

На правах рукописи



**УСТИНОВ Андрей Анатольевич**

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

Специальность 2.6.17 – Материаловедение

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2021

Работа выполнена на кафедре «Технологии композиционных материалов, конструкций и микросистем» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент  
**Козлов Николай Алексеевич**

Официальные оппоненты: **Чалых Анатолий Евгеньевич**  
доктор химических наук,  
ФГБУН Институт физической химии и  
электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН,  
главный научный сотрудник

**Гладких Светлана Николаевна**  
кандидат химических наук,  
ООО НПФ "Адгезив",  
ведущий специалист

Ведущее предприятие: ПАО "Ракетно-космическая корпорация "Энергия"  
имени С.П. Королёва"

Защита диссертации состоится 02 декабря 2021 года в 15 часов 00 на заседании диссертационного совета 24.2.327.04 (Д 212.125.15) в ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: г. Москва, ул. Оршанская, 3, ауд. 307Б. Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, А-80, ГСП-3, МАИ, ученому секретарю диссертационного совета Скворцовой С.В. и по электронной почте skvorcovasv@mai.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Университета и на сайте [https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT\\_ID=160229](https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=160229)

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021г.

Ученый секретарь  
диссертационного Совета

Скворцова С.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

В настоящее время прочные (конструкционные) полимерные клеи всё чаще применяются для соединения листовых конструкционных материалов (металлов и композитов) в производстве и ремонте аэрокосмических конструкций, длительно работающих в жестких условиях. В отличие от механических, клеевые соединения обеспечивают существенный выигрыш в весе и герметичности конструкций. Однако, при длительной эксплуатации, особенно в условиях космического пространства, клеевые соединения на основе конструкционных клеев склонны к разрушению вследствие критического или докритического роста дефектов (трещин) под воздействием внешних нагрузок и факторов окружающей среды. Это обуславливает необходимость в разработке методов эффективной оценки и прогнозирования несущей способности и долговечности конструкционных клеевых соединений (ККС) при заданной их геометрии и моде нагружения, конфигурации и размерах дефекта. Наилучшие возможности для этого обеспечивает использование аналитических и экспериментальных методов линейной упругой механики разрушения (ЛУМР), позволяющих определять критические значения энергетических и силовых параметров нагрузки на дефект (трещину) как показатели трещиностойкости и кинетику докритического подрастания трещины, определяющую долговечность конструкционных клеевых соединений. Такие методы применимы только при наличии заданной, четко выраженной трещины при сравнительно простой геометрии конструкционных клеевых соединений и дефектов в них и не могут быть использованы для оценки ее зарождения и роста в местах концентрации напряжений. Эта проблема, в рамках применимости линейной упругой механики разрушения, решается разработкой численных методов моделирования инициирования и роста трещин путем имплантации в метод конечных элементов (МКЭ) модели когезионной зоны (МКЗ), базирующейся на микромеханическом анализе предразрушения материала вблизи кончика трещины или любом месте концентрации напряжения, называемом когезионной зоной (КЗ). При имплантации в метод конечных элементов модели когезионной зоны между двумя частями твердотельной конечно-элементной модели вводится связанный с ними тонкий промежуточный (интерфейсный или когезионный) слой с отдельной сеткой специальных интерфейсных конечных элементов. Механическое поведение этого слоя подчиняется определённому закону - закону когезионной зоны (ЗКЗ). Современные программные пакеты ANSYS® и ABAQUS® позволяют создавать такие модели применительно к инициированию и росту трещин в конструкционных клеевых соединениях, в том числе геометрически сложной конфигурации, но для

этого необходимо знать форму и параметры закона когезионной зоны, а сами модели требуют экспериментальной проверки корректности на стандартных образцах.

### **Степень разработанности темы:**

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

Для численного моделирования и оценки параметров трещиностойкости конструкционных клеевых соединений, помимо метода имплантации МКЗ в МКЭ в рамках линейной упругой механики разрушения, используется также метод имплантации в МКЭ модели виртуального закрытия трещины - VCCT. С точки зрения решения материаловедческих проблем оценки и прогнозирования трещиностойкости конструкционных клеевых соединений первый подход значительно более обоснован и эффективен, и он используется значительно шире, чем второй. При моделировании методом МКЭ/МКЗ образцов конструкционных клеевых соединений типа ДКБ, нагружаемых по моде I, наибольшее внимание уделяется определению влияния формы и параметров закона когезионной зоны на точность расчетов с выявлением перспектив применения этого метода для конструкционных клеевых соединений более сложных конфигураций.

По сравнению с критическими параметрами трещиностойкости ККС экспериментальных исследований и численного моделирования кинетики докритического роста трещин для определения обобщенной зависимости скорости роста трещины от нагрузки на нее ( $G$ - $V$  диаграммы) проведено значительно меньше. Большинство имеющихся в литературе данных относится к экспериментальной и численной оценке кинетики усталостного роста трещин при циклических нагрузках, амплитудные значения которых меньше критических, в образцах ККС типа ДКБ,

нагружаемых по моде I. Имеются немногочисленные экспериментальные данные о кинетике докритического роста трещин в конструкционных клеевых соединениях при квазистатических нагрузках. Кроме длительности экспериментов при таких нагрузках возникают проблемы их практической реализации. Если при оценке критических параметров трещиностойкости конструкционных клеевых соединений обычно используют монотонное нагружение приложением растягивающей силы к краям трещины с построением диаграммы разрушения нагрузка-раскрытие, то определить кинетику докритического подрастания трещины приложением к ее краям заданной постоянной нагрузки не представляется возможным. Данных о применении численных методов для оценки устойчивости межслоевых трещин к квазистатическому усталостному нагружению в литературе не найдено.

