



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

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КВАЗИСТАТИЧЕСКОЙ
КРИТИЧЕСКОЙ И УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ
КОНСТРУКЦИОННЫХ КЛЕЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ КОГЕЗИОННОЙ ЗОНЫ И ЕЁ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ**

Специальность 05.16.09 – Материаловедение (машиностроение)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор технических наук
Козлов Николай Алексеевич

Москва 2020

Оглавление

Введение	4
1. Литературный обзор	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	29
1.2. Методы оценки и прогнозирования критической и докритической трещиностойкости ККС в рамках ЛУМР	32
1.2.1 Аналитические макромеханические модели и методы ЛУМР	32
1.2.2 Аналитические микромеханические модели и методы ЛУМР	39
1.2.3 Аналитические подходы и методы оценки кинетики докритического роста трещин и долговечности ККС в рамках ЛУМР	43
1.2.4 Подходы и методы численного моделирования и оценки трещиностойкости ККС	46
1.3 Экспериментальные исследования и численное моделирование критической и докритической трещиностойкости ККС	57
1.3.1 Устойчивость ККС к критическому росту трещин	57
1.3.2 Устойчивость ККС к докритическому росту трещин	63
2. Экспериментальная часть.....	73
2.1 Объекты и образцы	73
2.2 Экспериментальные методы	75
2.2.1 Определение критического параметра трещиностойкости (G_{IC}).....	75
2.2.2 Определение кинетических параметров докритического роста трещины	78
2.2.3 Определение локальной межслоевой когезионной прочности	80

2.2.4 Численное моделирование критического и докритического роста трещины и оценка трещиностойкости образцов ККС типа ДКБ	81
3. Обобщение и сравнительный анализ экспериментально полученных и расчетных результатов.....	96
3.1 Параметры критической трещиностойкости ККС.....	96
3.2 Кинетические параметры докритического роста трещин в ККС при квазистатическом нагружении.....	99
Выводы	104
Перечень сокращений	107
Список литературы	108

Введение

Актуальность работы:

В настоящее время жёсткие (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. Это обуславливает необходимость в разработке методов эффективной оценки и прогнозирования несущей способности и долговечности конструкционных клеевых соединений (ККС). Наилучшие возможности для этого обеспечивает использование аналитических и экспериментальных методов линейной упругой механики разрушения (ЛУМР), позволяющих определять энергетические и силовые параметры нагрузки на дефект (трещину), их критические значения (параметры трещиностойкости) и кинетику докритического подрастания трещины, определяющую долговечность ККС при заданной геометрии и моде нагружения, конфигурации и размерах дефекта. Однако, классические подходы ЛУМР применимы только в случаях простой геометрии ККС и дефектов в них и требуют сложных аналитических расчетов для оценки прочности ККС, особенно при их сложной конфигурации. В последнее время эти проблемы, в рамках применимости ЛУМР решаются разработкой численных методов моделирования инициирования и роста трещин в упруго-хрупких материалах, в том числе ККС имплантацией в метод конечных элементов (МКЭ) модели когезионной зоны (МКЗ), базирующейся на микромеханической модели предразрушения материала вблизи кончика трещины или любом месте концентрации напряжения,

называемом процессной, адгезионной или когезионной зоной (КЗ). В методах МКЭ/МКЗ между двумя частями твердотельной модели МКЭ вводится связанный с ними тонкий промежуточный (интерфейсный, адгезионный или когезионный) слой с отдельной сеткой специальных конечных (интерфейсных) элементов, механическое поведение которого подчиняется определённому закону - закону когезионной зоны (ЗКЗ). При наличии экспериментально определённых параметров ЗКЗ современные программные пакеты позволяют создать модель геометрически сложного элемента конструкции или ККС, однако такие модели требуют проверки своей корректности на примере стандартных испытаний.

Степень разработанности темы:

Проведенный аналитический обзор литературы показал, на данный момент накоплен большой объём данных о методах и результатах экспериментальных исследований, численного моделирования и расчетов критической трещиностойкости жестких конструкционных клеевых соединений, базирующихся на подходах ЛУМР с использованием стандартных конфигураций образцов, чаще всего в виде двойной консольной балки с заданной краевой трещиной, нагружаемой раскрытием по моде I, и энергетического параметра трещиностойкости – критической интенсивности высвобождения упругой энергии при росте трещины (G_{IC}). В этих работах оценивается влияние на трещиностойкость 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.

Исследований кинетики докритического роста трещин в конструкционных клеевых соединениях 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. Большинство имеющихся в

литературе данных относится к усталостному росту трещин при циклических нагрузках, амплитудные значения которых меньше критических. 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 (Р-Δ), то при определении кинетических параметров докритического подрастания трещины нагружение приложением заданной постоянной нагрузки неприменимо.

Современные публикации всё чаще 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 использовании метода МКЭ/МКЗ особое внимание уделяется точности расчетов механических параметров закона когезионной зоны.

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.

Цель работы: разработка методик и оценка критических параметров трещиностойкости и кинетики докритического роста трещин в ККС листов алюминиевого сплава, с использованием численного конечно-элементного моделирования, базирующегося на микромеханической модели когезионной зоны и их проверка по экспериментальным данным.

Задачи:

1. Анализ конструкционных клеевых соединений, применяемых в авиационной и ракетно-космической технике, дефектов в них, подходов и методов ЛУМР к оценке устойчивости к статическому критическому и усталостному докритическому псевдохрупкому росту трещин.
2. Разработка и проверка численной модели на основе МКЭ/МКЗ для анализа критической трещиностойкости ККС и отработка методик экспериментального определения необходимых параметров.
3. Разработка, на основе физической модели, алгоритма и методики численной оценки кинетики докритического подрастания трещины при длительном квазистатическом нагружении с использованием экспериментальных данных.
4. Получение и сопоставление экспериментальных и расчетных данных о параметрах квазистатической критической и усталостной трещиностойкости трех типов конструкционных клеевых соединений.

Научная новизна:

1. Впервые экспериментально определены локальные параметры когезионной зоны при разрыве по моде нагружения I (максимальное напряжение σ_c , максимальное раскрытие δ_{max} и рассчитанная по ним длина $l_{кз}$) для клеевых соединений на основе пластин алюминиевого сплава и трех типов

конструкционных эпоксидных клеёв марок ВК-9, ЭПК-1 и К-300-61. Определены изменения этих параметров при длительной выдержке до 104 суток.

2. В пакете прикладных программ ANSYS разработана оригинальная 3D модель МКЭ/МКЗ критического роста трещины в ККС, позволяющая, с использованием экспоненциального ЗКЗ и экспериментально определённых параметров когезионной зоны, выбирать оптимальное количество интерфейсных элементов и рассчитывать нагрузку начала расслоения с достаточно высокой точностью при минимальном объеме вычислений. Проверкой модели на адекватность показано хорошее совпадение расчетных и экспериментально полученных данных для трех типов ККС.

3. Впервые разработаны алгоритм и расчетная методика МКЭ/МКЗ, базирующиеся на суммировании микроступенчатых подрастаний трещины на длину КЗ и имплантированные в программный комплекс ANSYS, для оценки кинетических параметров докритического роста трещины в ККС при длительных квазистатических нагрузках с использованием экспериментально определенных параметров экспоненциального ЗКЗ. Полученные расчетные данные и $G-V$ диаграмма докритического роста трещины в ККС на основе алюминиевого сплава и эпоксидного клея ВК-9 хорошо совпадают с экспериментальными данными.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Усовершенствованная методика МКЭ/МКЗ и хорошее соответствие расчетных и экспериментально полученных данных о критической трещиностойкости образцов ККС в виде ДКБ из листов алюминиевого сплава и трех типов промышленных клеев при наиболее опасной моде нагружения I имеют важное значение с точки зрения выбора клея, проектирования и расчета клеевых соединений в элементах конструкций АРКТ на устойчивость к росту как существующих трещин, так и к их инициированию в любых концентраторах напряжений или дефектах. Оптимизация длины и количества ИЭ в конечно-элементной численной модели когезионной зоны с использованием

экспериментально определенных параметров физической КЗ позволяет минимизировать объем вычислений для получения достоверных результатов о критической трещиностойкости ККС в элементах конструкций даже со сложной геометрией.

2. Разработанные алгоритм и методика МКЭ/МКЗ и соответствующие имеющимся экспериментальным данным результаты численных расчетов кинетики докритического роста трещины в образцах ККС в виде ДКБ на основе листов алюминиевого сплава и эпоксидного клея при квазистатической моде нагружения I с использованием экспериментально определенных параметров КЗ позволяют резко сократить длительность и объем экспериментов и вычислений, необходимых для оценки докритической трещиностойкости ККС различной природы и геометрии. Получаемые при этом кинетические $G-V$ диаграммы необходимы для прогнозирования статической долговечности ККС с дефектами заданного типа, длительно эксплуатируемые в заданных климатических условиях.

3. Для адгезионного механизма псевдохрупкого роста трещины в ККС впервые установлена аналогия между экспоненциальной формой ЗКЗ и производной потенциала Леннарда-Джонса для адгезионных связей по границе раздела клеевой слой-субстрат и предложен микроступенчатый термофлуктуационный механизм докритического подрастания трещины на длину когезионной зоны.

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. А также моделирование методом конечных элементов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Экспериментально определенные значения локальных параметров (прочности при растяжении σ_C , максимального раскрытия δ_{max} и длины l_{K3}) когезионной зоны для клеевых соединений на основе листов алюминиевого сплава и трех типов конструкционных эпоксидных клеев.
2. Численная модель МКЭ/МКЗ и результаты расчетов критических параметров трещиностойкости образцов трех типов ККС в виде двойной консольной балки (ДКБ).
3. Физическое обоснование, численная МКЭ/МКЗ модель и результаты расчета кинетики докритического подрастания трещины и построения G-V диаграмм для образцов ККС 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, трёх частей (литературный обзор, экспериментальная часть, обсуждение результатов), выводов и общего списка литературы.

1. Литературный обзор

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).

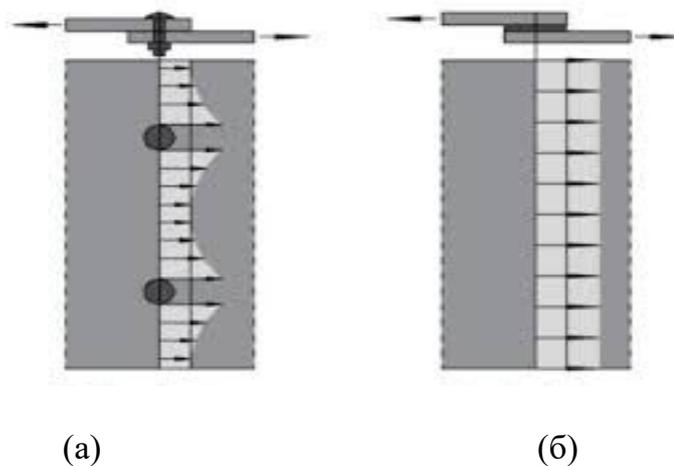


Рисунок 1.1 – Распределение напряжений при действии сдвиговых сил в болтовом (а) и клеевом (б) соединении [4].

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 аэрокосмической 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 авиации (табл. 1.1).

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

Наименование показателя	СИАЛ	1163-АТ	В95о.ч.-Т2
Структура	2/1; 3/2	1	1
Толщина, мм:		1,5	1,5
общая	0,8-2,5		
металл	0,3-0,5		
Плотность, г/см ³	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.

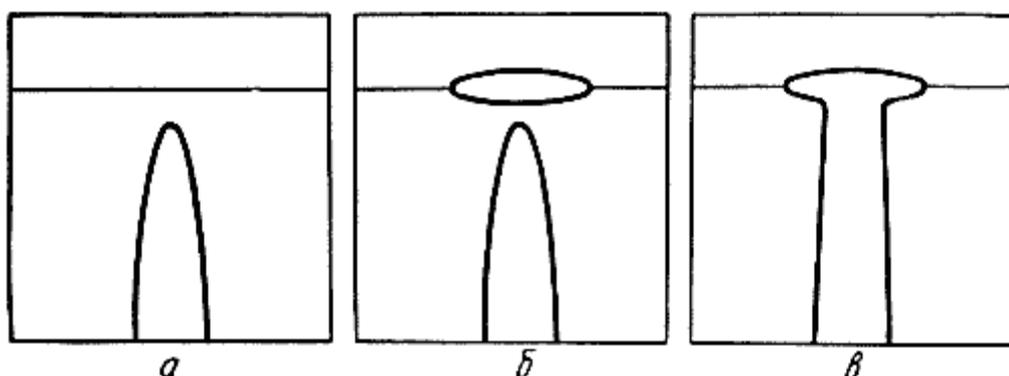


Рисунок 1.3. Схема торможения трещины по Куку-Гордону: а — трещина приближается к слабой границе раздела; б — граница раздела перед трещиной разрушается; в — затупление трещины. [9].

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 конструктивными 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 получать 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. Заполнитель 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. Повышенная устойчивость сотовых конструкций при сжатии и сдвиге позволяет конструировать их без подкрепляющих продольных элементов. Высокая устойчивость таких панелей позволяет применять несущие обшивки малой толщины (0,3—0,6 мм), что очень важно для снижения массы конструкции. 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 в слое толщиной 0,1-0,25 мм: относительное удлинение при разрыве не менее 2,5% по ГОСТ 14236-81. Они обеспечивают также минимальные показатели газовыделения в отвержденном состоянии: ПМР (общая потеря массы за вычетом воды) <1,0%; ЛКВ (легкоконденсирующиеся вещества) < 0,1% при вакуумно-тепловом воздействии по ГОСТ Р 50109-92.

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 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°С 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]. Введение Лапроксидов должно положительно влиять на адгезионные характеристики клеев, поскольку их низкая вязкость улучшает смачивающую способность – одного из важнейшего факторов, определяющего взаимодействие на границе раздела твердого субстрата и клеевого слоя. В качестве отвердителей использованы низкомолекулярные полиаминоамиды, амины и их смеси, а в качестве наполнителей – нитрид бора, микротальк, диоксид титана и другие.

Для модификации эпоксидных клеев были опробованы одно-, двух- и трехфункциональные Лапроксиды с варьированием их содержание в широких

пределах с оценкой технологических и прочностных свойств - адгезионных при сдвиге и отрыве и когезионных (относительного удлинения при разрыве и разрушающего напряжения при растяжении) в широком температурном интервале. Прочность при сдвиге образцов клеевых соединений из алюминиевого сплава АМГб определяли в соответствии с ОСТ 92-1477-78 при температурах от -196 до +250°C, а при отрыве – в соответствии с ОСТ 92-1476-78. Испытывая при растяжении при температуре 20°C в соответствии с ГОСТ 14236-81 образцы пленок из отвержденных клеевых композиций толщиной 0,15-0,20 мм, определяли их относительное удлинение при разрыве и разрушающее напряжение при растяжении.

В результате проведенных исследований 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.

В быстроотверждающихся (за 3 ч. при нормальных условиях) клеях с высокой адгезионной прочностью содержание Лапроксидов составляет не более 10%, так как их введение в больших количествах увеличивает продолжительность отверждения. В нашедших широкое применение конструкционных клеях с жизнеспособностью от 2 до 4 ч. типа ЦМК-5, ЭЛК-5 отверждающихся при нормальных условиях в течение 2-3 суток, содержание модифицирующих олигоэфиров типа Лапроксид доходит до 18-27%. Относительное удлинение при разрыве тонких пленок из отвержденных клеев не менее 2,0%, а прочность при растяжении выше 30 МПа.

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°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).

Клей-герметик КГЭ-3/16 предназначен для склеивания, с одновременным обеспечением герметичности, разнородных материалов в узлах, испытывающих высокие вибрационные, ударные нагрузки, воздействие температур от -150 до +120°C (кратковременно до +200°C). Его применение позволяет решить следующие задачи:

- повышение тактико-технических характеристик за счет снижения массовых показателей узлов изделий при замене слоев герметика толщиной 1,5 мм на клеевой слой толщиной 0,2-0,3 мм;
- значительное сокращение сроков сборки в случае применения одного разработанного клея-герметика вместо склеивания конструкционным клеем (типа ВК-9) и последующей заделки клеевого шва герметиком типа УТ-34.

Этот клей-герметик опробован с положительным результатом на работоспособность при многократных циклических изменениях температуры от -60 (± 5)°C до +70 (± 5)°C. Конструкционный клей-герметик КГЭ-3/16 наряду с герметичностью клеевого шва обеспечивает высокую прочность склеивания в любых сочетаниях сталей и алюминиевых сплавов (в том числе с покрытиями), стеклопластиков и стеклонаполненных полиамидов.

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.

Клеи ЦМК-ТП и ЦМК-ТПЭ представляют собой высоковязкие пасты, которые готовятся перед применением из трех компонентов, отверждаются при нормальных условиях без усадки с образованием мелкопористой структуры. По минимальным показателям газовыделения при вакуумно-тепловом воздействии клеев ЦМК-ТП соответствует ГОСТ Р 50109-92.

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, пластиков, 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 $20-25^{\circ}\text{C}$ происходит в течение 3-5 ч, полное отверждение – в течение 18 ч. В отвержденном состоянии мастика имеет плотность $\sim 2,2 \text{ г/см}^3$, работоспособна в интервале температур от -196 до $+200^{\circ}\text{C}$ 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 $+20^{\circ}\text{C}$ через 3 часа после склеивания. Клеи готовятся непосредственно перед применением из трех составляющих и при температуре $18-25^{\circ}\text{C}$ 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.

Было замечено, что прочность при сдвиге образцов клеевых соединений для обоих клеев через 2, 7, 10 суток после склеивания алюминиевых сплавов не уменьшалась, а возрастала, и в процессе их дальнейшей выдержки не наблюдается повышение хрупкости. У традиционных быстроотверждающихся клеев за 2-3 часа после склеивания обычно наблюдается набор прочности при сдвиге до не менее 10 МПа, а через 2-3 суток прочность при сдвиге снижается до

6-7 МПа вследствие доотверждения полимерной матрицы клея, приводящее к повышению его жесткости и охрупчиванию.

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. В результате этого трудоемкость технологического процесса склеивания снижается по сравнению с фенольно-каучуковыми клеями ~ на 40%, повышается культура производства, уменьшаются пожароопасность и загрязнение окружающей среды за счет исключения выделения паров растворителей, значительно улучшаются условия труда. Высокопрочные пленочные клеи применяют в наиболее нагруженных и ответственных агрегатах планера для склеивания сотовых и слоистых конструкций из металлов и полимерных композиционных материалов. 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. Режимы отверждения вспенивающихся клеев аналогичны режимам отверждения высокопрочных пленочных клеев, что позволяет изготавливать агрегаты с применением как основного высокопрочного, так и вспенивающегося клея за одну технологическую операцию.

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]:

- непроклеи - 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) напряжениях, возникающих при отверждении клея, из-за несоблюдения режима склеивания, больших перепадов температуры при термообработках или в условиях эксплуатации, воздействия воды, локальных ударных нагрузок (Рис.1.4).

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.1.5).

