порядка INTER202 (а) и 6-ти узловой элемент второго порядка INTER203 (б); (в,г) - 3D 16-ти узловой элемент второго порядка INTER204 (в) и 8-ми узловой элемент первого порядка INTER205(г).

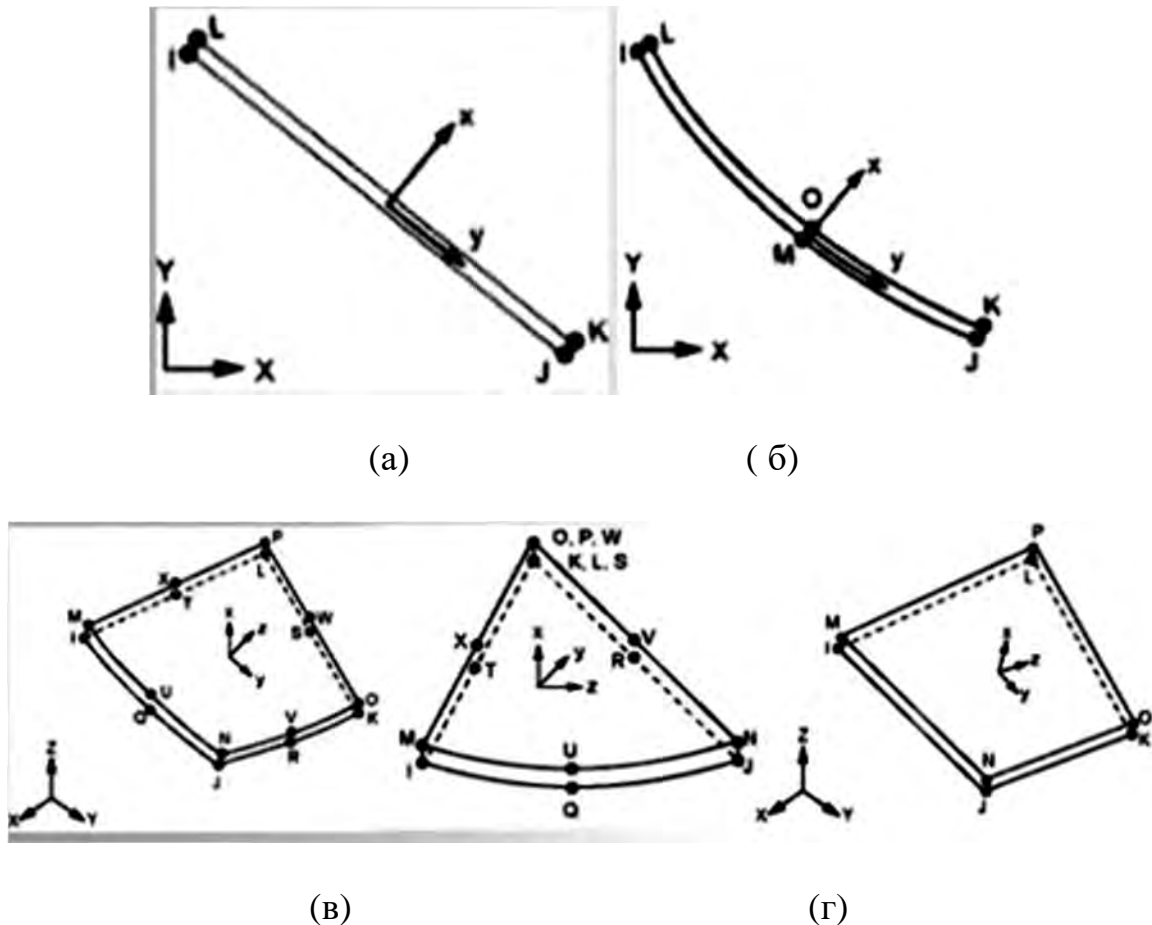


Рисунок 4.3. 2D (а,б) и 3D (в,г) интерфейсные элементы [34].

Для генерации сетки интерфейсных элементов INTER20x применяется команда CZMESH. Команда CZMESH работает с узлами твёрдых 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 ККС.

Команда CZMESH формирует интерфейсные элементы путем разъединения общих узлов выбранных твёрдых элементов как показано на рис. 4.4 [34]:

- Тип интерфейсного элемента задается только командой ET;
- Закон расслоения задается набором команд TB,CZM,,,EXPO;

- Команда CZDEL удаляет элементы INTER20x из модели.

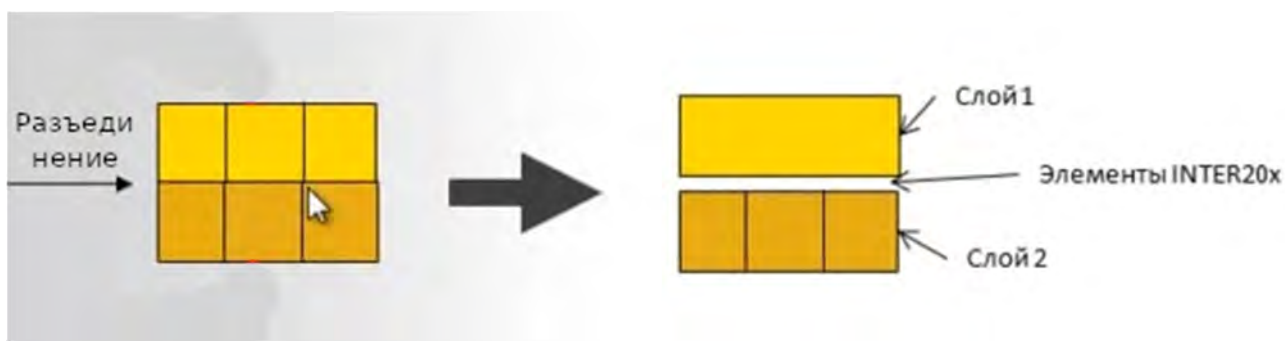


Рисунок 4.4. Схема формирования интерфейсных элементов [34].

В методе МКЗ/МКЭ используются следующие команды [34]:

- NTEMP - число температур, для которых определяются параметры материала (по умолчанию равен 1).
- NPT - число точек данных (data points) для указанной температуры.
- ТВОРТ – ЗКЗ. При моделировании расслоения, т.е. межслоевого роста трещины, в методе МКЗ/МКЭ могут быть применены различные ЗКЗ, чаще всего экспоненциальный и билинейный, причем экспоненциальный более физически обоснован применительно к слоистым ПКМ и ККС, поэтому ниже описывается методика расчетов с применением этого ЗКЗ с опцией команды ТВОРТ - EXPO и с общим набором команд ТВ,CZM,,,EXPO для расслоения по нормали (по моде I) .

На рис. 4.5 приведен графический вид экспоненциального закон расслоения (а) а на 4.6 - визуальное изображение приращения размеров области расслоения (separation distances), которое вычисляется на основе точек Гаусса по срединной плоскости элемента (б).

В процессе вычислений (при расслоении по нормали) необходимо ввести два параметра материала в команде ТВ,CZM [34]:

C1: Максимальное нормальное напряжение раскрытия слоев  $\sigma_C$ ;

C2: Величина деформации по нормали к поверхности – раскрытие  $\delta_C$  при напряжении  $\sigma_C$ , когда отсутствует сдвиг слоев.

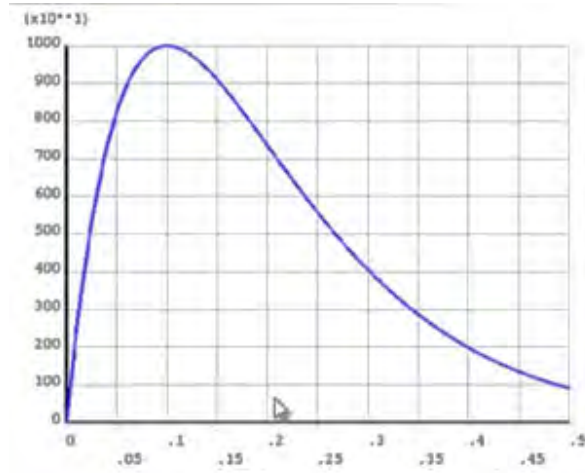


Рисунок 4.5. Зависимость напряжений от величины раскрытия в экспоненциальном ЗКЗ [34].

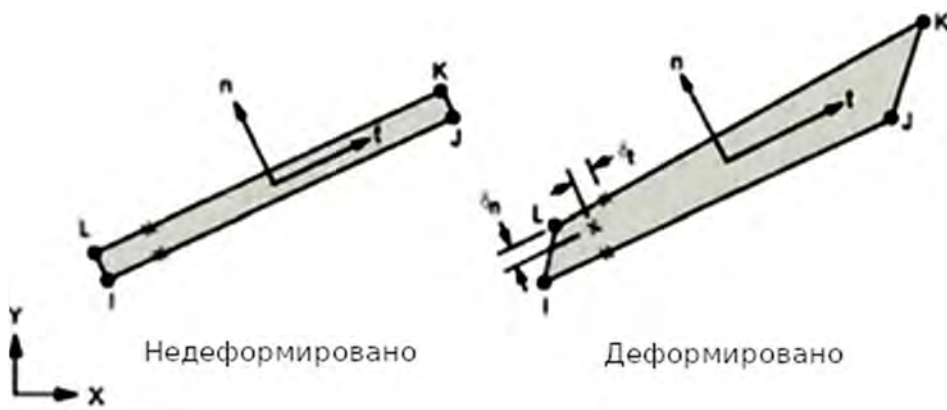


Рисунок 4.6. Приращение размеров области расслоения [34].

Вычисление работы раскрытия слоев по нормали  $\phi_n$  осуществляется по формуле:

$$\phi_n = e \cdot \sigma_C \delta_C \quad (4.1)$$

где  $e$  – основание натурального логарифма.

Метод МКЗ/МКЭ с экспоненциальным ЗКЗ применяется совместно с интерфейсными элементами INTER20х и контактными элементами CONTA17х. При этом требуется задание параметров для элементов INTER20х (ТВ,CZM,...EXPO). Интерфейсные элементы позволяют моделировать зону расслоения, применяя команду ТВ,CZM,,,ВОРТ с командой EXPO для задания экспоненциального закона поведения материала и командой ТВDATA для задания параметров, приведённых в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Параметры модели с экспоненциальным ЗКЗ.

Параметр	Обозначение	Размерность
C1	$\sigma_c$	Па
C2	$\delta_{max}$	м

Для задания свойств материала в зависимости от температуры, применяется команда ТВTEMP:

ТВ,CZM,1,2,,EXPO	Активация экспоненциальной модели материала
ТВTEMP,100.0	Задание первой температуры
ТВDATA,1,cmax, $\delta_n$ , $\delta_t$	Задание свойств материала при T=100.0
ТВTEMP,200.0	Задание второй температуры
ТВDATA,1,cmax, $\delta_n$ , $\delta_t$	Задание свойств материала при T=200.0

Визуализация результатов расчета на элементах INTER20х достигается просмотром нормальных напряжений в /POST1 или /POST26 SS,ХиSS,XY (SS,XZ) и нормальных перемещения в /POST1 или /POST26 SD,ХиSD,XY (SD, XZ). Для вывода изображения используются команды PLxSOL, PRxSOL или ESOL. На рис. 4.7 приведен пример распределения нормальных напряжений на элементах INTER20х, где разрушенные элементы - с нулевыми напряжениями.

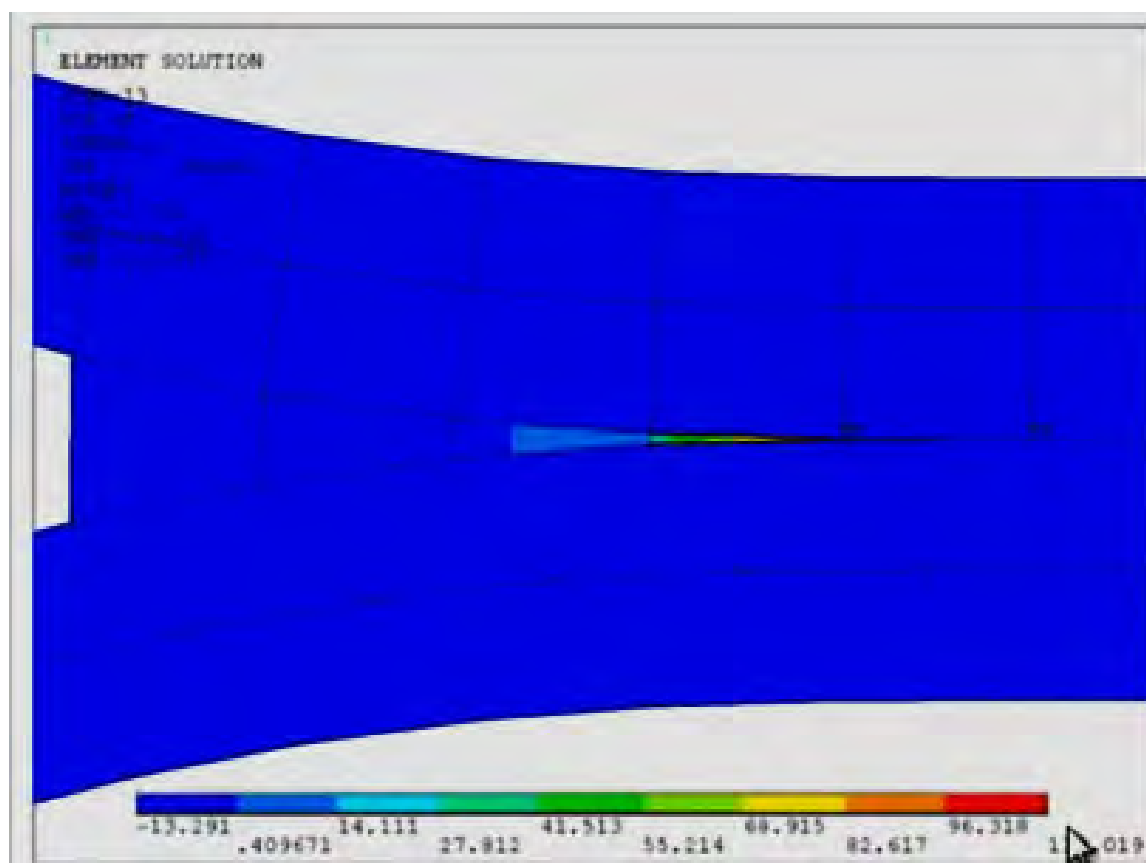


Рисунок 4.7. Распределение нормальных напряжений при моделировании расслоения в PostProcANSYS [34].

Из анализа возможностей конечных элементов серии INTER20x и CONTA17x при CZM моделировании следует:

- Для элементов INTER20x, работа по расслоению принимается одной и той же для режимов ModeI и ModeII.
- Для контактных элементов CONTA17x, значение работы, затраченной на расслоение, вычисляется отдельно.
- Элементы INTER20x не учитывают повреждаемость в случае циклических нагрузок.
- Экспоненциальный закон расслоения численно более устойчив и стабилен, чем билинейный закон.

## 4.2 Численное моделирование

В данной работе для решения задач численного моделирования и оценки критической трещиностойкости ККС и кинетики докритического роста трещины в них использован метод МКЭ/МКЗ, сочетающий конечно-элементную 3D модель расслоения заданной трещины по моде  $I$  в образце в виде твердотельной двухконсольной балки (ДКБ), представляющей собой подложки (субстраты) и жестко связывающего их тонкого когезионного слоя (КС), который в случае ККС логичнее называть интерфейсным, а при адгезионном разрушении ККС – адгезионным слоем (ИС или АС соответственно).

Конечно-элементная 3D твердотельная модель образца типа ДКБ, нагружаемого по моде  $I$ , разработана в пакете прикладных программ ANSYS® с использованием двух типов конечных элементов - Solid 185 и Inter 205 (рис. 4.8).