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

**Задачи:**

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

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

### **Научная новизна:**

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

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

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

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

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

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

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

1. Экспериментально определенные значения локальных параметров (прочности при растяжении  $\sigma_c$ , максимального раскрытия  $\delta_{max}$  и длины  $l_{K3}$ ) когезионной зоны для клеевых соединений на основе листов алюминиевого сплава и трех типов конструкционных эпоксидных клеев.
2. Численная модель с имплантацией в метод конечных элементов модели когезионной зоны и результаты расчетов критических параметров

трещиностойкости образцов трех типов конструкционных клеевых соединений в виде двойной консольной балки (ДКБ).

3. Физическое обоснование, численная с имплантацией в метод конечных элементов модели когезионной зоны, модель и результаты расчета кинетики докритического подрастания трещины и построения G-V диаграмм для образцов конструкционных клеевых соединений в виде ДКБ на основе листов алюминиевого сплава и одного типа конструкционного эпоксидного клея.

### **Степень достоверности результатов:**

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

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

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

**Структура и объем работы:** Диссертация изложена на 125 страницах машинописного текста, содержит 60 рисунков и 16 таблиц. Работа состоит из введения, 5 глав, общих выводов и списка литературы из 73 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### **Глава I. Состояние вопроса.**

В главе проанализированы современные конструкционные клеевые соединения на основе полимерных клеев (клеевых композиций), технологии их получения и методы оценки прочности и долговечности. Показано, что клеевые соединения, преимущественно, 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. Широкое применение конструкционные



клеевые соединения находят в производстве трехслойных сотовых и пенопластовых конструкций и гибридных металл-полимерных композитных листовых материалов типа СИАЛ. 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.

Показано, что применительно к оценке и прогнозированию трещиностойкости конструкционных клеевых соединений как устойчивости к критическому и докритическому росту дефектов (трещин) при статических и усталостных нагрузках, наиболее эффективными являются численные методы, базирующиеся на макро- и микромеханических подходах линейной упругой механики разрушения. Их развитие привело к созданию численных моделей инициирования и роста трещин, имплантированных в метод конечных элементов, 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).

Отмечено, что использование модели когезионной зоны, имплантированной в метод конечных элементов, позволяет эффективно оценивать и прогнозировать несущую способность и долговечность конструкционных клеевых соединений при сложной геометрии таких соединений. Однако применение такого подхода требует корректного экспериментального определения параметров закона когезионной зоны, учета возможных погрешностей и общей оценки соответствия результатов моделирования и реальных испытаний на примере стандартных образцов для конкретных типов конструкционных клеевых соединений. Данных о проведении таких работ применительно к активно используемым при создании долговременных космических конструкций соединениям на основе алюминиевых сплавов и эпоксидных конструкционных клеев в условиях квазистатического критического и длительного докритического нагружения не найдено. Поэтому решение проблем разработки и проверки расчетно-экспериментальных методик оценки критической трещиностойкости и кинетики докритического подрастания трещины с построением G-V диаграмм являются достаточно важным и актуальным.

На основе анализа литературных данных была поставлена цель работы и сформулированы её задачи.

## Глава II. Объекты и методы исследования

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

Таблица 1 - Состав клеев

Тип, марка /содержание компонента	Марка клея		
	ЭПК-1	ВК-9	К-300-61
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.	Алюминиевая пудра/5 м.ч.	Порошок NiB/10 м.ч.

Для определения критического параметра трещиностойкости и кинетики докритического роста трещины использовали образцы конструкционных клеевых соединений типа ДКБ с предварительно заданной трещиной (рис. 1а). Для получения таких образцов использовали вырезанные из листов сплава Д-16 пластины шириной 20 мм и длиной 110 мм.

Толщину клеевой прослойки между пластинами задавали с помощью закладных фторопластовых плёнок толщиной 100 мкм (см. рис. 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  $120^\circ\text{C}$  в течение 2 часов. На склеенные пластины для повышения их жесткости образом наклеивали дополнительные металлические пластины толщиной 5 мм.

Для экспериментального определения локальных деформационно-прочностных характеристик клеевых соединений, имитирующих параметры закона когезионной зоны, развиваемой у кончика трещины, предложено использовать образцы, получаемые из двух отрезков однотавровой балки из алюминиевого сплава Д-16 с размером полок  $40 \times 20$  мм, склеиваемых на малом участке размером  $10 \times 10 \text{ мм}^2$  (рис. 1б). Для получения такого соединения между склеиваемыми поверхностями после нанесения на них клеевого слоя прокладывали фторопластовую плёнку толщиной 100 мкм с вырезанным посередине квадратом  $10 \times 10 \text{ мм}^2$ , ограничивающим зону склеивания.