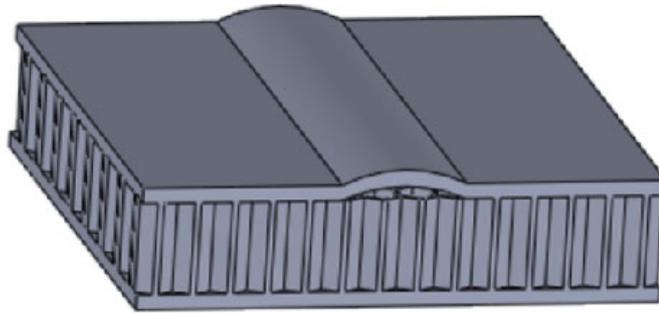


Рисунок 1.4 – Схематическое изображение макроскопического отслоения алюминиевых сот от обшивки сотовой (сэндвичевой) конструкции [18].

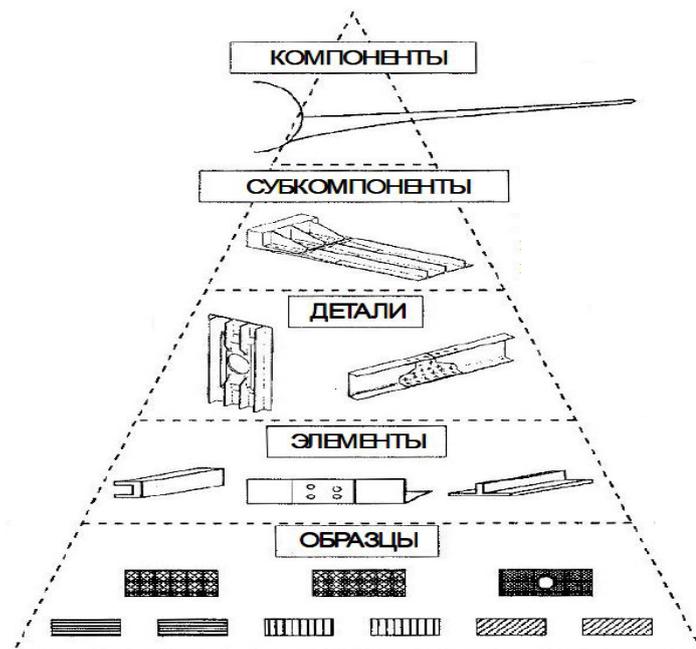


Рисунок 1.5 - Обобщенная многоуровневая пирамида расчетно-экспериментальной оценки и прогнозирования свойств конструкций АРКТ [19].

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.1.6).

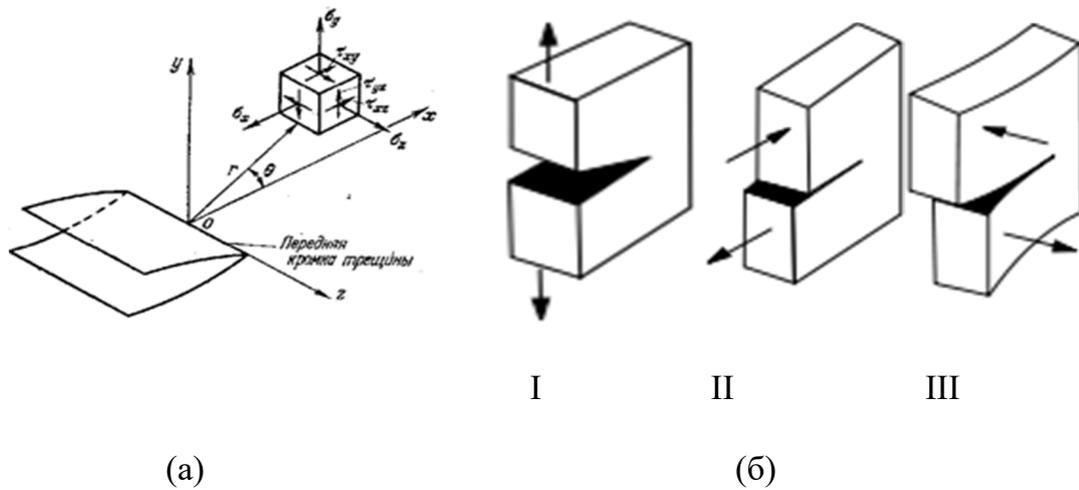


Рисунок 1.6 - Схема локальных напряжений у края трещины (а) и типы (моды) нагрузки на трещину и ее роста: I – при растяжении (раскрытии, отрыве); II – при сдвиге в плоскости; III – при сдвиге в антиплоскости (срезе) (б).

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 σ – глобальное напряжение в пластине; E - модуль Юнга материала.

При этом:

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

где γ_F – удельная работа на единицу площади поверхности.

Так как при росте трещины образуются две поверхности, то затрачиваемая работа удваивается. В случае идеально хрупкого тела γ_F соответствует его поверхностной энергии γ_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/м²]. 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; κ - константа, учитывающая эффект Пуассона: при плоском напряженном состоянии образца (в тонких пластинах) она равна 1, а при плоской деформации $1-\nu^2$, где ν - коэффициент Пуассона. Для бесконечной пластины с эллиптической трещиной $Y=2/\pi$. Для других конфигураций тел и трещин расчеты геометрического фактора Y значительно усложняются.

Инициирование (начало) 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 полувысотой h , толщиной b и длиной краевой трещины a с определением усилия P , прикладываемого к краям трещины, или предельного ее раскрытия Δ (рис.1.7).

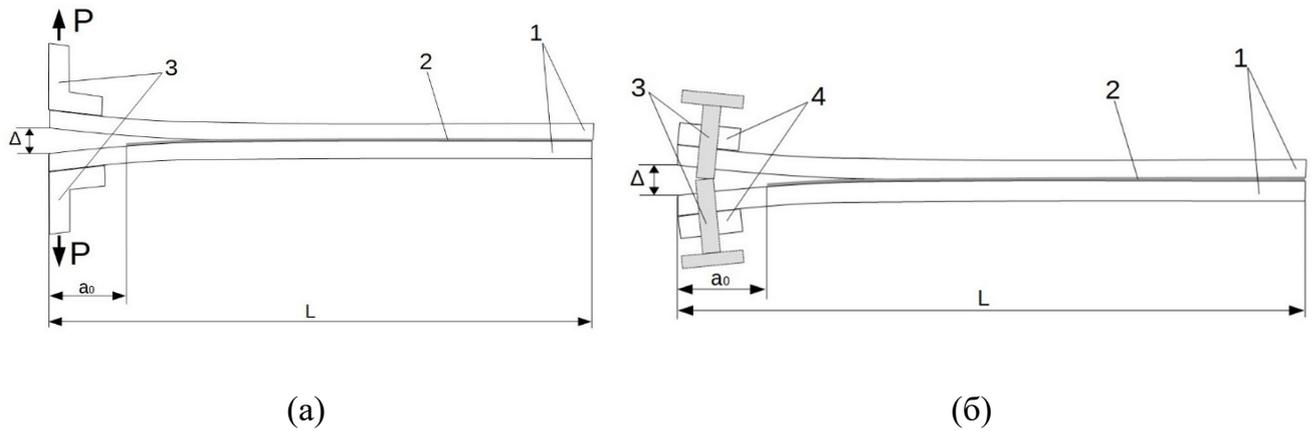


Рисунок 1.7 - Схематическое изображение образцов в виде двухконсольной балки (ДКБ) с концевой трещиной, нагружаемой по моде I усилием P

(а) и раскрытием Δ (б).

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

$$C = \Delta / P \quad (1.6)$$

где P - сила, действующая вдали от кончика трещины в направлении, перпендикулярном ее основной оси x ; Δ - глобальное раскрытие трещины в точках приложения силы, a - длина краевой трещины:

$$G_I = \frac{P^2}{2b} \frac{dC}{da} = \frac{\Delta^2}{2b} \frac{1}{C^2} \frac{dC}{da} \quad (1.7)$$

где b - толщина образца. При этом задавать можно или силу P , или раскрытие трещины Δ .

Для образца ДКБ $\Delta = \frac{8Pa^3}{Eb^3h^3}$; $C = \frac{8a^3}{Eb^3h^3}$; $\frac{dC}{da} = \frac{24a^2}{Eb^3h^3}$. Тогда при нагружении образца силой:

$$G_I = \frac{12P^2a^2}{Eb^2h^3} \quad (1.8a)$$

и раскрытием трещины:

$$G_I = \frac{3\Delta^2 E h^3}{16a^4} \quad (1.8б)$$

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 (1.8a) или по предельному глобальному раскрытию трещины $\Delta=\Delta_C$ (при монотонном раскрытии) по уравнению (1.8б). 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 (1.8a) принимает вид:

$$G_I = \frac{4P^2}{Eb^2} \left(\frac{3a^2}{h^3} + \frac{1}{h} \right) \quad (1.8в)$$

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 трещинодвижущей силы используется величина потока энергии через произвольный замкнутый контур, окружающий вершину трещины (J -интеграл, или J -параметр), критическое значение которого (J_c) соответствует началу роста трещин и характеризует трещиностойкость материала.

В случае псевдохрупких 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 трещинодвижущих 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. Для характеристики локального ослабления или упрочнения материала при росте трещины экспериментально определяют так называемые R -кривые - зависимости предельного сопротивления росту трещины (G_{IC}) от ее длины в момент инициирования роста. При этом в зависимости от характера и степени изменения локальной прочности материала при развитии неупругой зоны может наблюдаться ступенчатый (скачками) или стабильный (с постоянной конечной скоростью) критический рост 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 σ_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:

$$r_y = \left(\frac{G_I E}{2\pi \sigma_y^2} \right) \quad (1.9)$$

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 σ при плоском напряженном состоянии, способном к деформациям с пределом

текучести σ_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 Δa_y , с равномерным распределением сил сцепления (когезионного связывания), равных пределу текучести материала σ_y . Длина пластической зоны при нагрузке до критической рассчитывается по формуле:

$$\Delta a_y = \frac{\pi K_{IC}^2}{8 \sigma_y^2} = \frac{\pi G_{IC} E}{8 \sigma_y^2} \quad (1.10a)$$

А ее раскрытие δ в поперечном направлении (перпендикулярном плоскости трещины) – по формуле:

$$\delta_C = \frac{K_{IC}^2}{\sigma_y E} = \frac{G_{IC}}{\sigma_y} \quad (1.10б)$$

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 (Рис.1.8а).

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_{K3} можно пользоваться методами механики сплошных сред, в том числе ЛУМР.

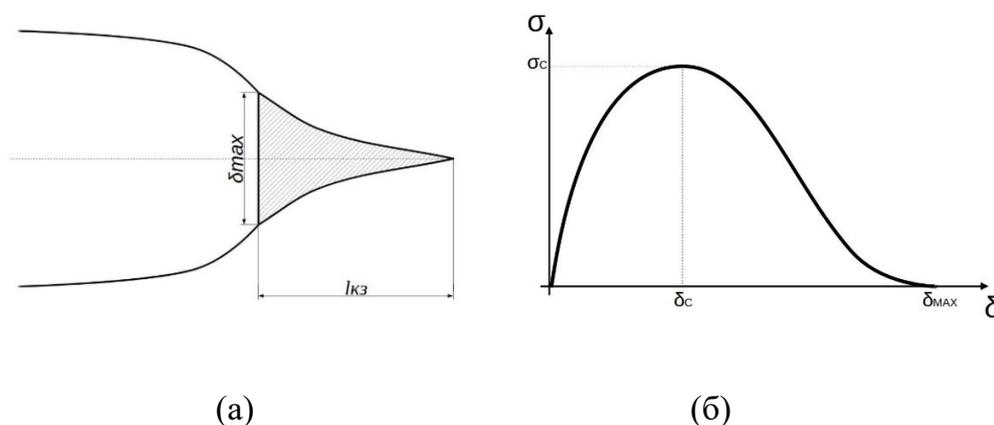


Рисунок 1.8. Схема общего вида трещины, нагружаемой по моде I , с когезионной зоной (КЗ) длиной l_{K3} у ее кончика (а) и локальная диаграмма ее разрушения, т.е. зависимость локального напряжения σ от деформации (раскрытия зоны) δ как ее экспоненциальный закон (ЗКЗ) (б)

2. Форма КЗ при сечении ее плоскостью, нормальной к контуру трещины, и докальная 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) в виде (см. рис.1.8б). 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:

$$\sigma_C \approx \frac{E}{\pi} \approx \sqrt{\frac{E\gamma_T}{b}} \quad (1.11)$$

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

- предельное упругое (δ_C) и максимальное (δ_{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:

$$\gamma_F = \int_0^{\delta_{max}} \sigma(\delta) d\delta \quad (1.12a),$$

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):

$$G_{IC} = 2\gamma_F = 2 \int_0^{\delta_{max}} \sigma(\delta) d\delta \quad (1.12b)$$

Так как в ЛУМР интенсивность высвобождения упругой энергии (G_I) вплоть до ее критического значения характеризует нагрузку на трещину, или трещиноподвижную силу (ТДС), то из уравнения (1.12б) следует, что производная G_I по раскрытию КЗ дает ЗКЗ:

$$\frac{dG_I}{d\delta} = \sigma(\delta) \quad (1.13a)$$

В случае экспоненциальной формы ЗКЗ эта производная равна [26-27]:

$$\sigma(\delta) = \sigma_C \frac{\delta}{\delta_{max}} e^{-\frac{\delta}{\delta_{max}}} \quad (1.13b),$$

где δ – текущее раскрытие КЗ, δ_{max} – ее предельное раскрытие (см. рис.1.8 б), e – основание натурального логарифма, равное 2,71.

Критические параметры ЗКЗ (σ_C , δ_C , δ_{max} и G_{IC}) при этом связаны между собой соотношениями, соответствующими экспоненциальному закону:

$$\delta_C = \delta_{max}/e \quad (1.14 a)$$

$$G_{IC} = 2\gamma_F = \sigma_C \cdot \delta_{max} \quad (1.14 б)$$

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

Важное значение имеет еще один критический параметр КЗ – ее длина ($l_{КЗ}$), определяемая в модели Баренблатта следующим соотношением:

$$l_{КЗ} = \frac{\pi k E G_{IC}}{8 \sigma_c^2} \quad (1.14в),$$

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 ν – коэффициент Пуассона.

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 [28-32]:

$$t_p = \tau_0 \exp \left[\frac{U_0 - \gamma \sigma}{RT} \right] \quad (1.15),$$

где t_p – статическая долговечность (время до разрушения); τ_0 – временная константа порядка периода тепловых колебаний атомов; U_0 – энергия активации разрыва связей; γ – константа материала, характеризующая распределение нагрузки на связи и зависящая от структуры полимера; σ – 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 $t_p = \int_{a_0}^{ac} da/V$ (1.16а), где $V=(da/dt)$;

- при циклическом нагружении: $N_p = ft_p = \int_{a_0}^{ac} da/V$ (1.16б), 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.1.9).

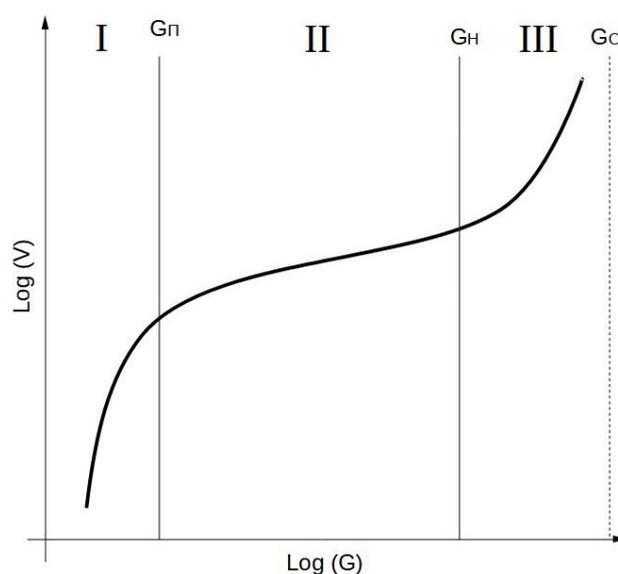


Рисунок 1.9 - Обобщенное схематическое изображение $G-V$ диаграммы в координатах $lgV — lgG$: I - область медленного докритического подрастания трещины, G_{II} – пороговое значение нагрузки на трещину; II – линейная область стабильного подрастания, G_{III} – нагрузка начала достаточно быстрого подрастания трещины; III - область быстрого роста, G_C – критическая нагрузка на трещину.

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):

$$V = A \cdot G_I^n \quad (1.17),$$

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

Интегрирование этого участка диаграммы дает следующие соотношения для расчета t_p и N_p . По параметрам уравнения (1.17) для образцов в виде полубесконечной пластины с трещиной долговечность (t_p и N_p) может быть рассчитана следующим образом:

$$t_p = \frac{N_p}{f} = \frac{(G_{I0}^{1-n} - G_{IC}^{1-n})}{A(n-1)\sigma_0 Y} \quad (1.18),$$

где: f – частота циклического нагружения, G_{I0} и G_{IC} – начальная докритическая нагрузка на трещину и трещиностойкость соответственно; σ_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 [33] 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 [34].

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 методика VCCT трещина помещается вдоль интерфейса между одним и тем же материалом или между двумя материалами. Можно задавать составные трещины (Multiple cracks).

Порядок решения задачи в методе VCCT [35]:

Шаг 1. Создание конечно-элементной модели с траекторией роста трещины. Выполняется стандартная процедура нелинейного решения и генерации конечно-элементной модели с заданием настроек решателя - нагрузок и граничных условий. Траектория предопределяемого роста трещины (predefined crack path) – это дискретизация пути роста трещины интерфейсными элементами и создание соответствующих компонентов (рис.1.10).

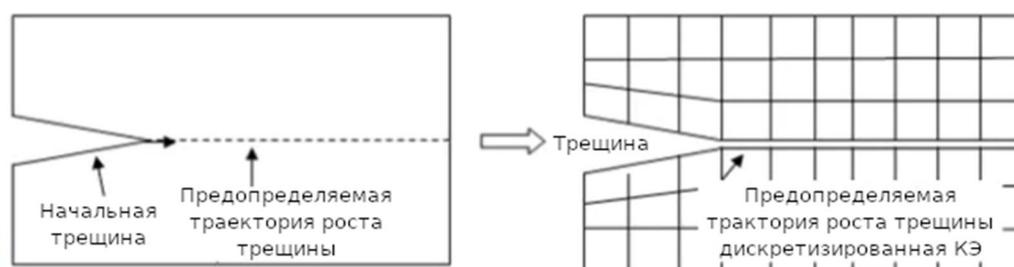


Рисунок 1.10. Предопределяемая траектория роста трещины при моделировании на основе интерфейсных элементов [35].

Шаг 2. Вычисление параметра интенсивности высвобождения энергии (Energy-Release Rate). Для вычисления этого параметра вводится команда CINT,TYPE,VCC.