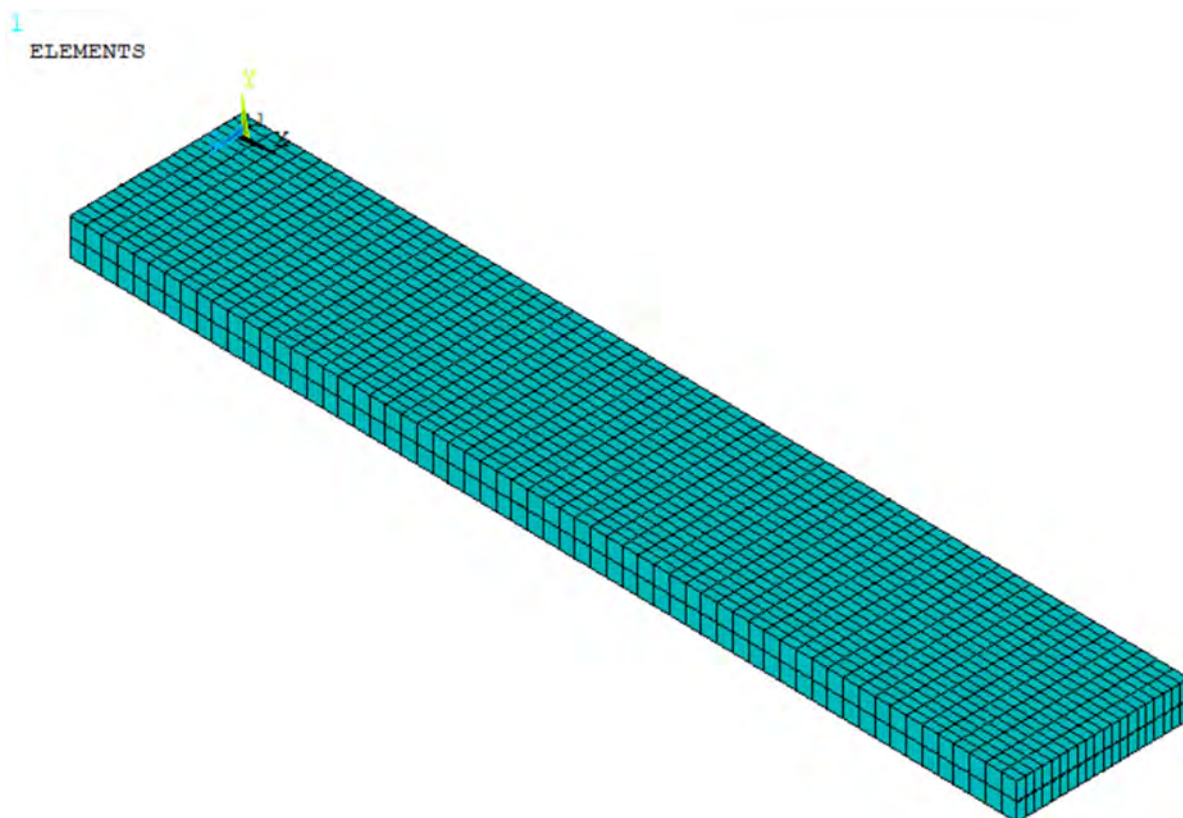
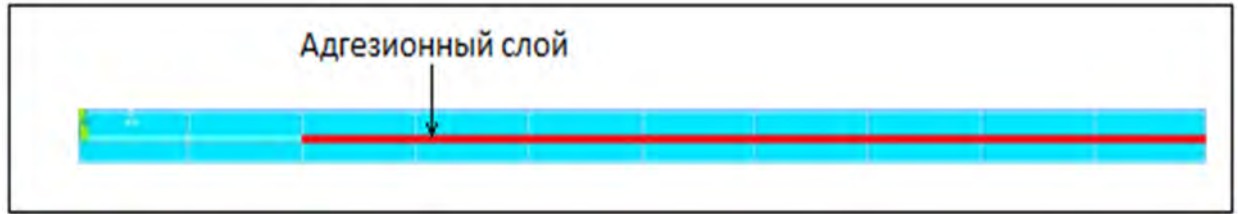
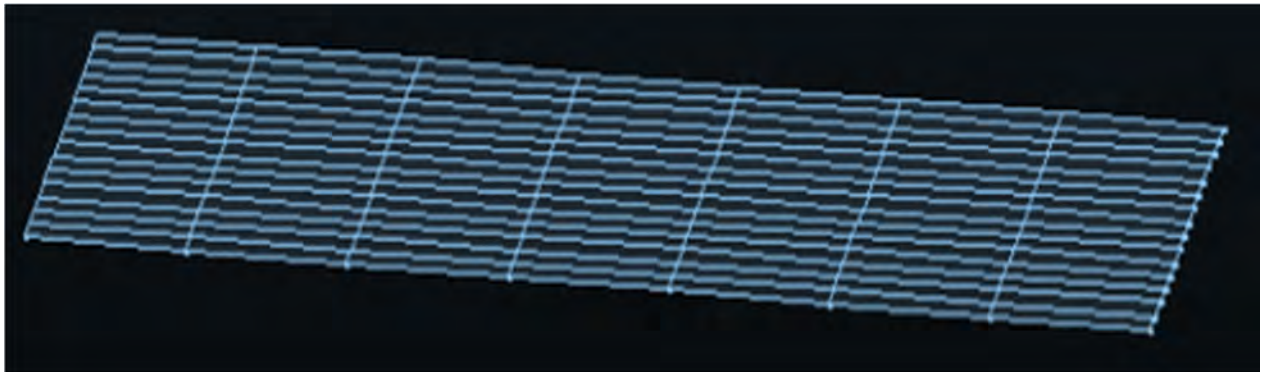


Рисунок 4.8 - Конечно-элементная 3D геометрическая твердотельная модель образца типа ДКБ до расслоения с нанесённой сеткой конечных элементов в пакете прикладных программ ANSYS®.

В данной модели ИС или АС встроен как тонкий напряжённый слой между пластинами субстрата впереди заданной трещины, разбитый на конечные интерфейсные элементы (ИЭ) (рис.4.9).



(a)



(б)

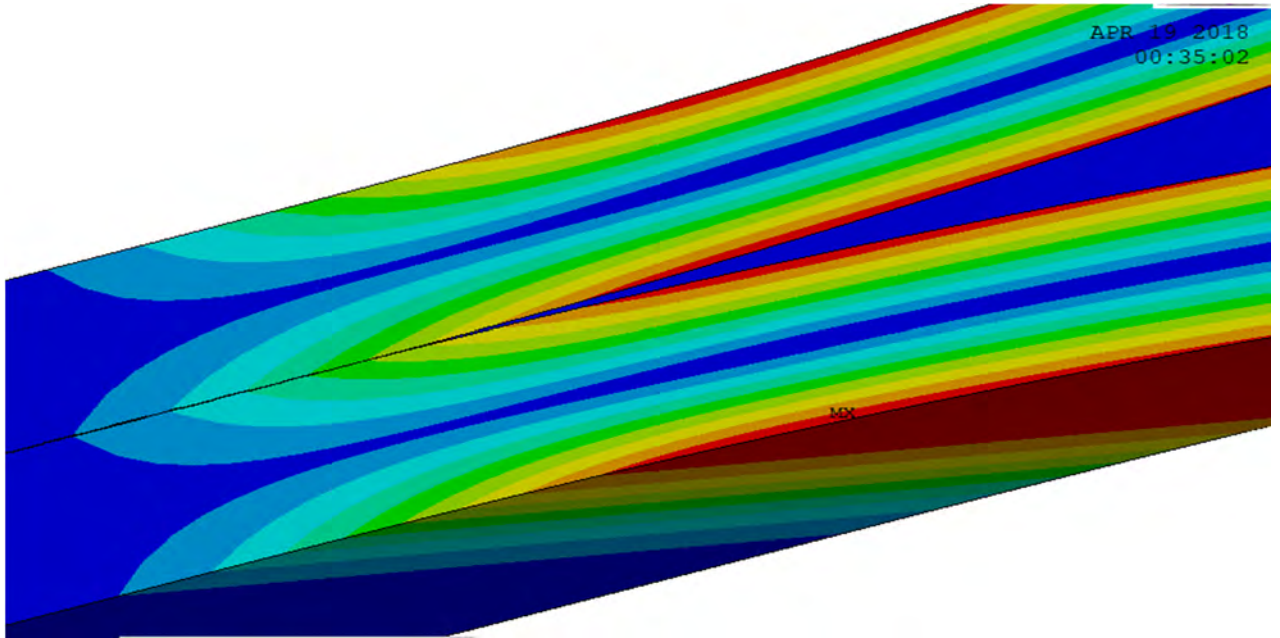
Рисунок 4.9 – ИС в общей геометрической модели ККС (а) и отдельный ИС, разделенный на конечные интерфейсные элементы (ИЭ) (б) в образце ККС типа ДКБ при моделировании методом МКЭ/МКЗ(МИС) в пакете прикладных программ ANSYS®.

На рис. 4.10 показано распределение напряжений в субстрате (а) и интерфейсном слое (б) конечно-элементной модели образца ККС типа ДКБ при расслоении по моде I.

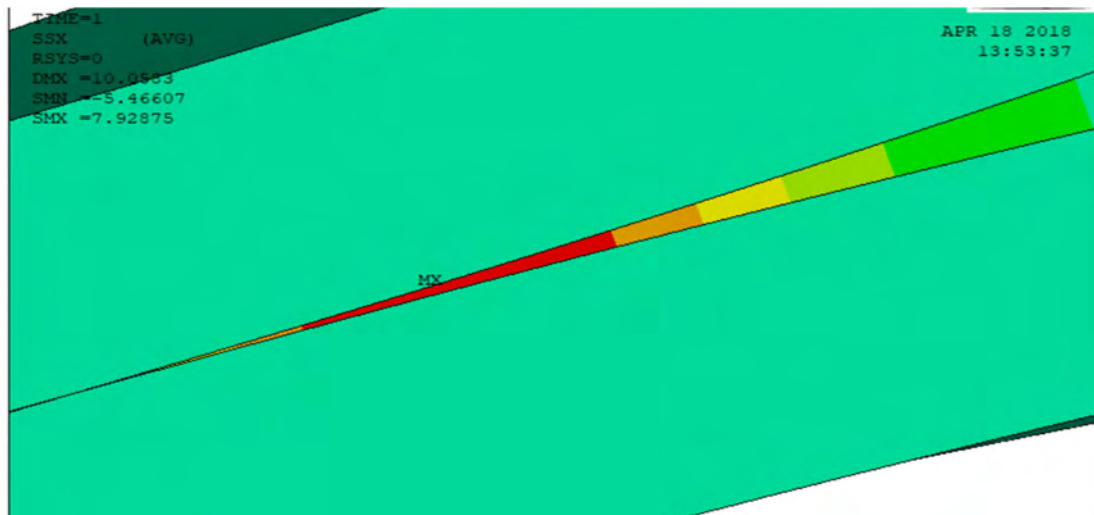
При действии на образец ДКБ нормальной нагрузки  $P$  с раскрытием заданной трещины  $\Delta$  впереди кончика трещины в ИС создается нелинейно деформированная зона, обычно называемая численной или конечно-элементной когезионной зоной (КЗ), которую в случае адгезионного разрушения ККС также



можно называть численной адгезионной зоной (АЗ), но далее будем придерживаться традиционной терминологии.



(a)



(б)

Рисунок 4.10 - Распределение напряжений в конечно-элементной модели расслоения образца ККС типа ДКБ: в субстрате (а) и в интерфейсном слое (б).

Поведение численной КЗ, также как и физической в экспериментах и аналитических микромеханических моделях, подчиняется заданному закону – закону когезионной зоны (ЗКЗ), связывающему локальное напряжение сцепления  $\sigma$  и смещение (раскрытие) КЗ  $\delta$  (рис. 4.11 - 4.12).

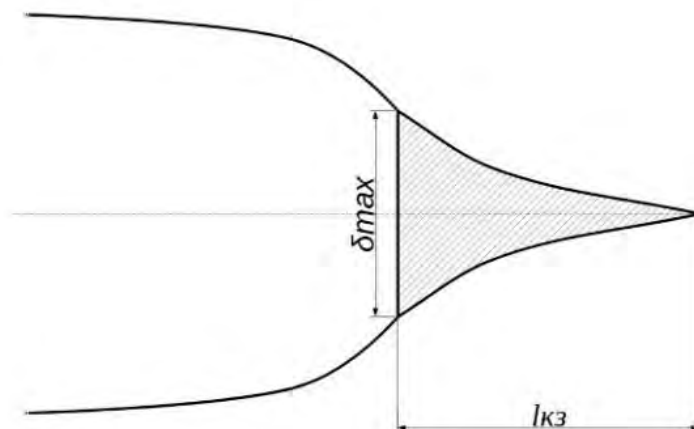


Рисунок 4.11 - Схема общего вида трещины, нагружаемой по моде  $I$ , с когезионной зоной (КЗ) длиной  $l_{кз}$  у ее кончика

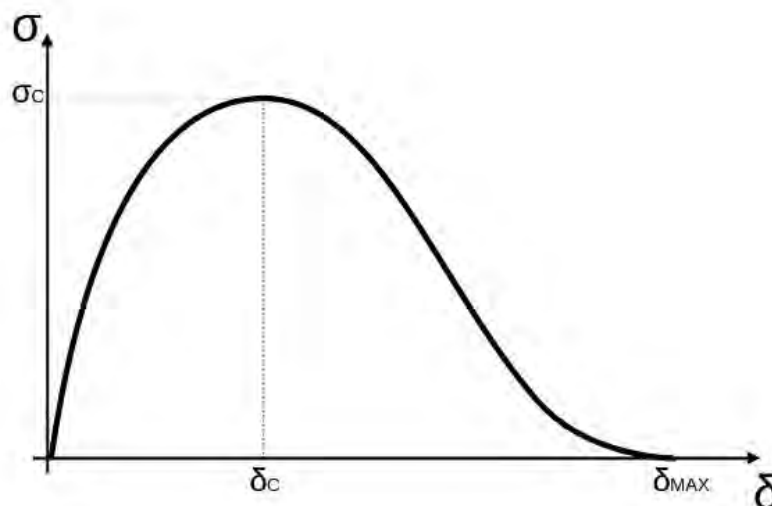


Рисунок 4.12 - Локальная диаграмма разрушения трещины, т.е. зависимость локального напряжения  $\sigma$  от деформации (раскрытия зоны)  $\delta$  как ее экспоненциальный закон (ЗКЗ).

Так как в ЛУМР интенсивность высвобождения упругой энергии ( $G_I$ ) вплоть до ее критического значения характеризует нагрузку на трещину, или трещиноподвижущую силу (ТДС), то из уравнения (1.9б) следует, что ЗКЗ является производной  $G_I$  по раскрытию КЗ дает:

$$\frac{dG_I}{d\delta} = \sigma(\delta) \quad (4.2a)$$

В случае экспоненциальной формы ЗКЗ эта производная равна [66-67]:

$$\sigma(\delta) = \sigma_C \frac{\delta}{\delta_{max}} e^{-\frac{\delta}{\delta_{max}}} \quad (4.2б)$$

где  $\delta$  – текущее раскрытие КЗ,  $\delta_{max}$  – ее предельное раскрытие,  $e$  – основание натурального логарифма, равное 2,71.

При этом критические параметры экспоненциального ЗКЗ ( $\sigma_C$ ,  $\delta_C$ ,  $\delta_{max}$  и  $G_{IC}$ ) связаны между собой соотношениями:

$$\delta_C = \delta_{max}/e \quad (4.3 а)$$

$$G_{IC} = 2\gamma_F = \sigma_C \cdot \delta_{max} \quad (4.4 б)$$

Наклон начального линейного участка ЗКЗ при  $\delta < \delta_C$ , т.е. коэффициент упругости КЗ, равен:  $K = \sigma_C / \delta_C$ .

Важный критический параметр КЗ – ее длина ( $l_{КЗ}$ ), являющаяся материальной константой, определяется следующим соотношением:

$$l_{КЗ} = \frac{\pi k E G_{IC}}{8 \sigma_C^2} \quad (4.5),$$

где  $E$  – модуль Юнга в направлении действия нагрузки на трещину,  $k$  – константа, зависящая от типа напряженно-деформированного состояния трещины: для плоско-напряженного состояния  $k=1$ , для плоско-деформированного состояния  $k=(1-\nu^2)$ , где  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

На рис. 4.13 приведен общий вид твердотельной модели образца ККС типа ДКБ в пакете прикладных программ ANSYS® до начала и после формирования численной КЗ.