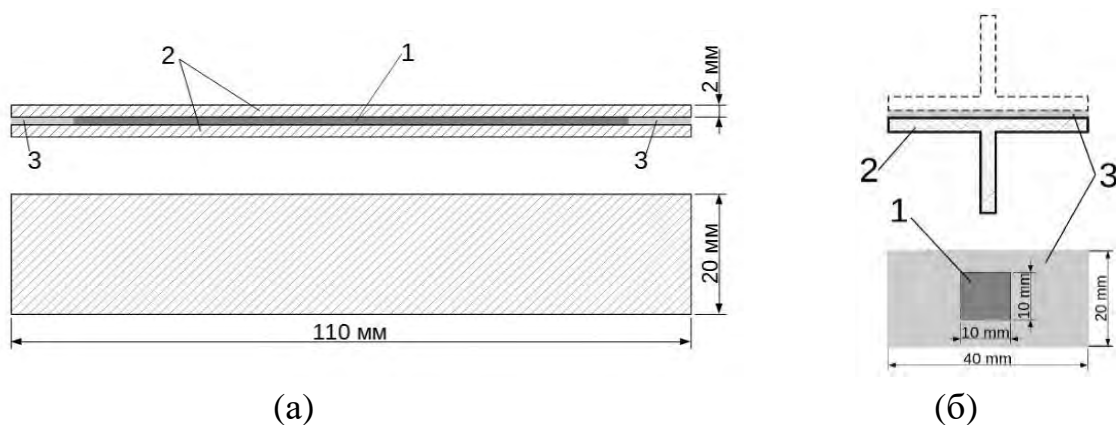


Рисунок 1 - Схематические изображения образцов клеевых соединений для испытаний на критическую и докритическую трещиностойкость (а) и на локальную прочность (б): 1 – клеевой слой, 2 - склеиваемые пластины, 3 – закладная фторопластовая плёнка

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.

Для экспериментального определения критического параметра трещиностойкости  $G_{IC}$  образцов типа ДКБ использовали метод, описанный в ГОСТ 28966.1-91, ГОСТ Р 56815-2015 и ASTM D 5528 – 01. Для этого к краям образцов прикреплялись алюминиевые уголки для закрепления в захватах разрывной машины.

Для оценки кинетики докритического роста трещины и получения G-V диаграмм использовали нестандартный метод. К краям образцов типа ДКБ приклеивали опорные накладки со сквозной резьбой, в которую ввинчивали соосные винты, с помощью которых задавали раскрытие трещины. При заданном докритическом раскрытии трещины через определенные промежутки времени в течение длительного периода с помощью катетометра фиксировали изменение ее длины.

Экспериментальное определение локальных деформационно-прочностных характеристик клеевых соединений, имитирующих параметры закона когезионной зоны, проводили методом нормального отрыва образцов из отрезков однотавровой балки, склеенных по полкам на небольшом участке, в исходном состоянии и после длительной выдержки при действии докритической нагрузки, фиксируя прилагаемое усилие и смещение. По полученным кривым нагрузка-деформация определяли локальные деформационно-прочностные параметры ( $\sigma_c$ ,  $\delta_c$  и  $\delta_{max}$ ) клеевых соединений.

### Глава III. Определение параметров трещиностойкости и кинетики докритического роста трещин

Определение критического параметра трещиностойкости  $G_{IC}$  как удвоенной удельной работе, затрачиваемой на рост трещины, проводили с использованием стандартного метода и образцов типа ДКБ с прикрепленными к их краям алюминиевыми уголками для закрепления в захватах разрывной машины. Перед испытанием измеряли расстояние от линии приложения нагрузки до конца начальной трещины, которое принимали за ее длину  $a$ .

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 получали диаграммы разрушения в координатах  $P - \Delta$  ( $P$  – усилие;  $\Delta$  – раскрытие трещины). По предельной нагрузке, соответствующей началу роста трещины ( $P_C$ ), рассчитывали критическое значение сопротивления росту трещины  $G_{IC}$  по формуле:  $G_{IC} = \frac{12P_C^2 a^2}{Eb^2 h^3}$  (1), где  $E$  – модуль упругости сплава Д-16,  $b$  и  $h$  – ширина и толщина образца. Среднеквадратическая погрешность полученных данных не превышала  $\pm 4$  Дж/м<sup>2</sup>.

Использование растяжения концов образцов типа ДКБ приложением заданной силы по моде I для экспериментальной оценки кинетики докритического подрастания трещины в квазистатических условиях затруднено тем, что образец с трещиной в этих условиях находится в нестабильном состоянии. Любое докритическое подрастание трещины сопровождается резким возрастанием нагрузки на трещину (см. формулу (1), и ее критическим ростом. В работе для этих целей использовали заданное раскрытие трещины  $\Delta$ . При этом докритическая нагрузка на трещину, определяемая в рамках ЛУМР по формуле:  $G_I = \frac{3\Delta^2 E h^3}{16a^4}$  (2), при докритическом ее подрастании резко уменьшается, т.е. образец находится в стабильном состоянии.

Для проведения экспериментов на конце образца, где задается трещина, приклеивали опорные накладки со сквозной резьбой, в которую ввинчивали соосные винты, задающие ее раскрытие  $\Delta$ . Нагруженные образцы выдерживали длительное время в лабораторных условиях в эксикаторе, и через определенные промежутки времени фиксировали изменения длины трещины с помощью катетометра. По полученным данным строили кинетические кривые изменения длины трещины и нагрузки на нее в процессе выдержки, обобщая их в двойных логарифмических координатах в виде кинетической  $G-V$  диаграммы - соответствия скорости

докритического подрастания трещины  $V_{mp}(t)$  и нагрузки на нее  $G_I(t)$  в одинаковые периоды времени. Данные испытания проводили для ккс на основе клея ВК-9.