Шаг 3. Выполнение анализа роста трещины (Crack Growth Calculation). Анализ запускается после фазы вычисления напряжений в узлах расчетной модели. Для этого необходимо задать необходимый набор параметров роста

трещины (crack growth set): траекторию роста трещины, критерий разрушения и параметры решателя (crack growth solution controls). Команда CGROW задает все необходимые параметры вычисления процесса роста трещины.

При моделировании роста трещин методом VCCT раскрытие трещины количественно измеряется суммой длин интерфейсных элементов, которые открыты как показано на рис.1.11. для 2D и 3D моделей.

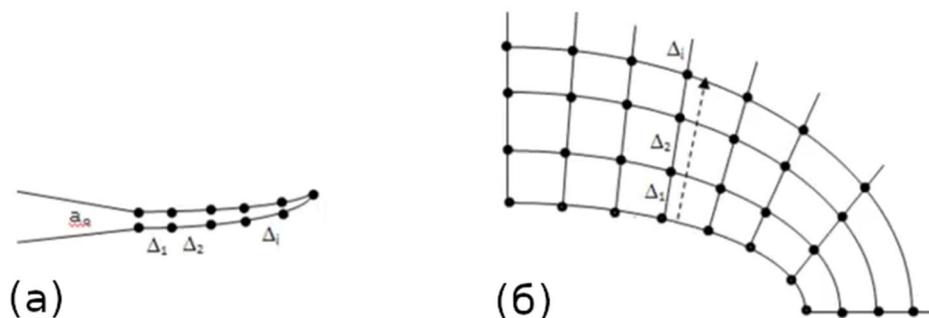


Рисунок 1.11. Схематическое изображение раскрытия трещины в 2D и 3D моделях [35].

При моделировании роста трещины методом VCCT для определения начала появления трещины и последующего ее развития необходимо определить критерий разрушения. В рамках ЛУМР критерий разрушения обычно представляет собой функцию критических интенсивностей высвобождения энергии разрушения и их фактических (докритических) значений при нагружении трещины по моде I (G_{IC}, G_I), II (G_{IIC}, G_{II}) и III (G_{IIIC}, G_{III}) соответственно:

$$f=f(G_{IC}, G_{IIC}, G_{IIIC}, G_I, G_{II}, G_{III}, \dots)(1.19)$$

Разрушение наступает, когда значение критерия разрушения удовлетворяет неравенству: $f \geq f_c$, где f_c – предельное значение критерия (fracture criterion ratio): его рекомендуемое значение от 0.95 до 1.05; по умолчанию оно равно 1.0.

Моделирование методом VCCT наиболее часто применяется для оценки межслоевой трещиностойкости слоистых ПКМ с использованием критерия Бензегга-Кенана (*Benzeggagh-Kenane*). Данный критерий [36] описывается следующим выражением:

$$f = \frac{G_T}{G_I^C + (G_{II}^C - G_I^C) \left(\frac{G_{II} + G_{III}}{G_T} \right)^n} \quad (1.20)$$

где $G_T = G_I + G_2 + G_3$

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 [37], 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).

Сегодня метод МКЗ/МКЭ может быть реализован в следующих программных пакетах - ANSYS Mechanical, MSCMARC; ABAQUS, MSCPatrani и др. Ниже кратко изложены возможности реализации этого метода в пакете ANSYS применительно к решению задач расслоения.

В пакете ANSYS существует два метода решения задач расслоения [35]:

1. На основе специальных элементов серии INTER20x с использованием модели МКЗ;
2. На основе контактных элементов серии 17x с типом контакта bonded и моделью CZM.

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 (когезионные или интерфейсные элементы – КЭ или ИЭ соответственно), которые располагаются между слоями материала в плоскости роста трещины как показано на рис.1.12 (а).

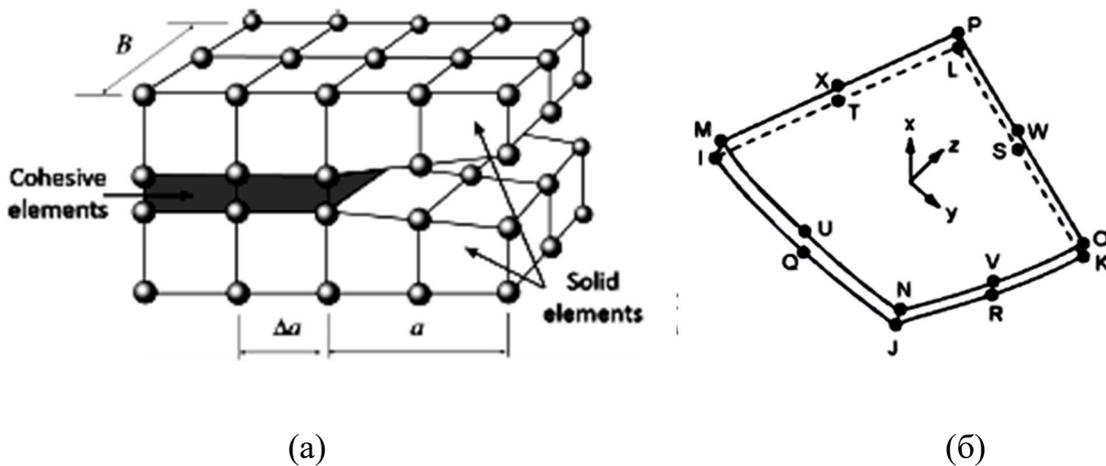


Рисунок 1.12. Расположение в плоскости роста трещины (а) и вид (б) когезионных элементов [38].

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. 1.12б). Начальная толщина интерфейсного элемента равна нулю (слои материала в начальный момент времени не расслаиваются);

- Точки интегрирования располагаются на срединной плоскости элементов;
- Для элементов второго порядка в начальный момент времени при нулевой толщине интерфейсного элемента на серединах ребер нет дополнительных узлов в направлении расслоения.

На рис. 1.13 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 (planestress, 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).

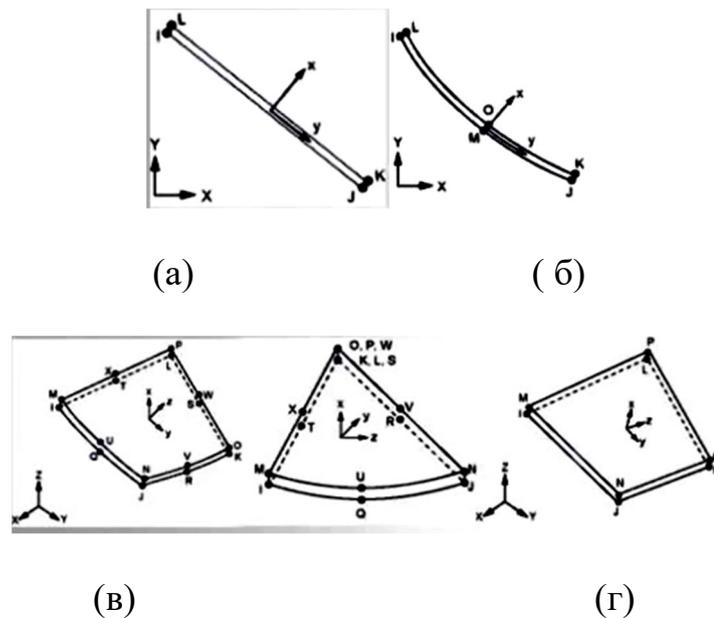


Рисунок 1.13. 2D (а,б) и 3D (в,г) интерфейсные элементы [102].

Для генерации сетки интерфейсных элементов INTER20x применяется команда CZMESH. Команда CZMESH работает с узлами твёрдотельных 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 твёрдотельных элементов как показано на рис. 1.14 [102]:

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

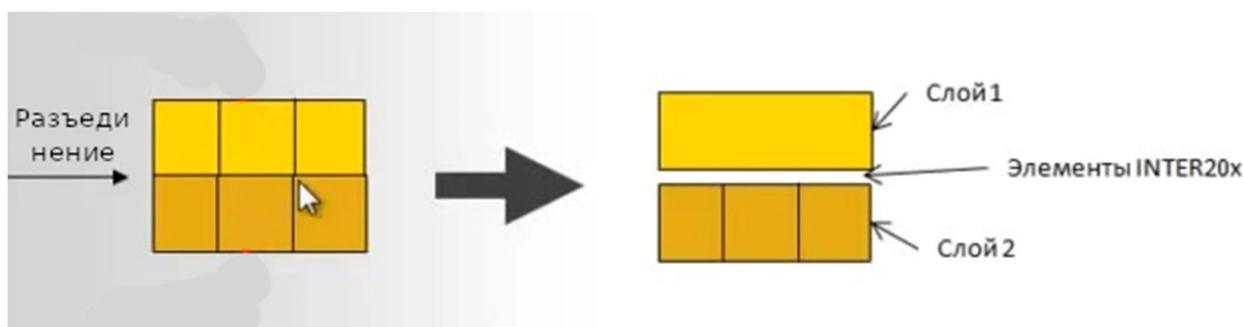


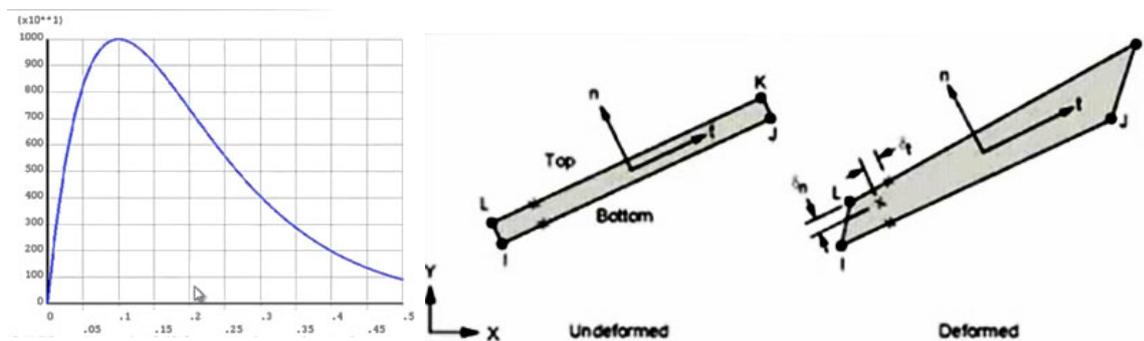
Рисунок 1.14. Схема формирования интерфейсных элементов [35].

В методе МКЗ/МКЭ используются следующие команды [35]:

- 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 TB,CZM,,,,EXPO для расслоения по нормали (по моде I) .

На рис. 1.15 приведен графический вид экспоненциального закон расслоения (а) и визуальное изображение приращения размеров области

расслоения (separation distances), которое вычисляется на основе точек Гаусса по срединной плоскости элемента (б).



(а)

(б)

Рисунок 1.15. Зависимость напряжений от величины раскрытия в экспоненциальном ЗКЗ (а) и приращение размеров области расслоения (б) [35].

В процессе вычислений (при расслоении по нормали) необходимо ввести два параметра материала в команде TB,CZM [102]:

C1: Максимальное нормальное напряжение раскрытия слоев σ_C ;

C2: Величина деформации по нормали к поверхности – раскрытие δ_C при напряжении σ_C , когда отсутствует сдвиг слоев.

Вычисление работы раскрытия слоев по нормали ϕ_n осуществляется по формуле:

$$\phi_n = e \cdot \sigma_C \delta_C \quad (1.21)$$

где e – основание натурального логарифма.

Экспоненциальный ЗКЗ, т.е. зависимость напряжения σ от раскрытия δ при моде нагружения I (см. рис. 1.15 а) определяется по формуле 1.13б.

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 1.2.

Таблица 1.2. Параметры модели с экспоненциальным ЗКЗ.

Параметр	Обозначение	Размерность
C1	σ_c	Па
C2	δ_{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, δ_n , δ_t	Задание свойств материала при T=100.0
ТВTEMP,200.0	Задание второй температуры
ТВDATA,1,cmax, δ_n , δ_t	Задание свойств материала при T=200.0

Визуализация результатов расчета на элементах INTER20х достигается просмотром нормальных напряжений в /POST1 или /POST26 SS,XиSS,XY (SS,XZ) и нормальных перемещения в /POST1 или /POST26 SD,XиSD,XY (SD, XZ). Для вывода изображения используются команды PLxSOL, PRxSOL или ESOL. На рис. 1.16 приведен пример распределения нормальных напряжений на элементах INTER20х, где разрушенные элементы - с нулевыми напряжениями.

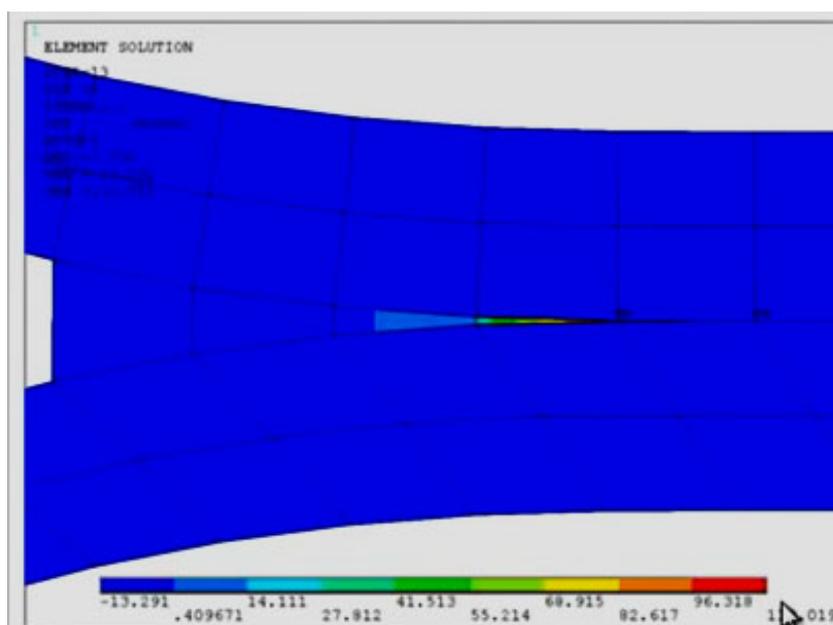


Рисунок 1.16. Распределение нормальных напряжений при моделировании расслоения в PostProcANSYS [35].

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.

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.

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, 30, 39 - 44]. 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 [45, 46].

В таблице 1.3 обобщены средние значения критических параметров трещиностойкости (G_{IC}), температуры стеклования (T_c) клеевого слоя и его поверхностной энергии (γ_p) после разрушения образцов клеевых соединений пластин Al и трех типов клеев после 12 лет экспозиции в космосе, наземных образцов-аналогов а также исходных образцов сразу после их получения.

Таблица 1.3 Средние значения критических параметров трещиностойкости (G_{IC}), температуры стеклования (T_c) клеевого слоя и его поверхностной энергии (γ_p) после разрушения образцов клеевых соединений пластин Al и трех типов клеев после 12 лет экспозиции в космосе, наземных образцов-аналогов а также исходных образцов после их получения

Образцы КС	Клей К-300			Клей ЭПК-1			Клей ВК-9		
	G_{IC} , Дж/ м ²	T_c , °С	γ_p , мДж/м ²	G_{IC} , Дж/м ²	T_c , °С	γ_p , мДж/ м ²	G_{IC} , Дж/ м ²	T_c , °С	γ_p , мДж/м ²
Исходные	335	60	29,8	390	59	31,2	330	40	24,7
Экспонированные в космосе	110	60	32,2	220	57	29,1	100	31	28,9
Образы – аналоги	155	33	29,8	190	58	14,9	140	56	22,6

Как видно из приведенных данных наибольшее снижение энергетического параметра трещиностойкости (G_{IC}) наблюдается 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.

Полученные данные о температурах стеклования свидетельствуют о ее увеличении: наземные образцы – аналоги - образцы экспонированные в космосе, что, очевидно, связано с увеличением густоты полимерной сетки клея, вызванном влиянием облучения в космосе и в результате постэкспозиционного дооблучения. Поверхностная энергия изменяется мало, причем главным образом за счет возрастания дисперсионной составляющей при некотором уменьшении полярной составляющей поверхностной энергии. Вероятнее всего это свидетельствует о том, что в образцах, экспонированных в космосе, из клеевых слоев удаляются полярные летучие компоненты, в первую очередь влага. Результаты эксперимента «Компласт» позволили установить возможность эксплуатации космических конструкций с исследованными ККС при длительном воздействии факторов космического пространства.

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 [47] 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 ($P-\delta$). При моделировании с использованием различных значений G_{IC} и σ_C и трапецеидального ЗКЗ было установлено, что восходящая часть кривой $P-\delta$ зависит от когезионной прочности σ_C , а после максимальной нагрузки – от G_{IC} (рис. 1.17).

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 (+-8%) между экспериментальными данными и результатами моделирования (рис. 1.18).

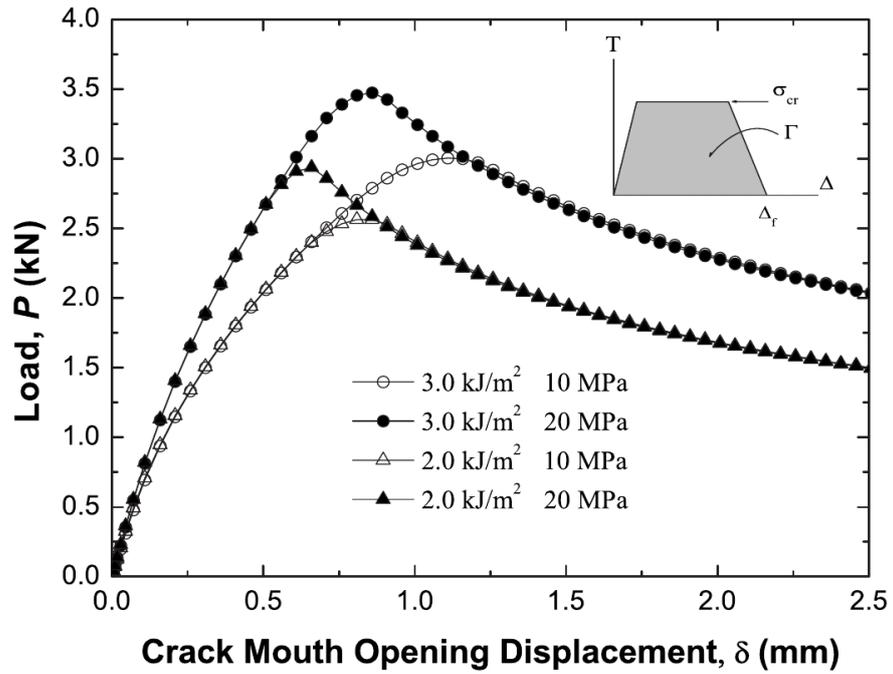


Рисунок 1.17. Полученные с использованием МКЗ кривые P - δ , соответствующие различным значениям энергии разрушения и когезионной прочности [47].