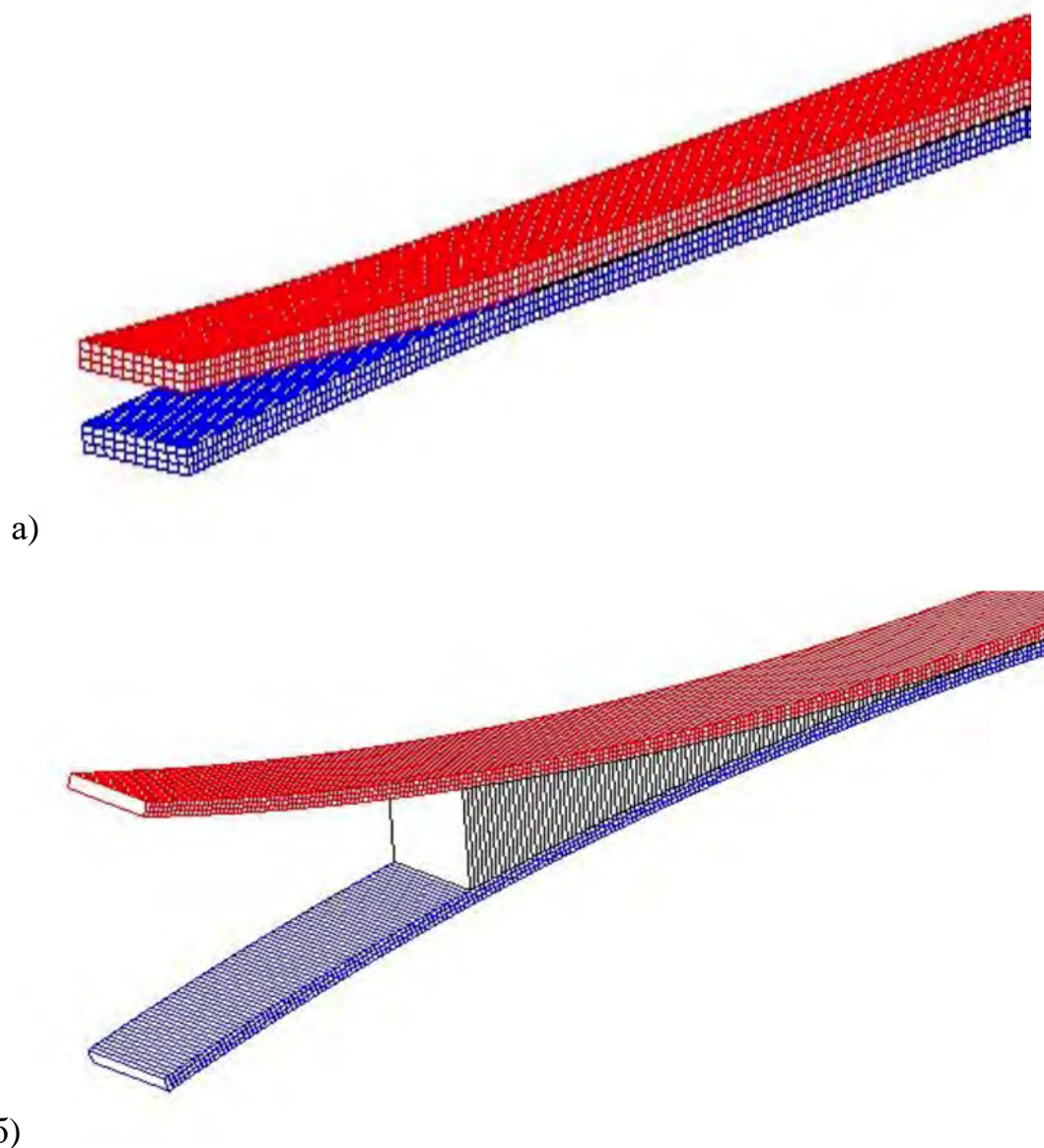


Рисунок 4.13 - Общий вид твердотельной модели образца ККС типа ДКБ в пакете прикладных программ ANSYS® в начальном состоянии (а) и после формирования численной КЗ с предразрушенными при ее развитии ИЭ (б).

Для соответствия численного моделирования и поведения физической КЗ форма ЗКЗ, т.е. кривая  $\sigma(\delta)$ , в численной модели должна соответствовать распределению напряжений, обусловленному механизмом предразрушения

впереди кончика физической трещины, что очень трудно определять экспериментально и, следовательно, задавать конкретный ЗКЗ в заданном образце. Однако было установлено, что при моделировании глобального поведения образца с трещиной и построения глобальной диаграммы разрушения усилие-раскрытие трещины (кривой  $P-\Delta$ ) получаемые диаграммы мало зависят от точной формы ЗКЗ, если есть достаточно точные данные о локальной прочности КЗ  $\sigma_C$  и удельной работы ее разрушения  $\gamma_F$ , равной площади под кривой или, в терминах ЛУМР, половине критической интенсивности высвобождения упругой энергии  $G_{IC}$ . Поэтому, как уже указывалось в главе I, для численного моделирования методом МКЭ/МКЗ чаще всего используется простейшая билинейная или экспоненциальная формы ЗКЗ. Нами использовалась экспоненциальная формы ЗКЗ, так как она более точно соответствует физической модели.

При этом необходимо четко понимать различия в понимании и определении длины физической и численной КЗ. Длина физической КЗ соответствует расстоянию впереди кончика трещины, на котором произошло необратимое предразрушение с сохранением сдерживающих сил сцепления, является материальной константой, не зависящей от условий нагружения и размеров трещины, и рассчитывается по уравнению 4.5.

На рис. 4.14 схематически подробно показано развитие численной КЗ на примере твердотельной модели образца ККС типа ДКБ в пакете прикладных программ ANSYS® при возрастании раскрытия трещины  $\Delta$  с упрощенным билинейным ЗКЗ и пятью конечными интерфейсными элементами (ИЭ). При начальном возрастании раскрытия трещины (верхняя часть рис. 4.14) напряжение в 1-м ИЭ, прилегающем к кончику трещины, быстро достигает максимального значения, соответствующего его прочности, и снижается в области предразрушения, в которой еще сохраняются сдерживающие силы. При дальнейшем нарастании раскрытия трещины напряжение во 2-м ИЭ также достигает максимального значения и начинает претерпевать необратимое

предразрушение, обуславливая начало формирования КЗ. Далее напряжения в следующих ИЭ (3-м и 4-м) превышают максимально допустимое, КЗ полностью формируется, и трещина начинает распространяться.

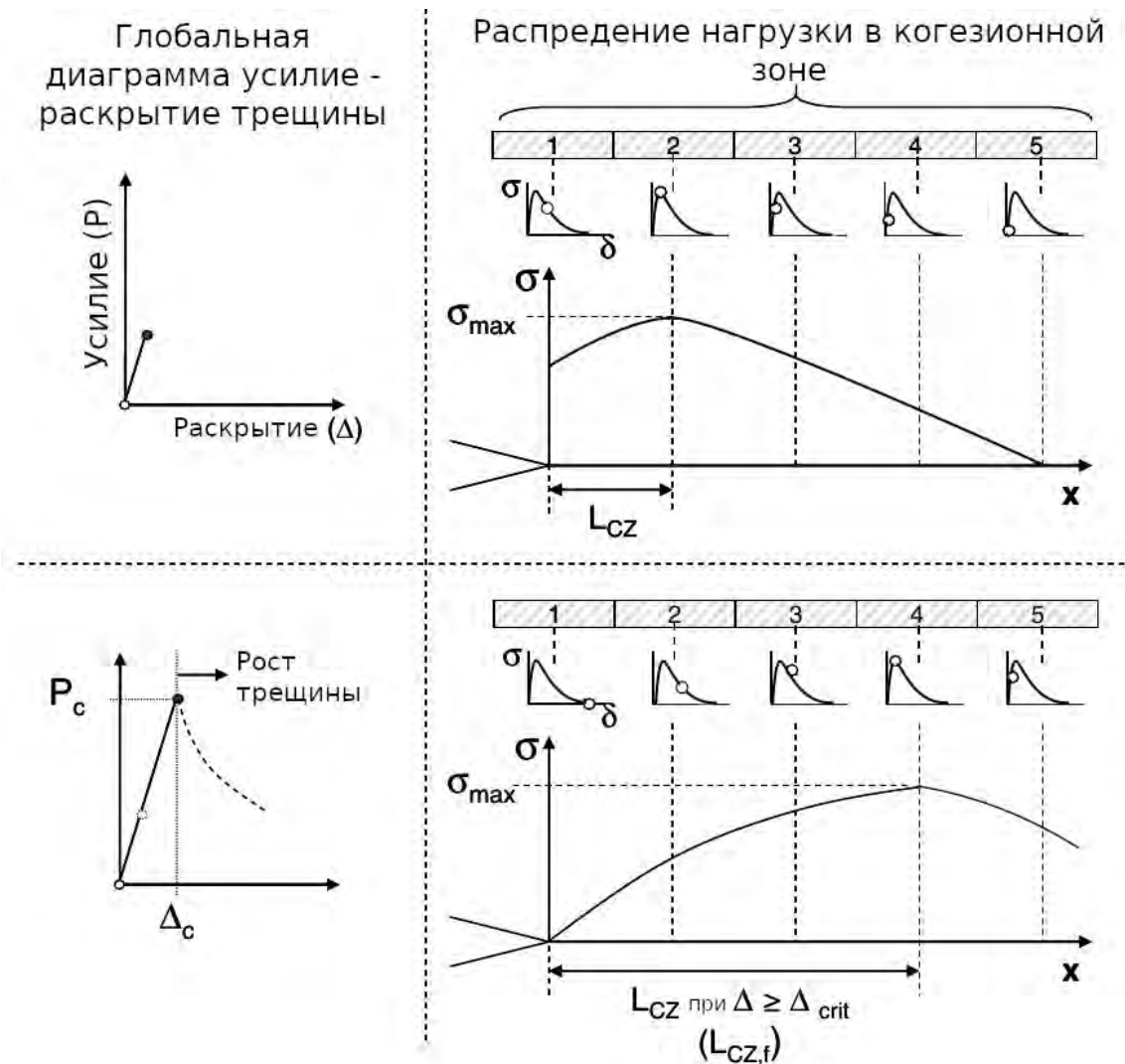


Рисунок 4.14 – Развитие численной КЗ в твердотельной модели МКЭ/МКЗ образца ККС типа ДКБ в пакете прикладных программ ANSYS®

Таким образом, длина полностью сформированной численной КЗ ( $L_{CZ,f}$  в нижней части рис.4.14) определяется расстоянием, на котором состояние интерфейсных элементов (ИЭ) соответствует ниспадающей области ЗКЗ, т.е. области уменьшения сил сцепления с увеличением деформирования (раскрытия) КЗ - области между  $\delta_c$  и  $\delta_{max}$  на кривой ЗКЗ (см. рис. 4.11 и 4.12).

Для определения максимального значения длины численной КЗ строится зависимость напряжения сцепления (traction)  $\sigma_i$ , сохранившегося после

нелинейного предразрушения ИЭ заданной длины, т.е. остаточной прочности каждого ИЭ после достижения предельного напряжения ( $\sigma_C$ ), т.е. полного разрушения и нулевой  $\sigma_t$  1-го элемента, непосредственно примыкающего к кончику трещины, от суммарной длины ИЭ. Точка пересечения этой кривой с линией  $\sigma_C$  соответствует  $L_{CZ,f}$ .

Из анализа развития численной КЗ следует, что для получения достоверных численных результатов с использованием модели когезионной зоны (МКЗ), имплантированной в МКЭ, число ИЭ, образующих КЗ, должно быть достаточно большим, а их размер, соответственно, достаточно малым, что сопровождается увеличением дискретизации сетки конечных интерфейсных элементов и расчетных ресурсов. Для оптимизации конечно-элементной пространственной дискретизации сетки конечных интерфейсных элементов в КЗ необходимо, чтобы по ее длине располагалось оптимальное число ИЭ (при их оптимальной длине), обеспечивая при заданной точности вычислений их допустимый объем. Следовательно, для точного анализа сетка должна быть достаточно мелкой, чтобы количество ИЭ по длине ИС обеспечивало хорошую точность вычислений, но при слишком мелкой сетке, особенно в случае сложных структур, резко возрастает требуемая вычислительная мощность.

Оптимизация сетки конечных ИЭ нами основана на использовании реальной длины физической КЗ ( $l_{кз}$ ), которая определяется по классической формуле Баренблатта (4.5). По формуле:  $N_e = l_{кз} / l_e$  рассчитывается количество ИЭ выбранной длины ( $l_e$ ), уместяющихся по длине реальной КЗ  $l_{кз}$ . Ориентируясь на величину  $N_e$  определяли оптимальное количество конечных ИЭ, обеспечивающее достаточную точность оценки условий зарождения и развития межслоевой трещины при допустимом объёме вычислений.

Численное моделирование проводили в следующей последовательности:

- Командой APDL задавали экспоненциальный ЗКЗ и вводили необходимые его параметры (определённое экспериментально значение  $\sigma_C$  и рассчитанное

по нему  $\delta_C$ ) для каждого типа ККС, а также значения модуля упругости Юнга, модуля сдвига и коэффициента Пуассона для подложки - алюминиевого сплава Д-16.

- Программными средствами задавали граничные условия для интерфейсного слоя - тонкого напряжённого слоя между пластинами субстрата впереди кончика трещины и формировали сетку разбиением этого слоя на конечные интерфейсные элементы по длине КЗ для каждого ККС. В рамках данной работы использовали конечные ИЭ такой длины, чтобы  $N$  было равно 4, 2, 1 и 0,5 шт (см. рис. 4.9 б)
- Задавали нагрузку и направление движения элементов ККС, вводили параметры расчёта.

После запуска программы виртуальный образец расслаивается под действием задаваемой нагрузки.

Данный метод численного моделирования расслоения по моде I образца ККС типа ДКБ в пакете прикладных программ ANSYS позволяет получать с использованием известных из экспериментов или рассчитанных по теории Баренблатта данных ( $G_{IC}$ ,  $\sigma_C$ ,  $\delta_C$  и  $\delta_{max}$ ) при заданной длине интерфейсного элемента  $l_e$  и, соответственно, при различном их количестве, укладываемых на длине физической КЗ, глобальную диаграмму расслоения – зависимость усилие-раскрытие трещины ( $P-\Delta$ ).

### 4.3 Сравнение экспериментальных и расчётных результатов

На рис. 4.15 - 4.17 представлены экспериментально полученные и рассчитанные по 3D модели МКЭ/МКЗ с использованием различных размеров конечных ИЭ ( $l_e$ ) кривые усилие-раскрытие краев трещины ( $P-\Delta$ ) при ее раскрытии по моде I для образцов в виде ДКБ ККС алюминиевого сплава и трёх типов клеев. Количество ИЭ ( $N_e$ ), располагаемых по длине когезионной зоны,



рассчитывали для каждого типа ККС по формуле  $N=l_{кз}/l_e$  и значениям  $l_{кз}$ , приведенным в таблице 3.10.

Анализ приведенных данных показывает явную тенденцию приближения расчётных кривых  $P-\Delta$  к экспериментально полученным при использовании большего числа и, соответственно, меньшей длины ИЭ, расположенных по длине КЗ. Наиболее близко расчётные кривые лежат к экспериментально полученным для ККС на основе клея ВК-9 при  $N_e=4$ , а для ККС на основе клеёв К300 и ЭПК-1 - при  $N_e=2$ . Дальнейшее увеличение числа элементов не даёт существенного приближения расчётных кривых  $P-\Delta$  к экспериментально полученным, но требует более мощных вычислительных ресурсов и значительно увеличивает объём и время необходимых вычислений. Обращает внимание то, что экспериментальная кривая для ККС на основе клея К-300 лежит ниже расчётных, в отличие от ККС на основе клеёв ВК-9 и ЭПК-1, у которых экспериментальные кривые расположены выше расчётных.