Для экспериментального определения локальных деформационно-прочностных характеристик клеевых соединений как параметров закона когезионной зоны использовали образцы, изображённые на рис. 1б. Испытания на нормальный отрыв проводили при скорости движения траверсы разрывной машины 0,5 мм/мин, записывая усилие с помощью динамометра, а абсолютную деформацию - с помощью датчика LVDP. Среднеквадратическая погрешность полученных значений когезионной прочности не превышала  $\pm 0,6$  МПа.

Изменение во времени локальной прочности конструкционного клеевого соединения ( $\sigma_C(t)$ ) при длительной выдержке в эксперименте на статическую долговечность определяли, также только для соединений на основе клея ВК-9 с использованием аналогичных образцов, которые выдерживали заданный период времени  $t$  (до 104 суток или до  $9 \cdot 10^6$  с) в лабораторных условиях, определяли остаточную прочность после этой выдержки.

Полученные экспериментальные результаты обобщены в таблице 2 и на рисунках 2-3.

Таблица 2 - Экспериментально определённые средние значения  $G_{IC}$  и  $\sigma_C$ , а также рассчитанные по ним размерные параметры КЗ ( $\delta_C$  и  $l_{K3}$ ) конструкционных клеевых соединений сплава Д-16 и трех типов клеев.

Клей	$G_{IC}$ , Дж/м <sup>2</sup>	$\sigma_C$ , МПа	$\delta_C$ , 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

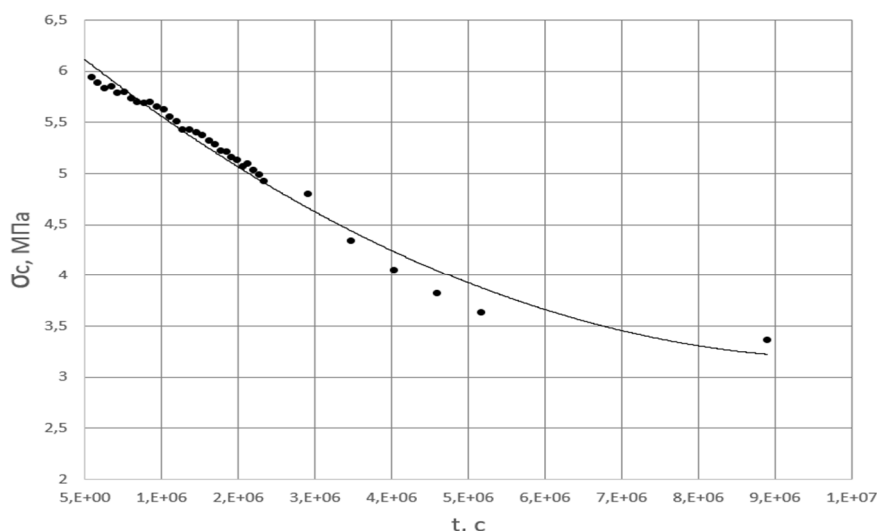


Рисунок 2 - Зависимость локальной прочности сцепления  $\sigma_c$  когезионной зоны клеевого соединения Д-16-ВК-9 от длительности выдержки  $t$ .

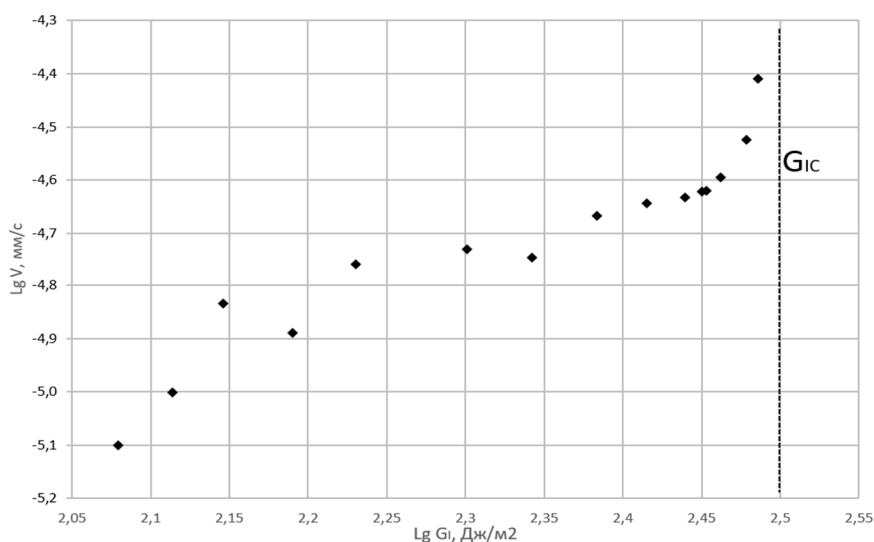


Рисунок 3 – Экспериментально определенная  $G-V$  диаграмма для клеевого соединения листов алюминиевого сплава Д-16 и клея ВК-9 при длительной статической нагрузке постоянным раскрытием трещины.

#### Глава IV. Численное моделирование критического роста трещины и оценка трещиностойкости образцов конструкционных клеевых соединений типа ДКБ

Для решения задач численного моделирования и оценки критической трещиностойкости конструкционных клеевых соединений и кинетики докритического роста трещины в них использовали метод имплантации модели когезионной зоны в метод конечных элементов. Метод МКЗ/МКЭ сочетает 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 в виде сетки интерфейсных конечных элементов. В работе использовали экспоненциальную

форму закона когезионной зоны, так как она более точно соответствует физической модели.