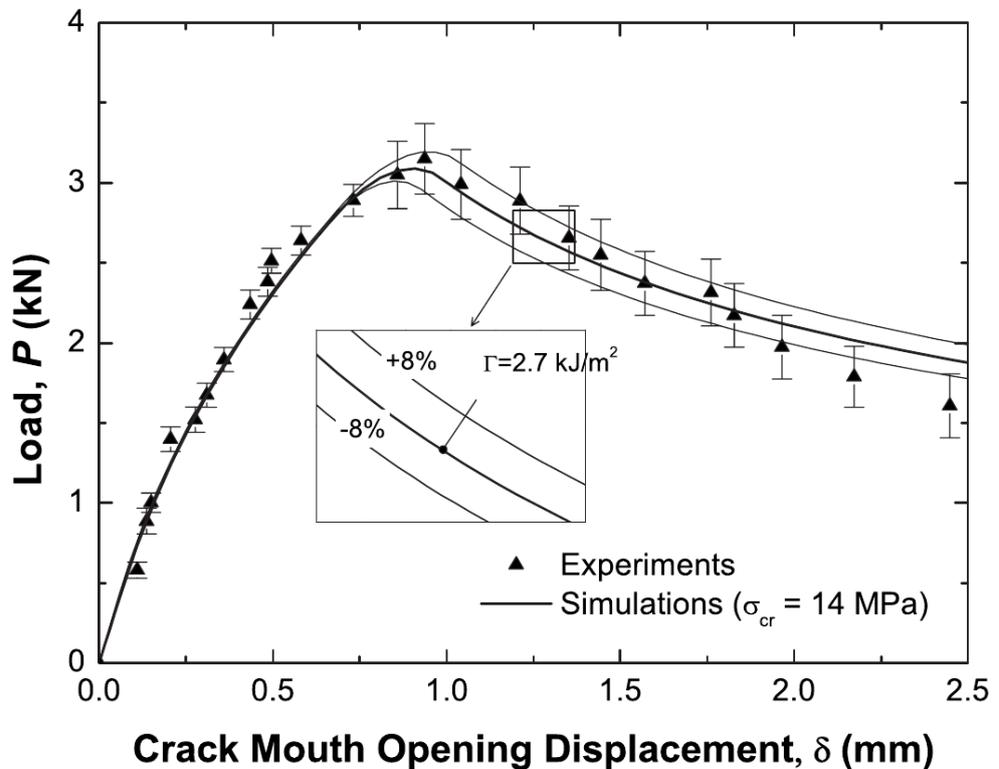
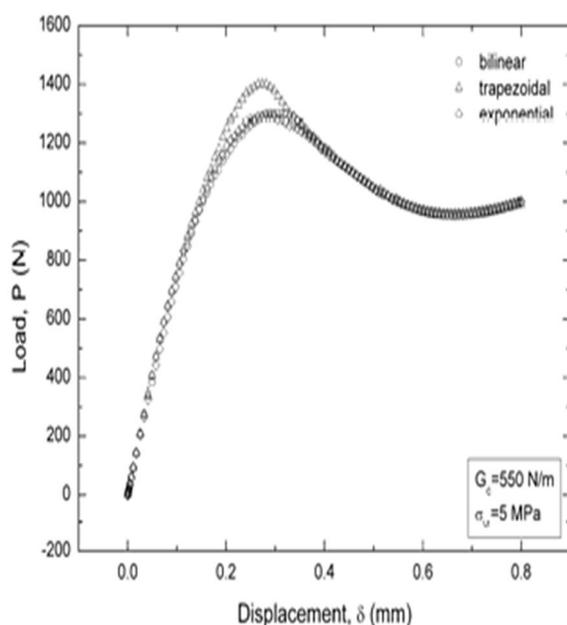
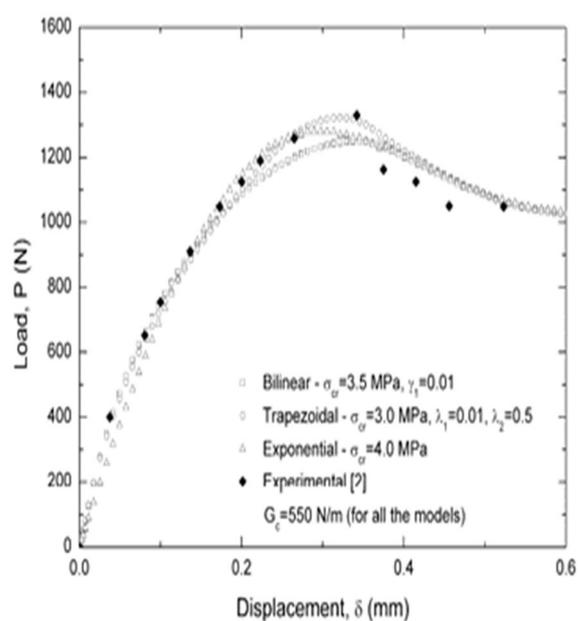


Рисунок 1.18. Сравнение экспериментальных данных и полученной моделированием методом МКЭ/МКЗ кривой P - δ при оптимальных значениях локальной прочности и работы разрушения КЗ [47].

Исследование влияния типа ЗКЗ (билинейного, трапецеидального и экспоненциального), проведенное в работе [48], 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. 1.19а-б).



(а)



(б)

Рисунок 1.19 – Кривые нагрузка–деформация, 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 σ_c и одинаковой G_c , с экспериментальными данными (б) [48].

Интересные исследования по оценке влияния коэффициента смещения 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, соединенный пленочным клеем Cytec FM 300 M [49]. Целью работы было определение критерия, который учитывает зависимость энергетического

параметра трещиностойкости от коэффициента смешения мод нагрузки. С этой целью были проведены экспериментальные оценки G_C для моды I, моды II и смешанного режима I/II с определенными соотношениями мод. Также как в работе [47], сравнивали экспериментально определенные кривые $P-\delta$ 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 [50, 51]. 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. 1.20 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].

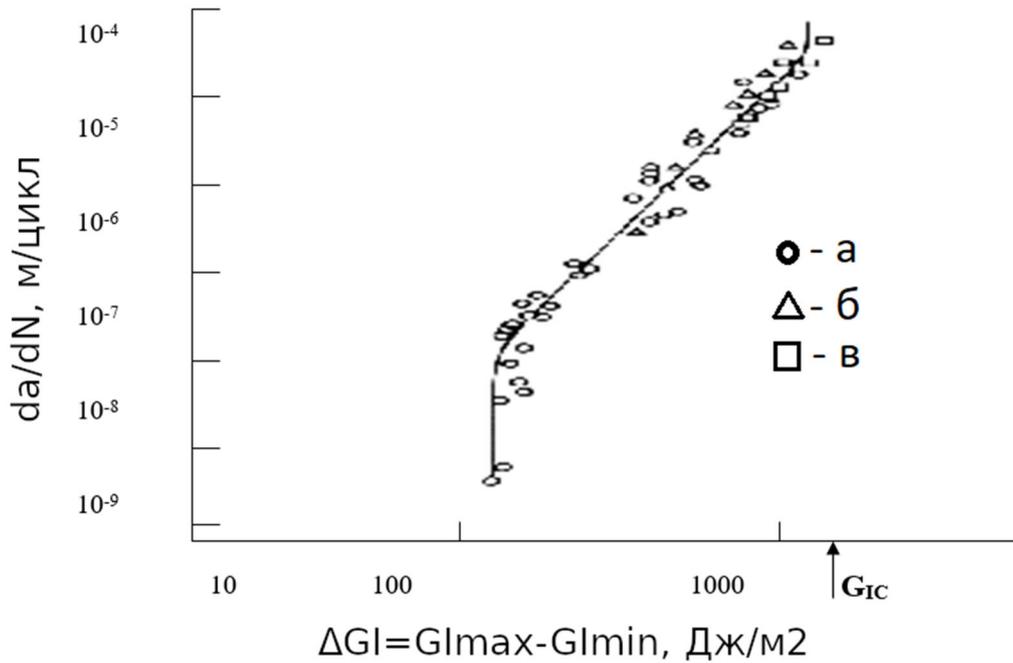


Рисунок 1.20 – Экспериментально полученная усталостная G - V диаграмма адгезионного соединения алюминиевого сплава и эпоксидного адгезива при длительном динамическом нагружении с частотой 3 Гц (а), 0,25 Гц (б), и 0,01 Гц (в) и влажности 20 % [21].

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 - Δ), 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 ($dG_I/da > 0$), т.е. любое подрастание нагруженной трещины приводит к резкому возрастанию ТДС и к быстрому росту трещины [52, 53].

При задании квазистатической нагрузки разведением концов трещины на заданную величину Δ 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 [44] 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. 1.21.

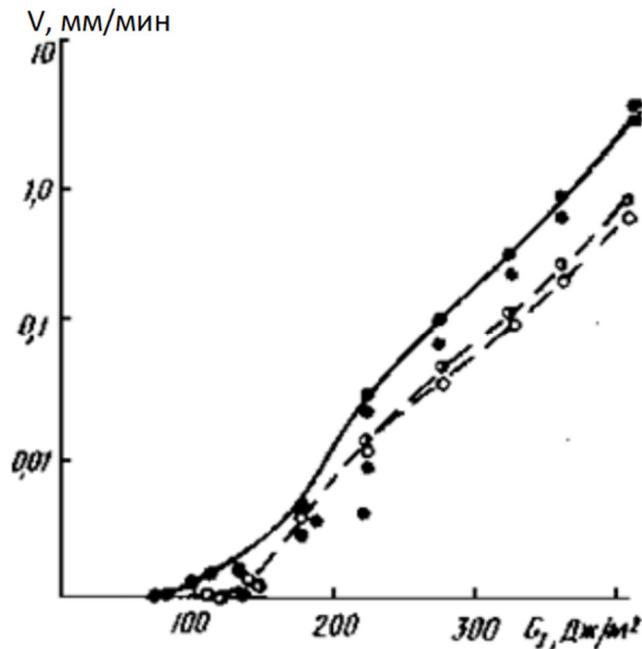


Рисунок 1.21. G - V диаграмма клеевого соединения стеклокомпозита и стали 3 после предварительной выдержки на воздухе 10 дней (сплошная линия) и после предварительной выдержкой 10 дней на воздухе и 30 дней в воде (штриховая линия) [44].

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.

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 [45, 46]. 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 (рис.1.22).

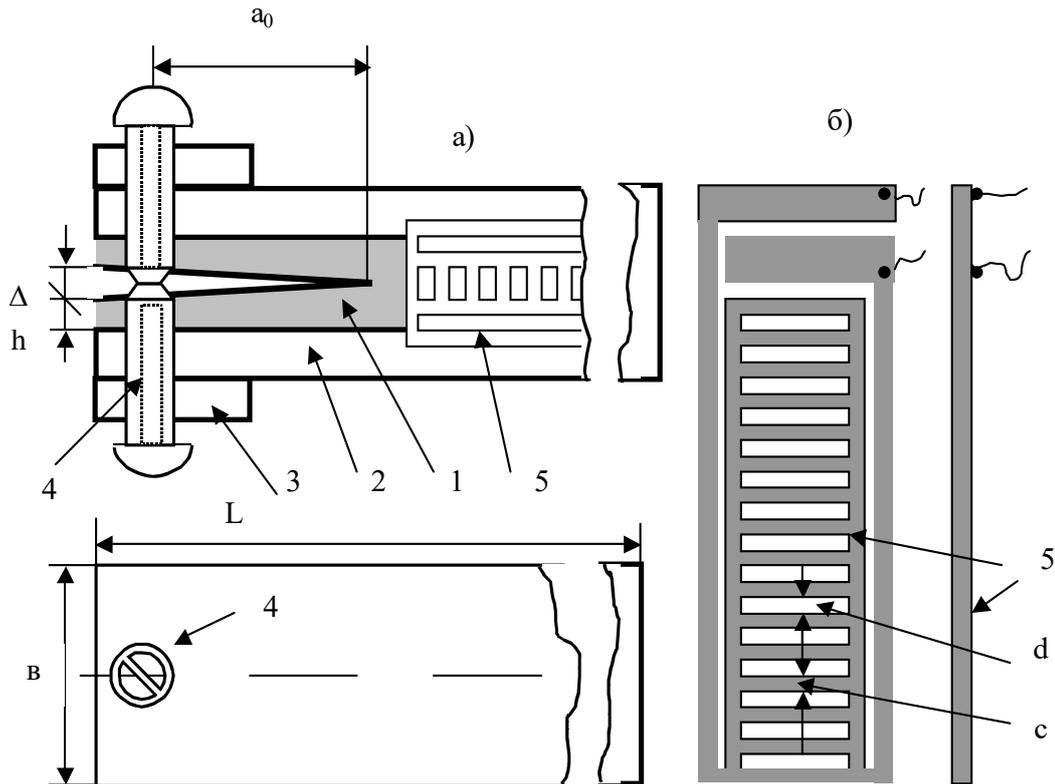


Рисунок 1.22 - Схема конструкции узла раскрытия трещины в образце ККС типа ДКБ (а) и вид датчика сопротивления для дистанционного контроля длины прорастания трещины (клеевой слой; 2 – склеиваемая пластина; 3 – опорная накладка для винтов; 4 – расклинивающий винт; 5 – датчик сопротивления, наклеиваемый на торцевую поверхность образца с трещиной).
Обозначения: a_0 – начальная длина трещины (10-20 мм); h – толщина склеиваемых пластин; b – ширина образца (20мм); L – длина образца (120 мм); c – ширина перемычки датчика (1 мм); d – ширина просвета между перемычками (0,4 мм).

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 1.4 приведены типы и характеристики образцов ККС алюминиевого сплава, использованных в эксперименте «КРТ», а на рис. 1.23 и в таблице 1.5 полученные для этих образцов $G-V$ диаграммы за 25 месяцев эксперимента и их параметры.

Таблица 1.4. Типы и характеристики образцов ККС алюминиевого сплава, использованных в эксперименте «КРТ».

№ п/п	Обозначение образца	Тип клевого соединения	Исходная длина трещины a_0 , мм	G_{IC} , Дж/м ²
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

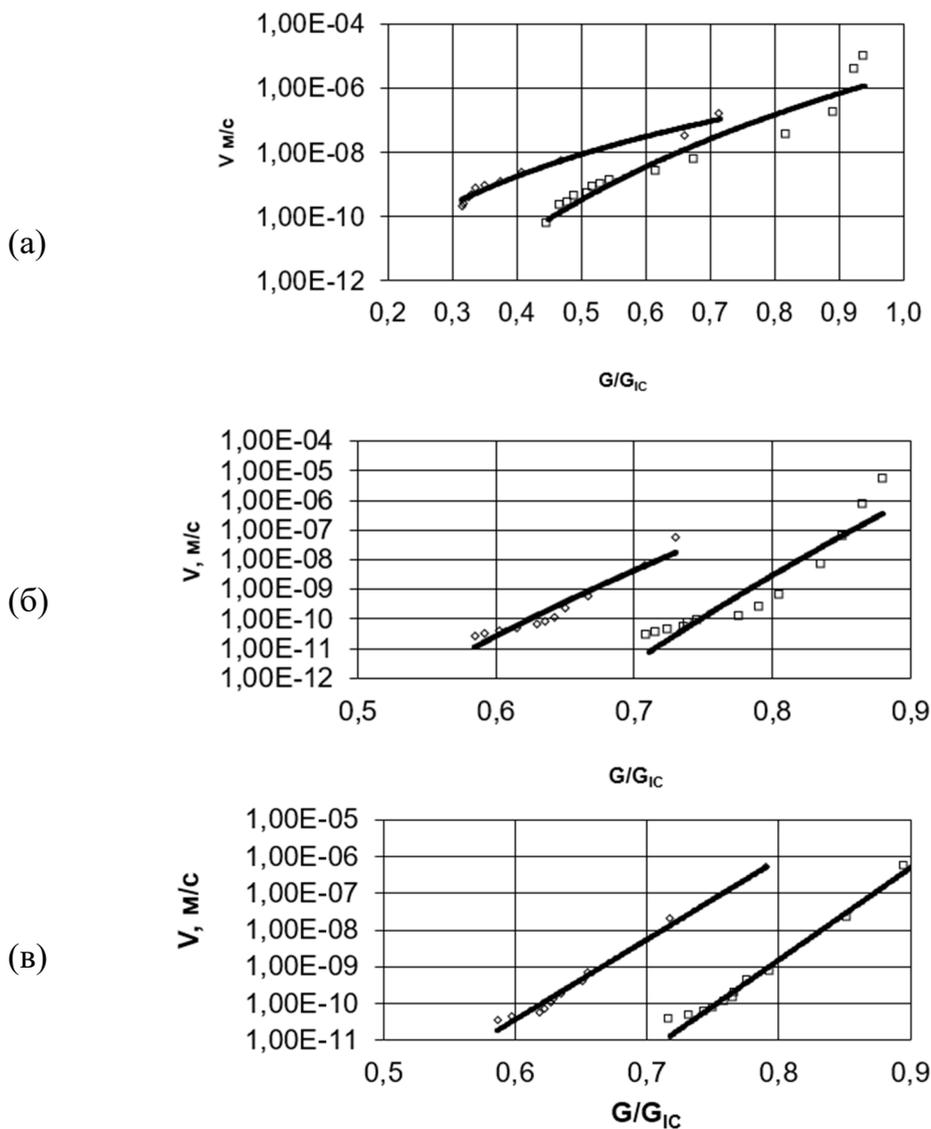


Рисунок 1.23 - G - V диаграммы в координатах скорость роста трещины – нормированная ТДС на нее (G – нагрузка на трещину, G_{IC} – критическая трещиностойкость) для образцов КРТ (\diamond), экспонированных в космосе в течение 25 месяцев: КРТ-4 (а), КРТ-8(б), КРТ-14 (в) и контрольных наземных образцов-аналогов (\square), испытанных в земных условиях [54, 52].

Таблица 1.5. 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, 55 - 59].

В качестве примера использования второго подхода может служить работа [60]. 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. 1.24).

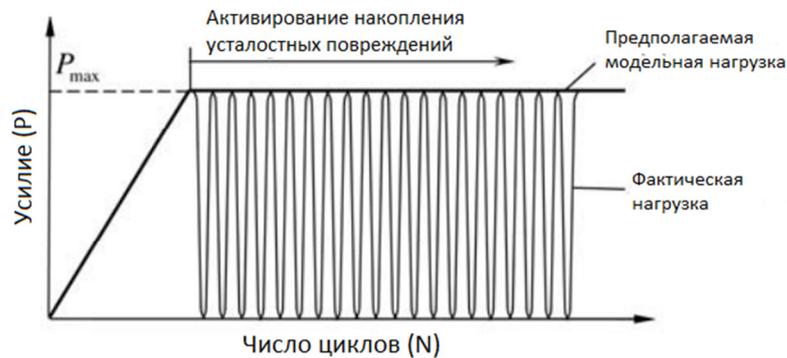


Рисунок. 1.24. Схема моделирования усталостного циклического нагружения в виде огибающей кривой.