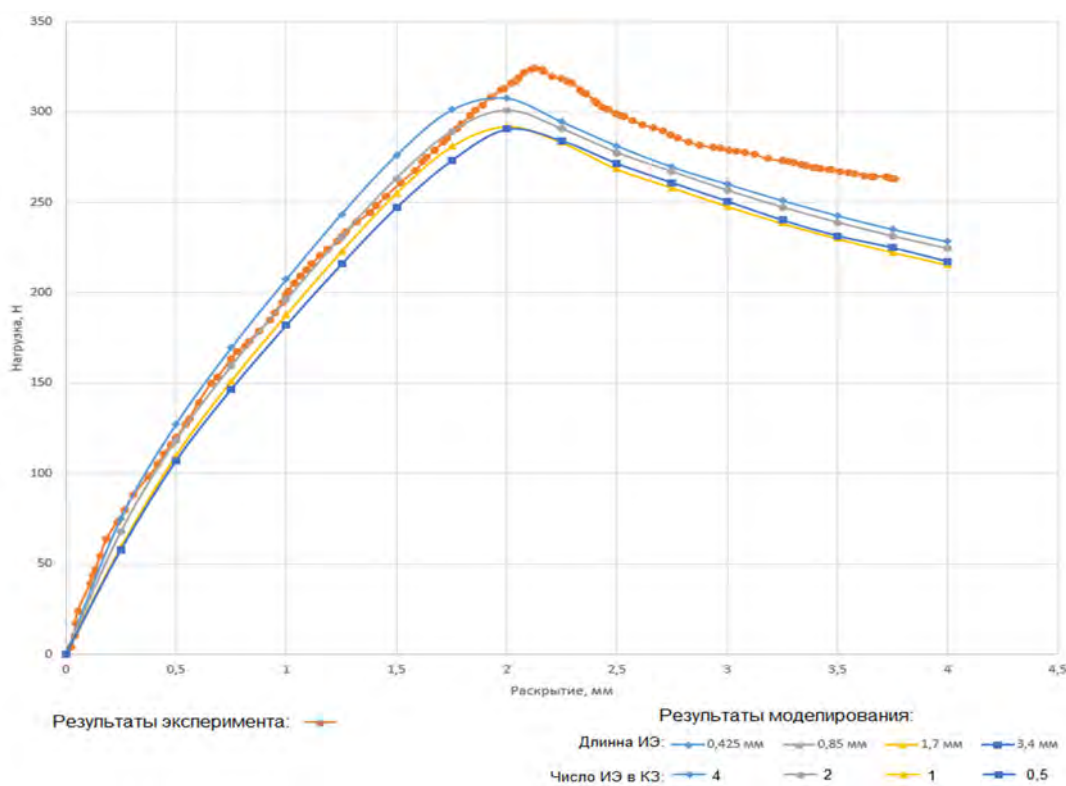


Рисунок 4.15. Диаграммы разрушения  $P-\Delta$  для ККС на основе клея ВК-9, полученные экспериментально и численным моделированием при различной длине ИЭ и, соответственно, их количестве, укладываемых по длине физической КЗ.

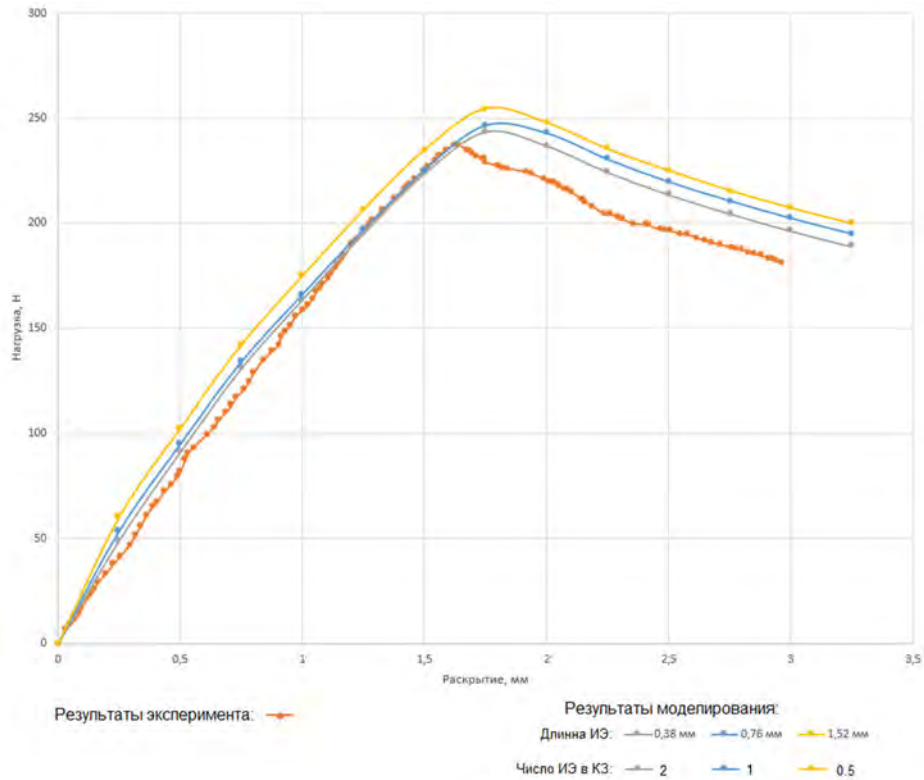


Рисунок 4.16. Диаграммы разрушения  $P-d$  для ККС на основе клея К-300-61, полученные экспериментально и численным моделированием при различной длине ИЭ и, соответственно, их количестве, укладываемых по длине физической КЗ.

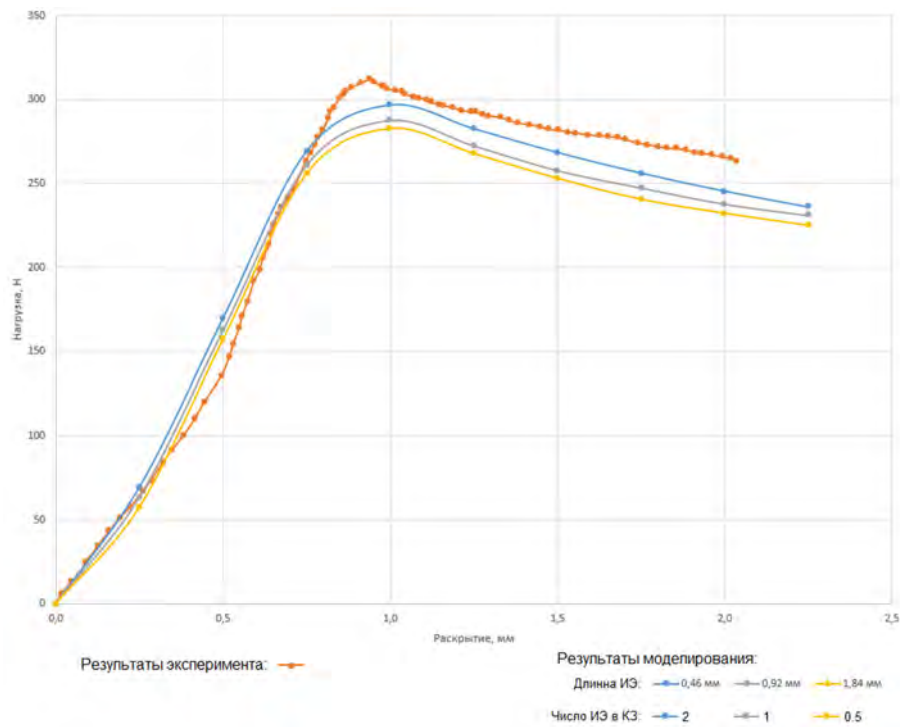


Рисунок 4.17. Диаграммы разрушения  $P-d$  для ККС на основе клея ЭПК-1, полученные экспериментально и численным моделированием при различной длине ИЭ и, соответственно, их количестве, укладываемых по длине физической КЗ.

Приведенные на рис. 4.18 – 4.20 для трех типов ККС расчетные зависимости напряжения сцепления или остаточной прочности  $\sigma_t$ , каждого ИЭ заданной длины, образующих КЗ, после разрушения первого, непосредственно примыкающего к кончику трещины, от суммарной их длины подтверждают эти заключения. Определенные по пересечению этих кривых с линиями  $\sigma_{IC}$  максимальные значения длины числовой КЗ ( $L_{CZ,f}$  на рис.4.14) ближе всего к значениям длины физической КЗ ( $l_{K3}$ ), рассчитанной по модели Баренблатта и экспериментально определенным параметрам трещиностойкости ККС, при использовании ИЭ наименьшей длины.

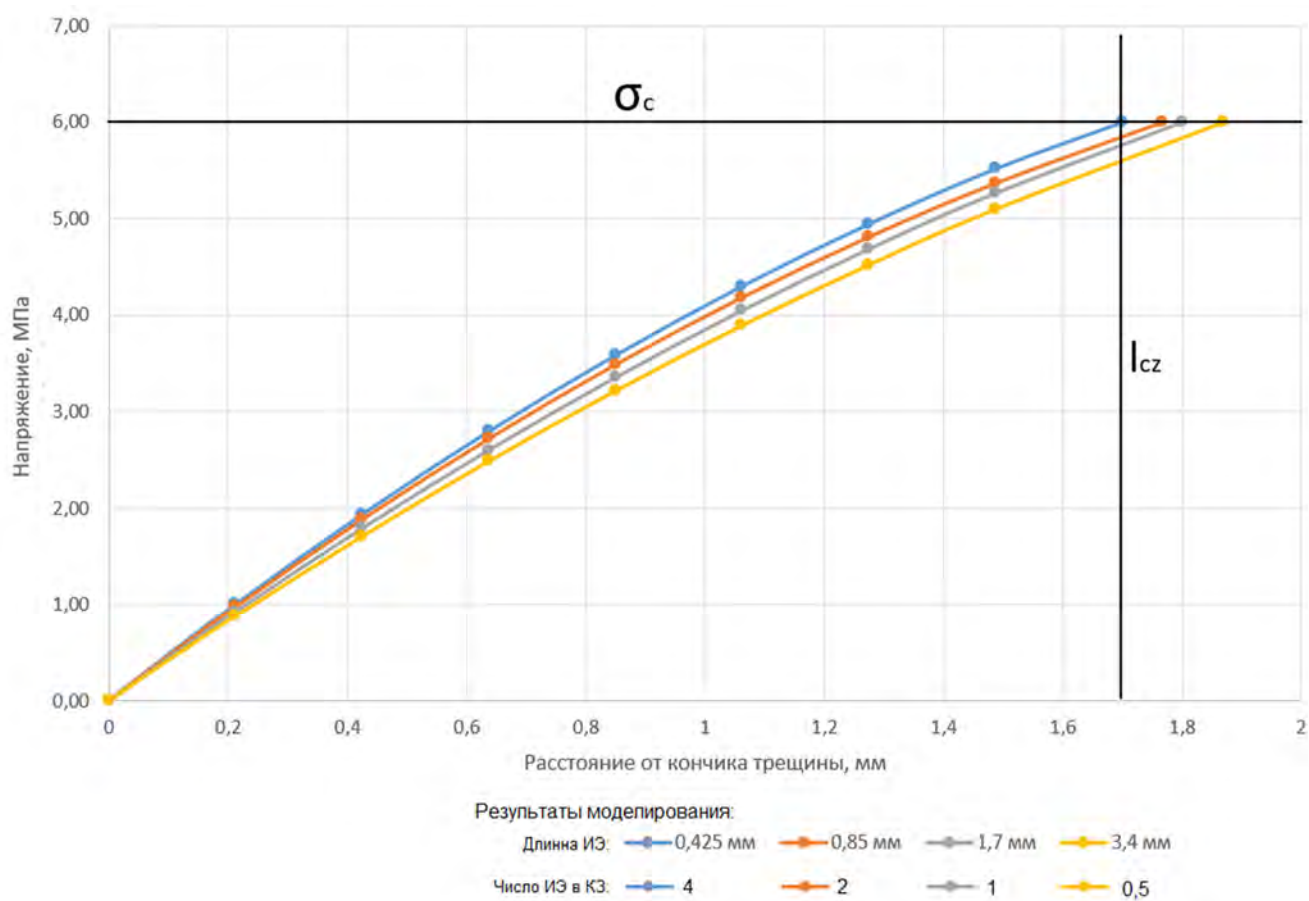


Рис. 4.18. Распределение напряжений по длине числовой КЗ при различной длине ИЭ для моделей ККС на основе клея ВК-9 и экспериментально полученные значениями  $\sigma_{IC}$  и  $l_{K3}$ .

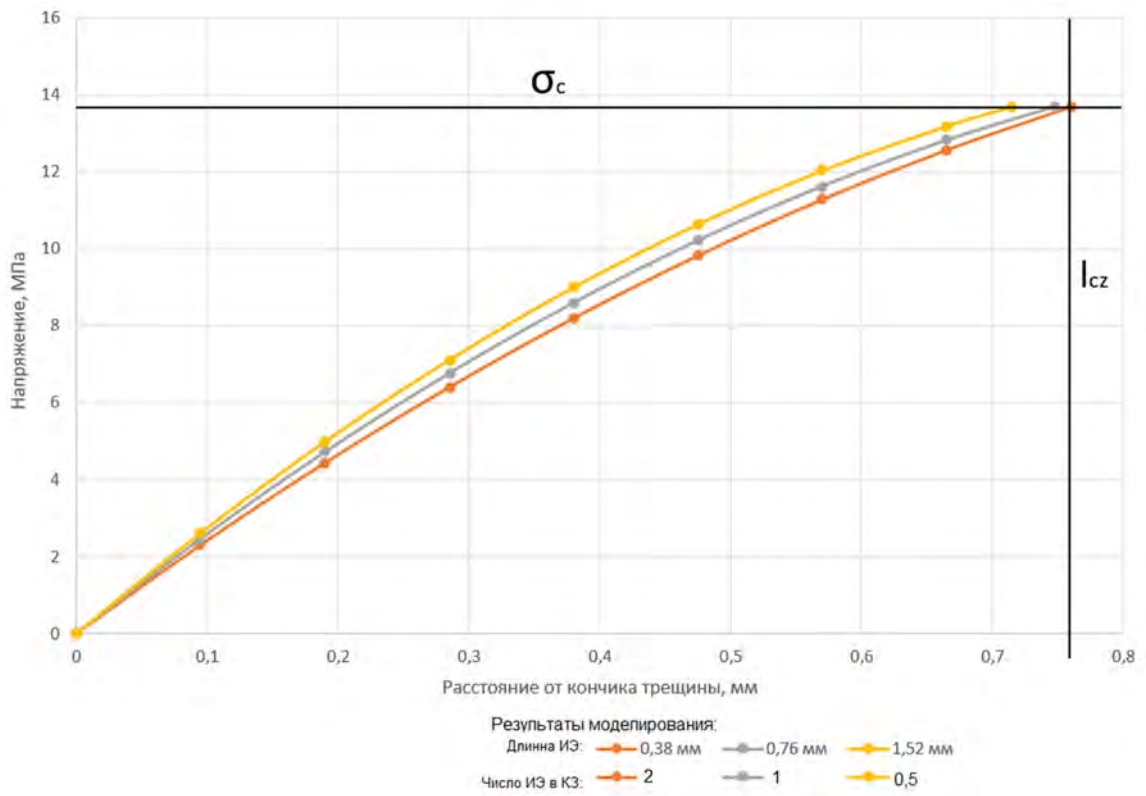


Рис. 4.19. Распределение напряжений по длине числовой КЗ при различной длине ИЭ для моделей ККС на основе клея К-300-61 и экспериментально полученные значения  $\sigma_c$  и  $l_{cz}$ .