Оптимизация сетки интерфейсных элементов, обеспечивающая при заданной точности вычислений их допустимый объем, основывается на использовании реальной длины физической когезионной зоны.

Численное моделирование проводили в следующей последовательности:

- Командой APDL задавали экспоненциальный закон когезионной зоны и вводили необходимые его параметры.
- Программными средствами задавали граничные условия для интерфейсного слоя.
- Задавали нагрузку и направление движения элементов конструкционного клеевого соединения, вводили параметры расчёта.

После запуска программы виртуальный образец расслаивается под действием задаваемой нагрузки.

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

На рисунке 4 представлены экспериментально полученные и рассчитанные по 3D модели методом имплантации модели когезионной зоны в метод конечных элементов с использованием различных размеров конечных интерфейсных элементов  $l_e$  кривые усилие-перемещение ( $P-\Delta$ ) краев трещины при ее раскрытии по моде I для образцов в виде ДКБ конструкционных клеевых соединений алюминиевого сплава и трёх типов клеев.

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 значительно увеличивает объём и время необходимых вычислений.

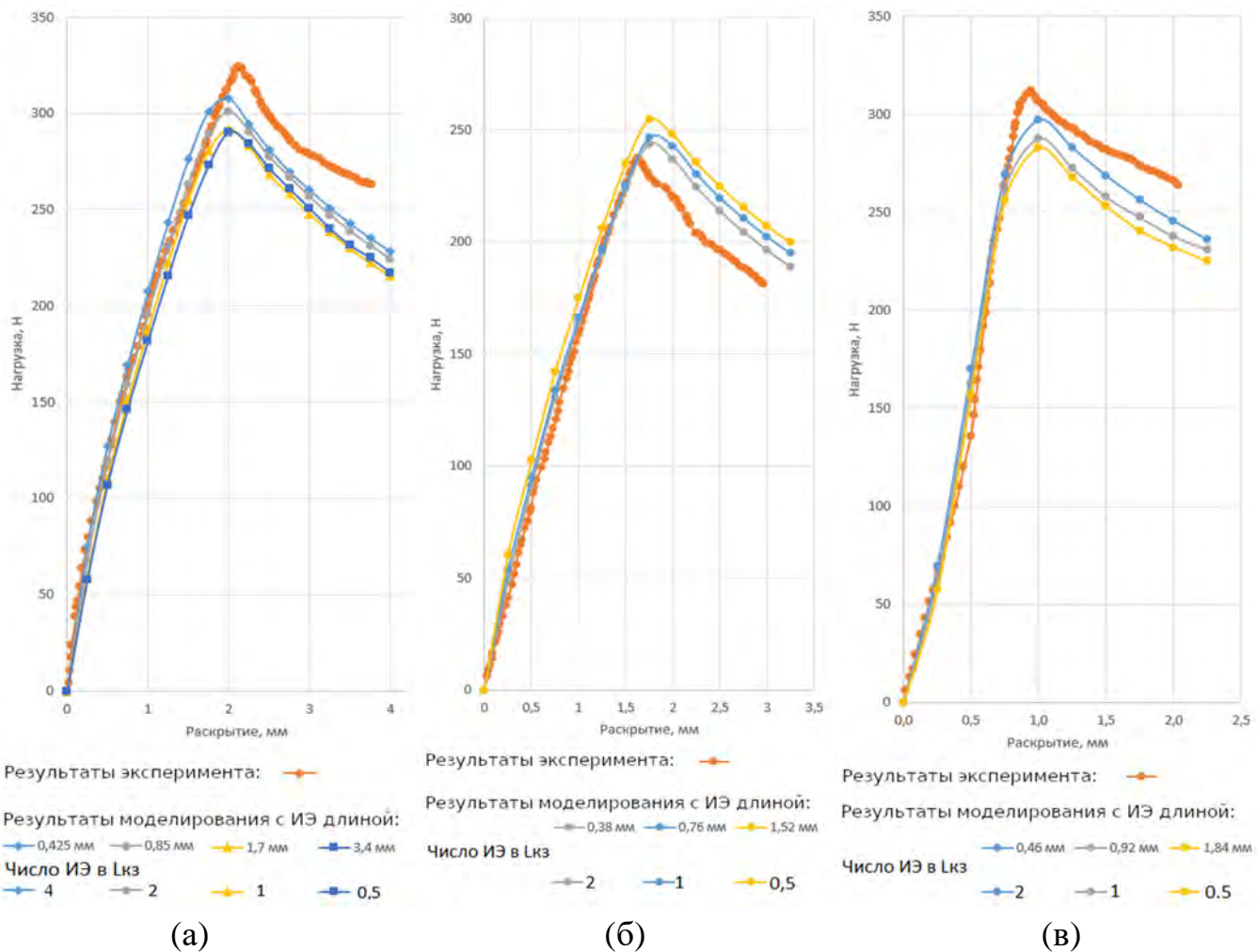


Рисунок 4. Диаграммы разрушения  $P-d$  для конструкционных клеевых соединений на основе клеев ВК-9 (а), К-300-61 (б) и ЭПК-1 (в), полученные экспериментально и численным моделированием при различной длине интерфейсных элементов и, соответственно, их количестве, укладываемых по длине физической когезионной зоны.