Для расчёта параметра повреждаемости D , используется формула, связывающая его с максимальным раскрытием Δ_{max} расслоения (трещины), достигнутым за всю предысторию нагружения:

$$D = \frac{\Delta_C}{\Delta_{max}} \cdot \frac{\Delta_{max} - \Delta_0}{\Delta_C - \Delta_0} \quad (1.22)$$

Подставляя в формулу (1.22) уравнение Пэриса для описания поцикловой скорости роста дефекта, получают формулу (1.23), которая позволяет оценивать приращение параметра повреждения в рассматриваемом элементе e в зависимости от заданного увеличения числа циклов ΔN [60]:

$$dD^e(dN) = \frac{\Delta_C \cdot \Delta_0}{(\Delta_{max}^e)^2 \cdot l_{FPZ}} C \left(\frac{G_{max}^e}{G_C} \right)^{\frac{b}{1-R^2}} dN \quad (1.23)$$

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.1.25 и 1.26 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.1.25), 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. 1.26).

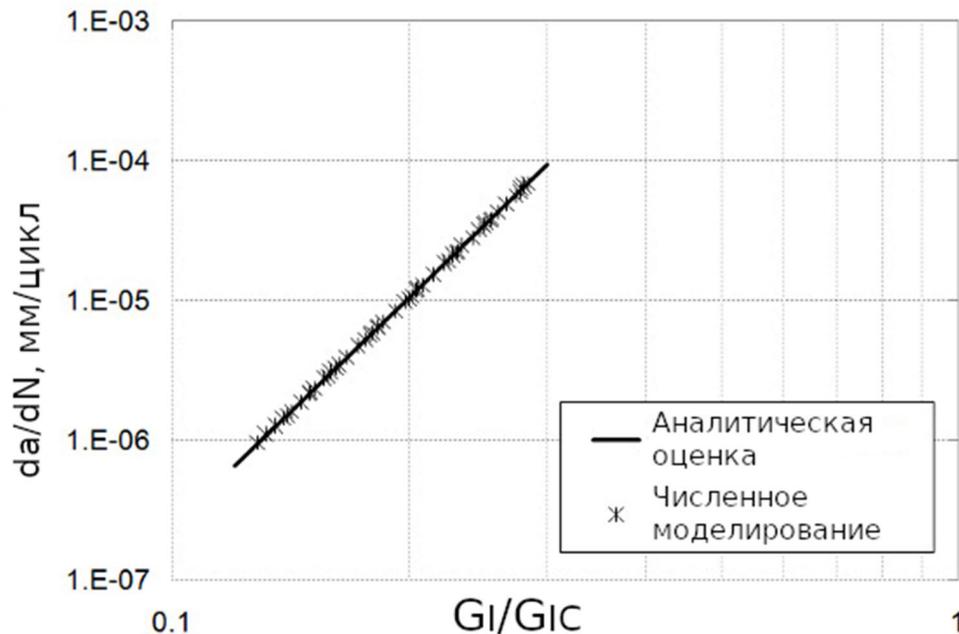


Рисунок 1.25 – Усталостная $G-V$ диаграмма образцов ККС тип ДКБ из алюминиевого сплава и эпоксидного клея, полученная аналитическим методом и численным моделированием каждого цикла нагружения [57].

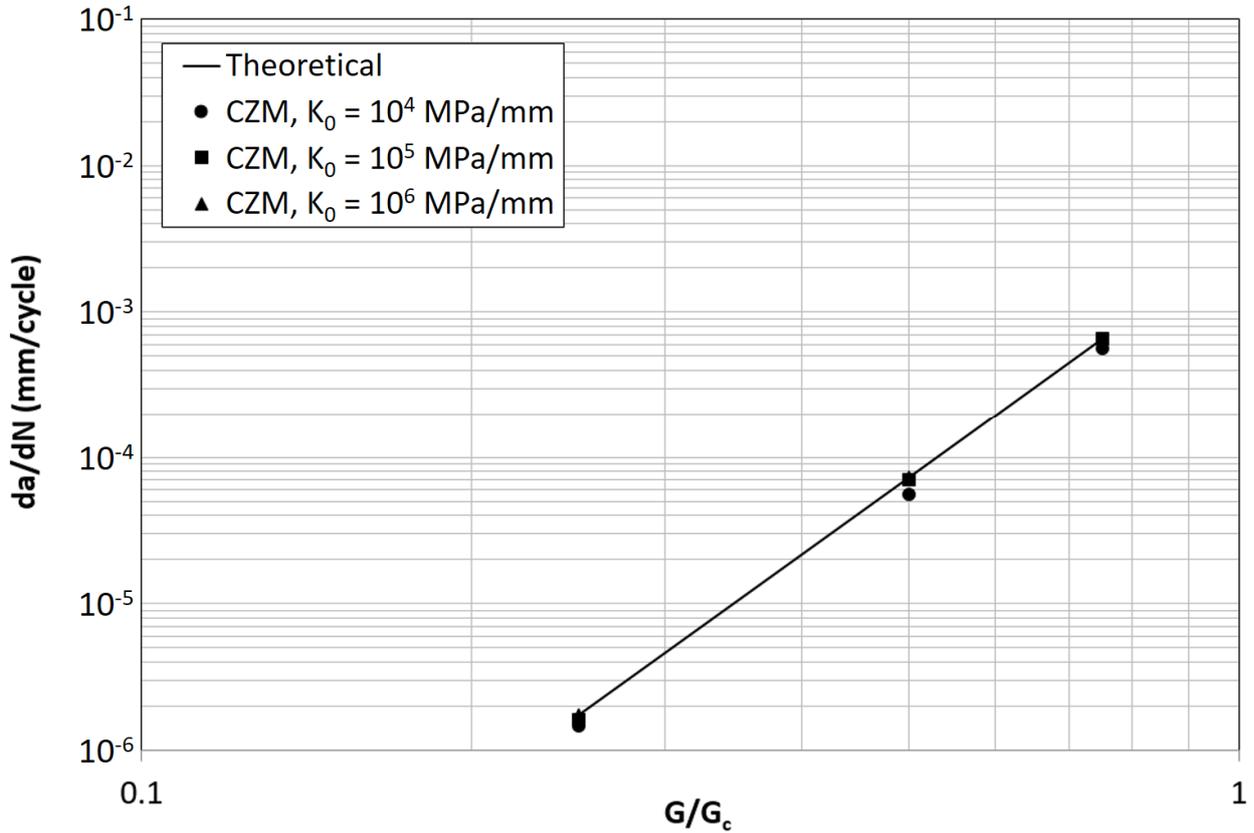


Рисунок 1.26 - Усталостная G – V диаграмма образцов ККС тип ДКБ из алюминиевого сплава и эпоксидного клея, полученная численным моделированием методом огибающей нагрузки при различных заданных значениях наклона линейного участка ЗКЗ (K_0) при одинаковом значении других его параметров ($G_c=0.26$ Н/мм, $\sigma_0=30$ МПа и $\delta_c=0.0173$ мм) и при перепаде нагрузки в цикле $\Delta G=0.06$ Н/мм [61].

Таким образом, анализ литературы показывает, 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. Моделирование докритического нагружения ККС активно проводится в условиях усталостного циклического нагружения, но, по литературным данным, ещё не применялось для условий длительной статической нагрузки. Поэтому задачи разработки проверки 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 достаточно актуальными.

2. Экспериментальная часть

2.1 Объекты и образцы

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.

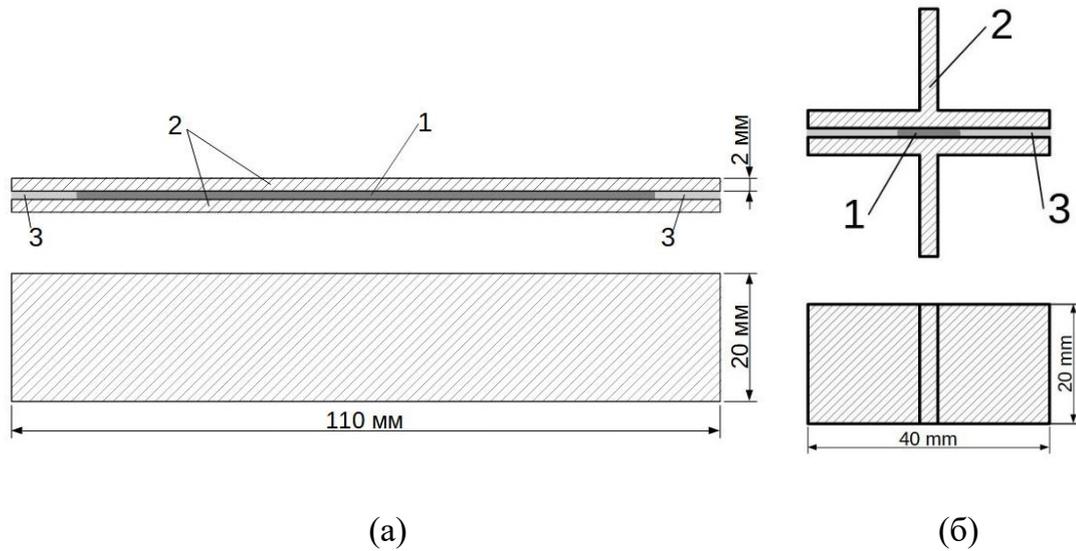


Рис. 2.1. Схематические изображения образцов клеевых соединений для испытаний на критическую и докритическую трещиностойкость (а) и на локальную прочность (б): 1 – клеевой слой, 2 - склеиваемые пластины, 3 – закладная фторопластовая плёнка.

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 течении 24 часов с последующей термообработкой при 120°C в течение 2 часов. На склеенные пластины для повышения их жесткости образом наклеивали дополнительные металлические пластины толщиной 5 мм.

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 $10 \times 10 \text{ мм}^2$ (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 Экспериментальные методы

2.2.1 Определение критического параметра трещиностойкости (G_{IC})

Для экспериментального определения критического параметра трещиностойкости G_{IC} образцов типа ДКБ трех типов ККС, описанных в подразделе 2.1, использовали стандартный метод [20, 62, 63]. К поверхности образцов на одном из краев, где расположена закладная пленка, приклеивали алюминиевые уголки для закрепления в захватах разрывной машины (рис. 2.2).



Рисунок 2.2 – 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 длину 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; Δ – раскрытие трещины). Далее полученные диаграммы обрабатывались и по ним определялась критическая нагрузка начала роста трещины – P_C .

На рисунке 2.3 показаны примеры кривых разрушения образцов в виде ДКБ для 3-х типов ККС.

Разрушение ККС происходит преимущественно по адгезионному механизму - расслаиванию по границе раздела субстрат-клеевая пленка с переходом от одной поверхности к другой (Рис.2.4).

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:

$$G_{IC} = \frac{4P_C^2}{Eb^2} \left(\frac{3a_0^2}{h^3} + \frac{1}{h} \right) \quad (2.1)$$

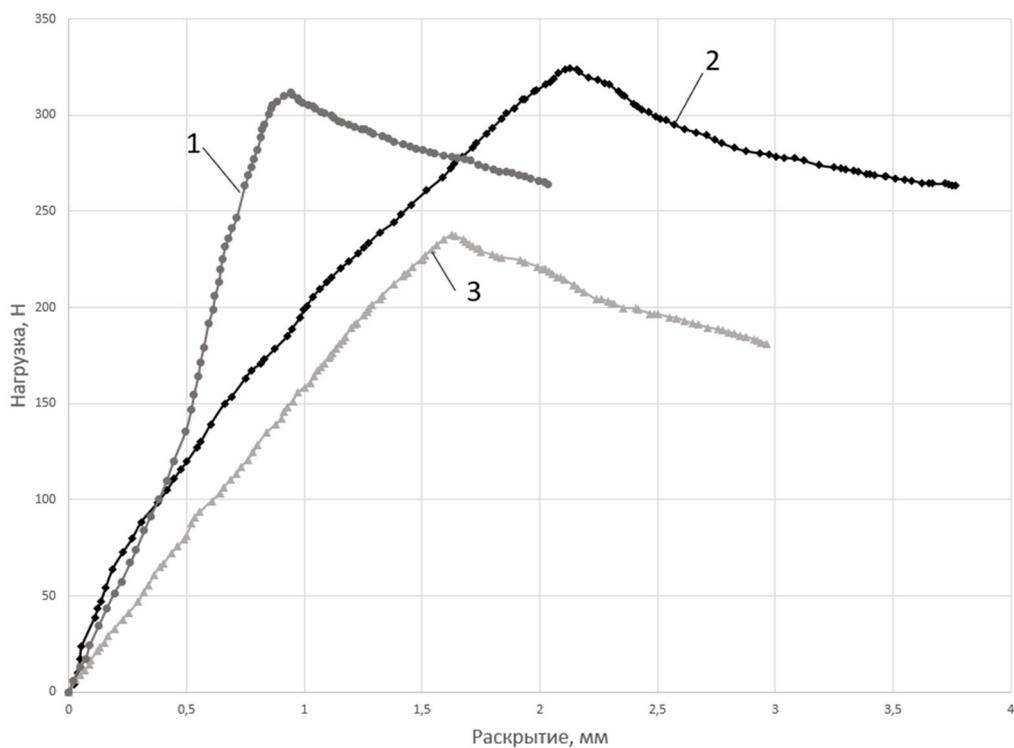


Рисунок 2.3 – Примеры экспериментально полученных диаграмм усилие-раскрытие трещины ($P-\Delta$) в процессе расслоения образцов типа ДКБ из ККС на основе клеев ЭПК-1 (1), ВК-9 (2) и К-300-61 (3).



Рисунок 2.4 - Фотографии поверхностей разрушения при нагружении по моде I образцов ККС типа ДКБ на основе клея ВК-9.

Среднеквадратическая погрешность полученных критических значений интенсивности высвобождения упругой энергии не превышала ± 4 Дж/м².

2.2.2 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 трещиновдвигущая сила (ТДС) G_I пропорциональна квадрату длины трещины a (см. уравнение 1.8а, подраздел 1.2.2), 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 [45, 46]. 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 Δ . В этом случае ТДС обратно пропорциональна длине трещины a в 4-й степени (см. уравнение 1.8б, подраздел 1.2.2) 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 нами использовалось постоянное раскрытие трещины. 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 Δ (рис. 2.5).

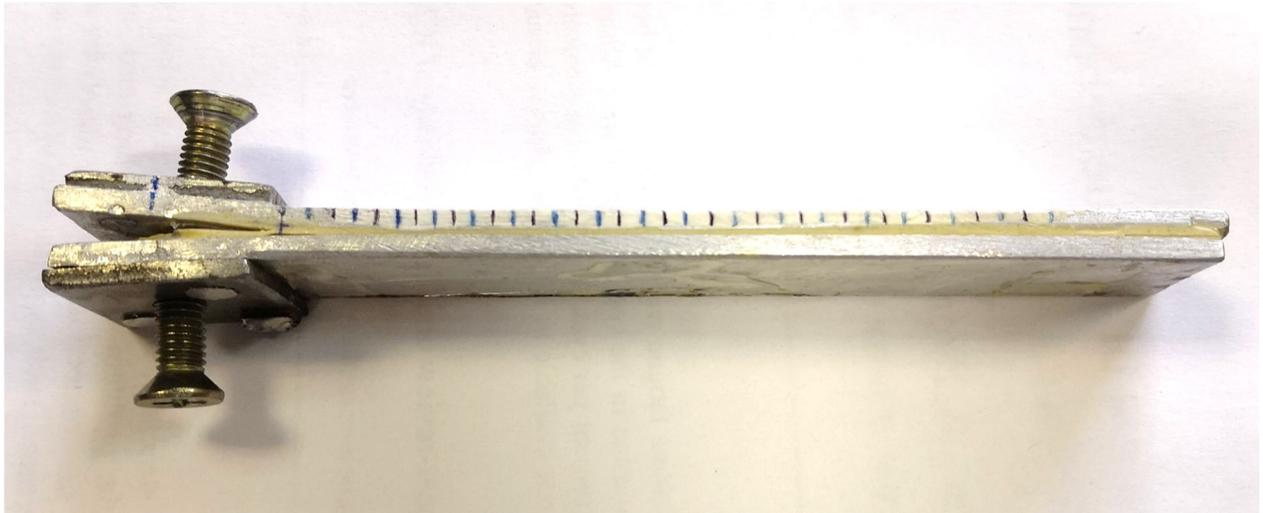


Рисунок 2.5 – Фотография образца ККС на основе клея ВК-9 для оценки кинетики подрастания трещины в ККС при статических условиях длительного докритического нагружения.

С помощью винтов задавали подрастание исходного надреза с фиксацией начальной длины трещины $a(0)$ и ее раскрытия Δ . Начальную нагрузку на трещину G_I рассчитывали по формуле (1.8б).

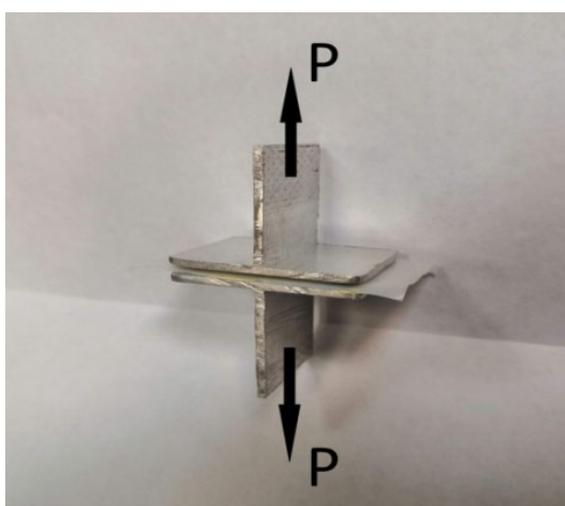
Нагруженные образцы выдерживали длительное время в лабораторных условиях в эксикаторе, и фиксировали через определенные промежутки времени изменение длины трещины с помощью катетометра. Заметный докритический рост трещины при нагрузке не более 0,8 от предельной (G_{IC}) наблюдался во временном интервале $9 \cdot 10^6$ с (примерно 4 месяца), после чего он существенно замедлялся. При докритическом подрастании трещины, как и при критическом росте, разрушение клеевого соединения протекало по адгезионному механизму (см. рис.2.4).

По полученным данным строили временные зависимости приращения длины трещины $\Delta a(t)$ и изменения нагрузки на трещину $G_I(t)$ вследствие ее подрастания при заданном раскрытии. Кривые $\Delta a(t)$ перестраивали во временную зависимость скорости докритического подрастания трещины $V_{mp}(t)$ как

производной приращения длины по времени. 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. Аналитическая форма линейного участка этой диаграммы описывается степенной функцией (см. уравнение 1.13, подраздел 1.2.2), 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.

2.2.3 Определение локальной межслоевой когезионной прочности

Для экспериментального определения локальной межслоевой прочности при нормальном отрыве использовали образцы, описанные в подразделе 2.1, представляющие собой т-образные алюминиевые профили, соединенные с помощью клея ВК-9 на малом участке размером 10×10 мм², имитирующий КЗ [64 - 66]. На рис. 2.4 приведены фотографии образца перед испытанием (а) и склеиваемых поверхностей после разрыва (б).