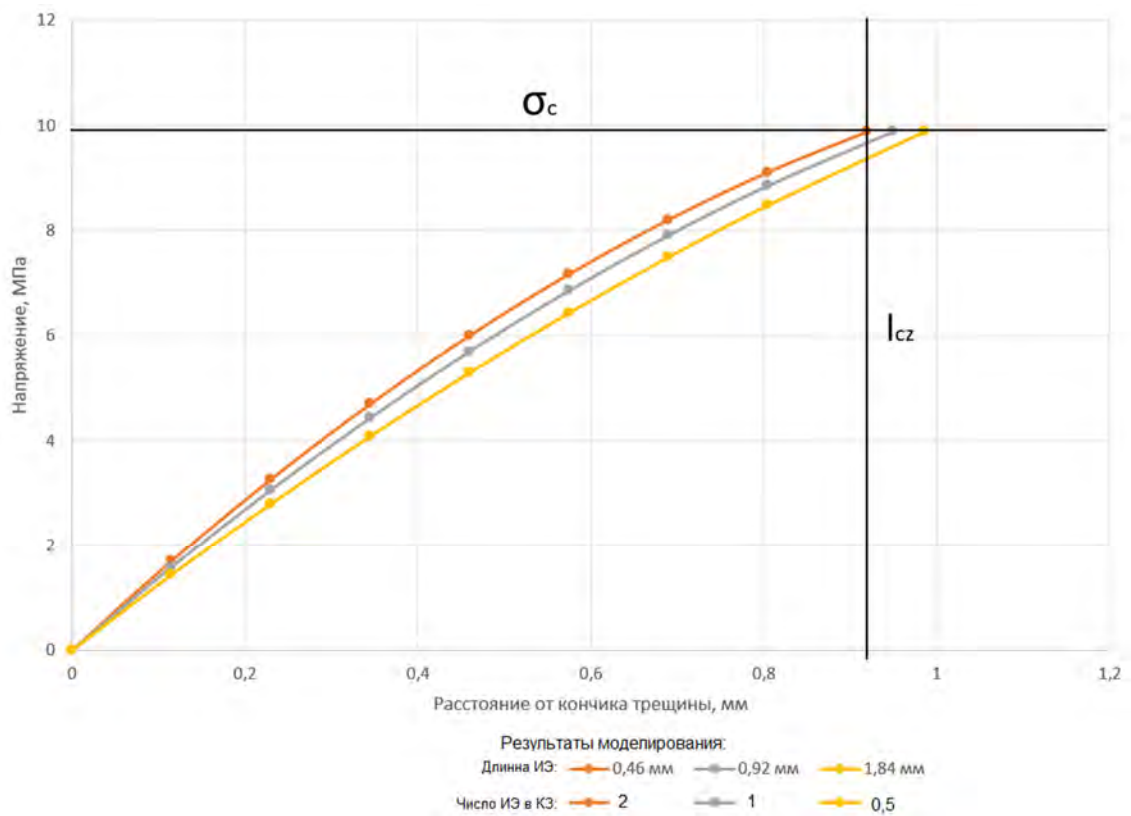


Рис. 4.20. Распределение напряжений по длине числовой КЗ при различной длине ИЭ для моделей ККС на основе клеев ЭПК-1 и экспериментально полученные значения  $\sigma_c$  и  $l_{cz}$ .

## 5. Численное моделирование докритического роста трещины в образцах ККС типа ДКБ и построение G-V диаграммы

### 5.1 Разработка методики моделирования докритического роста

В рамках данной работы впервые предлагается и реализуется методика МКЭ/МКЗ для численного моделирования и расчета кинетики докритического подрастания трещины в ККС при длительном квазистатическом нагружении постоянным раскрытием трещины. *Алгоритм предлагаемой методики* базируется на суммировании микроступенчатых подрастаний трещины на длину КЗ вследствие потери ее несущей способности при длительном воздействии факторов окружающей среды. Такой механизм физически обосновывается:

- моделью Баренблатта, в соответствие с которой в равновесно открывающейся трещине при заданных условиях длина физической когезионной зоны  $l_{кз}$  является материальной константой, т.е. определяется локальными свойствами материала (параметрами ЗКЗ) и не зависит от величины нагрузки на трещину;

- термофлуктуационной теорией статической долговечности, в соответствие с которым при нагрузках, меньших критических, разрушение полимеров и их адгезионных соединений определяется накоплением разрывов связей вследствие тепловых флуктуаций.

При заданном докритическом раскрытии трещины по моде I от начального надреза глобальная нагрузка на нее ( $G_I$ ), определяемая для образцов ККС типа ДКБ с краевой трещиной по формуле (1.6б), вызывает возникновение равновесной стабильной КЗ, длина ( $l_{кз}$ ) которой определяется соотношением (4.5).

Локальные напряжения  $\sigma$  в КЗ как фиктивной трещине возрастают по ее длине, достигая максимума у самого ее края, а затем спадают до 0 при удалении от него (рис. 5.1).

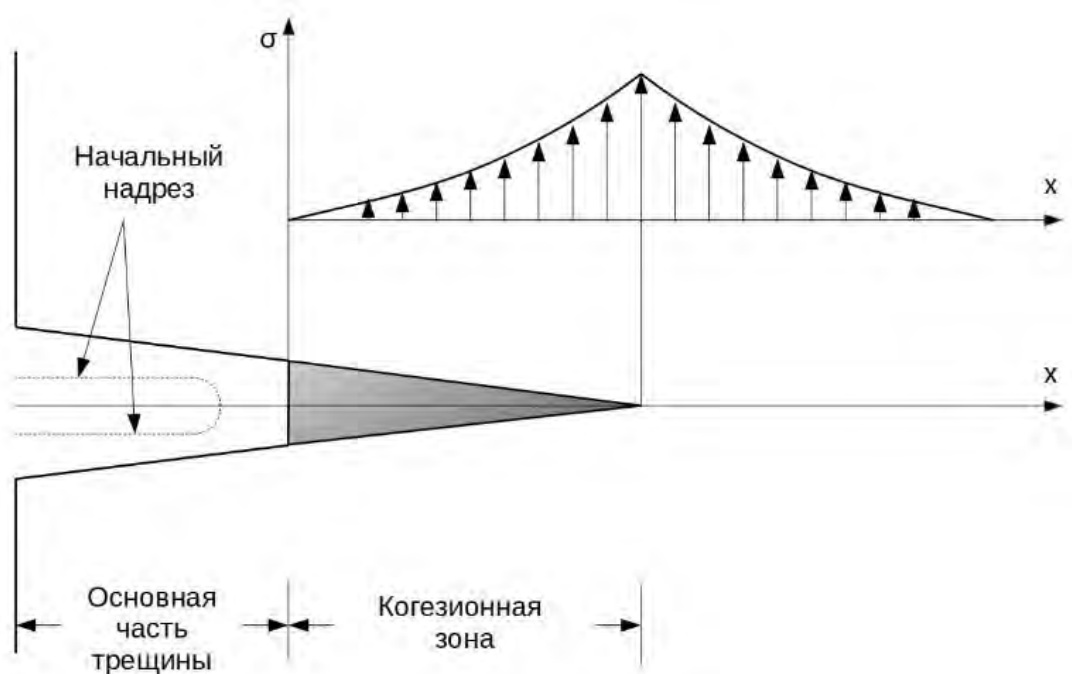


Рисунок 5.1 - Схема КЗ трещины при заданном ее раскрытии по моде I, распределение локальных напряжений по длине КЗ и при удалении от нее (а).

При этом уравнивающее их сопротивление росту КЗ, показанное на рис. 5.2 в форме экспоненциального ЗКЗ, распределяется по ее раскрытию с максимумом, характеризующим предел упругости сопротивления, и последующим его ослаблением аналогично прохождению через максимум сил адгезионных связей как производной по расстоянию потенциала взаимодействия Леннарда-Джонса (рис. 5.3).

Очевидно, что при заданной докритической нагрузке равновесная трещина может потерять равновесие и подрасти только при уменьшении критических параметров ЗКЗ как материальных характеристик до значений, соответствующих действующей нагрузке. Вероятнее всего это может происходить вследствие накопления в КЗ с течением времени под действием механической нагрузки и факторов окружающей среды разрывов сдерживающих связей по термофлуктуационному механизму [29 - 30, 69 - 71]. Это приводит к уменьшению

локальной прочности сцепления  $\sigma_c$ , критического  $\delta_c$  и предельного раскрытия  $\delta_{max}$  КЗ и, соответственно, удельной работы разрушения  $\mathcal{U}_F$ , удвоенная величина которой определяет, в терминах ЛУМР,  $G_{IC}$ . Когда глобальное сопротивление росту трещины станет равным или меньшим, чем исходная докритическая ТДС, т.е.  $G_{IC} \leq G_I$ , трещина прорастает на длину КЗ аналогично раскрытию застёжки «молния» [72]. При этом возникает новая стабильная КЗ, соответствующая нагрузке на трещину с подресшей длиной.

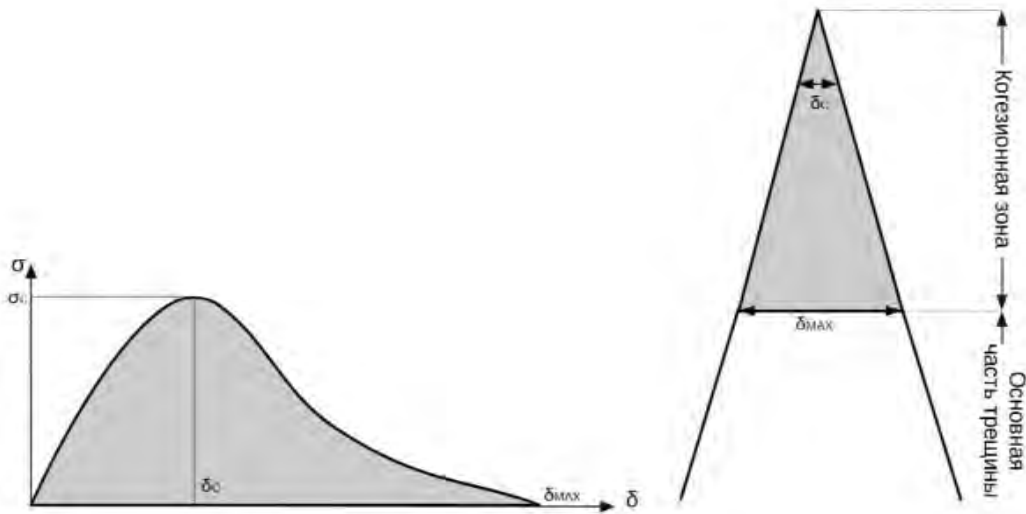


Рисунок 5.2 – Экспоненциальная форма распределения локальных напряжений по ширине (раскрытию) КЗ.

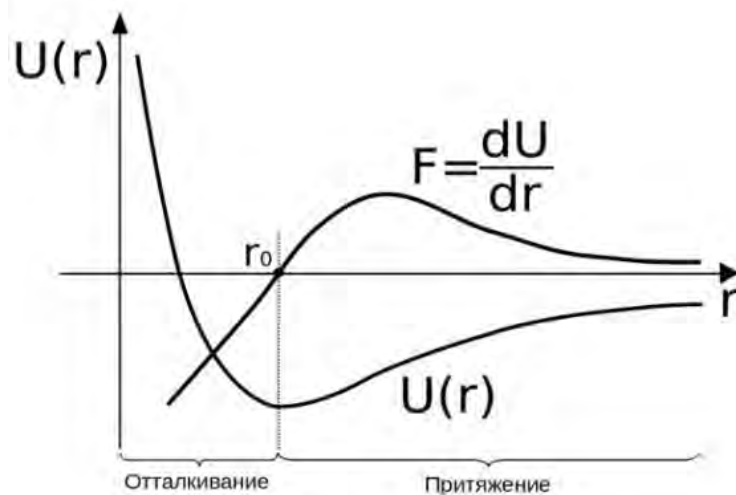


Рисунок 5.3 – Энергии и силы межатомного или межмолекулярного взаимодействия от расстояния (потенциала взаимодействия Леннарда-Джонса и его производной по расстоянию).

Таким образом, если в начальный момент времени  $t_0=0$  на исходную трещину длиной  $a(0)$  действует ТДС  $G_I(0)$ , то она вызывает развитие КЗ длиной  $l_{КЗ}(0)$ . При этом величина  $G_I(0)$  меньше, чем исходное сопротивление росту трещины  $G_{IC}(0)$ , равное удвоенной площади под кривой ЗКЗ. При выдержке под нагрузкой начальные параметры ЗКЗ -  $\sigma_c(0)$  и  $\delta_{max}(0)$  уменьшаются вследствие накопления термофлуктуационных разрывов связей, вызывая соответствующее уменьшение площади под кривой ЗКЗ -  $G_{IC}(0)$ . Когда за определенный период времени  $t_1$  сопротивление росту трещины  $G_{IC}(0)$  уменьшится до  $G_{IC}(t_1)$  и сравняется с начальной нагрузкой на нее  $G_I(0)$ , т.е. когда  $G_{IC}(t_1)=G_I(0)$ , трещина подрастет на начальную длину КЗ  $l_{КЗ}(0)$  (рис. 5.4).

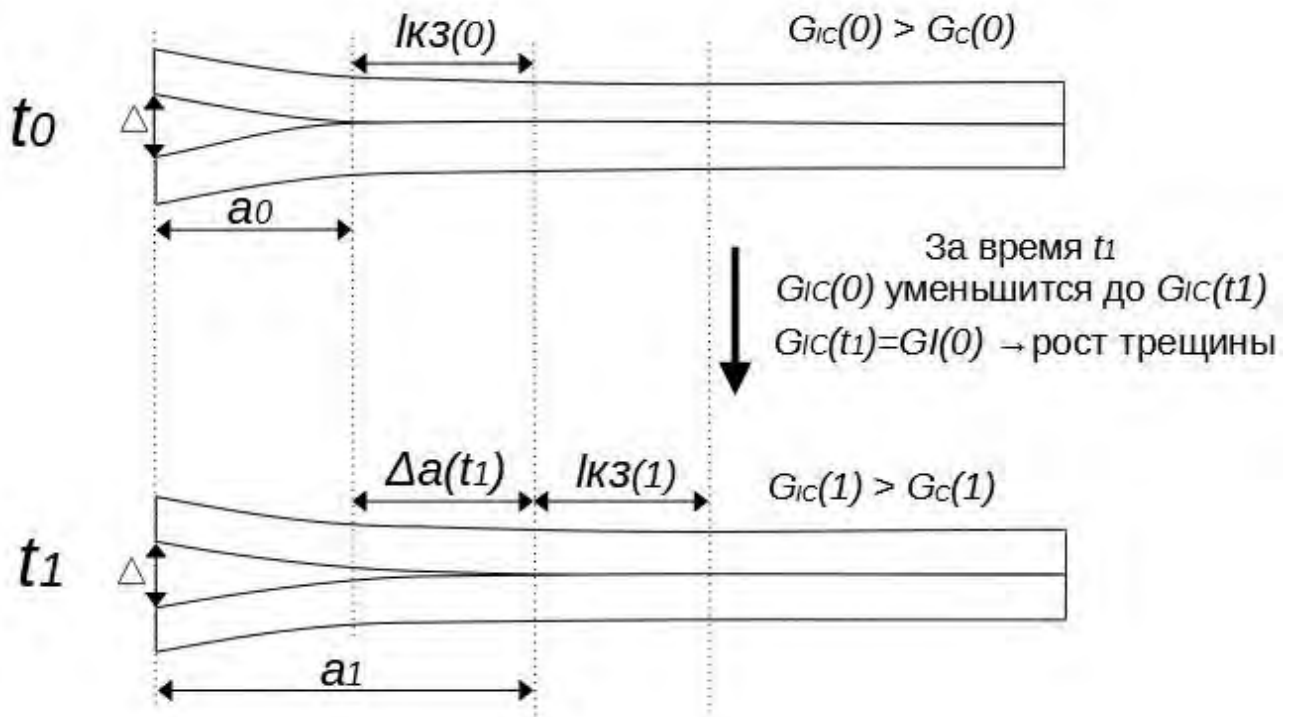


Рисунок 5.4 – Схематическое изображение докритического подрастания трещины.