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

В рамках данной работы впервые предлагается и реализуется методика численного моделирования и расчета кинетики докритического подрастания трещины в образцах конструкционных клеевых соединений типа ДКБ при длительном квазистатическом нагружении - постоянном раскрытии краевой трещины. Алгоритм предлагаемой методики базируется на суммировании микроступенчатых подрастаний трещины на длину когезионной зоны вследствие потери ее несущей способности при длительном воздействии факторов окружающей среды. Такой механизм физически обосновывается моделью Баренблатта и термофлуктуационной теорией статической долговечности Журкова.



При заданном постоянном раскрытии трещины  $\Delta$  нагрузка на нее ( $G_I$ ), вызывает возникновение стабильной когезионной зоны. При этом уравнивающее их сопротивление росту когезионной зоны, в форме экспоненциального закона когезионной зоны, распределяется по ее раскрытию с максимумом, характеризующим предел упругости сопротивления, и последующим его ослаблением аналогично прохождению через максимум сил адгезионных связей как производной по расстоянию потенциала взаимодействия Леннарда-Джонса (рис. 5).

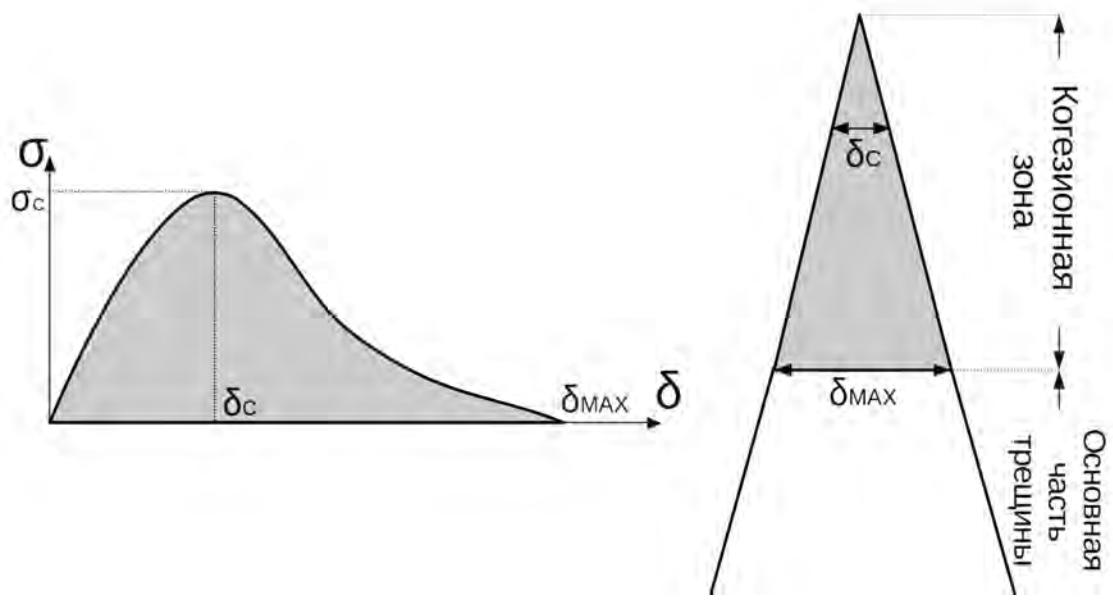


Рисунок 5 – Экспоненциальная форма распределения локальных напряжений по ширине (раскрытию) КЗ.

С течением времени под воздействием механической нагрузки и факторов окружающей среды в когезионной зоне накапливаются разрывы сдерживающих связей, вероятнее всего по термофлуктуационному механизму. Это приводит к уменьшению локальной прочности сцепления  $\sigma_c$ , критического  $\delta_c$  и предельного раскрытия  $\delta_{max}$  когезионной зоны и, соответственно, удельной работы разрушения  $\mathcal{U}_F$ , удвоенная величина которой определяет, в терминах ЛУМР  $G_{IC}$ . Когда  $G_{IC}$  станет равным или меньшим, чем исходная докритическая трещиноводвижущая сила, т.е.  $G_{IC} \leq G_I$ , трещина прорастает на длину когезионной зоны аналогично раскрытию застёжки «молния». При этом возникает новая стабильная когезионная зона, соответствующая нагрузке на трещину с подросшей длиной.

Таким образом, если в начальный момент времени  $t_0=0$  на исходную трещину длиной  $a(0)$  действует трещиноводвижущая сила  $G_I(0)$ , то она вызывает развитие когезионной зоны длиной  $l_{K3}(0)$ . При этом величина  $G_I(0)$  меньше, чем исходное сопротивление росту трещины  $G_{IC}(0)$ . При выдержке под нагрузкой начальные

параметры закона когезионной зоны -  $\sigma_c(0)$  и  $\delta_{max}(0)$  уменьшаются вследствие накопления термофлуктуационных разрывов связей, вызывая соответствующее уменьшение  $G_{IC}(0)$ . Когда за некоторый 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 когезионной зоны  $l_{K3}(0)$ . Новая 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  $G_{IC}(t_2)$ , сравнявшись 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.

По полученным значениям приращения длины трещины  $\Delta a(t_i)$  в каждый временной интервал определяется средняя скорость докритического подрастания трещины, а по длине трещины в этом интервале - 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, обычно в двойных логарифмических координатах.

Для численного моделирования и расчета кинетических параметров докритического подрастания трещины при заданном ее раскрытии на величину  $\Delta$  по моде I в образцах конструкционных клеевых соединений типа ДКБ, так же, как и при моделировании и расчете параметров критического роста, использовали среду ANSYS® Mechanical APDL Release 19R2 и аналогичную геометрическую твёрдотельную 3D модель.