(а)



(б)

Рисунок 2.4 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 (2.2):

$$\sigma_c = \frac{P_{\text{макс}}}{S} \quad (2.2),$$

где $P_{\text{макс}}$ - максимальное усилие отрыва, S – площадь зоны разрушения. Среднеквадратическая погрешность полученных значений прочности не превышала $\pm 0,6$ МПа:

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 4-х месяцев или до $9 \cdot 10^6$ с) в лабораторных условиях, определяли остаточную прочность после этой выдержки и строили график ее временной зависимости $\sigma_c(t)$.

2.2.4 Численное моделирование критического и докритического роста трещины и оценка трещиностойкости образцов ККС типа ДКБ

А) Моделирование критического роста трещины и определение глобальной диаграммы расслоения

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. 2.5).

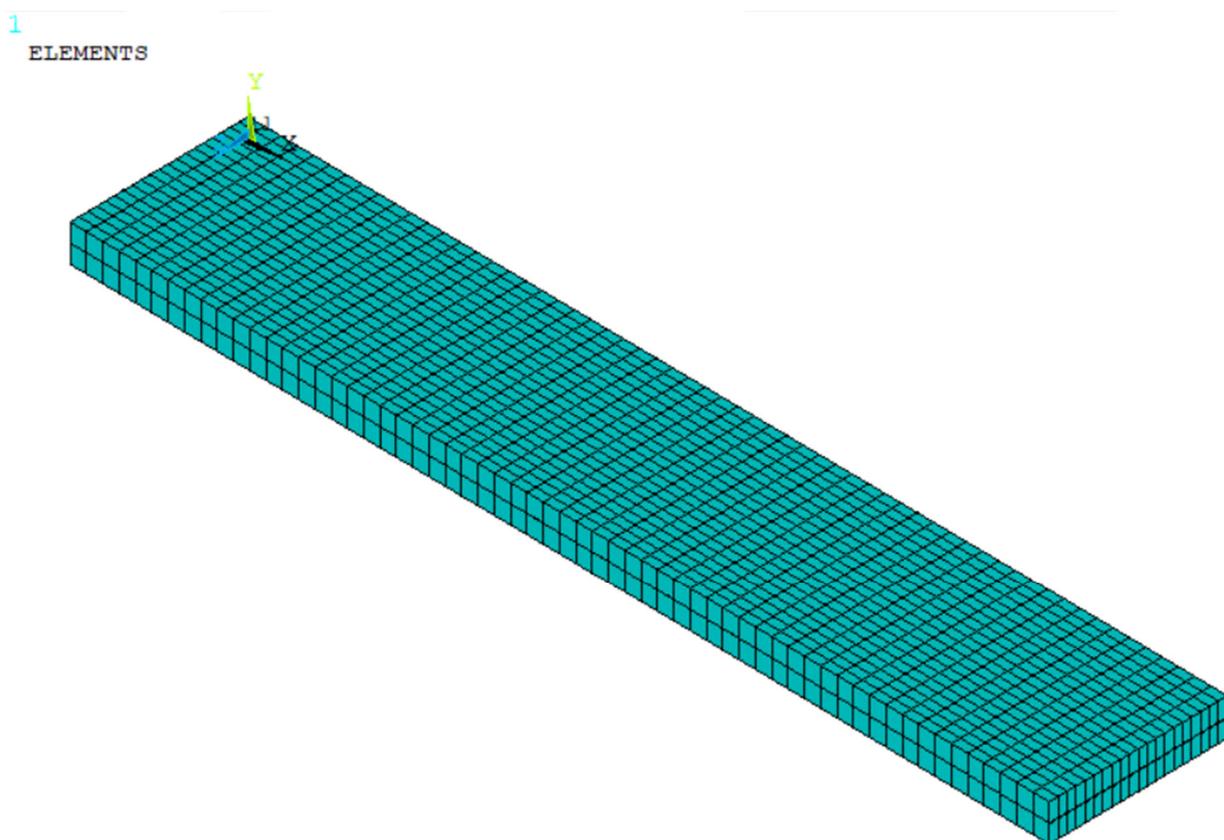
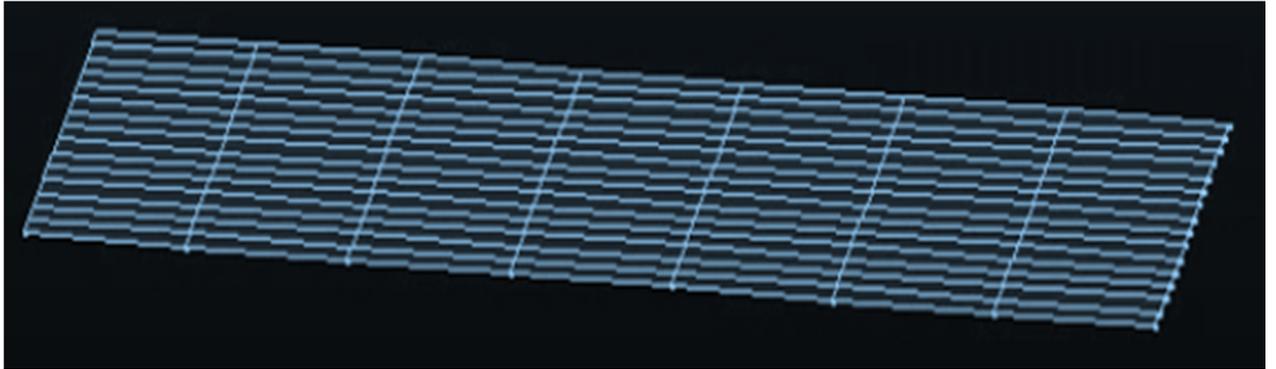


Рисунок 2.5 - Конечно-элементная 3D геометрическая твердотельная модель образца типа ДКБ до расслоения с нанесённой сеткой конечных элементов в пакете прикладных программ ANSYS®.

В данной модели ИС или АС встроен как тонкий напряжённый слой между пластинами субстрата впереди заданной трещины, разбитый на конечные интерфейсные элементы (ИЭ) (рис.2.6).



(a)

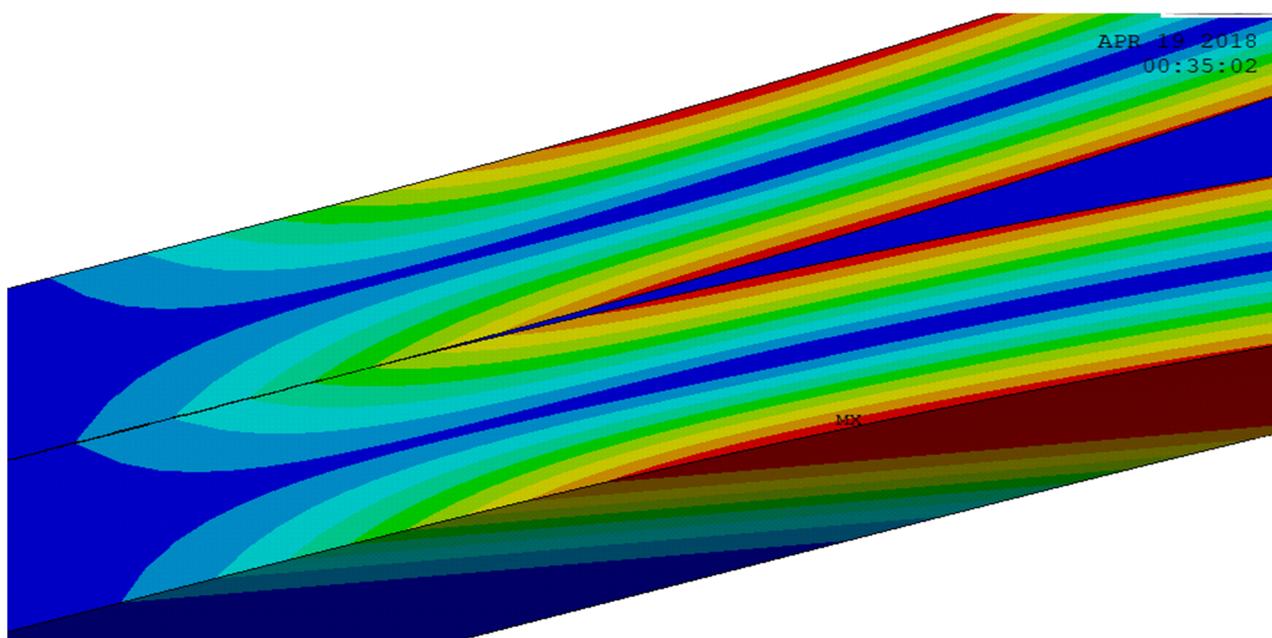


(б)

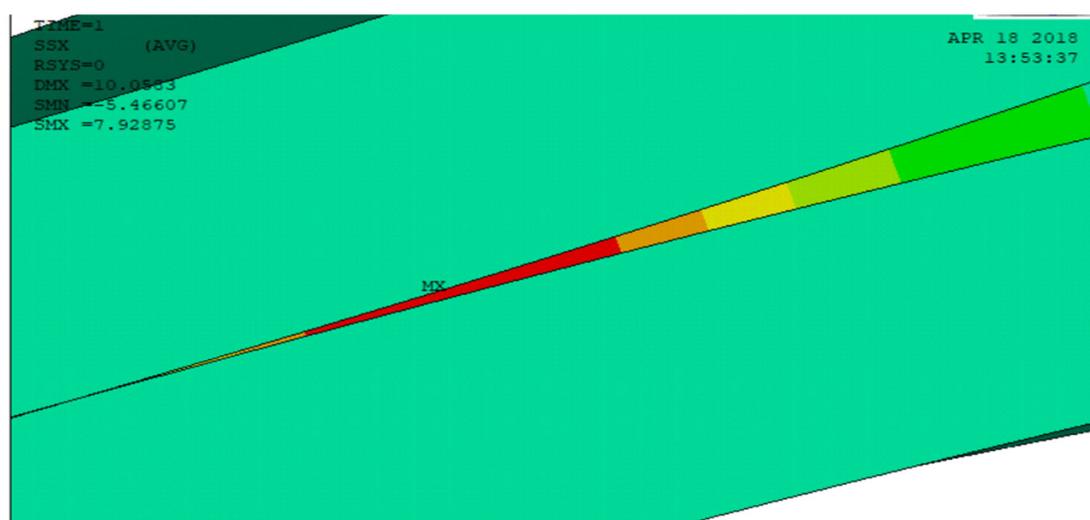
Рисунок 2.6 – ИС в общей геометрической модели ККС (а) и отдельный ИС, разделенный на конечные интерфейсные элементы (ИЭ) (б) в образце ККС типа ДКБ при моделировании методом МКЭ/МКЗ(МИС) в пакете прикладных программ ANSYS®.

На рис.2.7 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 Δ 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 было-бы называть численной адгезионной зоной (АЗ), но далее будем . придерживаться традиционной терминологией.



(a)



(б)

Рисунок 2.7 - 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 σ и смещение (раскрытие) КЗ δ (рис. 2.8-2.9).

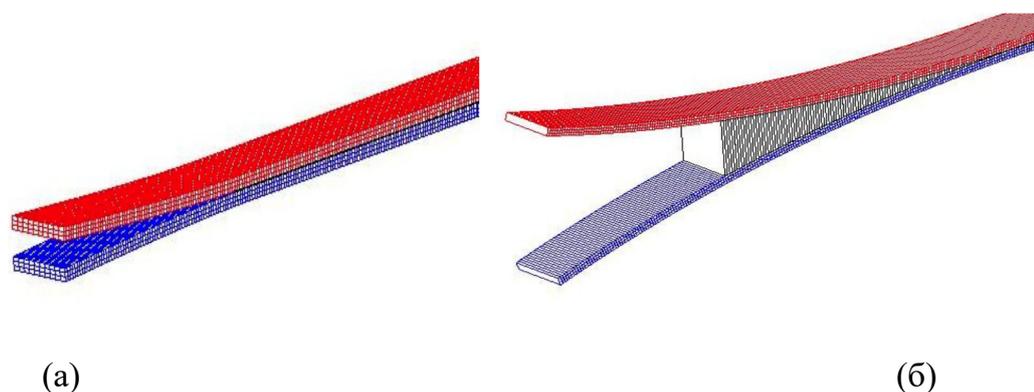


Рисунок 2.9 - Общий вид твердотельной модели образца ККС типа ДКБ в методе МКЭ/МКЗ(МИС) в пакете прикладных программ ANSYS® в начальном состоянии (а) и после формирования численной КЗ с предразрушенными при ее развитии ИЭ (б) [27].

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 σ_C и удельной работы ее разрушения γ_F , равной площади под кривой или, в терминах ЛУМР, половине критической интенсивности высвобождения упругой энергии G_{IC} . Поэтому, как уже указывалось в Литературном обзоре, 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 определении длины физической и численной КЗ. Длина физической

КЗ соответствует расстоянию впереди кончика трещины, на котором произошло необратимое предразрушение с сохранением сдерживающих сил сцепления, а длина численной КЗ – расстоянию, на котором состояние интерфейсных элементов (ИЭ) соответствует ниспадающей области ЗКЗ, т.е. области уменьшения сил сцепления с увеличением деформирования (раскрытия) КЗ - области между δ_C и δ_{max} на кривой ЗКЗ (см. рис.2.8 и 2.9). С развитием смещения в кончике трещины в примыкающем к нему ИЭ достигается предельное напряжение локального растяжения σ_C , а напряжение сцепления спадает до нуля (Рис. 2.10).

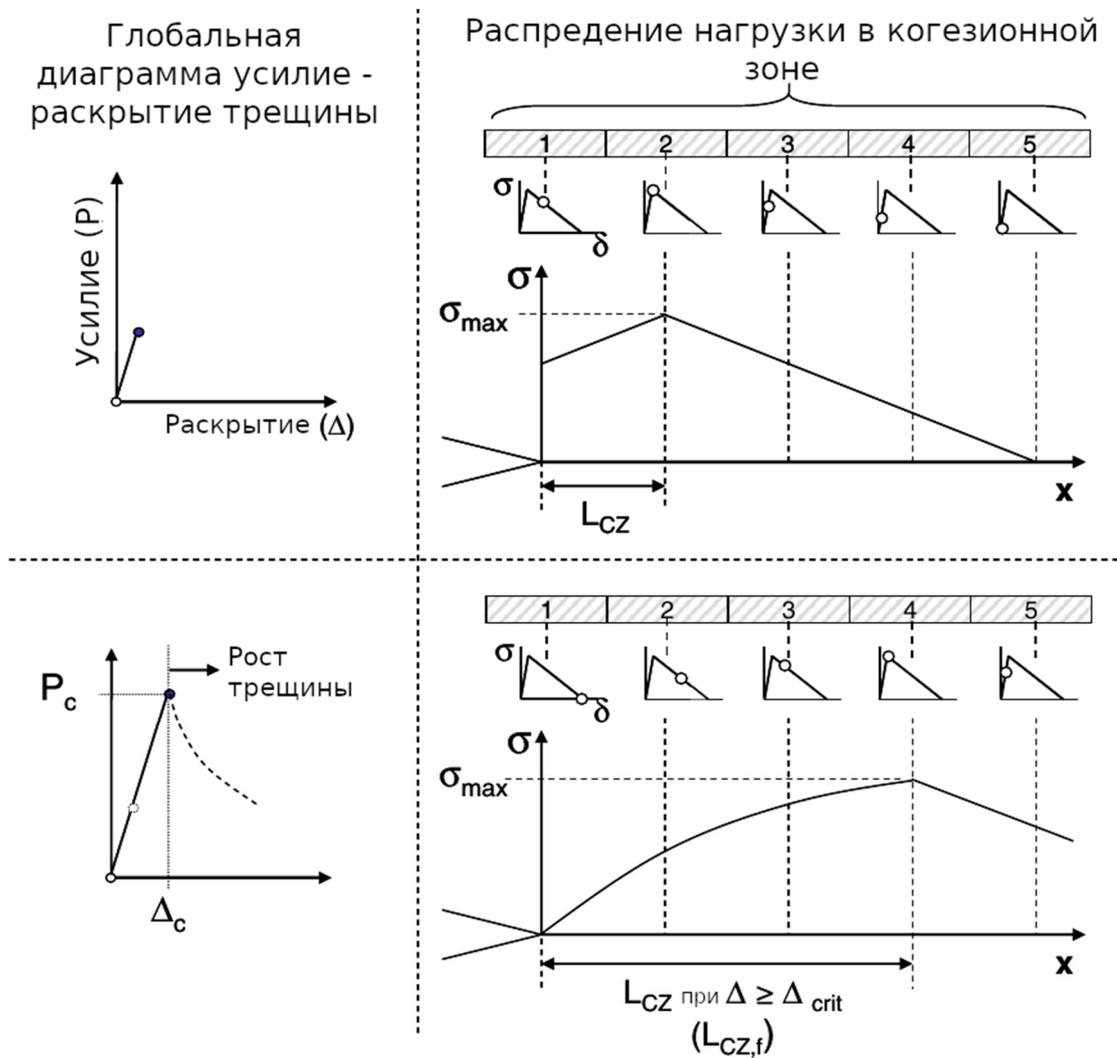


Рисунок 2.10 – Развитие численной КЗ в твердотельной модели образца ККС типа ДКБ в методе МКЭ/МКЗ в пакете прикладных программ ANSYS®[27].

При дальнейшем увеличении смещения в кончике трещины следующие примыкающие к нему ИЭ также претерпевают необратимые деформации, определяя длину числовой КЗ (l_{CZ}) как расстояние от кончика трещины до точки, где $\sigma \geq \sigma_C$. Максимальное значение l_{CZ} соответствует точке, где 1-я примыкающая к кончику трещины ИЭ полностью разрушается, и трещина начинает критически расти.

Для получения достоверных численных результатов с использованием модели когезионной зоны (МКЗ), имплантированной в МКЭ, напряжения в ИС должны быть представлены оптимальной конечно-элементной пространственной дискретизацией - сеткой конечных интерфейсных элементов (ИЭ) в этой зоне, т.е. так, чтобы по длине ИС располагалось максимальное число ИЭ (при их минимальной длине), обеспечивая при заданной точности вычислений их допустимый объем: 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. Поэтому оптимизация сетки требует минимизации числа ИЭ на длину ИС.

Оптимизацию сетки ИЭ основывали на использовании реальной длины физической КЗ ($l_{kз}$), которая определяется по классической формуле Баренблатта (1.14в). По формуле: $N=l_{kз}/l_e$ рассчитывается количество ИЭ выбранной длины (l_e), уместяющихся по длине реальной КЗ $l_{kз}$. По величине N определяли оптимальное количество конечных ИЭ, обеспечивающее достаточную точность оценки условий зарождения и развития межслоевой трещины при допустимом объеме вычислений.

Численное моделирование проводили в следующей последовательности:

- Командой APDL задавали экспоненциальный ЗКЗ и вводили необходимые его параметры (определённое экспериментально значение σ_C и рассчитанное по нему δ_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. 2.6б)
- 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} , σ_C , δ_C и δ_{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 ($P-\Delta$). Определением напряжения сцепления (traction) σ_t , сохранившегося после нелинейного деформирования или предразрушения ИЭ, т.е. остаточной прочности каждого последующего ИЭ после достижения предельного напряжения (σ_C) (разрушения и нулевой σ_t) первым элементом, непосредственно примыкающим к кончику трещины, и суммированием их длины строили зависимость σ_t от длины числовой КЗ. По пересечению этой кривой с линией σ_C определяли максимальное значение длины численной КЗ – l_{max} (см.рис. 2.10).