Новые нагрузка на трещину  $G_I(t_1)$  и длина когезионной зоны  $l_{КЗ}(t_1)$  соответствуют новой длине трещины при том же ее раскрытии и новым параметрам ЗКЗ -  $\sigma_{IC}(t_1)$  и  $\delta_{max}(t_1)$ . При этом нагрузка на трещину снова



докритическая, т.е.  $G_I(t_1) < G_{IC}(t_1)$  (рис. 5.4). Период времени  $t_1$ , за который  $G_{IC}(0)$  уменьшится до величины  $G_I(0) = G_{IC}(t_1)$ , и трещина подрастет на длину  $\Delta a(t_1) = l_{K3}(0)$ , соответствует первому временному интервалу микроступенчатого подрастания трещины. При дальнейшей выдержке второй период времени  $t_2$ , за который  $G_{IC}(t_1)$  уменьшится до  $G_{IC}(t_2)$ , сравнившись с нагрузкой на подросшую в первый период трещину  $G_I(t_1)$ , а трещина подрастет на длину  $\Delta a(t_2) = l_{K3}(t_1)$ , соответствует второму временному интервалу микроступенчатого подрастания трещины. Так повторяется  $n$  число раз, пока подрастание трещины не достигнет некоторого предела для заданного глобального раскрытия трещины  $\Delta = const$ , когда длительность периода микроступенчатого подрастания трещины станет очень большой. Общая длина подрастающей трещины за  $n$  периодов времени (5.1а) определяется суммой (5.1б):

$$t_n = \sum_{i=1}^n t_i \quad (5.1a)$$

$$a(t_n) = a(0) + \sum_{i=1}^n \Delta a(t_i) \quad (5.1б)$$

где  $a(0)$  - начальная длина трещины,  $i$  - номер временного интервала,  $\Delta a(t_i)$  - приращение длины трещины в соответствующем временном интервале.

По полученным значениям приращения длины трещины  $\Delta a(t_i)$  в каждый временной интервал определяется средняя скорость докритического подрастания трещины как отношение:

$$V(t_i) = \Delta a(t_i) / t_i \quad (5.1в)$$

А по длине трещины в этом интервале и формуле (2.1б) - нагрузка на трещину  $G_I(t_i)$ . Комбинация полученных данных  $V(t_i)$  и  $G_I(t_i)$  позволяет строить искомую кинетическую  $G$ - $V$  диаграмму в двойных логарифмических координатах.

## 5.2 Проведение расчётов и сравнение с экспериментальными данными

Для численного моделирования и расчета кинетических параметров докритического подрастания трещины при заданном ее раскрытии на величину  $\Delta$  по моде I в образцах ККС типа ДКБ, так же как и при моделировании и расчете параметров критического роста (см. предыдущий раздел 4), использовали среду ANSYS® Mechanical APDL Release 19R2 и аналогичную геометрическую твёрдотельную 3D модель образца типа ДКБ, построенную в графическом редакторе программного комплекса. Из представленных в библиотеке программного комплекса ANSYS® типов конечных элементов в модели использовали твёрдотельный элемент Solid 185 для разбиения полубалок образца ДКБ и интерфейсный элемент (ИЭ) Inter 205 для создания конечно-элементной модели когезионного (интерфейсного) слоя (ИС) между полубалками. Связь между совпадающими узлами твёрдотельных и интерфейсных элементов – жёсткая. В рамках данной работы используются ИЭ такой длины, чтобы по длине когезионной зоны ( $l_{КЗ}$ ) их умещалось 4, т.е.  $l_e = l_{КЗ}/4$  [65].

В опции Material Models задавали упругие характеристики материала твёрдотельного элемента в различных направления по плоскостям (справочные данные для сплава Д16: модули Юнга  $E_1, E_{22}, E_{33}$ , модули сдвига  $G_{11}, G_{12}, G_{13}$  и коэффициенты Пуассона  $\nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}$ ), а также экспериментально определенные или теоретически рассчитанные начальные параметры ЗКЗ, соответствующие характеристикам КС в начальный момент времени  $t_0=0$  – площади под кривой ЗКЗ, равной работе разрушения КС, т.е. половине начальной интенсивности высвобождения упругой энергии  $G_{IC}(0)$ , локальной прочности сцепления  $\sigma_{IC}(0)$  и максимального раскрытия  $\delta_{max}(0)$ .

После запуска программы, в соответствие с алгоритмом моделирования для начального момент времени  $t_0=0$ , виртуальный образец расслаивается по моде I заданным раскрытием на концах ( $\Delta = const$ ) и начальной длиной трещины  $a(0)$ , по которым, с использованием формул (2.1б) и (4.5) рассчитывали начальную

нагрузку на трещину  $G_I(0)$  и начальную длину когезионной зоны  $l_{КЗ}(0)$  соответственно. Программа строит ЗКЗ начального виртуального образца (Рис. 5.5, кривая  $t_0$ ).

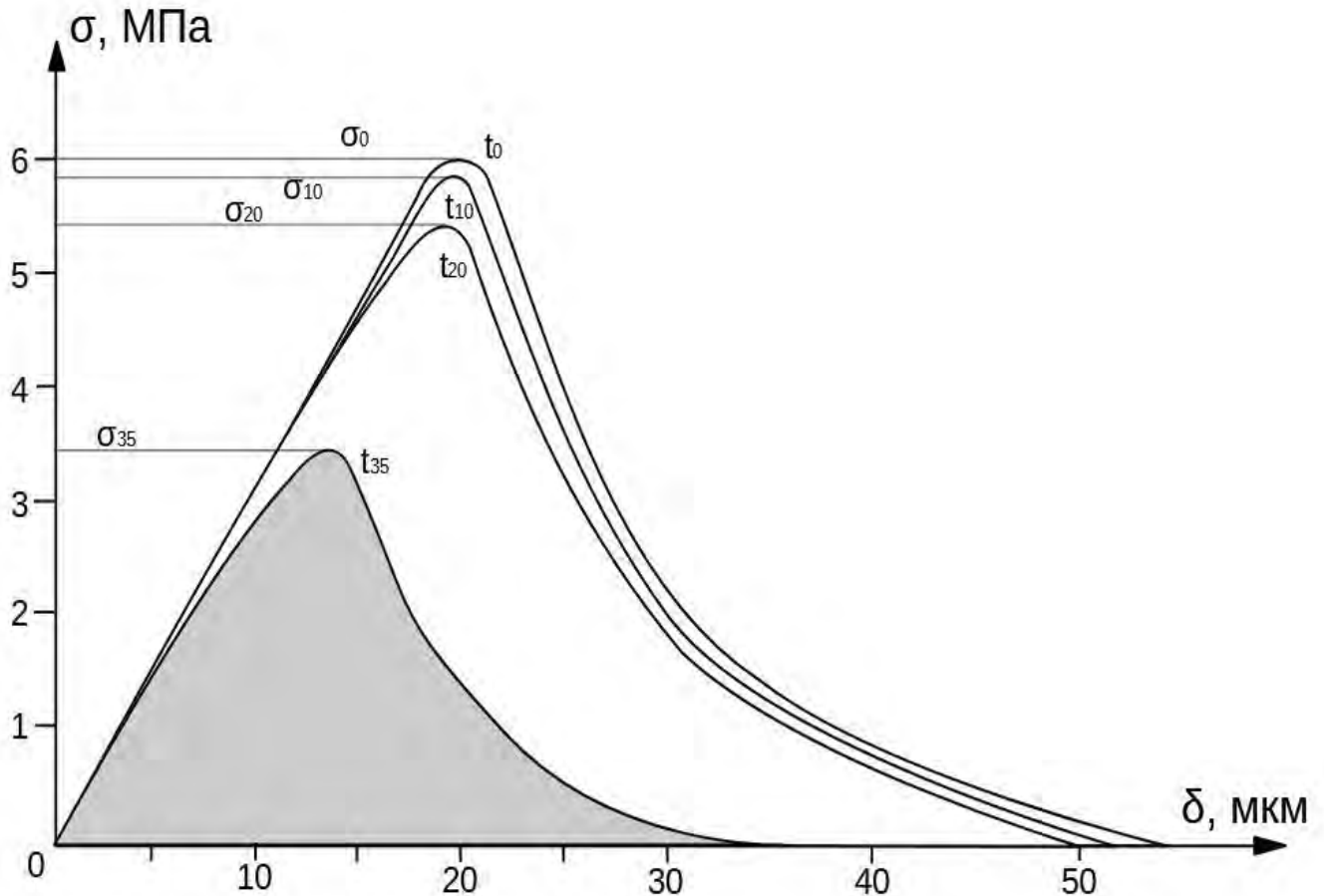


Рисунок 5.5 - Вид расчетных кривых ЗКЗ, полученных и использованных в модельных расчетах методом МКЭ/МКЗ кинетических параметров докритического роста трещины в образцах клеевых соединений Д-16-ВК-9 типа ДКБ при длительном докритическом нагружении заданным раскрытием трещины ( $\Delta=5,6$ мм) с начальной длиной  $a(t_0)=13,0$ мм,  $t_n=9 \cdot 10^6$ с.

Удвоенная площадь под кривой ЗКЗ, равная в модели Баренблатта произведению  $\sigma_C(t_0)$  на  $\delta_{max}(t_0)$ , соответствует начальному сопротивлению роста трещины  $G_{IC}(t_0)$ .

На следующем этапе моделирования роста трещины с использованием опции Arc-length options [73] в настройках решателя по экспериментально определенным зависимостям  $\sigma_{IC}(t)$  и  $\delta_{max}(0)$  и уравнениям (2.1б), (1.9б) и (4.5) определяли период времени (первый временной интервал микроступенчатого подрастания трещины)  $t_1$ , за который  $\sigma_{IC}(0)$  уменьшится до  $\sigma_{IC}(t_1)$ ,  $\delta_{max}(0)$  – до  $\delta_{max}(t_1)$  и, соответственно,  $G_{IC}(0)$  - до  $G_{IC}(t_1)=G_I(0)$ , а трещина подрастет на длину  $\Delta a(t_1)=l_{K3}(0)$ . Для этого периода времени создавали новую виртуальную модель образца ККС типа ДКБ с соответствующей длиной трещины и строили его ЗКЗ (см. рис. 5.5, кривая 2). Так повторяли  $n$  число раз, пока длительность временного интервала, необходимого для микроступенчатого подрастания трещины не стала слишком большой. Каждый раз в интерфейсные или когезионные слои вводили экспериментально определенные параметры ЗКЗ для конкретного временного интервала - параметры С1 (локальная прочность сцепления  $\sigma_c$ ) и С2 (предельное раскрытие  $\delta_{max}$ ) с учётом длины проросшей в предыдущей модели.

На рис. 5.6 приведены наглядные изображения изменения длины трещины и нагрузки на нее в численных экспериментах методом МКЗ/МКЭ в различные периоды времени в отдельных моделях.

По уравнению (5.1а) суммированием периодов времени рассчитывали общее время модельных экспериментов, которое составило величину порядка  $9 \cdot 10^6$  с (примерно 4 месяца), при числе моделей  $n=36$ . По полученным значениям приращения длины трещины  $\Delta a(t_i)$  в каждый временной интервал определяли среднюю скорость докритического подрастания (уравнение (5.1в), а по ее длине в этом интервале и формуле (2.1б) - нагрузку на трещину  $G_I(t_i)$ , комбинацией которых получается кинетическая  $G-V$  диаграмма, записываемая в двойных логарифмических координатах.

Эти данные использованы для модельных (численных) расчетов кинетических параметров докритического подрастания трещины при заданном ее раскрытии на величину  $\Delta$  по моде I в образцах ККС Д16-ПК9 типа ДКБ разработанным методом МКЭ/МКЗ по заданному алгоритму.

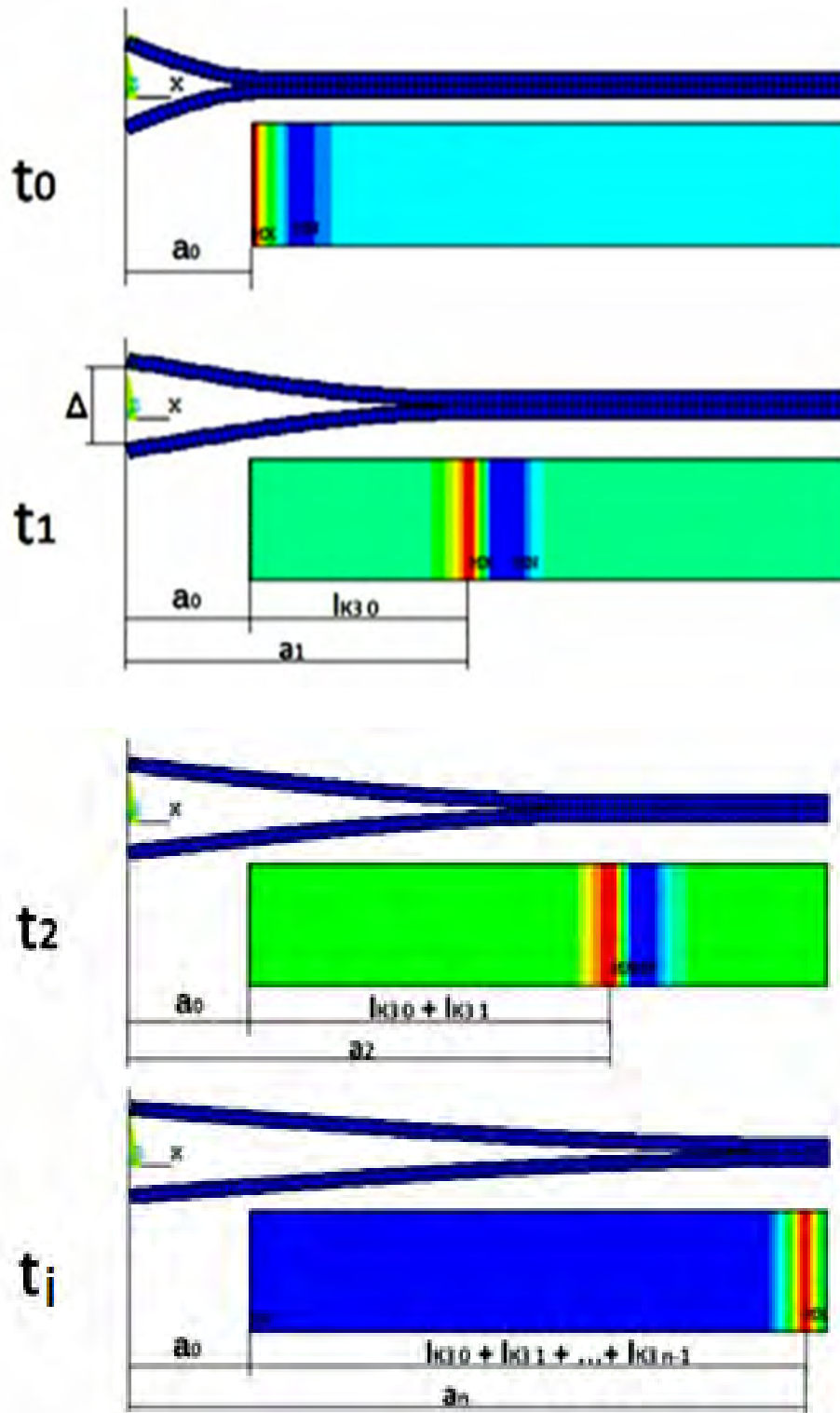


Рисунок 5.6 – Наглядные изображения изменения длины трещины и нагрузки на нее в численных экспериментах методом МКМ/МКЭ в различные периоды времени от  $t_0=0$  до  $t_n=9 \cdot 10^6$  с в соответствующих моделях.

Примеры рассчитанных для различных периодов времени (от  $t_0=0$  до  $t_n=9 \cdot 10^6$  с) значений параметров ЗКЗ, длины трещины и нагрузки на неё для образцов клеевых соединений Д-16-ВК-9 типа ДКБ при постоянном раскрытии трещины ( $\Delta=5,6$ мм) приведены в таблице 5.1, а построенные по ним кинетические кривые докритического подрастания трещины и изменения нагрузки на нее при заданном глобальном раскрытии с сопоставлением с экспериментально полученными данными – на рис. 5.7. – 5.8.

Таблица 5.1. Примеры рассчитанных для различных периодов времени значений параметров ЗКЗ, длины трещины и нагрузки на нее для образцов клеевых соединений Д-16-ВК-9 типа ДКБ при постоянном раскрытии трещины ( $\Delta=5,6$ мм) с начальной длиной  $a(t_0)=13,0$ мм.