В модели задаются характеристики сплава Д16, а также экспериментально определенные или теоретически рассчитанные начальные параметры закона когезионной зоны, соответствующие характеристикам клеевого соединения в начальный момент времени  $t_0 = 0$  - площади под кривой закона когезионной зоны, равной работе разрушения клеевого соединения, т.е. половине начальной интенсивности высвобождения упругой энергии  $G_{IC}(0)$ , локальной прочности сцепления  $\sigma_{IC}(0)$  и максимального раскрытия  $\delta_{max}(0)$ .

После запуска программы, в соответствие с алгоритмом моделирования для начального момент времени  $t_0=0$ , виртуальный образец расслаивается по моде I заданным раскрытием на концах ( $\Delta = const$ ) и начальной длиной трещины  $a(0)$ , по которым рассчитываются начальная нагрузка на трещину  $G_I(0)$  и начальная длина когезионной зоны  $l_{K3}(0)$  соответственно. Программа строит закон когезионной зоны начального виртуального образца (Рис.6, кривая 1). На следующем этапе моделирования роста трещины по экспериментально определенным зависимостям  $\sigma_{IC}(t)$  и  $\delta_{max}(0)$  определяется период времени  $t_1$ , за который  $\sigma_{IC}(0)$  уменьшится до  $\sigma_{IC}(t_1)$ ,  $\delta_{max}(0)$  – до  $\delta_{max}(t_1)$  и, соответственно,  $G_I(0)$  - до  $G_I(t_1)=G_I(0)$ , а трещина подрастет на длину  $\Delta a(t_1)=l_{K3}(0)$ . Для этого периода времени создается новая виртуальная модель образца конструкционного клевого соединения типа ДКБ с соответствующей длиной трещины и строится его закон когезионной зоны (см. рис. 6, кривая 2). Так повторяется  $n$  число раз, пока длительность временного интервала, необходимого для микроступенчатого подрастания трещины не станет слишком большой.

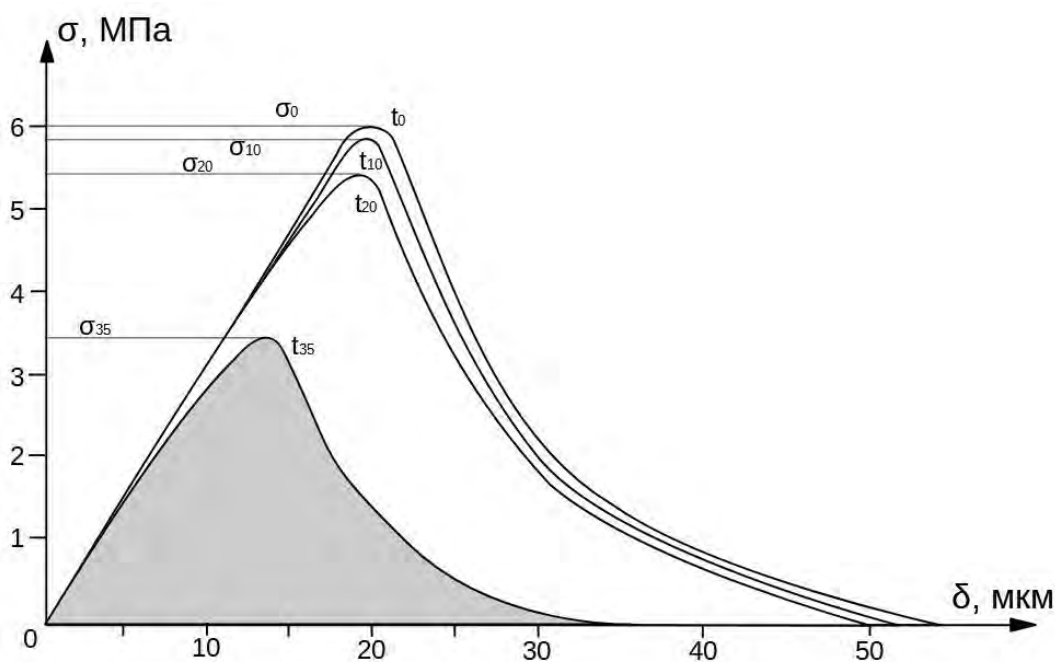


Рисунок 6 - Вид расчетных кривых закона когезионной зоны, полученных и использованных в модельных расчетах методом имплантации модели когезионной зоны в метод конечных элементов кинетических параметров докритического роста трещины в образцах КС Д-16-ВК-9 типа ДКБ при длительном докритическом нагружении.

Суммированием периодов времени рассчитывается 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 определяется средняя скорость докритического

подростания, а по ее длине в этом интервале - нагрузка на трещину  $G_I(t_i)$ , комбинацией которых получается кинетическая  $G-V$  диаграмма, записываемая в двойных логарифмических координатах.

Исследования кинетических параметров докритического роста трещин при квазистатическом нагружении были проведены для одного типа конструкционного клеевого соединения 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 когезионной зоны  $\delta_C$ ,  $\delta_{max}$  и  $l_{K3}$  данного конструкционного клеевого соединения, а также экспериментально определённые изменения во времени  $\sigma_C$  и  $\delta_{max}$  (см. табл.2 и рис.2) использованы в разработанном методе по заданному алгоритму для численных расчетов кинетических параметров докритического подростания трещины при заданном ее раскрытии. Построенная по полученным данным численная  $G-V$  диаграмма в сравнении с экспериментально полученными данными приведена на рис.7.