Б) Моделирование докритического роста трещины и построение G-V диаграммы

а) Алгоритм моделирования

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_{K3} 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 (1.8б), вызывает возникновение равновесной стабильной КЗ, длина (l_{K3}) которой определяется соотношением (1.14в).

Локальные напряжения σ 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.11).

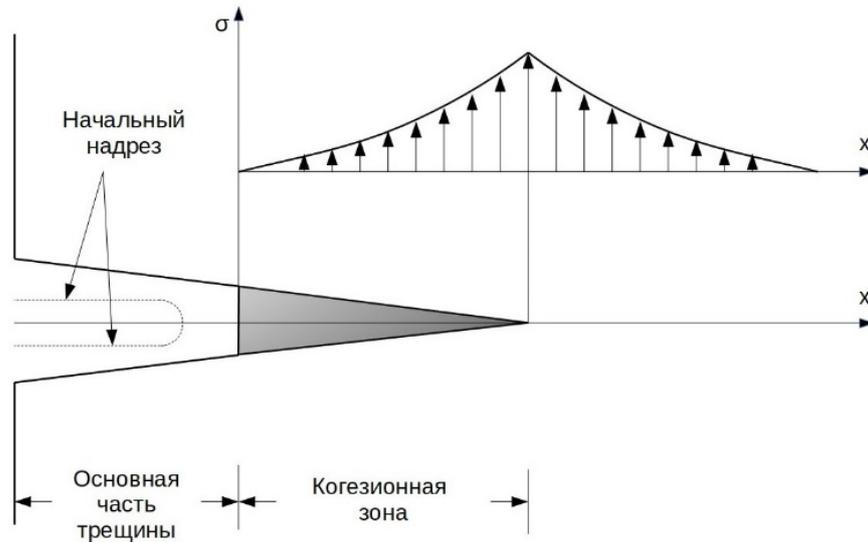


Рисунок 2.11 - Схема КЗ трещины при заданном ее раскрытии по моде I, распределение локальных напряжений по длине КЗ и при удалении от нее (а).

При этом уравновешивающее их сопротивление росту КЗ, показанное на рис. 2.12а 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.12б).

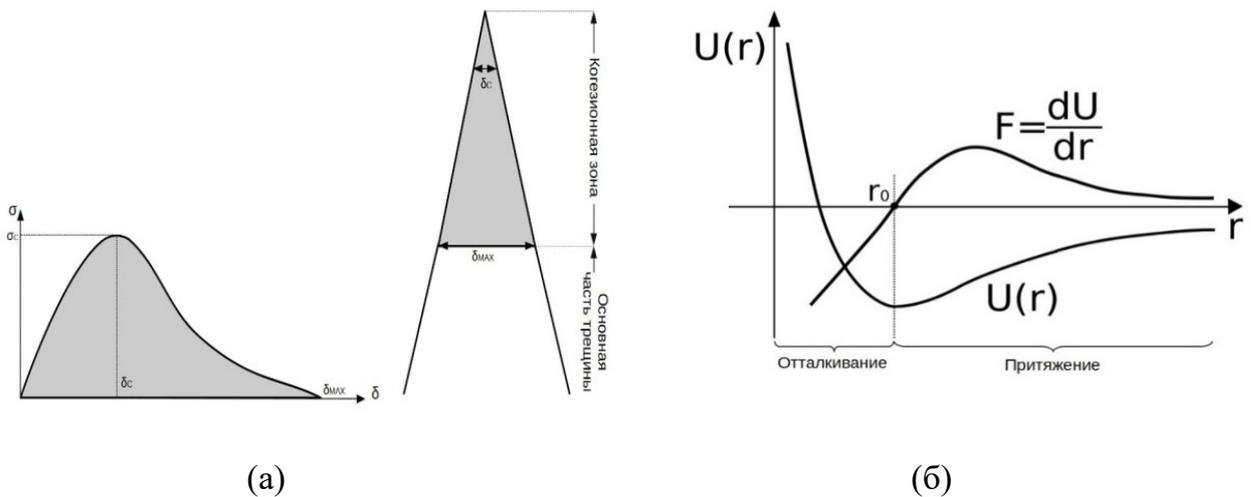


Рисунок 2.12 – Экспоненциальная форма распределения локальных напряжений по ширине (раскрытию) КЗ (а) и энергии и силы межатомного или межмолекулярного взаимодействия от расстояния (потенциала взаимодействия Леннарда-Джонса и его производной по расстоянию)

(б).

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 [31 - 32, 67 - 69]. Это приводит к уменьшению локальной прочности сцепления σ_c , критического δ_c и предельного раскрытия δ_{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» [70]. При этом возникает новая стабильная КЗ, соответствующая нагрузке на трещину с подросшей длиной.

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 $l_{K3}(0)$. 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 $l_{K3}(0)$. Новые нагрузка на трещину $G_I(t_1)$ и длина когезионной зоны $l_{K3}(t_1)$ 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. $G_I(t_1) < G_{IC}(t_1)$. 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 (2.3а) определяется суммой (2.3б):

$$t_n = \sum_{i=1}^n t_i \quad (2.3a)$$

$$a(t_n) = a(0) + \sum_{i=1}^n \Delta a(t_i) \quad (2.3б)$$

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:

$$V(t_i)=\Delta a(t_i)/t_i(2.3в)$$

А по длине трещины в этом интервале и формуле (1.4б) - 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.

б) Численное моделирование и расчеты

Для численного моделирования и расчета кинетических параметров докритического подрастания трещины при заданном ее раскрытии на величину Δ по моде I в образцах ККС типа ДКБ, так же как и при моделировании и расчете параметров критического роста (см. предыдущий подраздел 2.2.4 А),

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_{K3}) их умещалось 4, т.е. $l_e = l_{K3}/4$ [66].

В опции Material Models задавали упругие характеристики материала твёрдотельного элемента в различных направлениях 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 момента 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 (1.4б) и (1.10в) рассчитывали начальную нагрузку на трещину $G_I(0)$ и начальную длину когезионной зоны $l_{K3}(0)$ соответственно. Программа строит ЗКЗ начального виртуального образца (Рис.2.10, кривая t_0).

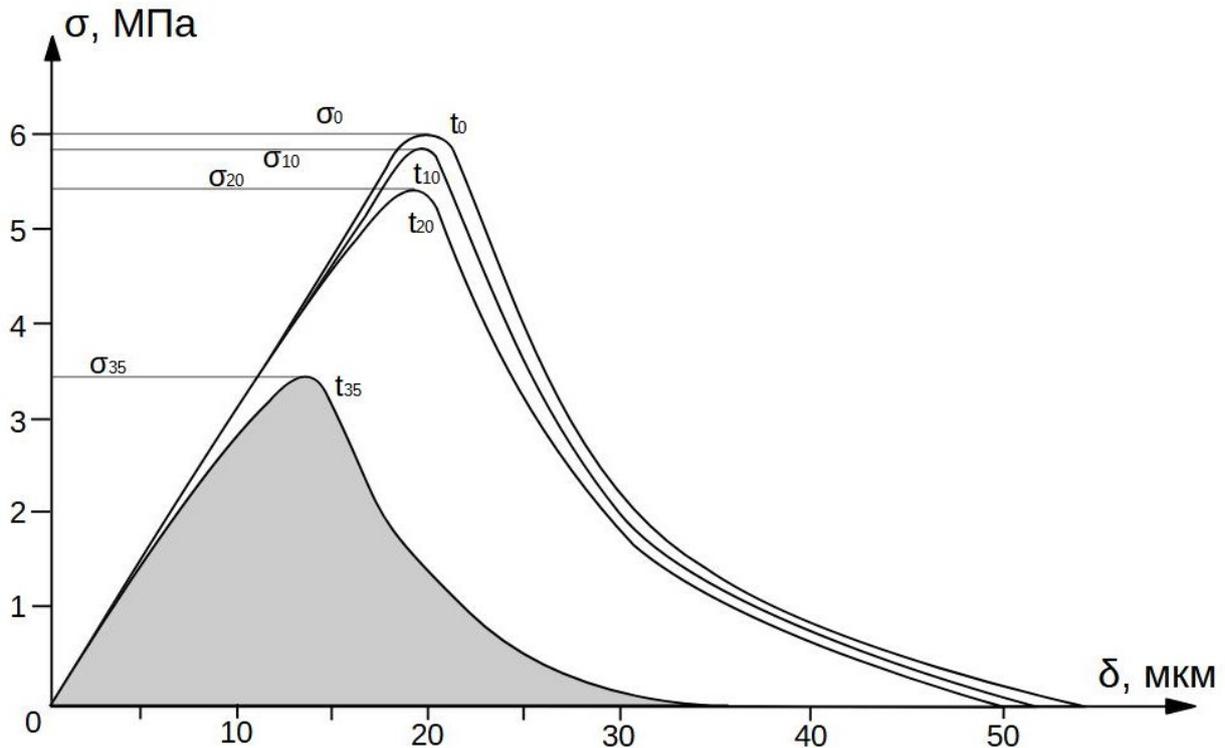


Рисунок 2.13 - Вид расчетных кривых ЗКЗ, полученных и использованных в модельных расчетах методом МКЭ/МКЗ кинетических параметров докритического роста трещины в образцах клеевых соединений Д-16-ВК-9 типа ДКБ при длительном докритическом нагружении заданным раскрытием трещины ($\Delta=5,6\text{мм}$) с начальной длиной $a(t_0)=13,0\text{мм}$, $t_n=9\cdot 10^6\text{с}$.

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 [71] в настройках решателя по экспериментально определенным зависимостям $\sigma_{IC}(t)$ и $\delta_{max}(0)$ и уравнениям (1.8б), (1.12б) и (1.14) 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.2.10, 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 σ_c) и С2 (предельное раскрытие δ_{max}) с учётом длины проросшей в предыдущей модели.

На рис.2.14 приведены наглядные изображения изменения длины трещины и нагрузки на нее в численных экспериментах методом МКЗ/МКЭ в различные периоды времени в отдельных моделях.

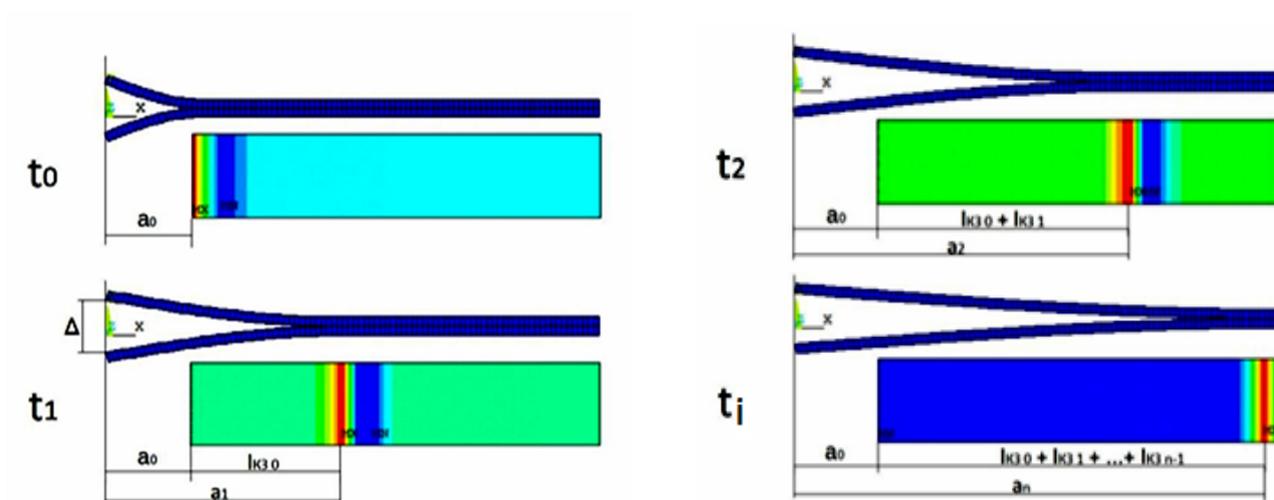


Рисунок 2.14 – Наглядные изображения изменения длины трещины и нагрузки на нее в численных экспериментах методом МКМ/МКЭ в различные периоды времени от $t_0=0$ до $t_n=9 \cdot 10^6$ с в соответствующих моделях.

По уравнению (2.3а) 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 (2.3в), а по ее длине в этом интервале и формуле (1.4б) - нагрузку на трещину $G_I(t_i)$, комбинацией которых получается кинетическая $G-V$ диаграмма, записываемая в двойных логарифмических координатах.

3. Обобщение и сравнительный анализ экспериментально полученных и расчетных результатов

3.1 Параметры критической трещиностойкости ККС

В таблице 3.1 обобщены определённые экспериментально средние критические значения интенсивности высвобождения упругой энергии (G_{IC}) и локальной прочности когезионной зоны (σ_C), а также рассчитанные по ним и модели Баренблатта значения предельного упругого раскрытия КЗ (δ_C) и ее длины (l_{K3}) для ККС алюминиевого сплава и трёх типов клеев.

Таблица 3.1. Экспериментально определённые средние значения G_{IC} и σ_C , а также рассчитанные по ним размерные параметры КЗ δ_C и l_{K3} ККС сплава Д-16 и трех типов клеев.

Клей	G_{IC} , Дж/м ²	σ_C , МПа	δ_C , мкм	l_{K3} , мм
ВК-9	323	6	19,9	1,70
К-300-61	183	13	8,9	0,76
ЭПК-1	214	9	10,8	0,92

На рисунке 3.1 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 2.3 и значениям l_{K3} , приведенным в таблице 3.1.

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 клеев 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 клеев ВК-9 и ЭПК-1, у которых экспериментальные кривые расположены выше расчётных.

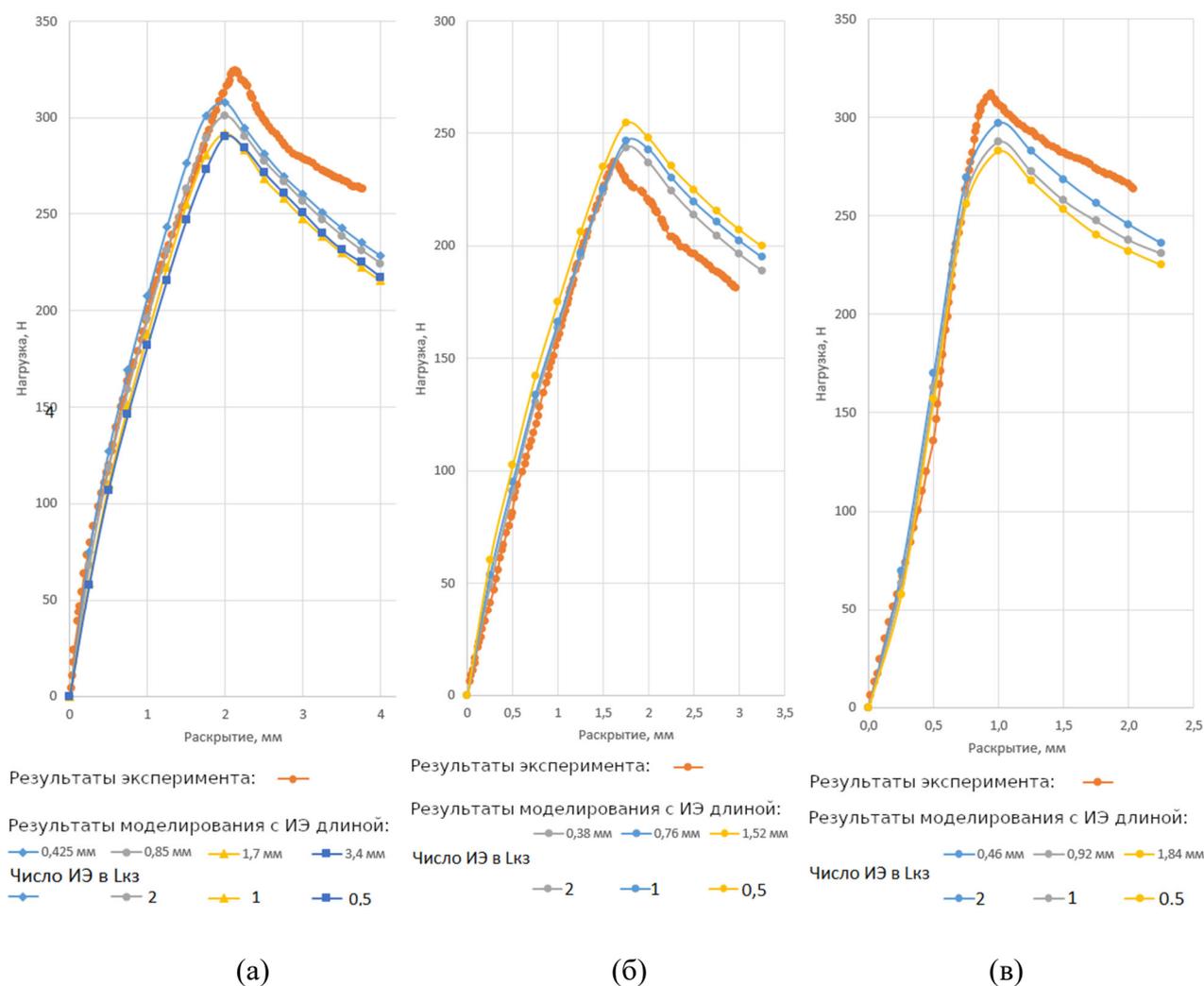


Рисунок 3.1. Диаграммы разрушения $P-\Delta$ для ККС на основе клеев ВК-9 (а), К-300-61 (б) и ЭПК-1 (в), полученные экспериментально и численным моделированием при различной длине ИЭ и, соответственно, их количестве, укладываемых по длине физической КЗ.

Приведенные на рис. 3.2 для трех типов ККС расчетные зависимости напряжения сцепления или остаточной прочности σ_t , последующих ИЭ заданной длины после разрушения первого, непосредственно примыкающего к кончику трещины, от суммарного расстояния до кончика трещины подтверждают эти заключения. Определенные по пересечению этих кривых с линиями σ_{IC} максимальные значения длины числовой КЗ (l_{CZmax}) ближе всего к значениям длины физической КЗ (l_{K3}), рассчитанной по модели Баренблатта и экспериментально определенным параметрам трещиностойкости ККС, при использовании ИЭ наименьшей длины.