Период времени $t$ , с	Параметры ЗКЗ					Длина трещины $a(t_0)$ , мм	Нагрузки на трещину $G_l(t)$ , Дж/м <sup>2</sup>
	$\sigma_c(t)$ , МПа	$\delta_{max}(t)$ , мкм	$G_{lc}(t)$ , Дж/м <sup>2</sup>	$\delta_c(t)$ , мкм	$l_{кз}(t)$ , мм		
$t_0=0$	6,00	53,8	323,0	19,9	1,69	13,0	318
$t_1=8,5 \cdot 10^4$	5,95	53,5	318	19,7	1,70	14,69	313
$t_2=1,7 \cdot 10^5$	5,89	53,2	313	19,6	1,70	16,40	309
.....	...	...	...	...	...	...	...
$t_{10}=8,5 \cdot 10^5$	5,71	52,1	301	19,5	1,74	30,00	298
$t_{11}=9,35 \cdot 10^5$	5,65	51,8	298	19,5	1,76	31,70	295
.....	...	...	...	...	...	...	...
$t_{20}=1,7 \cdot 10^6$	5,28	50,5	268	18,7	1,81	47,00	262
$t_{21}=1,77 \cdot 10^6$	5,23	50,1	262	18,5	1,81	48,80	260
....	...	...	...	...	...	...	...
$t_{35}=10^7$	3,36	35,7	120	13,2	2,00	75,21	117

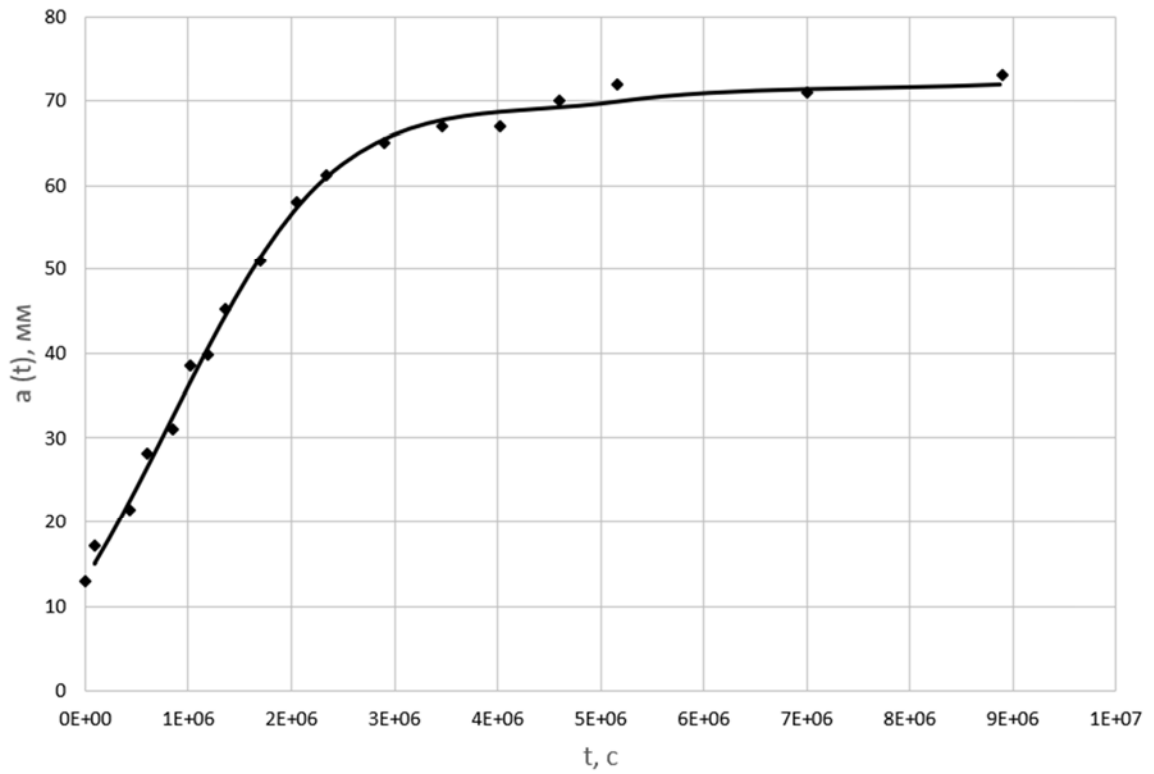


Рисунок 5.7 – Расчетная кинетическая кривая изменения длины трещины  $a(t)$  при заданном её раскрытии (линия) и экспериментально полученные данные (точки) при нормальных условиях.

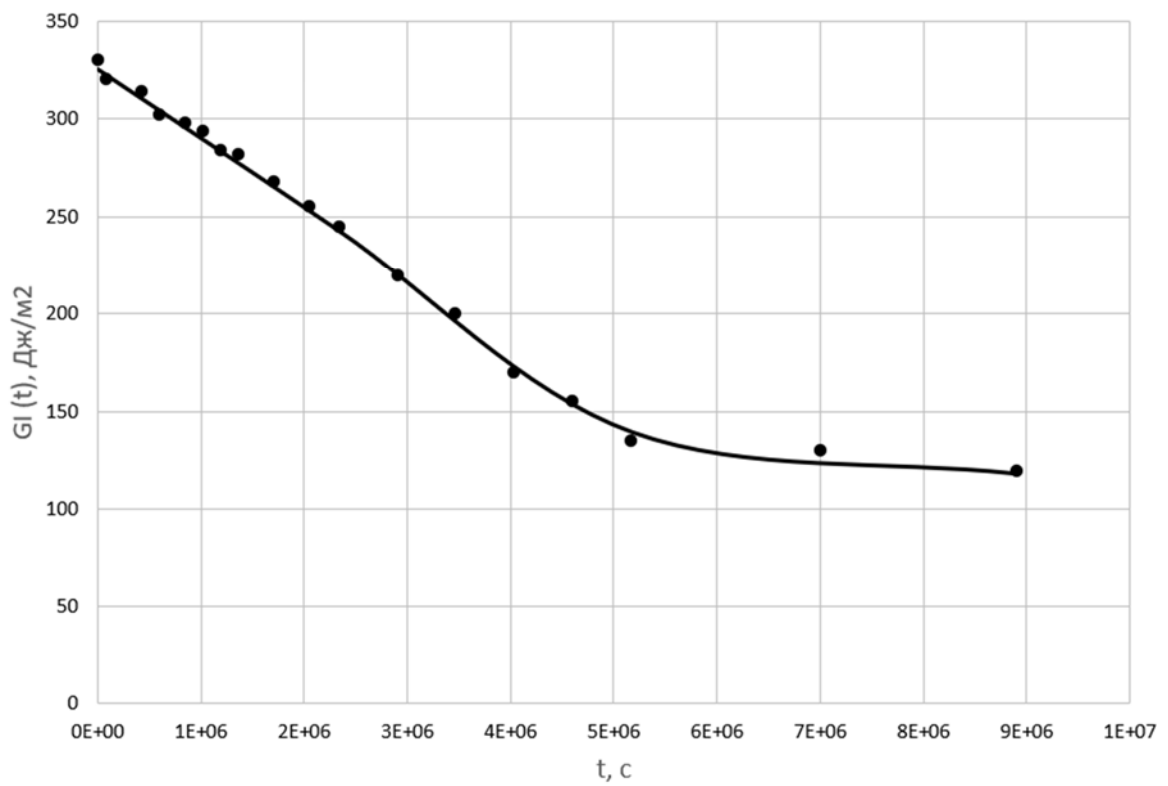


Рисунок 5.8 – Расчетные кинетические кривые изменения нагрузки на трещину  $G_I(t)$  при заданном её раскрытии (линия) и экспериментально полученные данные (точки) при нормальных условиях.

Построенные комбинацией рассчитанных средних скоростей докритического подрастания трещины и действующих на нее ТДС в соответствующие периоды времени численная  $G-V$  диаграмма в сравнении с экспериментально полученными данными приведена на рис. 5.9.

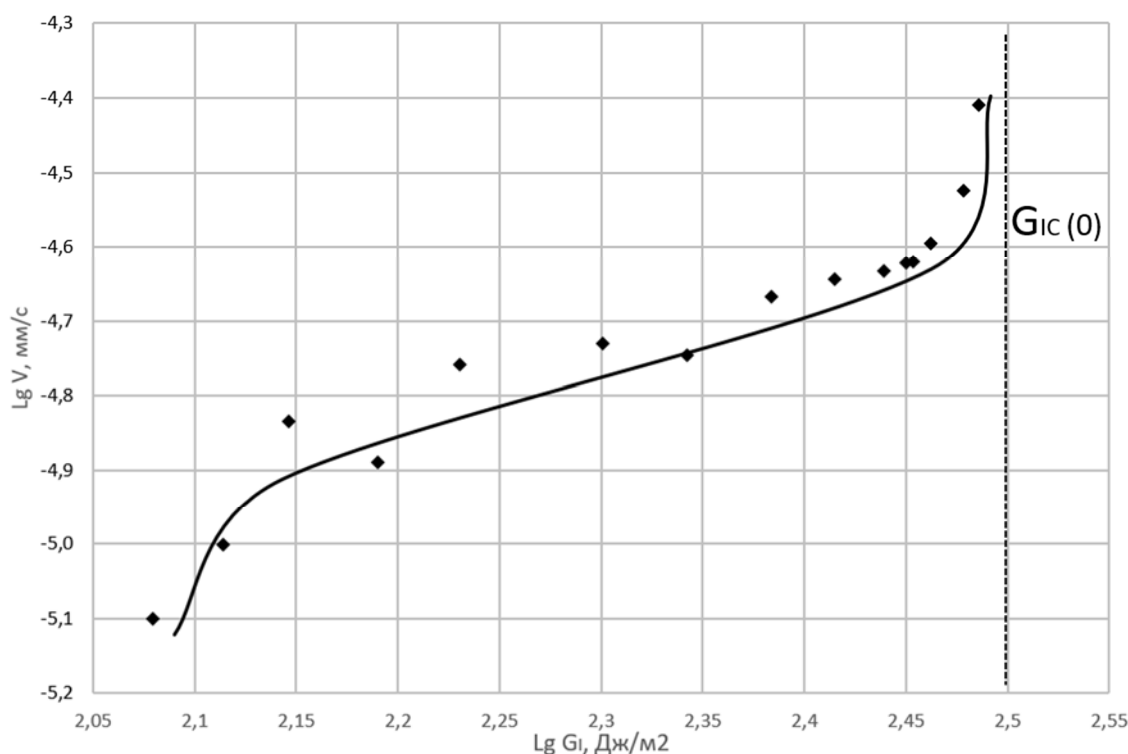


Рисунок. 5.9 - Расчетная (линия) и экспериментально определенная (точки)  $G-V$  диаграмма для клеевого соединения листов алюминиевого сплава Д-16 и клея ВК-9 при длительной статической нагрузке постоянным раскрытием трещины (нормальные условия).

Сравнение полученных результатов показывает, что для образцов КС Д-16-ВК-9 расчётная  $G-V$  диаграмма лежит несколько ниже экспериментальных значений, однако, в целом они имеют хорошее совпадение, что свидетельствует об адекватности разработанных экспериментальных и расчетной методик. Основная проблема при этом связана с трудоемкостью экспериментальной оценки усталостного поведения (долговечности) КЗ при длительных статических испытаниях. Как уже указывалось, большие перспективы в решении этих проблем заложены в использовании термофлуктуационной теории долговечности полимеров и их адгезионных соединений.



## Выводы

1. Экспериментально, с использованием стандартного метода, определены критические параметры трещиностойкости для клевых соединений, активно используемых при создании АРКТ – соединений на основе пластин алюминиевого сплава и трех типов конструкционных эпоксидных клеев марок ВК-9, ЭПК-1 и К-300: 323, 214 и 183 Дж/м<sup>2</sup>, соответственно. Также определена нагрузка начала расслоения: для КС на основе клеев ВК-9, К-300-61 и ЭПК-1, которая равна 330, 240 и 312 Н, соответственно.
2. Экспериментально установлены локальные параметры когезионной зоны при разрыве по моде нагружения I (максимальное напряжение  $\sigma_c$ , максимальное раскрытие  $\delta_{max}$  и рассчитанная по ним длина  $l_{K3}$ ) для клеевых соединений, активно используемых при создании АРКТ – соединений на основе пластин алюминиевого сплава и трех типов конструкционных эпоксидных клеев марок ВК-9, ЭПК-1 и К-300.
3. Определены закономерности изменения максимального напряжения  $\sigma_c$  и максимального раскрытия  $\delta_{max}$  для трёх типов клеевых соединений при длительной выдержке до 104 суток: в течении первого месяца выдержки значения этих параметров относительно быстро снижаются, после чего постепенно выходят на плато.
4. Для условий критического роста трещины конструкционного клеевого соединения, в рамках применимости ЛУМР, разработана оригинальная 3D модель, основанная на имплантации в метод конечных элементов (МКЭ) модели когезионной зоны (МКЗ) в программном комплексе ANSYS. Данная модель позволяет, с использованием экспоненциального закона когезионной зоны и экспериментально определённых параметров когезионной зоны, выбирать оптимальное количество интерфейсных элементов и рассчитывать нагрузку начала расслоения при минимальном объеме вычислений.

5. Установлена адекватность модели критического роста трещины для конструкционных клеевых соединений на основе пластин алюминиевого сплава и трех типов конструкционных эпоксидных клеев марок ВК-9, К-300-61 и ЭПК-1. Численно полученные результаты совпадают с экспериментальными с погрешностью не более 5 % при длине интерфейсных элементов для ВК-9, К-300-61 и ЭПК-1, 0,425 мм, 0,38 мм и 0,46 мм соответственно.

6. Разработан алгоритм и расчетная методика, основанная на имплантации в метод конечных элементов (МКЭ) модели когезионной зоны, для условий докритического роста трещины при квазистатической моде нагружения I, базирующиеся на суммировании микроступенчатых подрастаний трещины на длину когезионной зоны и имплантированные в программный комплекс ANSYS. Установлена применимость такого подхода для оценки кинетических параметров докритического роста трещины в конструкционных клеевых соединениях при длительных квазистатических нагрузках с использованием экспериментально определенных параметров экспоненциального закона когезионной зоны. Полученные кинетические  $G-V$  диаграммы позволяют прогнозировать статическую долговечность конструкционных клеевых соединений с дефектами заданного типа, длительно эксплуатируемые в заданных климатических условиях.

7. Показано резкое сокращение длительности и объема экспериментов и вычислений, необходимых для оценки докритической трещиностойкости конструкционных клеевых соединений различной природы и геометрии, с использованием разработанного алгоритма и расчетной методики, основанной на имплантации в метод конечных элементов модели когезионной зоны, для условий докритического роста трещины при квазистатической моде нагружения I.

8. Проверка разработанного алгоритма и расчетной методики для условий докритического роста трещины при квазистатической моде нагружения I показала, что расчетные данные и  $G-V$  диаграмма докритического роста трещины в конструкционном клеевом соединении на основе алюминиевого сплава и эпоксидного клея ВК-9 совпадают с экспериментальными данными.

9. Впервые установлено существование аналогии между экспоненциальной формой закона когезионной зоны и производной потенциала Леннарда-Джонса для адгезионных связей по границе раздела клеевой слой-субстрат при псевдохрупком росте трещины в конструкционных клеевых соединениях и предложен микроступенчатый термофлуктуационный механизм докритического подрастания трещины на длину когезионной зоны.