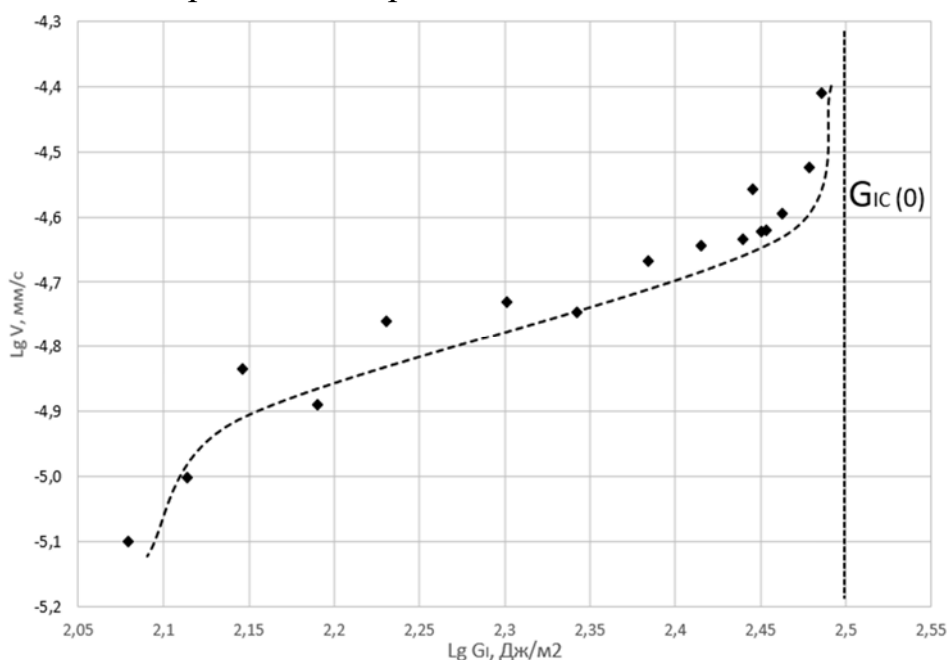


Рисунок 7 - Расчетная (пунктирная линия) и экспериментально определенная (точки)  $G-V$  диаграмма для клеевого соединения листов алюминиевого сплава Д-16 и клея ВК-9 при длительной статической нагрузке постоянным раскрытием трещины.

Прямые экспериментальные данные о кинетических параметрах докритического подростания трещины, используемые для сравнения с расчетными, были получены при контрольных наземных испытаниях образцов клеевых соединений в рамках пассивного («Компласт») и активного («КРТ») космических

экспериментов по оценке и прогнозированию долговечности конструкционных клеевых соединений и ПКМ в околоземных космических условиях.

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) клеевых соединений при длительных статических испытаниях. Как уже указывалось, большие перспективы в решении этих проблем заложены в использовании термофлуктуационной теории долговечности полимеров и их адгезионных соединений.

### **Выводы**

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

оптимальное количество интерфейсных элементов и рассчитывать нагрузку начала расслоения при минимальном объеме вычислений.

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

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

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

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

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

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

1. 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.
2. Бабаевский П.Г., Козлов Н.А., Салиенко Н.В., Устинов А.А. Анализ трещиностойкости клеевых соединений с использованием метода конечных элементов и модели когезионной зоны // Ученые записки физического факультета Московского университета. - 2019 - № 2. - с.(1920402-1)-(1920402-6)
3. Бабаевский П.Г., Козлов Н.А., Салиенко Н.В., Устинов А.А. Использование метода конечных элементов и модели когезионной зоны для анализа трещиностойкости клеевых соединений // Труды XIX Межвузовской научной школы молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине» М.: "КДУ", "Университетская книга" – 2018 - С. 46-51.
4. Устинов А.А., Козлов Н.А. Аналитическая оценка скорости докритического роста трещин в клеевых соединениях с использованием модели когезионной зоны // Гагаринские чтения – 2018: XLIV Международная молодёжная научная конференция: Сборник тезисов докладов. Т.3: М.: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) – 2018 - С.319
5. Бабаевский П.Г., Козлов Н.А., Салиенко Н.В., Устинов А.А. Определение критической трещиностойкости методом конечных элементов и аналитическая оценка скорости докритического роста трещин в клеевых соединениях с использованием модели когезионной зоны. // Четвертый междисциплинарный научный форум с международным участием "Новые Материалы и перспективные технологии". Москва. 27-30 ноября 2018 г. Сборник материалов. Том 1 - М: ООО «Буки Веди» - 2018 - С. 852-853
6. Устинов А.А. Козлов Н.А. Оценка устойчивости к инициированию и росту трещин клеевых соединений с использованием модели когезионной зоны и метода конечных элементов. // Гагаринские чтения – 2019: XLV Международная молодёжная научная конференция: Сборник тезисов докладов. Т.3: М.: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) – 2019 - С. 869 – 870.
7. Салиенко Н.В., Бабаевский П.Г., Козлов Н.А., Устинов А.А. Использование модели когезионной зоны и термофлуктуационной теории для оценки кинетики докритического роста трещин в клеевых соединениях. // 18-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2019». 18-22 ноября 2019 года. Москва. Тезисы. – М.:Типография «Логотип» - 2019 - С. 248.