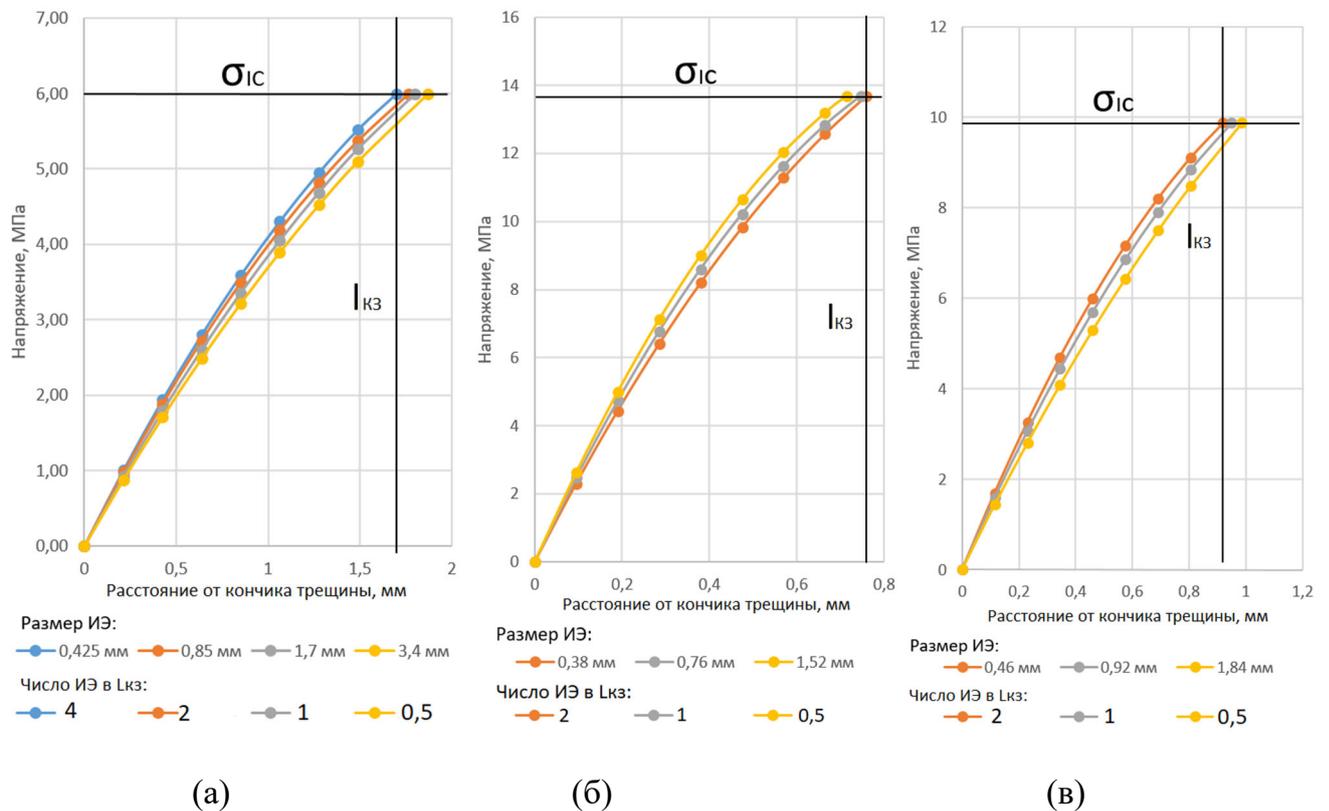


Рис. 3.2. Распределение напряжений по длине числовой КЗ при различной длине ИЭ для моделей ККС на основе клеев ВК-9 (а), К-300-61 (б), ЭПК-1 (в) и экспериментально полученные значениями σ_{IC} и l_{K3} .

3.2 Кинетические параметры докритического роста трещин в ККС при квазистатическом нагружении

Исследования кинетических параметров докритического роста трещин при квазистатическом нагружении были проведены для одного типа ККС на основе алюминиевого сплава Д-16 и конструкционного клея ВК-9.

Экспериментально определённые начальные значения $G_{IC}(0)$ и $\sigma_C(0)$ и рассчитанные по ним размерные параметры $K3\delta_C$, δ_{max} и l_{K3} данного ККС соответствуют приведенным в таблице 3.1, а экспериментально определённые изменения во времени σ_C и δ_{max} приведены на рис.3.3.

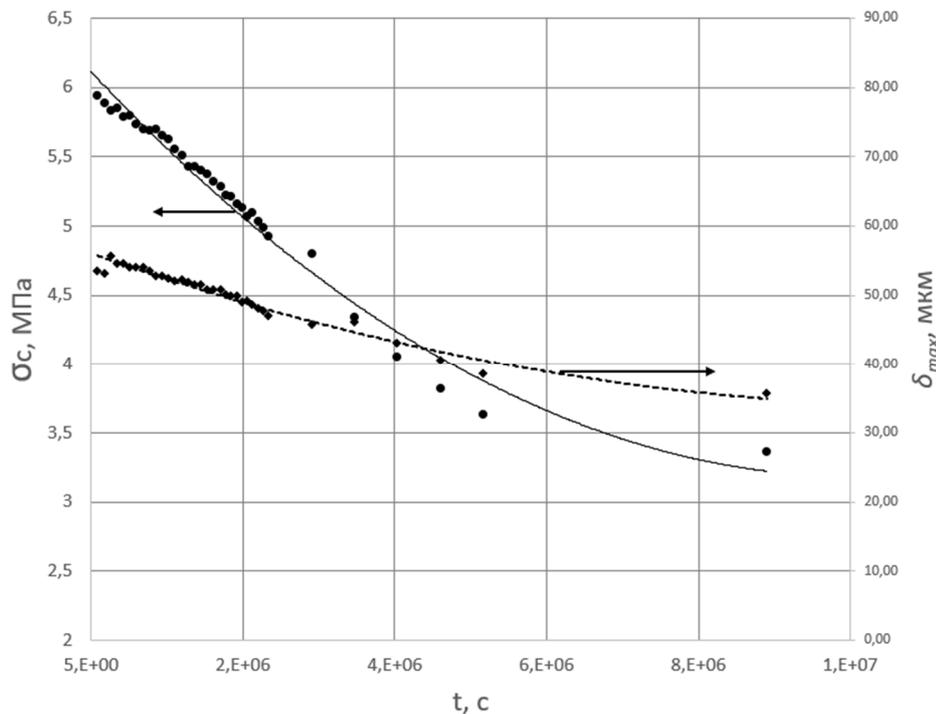


Рисунок 3.3 - Зависимости локальной прочности сцепления δ_{IC} (1) и предельного раскрытия δ_{max} (2) КЗ клеевого соединения Д-16-ВК-9 от длительности выдержки t .

Эти данные использованы для модельных (численных) расчетов кинетических параметров докритического подрастания трещины при заданном ее раскрытии на величину l по моде I в образцах ККС Д16-ПК9 типа ДКБ разработанным методом МКЭ/МКЗ по заданному алгоритму. 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 3.2, 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.3.4.

Таблица 3.2. 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 $G(t)$, Дж/м ²
	$\sigma_c(t)$, МПа	$\delta_{max}(t)$, мкм	$G_{Ic}(t)$, Дж/м ²	$\delta_c(t)$, 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

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.3.5.

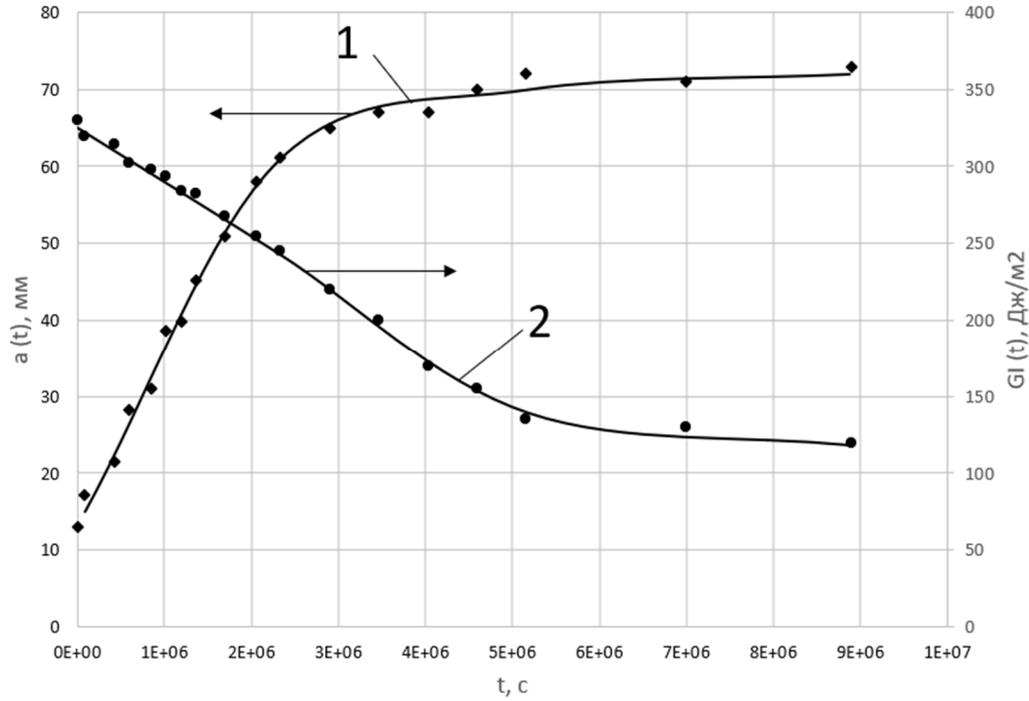


Рисунок 3.4 – Расчетные кинетические кривые изменения длины трещины $a(t)$ (1) и нагрузки на нее $G_I(t)$ (2) при заданном раскрытии трещины (пунктирные линии) и экспериментально полученные данные (точки).

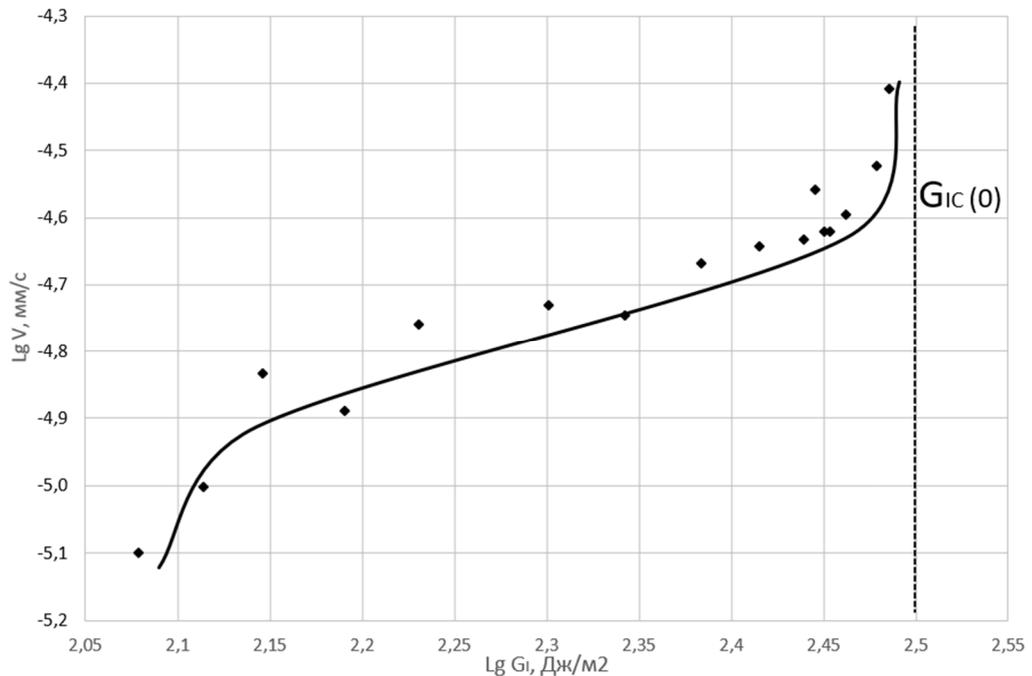


Рис.3.5 - Расчетная (линия) и экспериментально определенная (точки) $G-V$ диаграмма для клеевого соединения листов алюминиевого сплава Д-16 и клея ВК-9 при длительной статической нагрузке постоянным раскрытием трещины.

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 [72-73]. 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 с помощью соосных винтов (см. рис. 2.5). Вначале задавали подрастание исходного надреза, фиксируя начальную длину трещины $a(0)$ и ее заданное раскрытие Δ , обеспечивающее меньшую критической нагрузку на трещину, рассчитываемую по формуле (5б). Нагруженные образцы выдерживали длительное время в лабораторных условиях в эксикаторе, фиксируя через определенные промежутки времени изменение длины трещины с помощью катетометра. Заметное докритическое подрастание трещины при начальной нагрузке $G_I(t_0)$, равной примерно 80% от критической ($G_{IC}(t_0)$), наблюдалось в течение порядка $9 \cdot 10^6$ с (примерно 4 месяца), после чего рост трещины существенно замедлялся. Докритическое подрастание трещины, как и критический рост, во всех случаях протекали и рассматривались по адгезионному механизму.

Сравнение полученных результатов показывает хорошее совпадение расчетных и экспериментально полученных $G-V$ диаграмм для образцов КС Д-16-ВК-9, 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. 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 позволяет эффективно прогнозировать несущую способность и долговечность ККС при сложной геометрии таких соединений. Данных о проведении такой работы в условиях критического нагружения для активно используемых при постройке долговременных космических конструкций эпоксидных конструкционных клеёв не найдено. Моделирование докритического нагружения ККС активно проводится в условиях усталостного циклического нагружения, но не при длительной статической нагрузке. Поэтому задачи разработки и проверки 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, поставленные в рамках данной работы, являются достаточно актуальными.

2. Экспериментально установлены локальные параметры когезионной зоны при разрыве по моде нагружения I (максимальное напряжение σ_c , максимальное раскрытие δ_{\max} и рассчитанная по ним длина l_{k3}) для КС, активно используемых при создании АРКТ – соединений на основе пластин алюминиевого сплава и трех типов конструкционных эпоксидных клеёв марок ВК-9, ЭПК-1 и К-300-. Определены закономерности изменения этих параметров при длительной выдержке до 104 суток.

3. Для условий критического роста трещины ККС, 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 ЗКЗ и экспериментально определённых параметров когезионной зоны, выбирать оптимальное количество интерфейсных элементов и рассчитывать нагрузку начала расслоения с достаточно высокой точностью при минимальном объеме вычислений. Модель была проверена на адекватность для ККС на основе пластин алюминиевого сплава и трех типов конструкционных эпоксидных клеев марок ВК-9, К-300-61 и ЭПК-1. Установлено, что нагрузка начала расслоения составляет: для КС на основе ВК-9 330 Н при длине КЗ 1,70 мм, для КС на основе К-300-61 240 Н при длине КЗ 0,76 мм, для КС на основе ЭПК-1 312 Н при длине когезионной зоны 0,92. Эти значения совпадают с численно полученными результатами с погрешностью не более 5 % при длине ИЭ для ВК-9, К-300-61 и ЭПК-1, 0,425 мм, 0,38 мм и 0,46 мм соответственно.

4. Разработан алгоритм и расчетная методика МКЭ/МКЗ для условий докритического роста трещины при квазистатической моде нагружения I, базирующиеся на суммировании микроступенчатых подрастаний трещины на длину КЗ и имплементированные в программный комплекс ANSYS. Установлена применимость такого подхода для оценки кинетических параметров докритического роста трещины в ККС при длительных квазистатических нагрузках с использованием экспериментально определенных параметров экспоненциального ЗКЗ. Показано резкое сокращение длительности и объема экспериментов и вычислений, необходимых для оценки докритической трещиностойкости ККС различной природы и геометрии. Полученные кинетические G-V диаграммы позволяют прогнозировать статическую долговечность ККС с дефектами заданного типа, длительно эксплуатируемые в заданных климатических условиях. Проверка разработанного алгоритма и расчетной методика показала, что расчетные данные и G-V диаграмма докритического роста трещины в ККС на основе алюминиевого сплава и эпоксидного клея ВК-9 совпадают с экспериментальными данными.

5. Впервые установлено существование аналогии между экспоненциальной формой ЗКЗ и производной потенциала Леннарда-Джонса для адгезионных связей

по границе раздела клеевой слой-субстрат при псевдохрупком росте трещины в ККС 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. 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.
27. 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.
28. 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.
29. Д. Ван Кревелен, Р. Хофтицер. Свойства и химическое строение полимеров // Пер. с англ. М.: Химия – 1976 - гл. 6.
30. П.Г. Бабаевский, А.Н. Шубин, П.Г. Вагстафф. Физико-механические свойства и характер разрушения эпоксиаминных композиций, отвержденных в виде

пленок, клеевых прослоек и блочных образцов // В сб. Конструкции из композиционных материалов - №4 – 1999 - стр. 36 – 47.

31. 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.

32. 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.

33. 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

34. Krueger, R. The Virtual Crack Closure Technique: History, Approach and Applications // ICASE Report - 2002 - №10 – pp/ 109-143

35. ANSYS Mechanical APDL Structural Analysis Guide, ANSYS Inc, Release 15.0 - November 2013 - 522p.

36. 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

37. 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.

38. 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>

39. D. Williams, A. Evans, A Simple Method for Studying Slow Crack Growth // Journal of Testing and Evaluation 1 – 1973 - no. 4 - pp.264-270.
40. 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.
41. D. C. Phillips, J. M. Scott. Determination of the K, V diagram of epoxide resins // J. Mat. Sci. – 1974 - №9 - p. 1205.
42. 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.
43. Яковлев Н.О., Гуляев А.И., Лашов О.А. Трещиностойкость слоистых полимерных композиционных материалов (обзор) // Труды ВИАМ – 2016 - №4 (40) - с. 106 – 140.
44. 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
45. 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.
46. 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.

47. 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
48. M. Alfano, F. Furgiuele, 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
49. C.Balzani et 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.
50. 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.
51. 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
52. 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
53. 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.
54. 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.

55. 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

56. Turon A., Costa J., Camanho P.P., Dávila C.G. Simulation of delamination in composites under high-cycle fatigue // Composites – 2007 – 38 – pp.2270-2282.

57. F. Moroni and A. Pirondi, Cohesive zone model simulation of fatigue debonding along interfaces // Procedia Engineering – 2011 - №10 – pp.1829–1834 1833

58. 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.

59. 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.

60. Чернякин С.А., Скворцов Ю.В. Анализ роста расслоений в композитных конструкциях // Сибирский журнал науки и технологий – 2014 - №4 (56) – с.249-254

61. 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

62. ASTM Designation: D 5528 – 01 (Reapproved 2007). Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites. 12p.

63. ГОСТ Р 56815-2015 Композиты полимерные. Метод определения удельной работы расслоения в условиях отрыва. – Москва: Стандартинформ, 2016. – 35 с.

64. M. Moslemi, M. Khoshnavan. Cohesive Zone Parameters Selection for Mode-I Prediction of Interfacial Delamination // Journal of Mechanical Engineering – 2015 – №61 – p.507-516.
65. 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.
66. 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.
67. Регель В. Р., Слуцкер А. И., Томашевский Э. Е. «Кинетическая природа прочности твердых тел» // М.: Наука – 1974 - 560с.
68. 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.
69. Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Салганик Р.Л. О кинетике распространения трещин. Флуктуационное разрушение // Изв. АН СССР. МТТ – 1967 - № 1 - С. 122-134.
70. 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).
71. 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

72. 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

73. 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.