## Перечень сокращений

G-V диаграмма - диаграмма нагрузка на трещину – скорость её докритического подрастания

ЗКЗ – закон когезионной зоны

ИЭ — интерфейсные элементы

ИС – интерфейсный слой

АС – адгезионный слой

КЗ — когезионная зона

КС – клеевое соединение

ККС – конструкционное клеевое соединение

ЛУМР – линейная упругая механика разрушения

МКЗ — модель когезионной зоны

МКЭ – метод конечных элементов

АРКТ - авиационная и ракетно-космическая техника

ДКБ – двойная консольная балка

ПКМ – полимерный композиционный материал

КЭ – космический эксперимент

## Список литературы

1. Петрова А. П., Клеевые технологии в авиастроении / А. П. Петрова, Н. Ф. Лукина // ФГУП «ВИАМ» - 2007-204777 - февраль 2007.
2. Bishopp, J. Adhesives for Aerospace Structures // Handbook of Adhesives and Surface Preparation: Technology, Applications and Manufacturing – 2011 – v.13 – p.301-344. Doi: 10.1016/B978-1-4377-4461-3.10013-6.
3. Messler, R.W. Joining of Materials and Structures // Elsevier, Oxford. (2004).
4. R.D. Adams, J. Comyn, W.C. Wake, Structural adhesive joints in engineering // Springer Science & Business Media. 1997.
5. S. Niks. Structural Adhesive Bonding in Aerospace [Электронный ресурс] – <https://www.adhesives.org/resources/knowledge-center/aggregate-single/structural-adhesive-bonding-in-aerospace>
6. Шарова И. А. Эпоксидные клеи холодного отверждения для склеивания и ремонта деталей авиационной техники. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. - Москва. 2014. – 125 с.
7. А.П. Петрова, Н.Ф. Лукина, А.А. Донской. Клеевые технологии в авиастроении. // Клеи. Герметики. Технологии. – 2007 - №5 - с.5-14
8. Синеоков А.П. Краткая история разработки анаэробных материалов в НИИ полимеров // Клеи. Герметики. Технологии. – 2006 - №1 – с. 9-12
9. Гордон. Дж. Почему мы не проваливаемся сквозь пол / Дж. Гордон. Перевод с английского С.Т. Милейко // Москва: Издательство "Мир" – 1971 - 114 с.
10. Гладких С.Н., Дворецкий А.Э., Вялов А.И. Новые клеи разработки ОАО "Композит" для изделий ракетно-космической техники // Новости материаловедения. Наука и техника. Изд.: Арпан (Москва), eISSN: 2307-8952 - №2 (20) – 2016 - С. 6-12

11. Пыриков А.В., Лойко Д.П. Изменение свойств эпоксидных полимеров под влиянием жидких полисульфидных и карбоксилатных бутадиеновых каучуков // Москва. ООО "Наука и Технологии" - «Ремонт, восстановление, модернизация». 2008 - №8 - С. 30-32.
12. Пыриков А.В., Лойко Д.П., Кочергин Ю.С. Модификация эпоксидных смол жидкими полисульфидными и карбоксилатными бутадиеновыми каучуками // «Клеи. Герметики. Технологии» - 2010 - №1 - С. 28-33.
13. Аниховская Л.И. Клеи и материалы на их основе для ремонта конструкций авиационной техники // «Клеи. Герметики. Технологии» - 2006 - №2 - С. 21-23.
14. J.A. Pascoe, R.C. Alderliesten, R. Benedictus. Methods for the Prediction of Fatigue Delamination Growth in Composites // Structural Integrity & Composites Group, Faculty of Aerospace Engineering, Delft University of Technology, P.O. Box 5058, 2600 GB Delft, The Netherlands and Adhesive Bonds - A Critical Review.
15. Куликов В.В., Петрова А.П. Анализ типов дефектов в клеевых соединениях авиационной техники и их ремонт // «Клеи, герметики, технологии» - №5 – 2011 - с.24-27.
16. Кардашов Д.А. Конструкционные клеи. М.: Издательство ХИМИЯ - 1980 г. - 288 стр.
17. Вильнав Ж.-Ж. Клеевые соединения, М: Техносфера – 2007 - 384 с.
18. В.А. Нелюб. Применение полимерных композиционных материалов в судостроении для ремонта корабельных надстроек // МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва [Электронный ресурс] – <https://emtc.ru/files/20%20Применение%20полимерных%20композиционных%20материалов%20в%20судостроении%20для%20ремонта%20корабельных%20надстроек.pdf>
19. Bertolini, Julien & Castanié, Bruno & Barrau, Jean-Jacques & Navarro, Jean-Philippe. Multi-level experimental and numerical analysis of composite stiffener

- debonding. Part 1: Non-specific specimen level // Composite Structures - v90 – p. 381-391. Doi: 10.1016/j.compstruct.2009.04.001.
20. ГОСТ 28966.1-91 Клеи полимерные. Метод определения прочности при расслаивании. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. – 8 с.
21. Кинлок Э. Адгезия и адгезивы. Наука и технология. М.: Мир, 1991. - 484 с.
22. П.Г. Бабаевский, С.Г. Кулик Трещиностойкость отвержденных полимерных композиций. М., «Химия» - 1991 г. – 336 с.
23. Williams, J. G. Application of Linear Fracture Mechanics. In: Advances in Polymer Sci. Failure in Polymers. Springer, Berlin-Heidelberg - N 4 – 1978 - pp. 67-120.
24. Kinloch, A.J. & Shaw, S. J. Development in adhesives-2, Ed. by A. J. Kinloch // Applied Science Publishers Ltd., London – 1981 - p. 82
25. Баренблатт Г. И. Математическая теория равновесных трещин, образующихся при хрупком разрушении // Изв. АН СССР. ПМТФ - 1961 - №4 - С. 3-56.
26. Аристовская Л. В., Бабаевский П. Г., Власов С. В. и др. Практикум по полимерному материаловедению. Под ред. П.Г. Бабаевского // М.: Химия – 1980 - с. 255.
27. Д. Ван Кревелен, Р. Хофтицер. Свойства и химическое строение полимеров // Пер. с англ. М.: Химия – 1976 - гл. 6.
28. П.Г. Бабаевский, А.Н. Шубин, П.Г. Вагстафф. Физико-механические свойства и характер разрушения эпоксисаминных композиций, отвержденных в виде пленок, клеевых прослоек и блочных образцов // В сб. Конструкции из композиционных материалов - №4 – 1999 - стр. 36 – 47.
29. Шубин А.Н., Кулик С.Г. «Разработка методики прогнозирования долговечности клеевых соединений по кинетике докритического подрастания трещин» // Тезисы докладов XX международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения». М.: МГАТУ – 1994 - с.28.

30. П.Г. Бабаевский, А.Н. Шубин, Резцов И.А. Моделирование кинетики докритического роста трещин в стеклообразных полимерных материалах при длительном статическом нагружении // Тезисы докладов XXV международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения». М.: МГАТУ – 1997 - т.1 - с.501.
31. Rybicki, E.F. and M.F. Kanninen. “A Finite Element Calculation of Stress-Intensity Factors by a Modified Crack Closure Integral // Engineering Fracture Mechanics - 1977 – 9 – с. 931-938
32. Krueger, R. The Virtual Crack Closure Technique: History, Approach and Applications // ICASE Report - 2002 - №10 – pp/ 109-143
33. Benzeggagh, M. and M. Kenane. Measurement of Mixed-Mode Delamination Fracture Toughness of Unidirectional Glass/Epoxy Composites with Mixed-Mode Bending Apparatus // Composite Science and Technology – 1996 – 56 – pp. 439-449
34. ANSYS Mechanical APDL Structural Analysis Guide, ANSYS Inc, Release 15.0 - November 2013 - 522p.
35. Hillerborg, A., Modéer, M., Petersson, P.-E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements // Cement and Concrete Research – 1976 - vol. 6 - no. 6 - p. 773-781 - DOI:10.1016/0008-8846(76)90007-7.
36. D. Williams, A. Evans, A Simple Method for Studying Slow Crack Growth // Journal of Testing and Evaluation 1 – 1973 - no. 4 - pp.264-270.
37. Beaumont P.W.R., Young R. J. Failure of brittle polymers by slow crack growth. Part 1: crack propagation in polymethylmethacrylate and time-to-failure predictions // J. Mater. Sci. – 1975 - Vol.10 - pp.1334 – 1342.
38. D. C. Phillips, J. M. Scott. Determination of the K, V diagram of epoxide resins // J. Mat. Sci. – 1974 - №9 - p. 1205.



39. Грабильников А. С., Ларина Н. Д. Методы определения трещиностойкости клеевых соединений // В сб.: Нестандартные методы исследования структуры и свойств полимерных материалов. – М.: МАТИ – 1990 - вып. 6 - с. 12–24.
40. Яковлев Н.О., Гуляев А.И., Лашов О.А. Трещиностойкость слоистых полимерных композиционных материалов (обзор) // Труды ВИАМ – 2016 - №4 (40) - с. 106 – 140.
41. С.И. Корягин, С.В. Буйлов, Е.С. Минкова, Методика исследования докритического роста трещин в клеевых соединениях // Международный научный журнал «инновационная наука». Институт транспорта и технического сервиса Балтийский федеральный университет им. И. Канта - 2015 - №5 – с.88 - 92
42. П.Г.Бабаевский, Н.А.Козлов, А.Н.Шубин, И.В.Чурило, В.П.Никитский, Т.Н.Смирнова // Космические исследования – 2004 - №3 - С.315-320.
43. П.Г.Бабаевский, Н.А.Козлов, А.Н.Шубин, Т.Н.Смирнова, Л.С.Новиков и др. Изучение свойств материалов в эксперименте «Компласт» на орбитальном комплексе «Мир» и Международной космической станции // Энциклопедия космоса. Изд. МГУ-НИИЯФ – 2007 - С.1-16.
44. Alfano., M. et al. Analysis of Fracture in Aluminum Joints Bonded with a Bi-Component Epoxy Adhesives // J. of Testing and Evaluation - 2010 - Vol.39 - №2 - Paper ID JTE102 753
45. M. Alfano, F. Furguele, A. Leonardi, C. Maletta, G. H. Paulino, Fracture analysis of adhesive joints using intrinsic cohesive zone models – [Электронный ресурс] - [https://paulino.ce.gatech.edu/conferences/papers/07alfano\\_IGF.pdf](https://paulino.ce.gatech.edu/conferences/papers/07alfano_IGF.pdf)
46. C.Balzani at al. Adhesive Joints in Composite Laminate – A Combined Numerical/ Experimental Estimate of Critical Energy Release Rates. Ch. 13. Adhesives for Aerospace Structures // Handbook of Adhesives and Surface Preparation Technology, Applications and Manufacturing, Elsevier – 2011 - 415 p.

47. Govila R.K. Material parameters for life prediction in ceramics. – In: Ceramics for High-Performance Applications. Part III. Reliability./ Ed. Lenoe E. M., Katz R. N., Burke J. Army materials technology conference series. NewYork-London: Plenum Press – 1983 - V.6 - pp.535-567.
48. Evans A. G. A method for evaluating the time-dependent failure characteristics of brittle materials - and its application to polycrystalline alumina // J. Mat. Sci. – 1972 - №7 - p. 1137-1146
49. П.Г. Бабаевский, Н.А. Козлов, А.Н. Шубин, Т.Н. Смирнова, Л.С. Новиков, В.Н. Черник. Кинетика докритического роста трещины и G-V-диаграммы клеевых соединений при длительном воздействии факторов космического пространства // Перспективные материалы – 2003 - №2 - С.17-23
50. А.Н. Шубин, А.А. Докунин, П.Г.Бабаевский, Разработка методики контроля трещин трещин в клеевых соединениях при длительном статическом нагружении // Тезисы докладов XX международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения». М.: МГАТУ – 1996 - с.110.
51. P.G.Babayevsky, N.A.Kozlov, A.N.Shubin, I.V.Tchurilo, T.N.Smirnova. Techniques and Instrumentation for Development of Space Experiments on Polymer Materials // Aircraft Engineering and Aerospace Technology – 2001 - v.73 - N3 - pp367-373.
52. Yu.V. Skvortsov et al. Simulation of fatigue delamination growth in composite laminates under mode I loading // Applied Mathematical Modelling – 2016 – №40 – pp.7216–7224
53. Turon A., Costa J., Camanho P.P., Dàvila C.G. Simulation of delamination in composites under high-cycle fatigue // Composites – 2007 – 38 – pp.2270-2282.
54. F. Moroni and A. Pironi, Cohesive zone model simulation of fatigue debonding along interfaces // Procedia Engineering – 2011 - №10 – pp.1829–1834 1833

55. Harper, P., Hallett, S. R., A Fatigue Degradation Law for Cohesive Interface Elements – Development and Application to Composite Materials // *Int. J. of Fatigue* - 2010 - Vol.32 - pp.1774-1787.
56. M.F. de Moura , J.P. Gonçalves, Cohesive zone model for high-cycle fatigue of adhesively bonded joints under mode I loading // *Int. J. Solids Struct* – 2014 – 51 - pp.1123–1131.
57. Чернякин С.А., Скворцов Ю.В. Анализ роста расслоений в композитных конструкциях // *Сибирский журнал науки и технологий* – 2014 - №4 (56) – с.249-254
58. A. Pirondi and F. Moroni Improvement of a Cohesive Zone Model for Fatigue Delamination Rate Simulation // *Materials* – 2019 - №12 – p.181; doi:10.3390/ma12010181
59. ASTM Designation: D 5528 – 01 (Reapproved 2007). Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites. 12p.
60. ГОСТ Р 56815-2015 Композиты полимерные. Метод определения удельной работы расслоения в условиях отрыва. – Москва: Стандартинформ, 2016. – 35 с.
61. M. Moslemi, M. Khoshnavan. Cohesive Zone Parameters Selection for Mode-I Prediction of Interfacial Delamination // *Journal of Mechanical Engineering* – 2015 – №61 – p.507-516.
62. Babaevskiy P.G., Kozlov N.A., Shumov A.E., Novikov L.S., Shaevich S.K., Golden J.L., Kravchenko M. Results of the Komplast experiment on the long-term exposure of materials specimens on the ISS surface // *Advances in Space Research* - 2015 - Volume 56 - Issue 10 - Pages 2188–2195
63. П.Г.Бабаевский, Н.А.Козлов, А.Н.Шубин, И.В.Чурило, В.П.Никитский, Т.Н.Смирнова. Комплект аппаратуры и методики для оценки влияния факторов

космического пространства на полимерные материалы и клеевые соединения в активных экспериментах // Космические исследования – 2004 - №3 - С.315-320.

64. Бабаевский П.Г., Салиенко Н.В., Новиков Г.В. Экспериментальное определение параметров когезионной зоны для слоистых композитов // Материалы XVIII Всероссийской научно-технической конференции «Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации – 2017», - Пермь; ПНИПУ – 2017 - с.20-23.

65. А Бабаевский П.Г., Козлов Н.А., Салиенко Н.В., Устинов А.А. Использование модели когезионной зоны и метода конечных элементов для анализа трещиностойкости клеевых соединений // «Клеи. Герметики. Технологии» - №8 – 2019 - DOI: 10.31044 / 1813-7008-2019-0-8-33-38 - С. 33-38.

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

67. Harper, P., & Hallett, S. R. Cohesive zone length in numerical simulations of composite delamination // Engineering Fracture Mechanics – 2008 – N 75(16) – pp.4774-4792. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2008.06.004.

68. K. Song, C. Dávila, C. Rose, Guidelines and Parameter Selection for the Simulation of Progressive Delamination // Materials Science – 2008 - [Электронный ресурс] – <https://ru.scribd.com/document/243927727/Guidelines-and-Parameter-Selection-for-the-Simulation-of-Progressive-Delamination>

69. Регель В. Р., Слуцкер А. И., Томашевский Э. Е. «Кинетическая природа прочности твердых тел» // М.: Наука – 1974 - 560с.

70. Гольдштейн Р. В., Перельмутер М. Н. О кинетике формирования и роста трещин на границе соединения материалов // Изв. РАН. Механика твердого тела – 2012 - № 4 - С. 32–49.

71. Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Салганик Р.Л. О кинетике распространения трещин. Флуктуационное разрушение // Изв. АН СССР. МТТ – 1967 - № 1 - С. 122-134.
72. P. Duangmuan, Layer waviness effects on compression strength of composite laminates: progressive failure analysis and experimental validation, PhD thesis, The University of Utah, Salt Lake City, (2012).
73. Lindgaard E., Bak B.L.V., Glud J.A., Sjølund J., Christensen E.T. A user programmed cohesive zone finite element for ANSYS Mechanical // Engineering Fracture Mechanics – 2017 - №180 – pp.229–239