



ПУБЛИЧНОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ КОРПОРАЦИЯ
«ЭНЕРГИЯ» ИМЕНИ С.П. КОРОЛЁВА»
(ПАО «РКК «ЭНЕРГИЯ»)

Ленина ул., д. 4А, г. Королёв, МО, 141070
Тел. +7 (495) 513-86-55, факс +7 (495) 513-86-20
e-mail: post@rsce.ru; http://www.energia.ru
ОКПО 07530238; ОГРН 1025002032538
ИНН/КПП 5018033937/997450001

15.11.2021 № 073-6/287

На № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
Публичного акционерного общества
«Ракетно-космическая корпорация
«Энергия» имени С.П. Королёва

И.Я. Озар

2021 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Публичного акционерного общества

«Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва»

на диссертацию Устинова Андрея Анатольевича

«Расчетно-экспериментальная оценка устойчивости конструкционных клеевых соединений к критическому и докритическому росту трещин с использованием модели когезионной зоны при квазистатическом нагружении», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17 – «Материаловедение»

Актуальность

Работа посвящена актуальному вопросу – методам оценки трещиностойкости и скорости докритического подрастания трещины в конструкционных клеевых соединениях. Для этого, в рамках применимости линейной упругой механики разрушения, были использованы современные численные методы моделирования инициирования и роста трещин путем имплантации в метод конечных элементов (МКЭ) модели когезионной зоны (МКЗ). Разработка моделей проводилась в программном пакете ANSYS®, который позволяет создавать такие модели применительно к инициированию и росту трещин в конструкционных клеевых соединениях, в том числе геометрически сложной конфигурации.

Общая характеристика работы

В первой части работы проведён анализ литературы из отечественных и зарубежных источников. Из него следует, что оценка трещиностойкости различных элементов конструкций с использованием метода конечных элементов и модели когезионной зоны – активно развивающееся направление. Показано, что применение такого подхода требует корректного экспериментального

определения параметров клеевого соединения. По итогу литературного обзора сформулированы цель и задачи работы.

Далее приводится описание объектов (клеевых соединений на основе алюминиевого сплава и трех видов конструкционных клеев) и основных экспериментальных методов, использованных в диссертации, описывается получение необходимых экспериментальных параметров. Для определения критического параметра трещиностойкости и кинетики докритического роста трещины в работе были использованы стандартные образцы клеевых соединений и метод, описанный в ГОСТ, с некоторыми изменениями для создания постоянного раскрытия трещины. Для экспериментального определения локальной прочности клеевого соединения, соответствующей прочности когезионной зоны, автором была использована относительно новая методика, взятая из литературы. Полученные результаты подробно описаны и грамотно представлены.

Раздел, посвящённый моделированию, начат с подробного описания использованных принципов и методик построения моделей. Вся информация представлена наглядно.

Разработка, согласно поставленным задачам начата с модели для условий критического роста трещины конструкционного клеевого соединения. Разработанная 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. Она основана на имплантации в метод конечных элементов модели когезионной зоны в программном комплексе ANSYS. Сравнением полученных данных с расчётными показана адекватность модели.

Далее описывается разработка алгоритма и расчетной методики, также основанной на имплантации в метод конечных элементов модели когезионной зоны, для условий докритического роста трещины по моде нагружения I, базирующиеся на суммировании микроступенчатых подрастаний трещины на длину когезионной зоны и имплантированные в программный комплекс ANSYS. Полученные кинетические G-V диаграммы совпали с экспериментальными данными, что доказывает применимость такого подхода для оценки кинетических

параметров докритического роста трещины в конструкционных клеевых соединениях при длительных квазистатических нагрузках с использованием экспериментально определённых параметров экспоненциального закона когезионной зоны.

Научная новизна

1. В представленной работе установлена аналогия между экспоненциальной формой зависимости локального напряжения от деформации когезионной зоны и производной потенциала Леннарда-Джонса для адгезионных связей при псевдохрупком адгезионном росте трещины по границе клей-субстрат в конструкционном клеевом соединении.

2. Экспериментально определены локальные деформационно-прочностные свойства когезионной зоны при разрыве по моде нагружения I и критический параметр трещиностойкости GIC клеевых соединений на основе пластин алюминиевого сплава Д-16 и трех типов конструкционных эпоксидных клеев марок ВК-9, ЭПК-1 и К-300-61. Также получены изменения локальных свойств и кинетика докритического роста трещин в лабораторных условиях при длительном нагружении (до 104 суток) клеевых соединений на основе клея ВК-9 и пластин из сплава Д-16.

3. Разработана конечно-элементная модель критического роста трещины в конструкционных клеевых соединениях, полученная с использованием модели когезионной зоны.

3. Разработаны алгоритм и расчетная методика оценки кинетики докритического роста трещин в конструкционных клеевых соединениях при длительных докритических нагрузках. В них использован обоснованный в данной работе принцип суммирования микроступенчатых подрастаний трещины.

Практическая значимость

1. Методики применения модели когезионной зоны в методе конечных элементов были доработаны для применения к отечественным конструкционным клеям в условиях критического роста трещин и позволяют оптимизировать выбор клея при проектировании и расчете клеевых соединений для изделий авиационной и ракетно-космической техники.

2. Также разработаны алгоритм и методика оценки докритической трещиностойкости конструкционных клеевых соединений различной природы и геометрии, что позволяет резко сократить длительность и объем необходимых экспериментов и вычислений. Это позволяет проводить прогнозирование статической долговечности конструкционных клеевых соединений.

Достоверность полученных результатов: автором проведено сравнение расчётных данных с экспериментальными, полученными в достаточном объёме, что свидетельствует об их достоверности.

Замечания

1. Не приведены примеры конкретных конструкций с докритическим квазистатическим нагружением трещин.
2. Не использованы другие типы субстратов для клеевых соединений (пластики, ПКМ).
3. Нет детального исследования характера разрушения образцов.

Сделанные замечания не снижают научной и практической ценности работы.

Заключение:

В целом представленная диссертация выполнена на высоком научно-техническом уровне и представляет собой законченную научно - квалификационную работу, в которой изложены научно обоснованные технические решения: оригинальная конечно-элементная модель критического роста трещины в конструкционных клеевых соединениях, алгоритм и расчетная методика оценки квазистатического роста трещины, методика определения необходимых для них экспериментальных параметров клеевых соединений.

Результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, прошли апробацию на 8 научно-технических конференциях, опубликованы в 12 печатных работах, в том числе 2 статей в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК. Результаты диссертационной работы могут быть использованы в области проектирования аэрокосмических конструкций.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

По научному уровню полученным результатам, содержанию и оформлению представленная диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям п.п. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденном Постановлением правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор Устинов Андрей Анатольевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17 – «Материаловедение».

Отзыв на диссертацию Устинова А.А. составлен на основе изучения диссертации и автореферата. Отзыв рассмотрен на расширенном заседании секции НТС «Конструкция, прочность и материаловедение» научно-технического совета Публичного акционерного общества «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С. П. Королёва» протокол № 10 от 11.11.2021 года.

На заседании присутствовало 22 члена из 37. Результаты голосования: «за» 22, против – нет, воздержавшихся нет.

Начальник отдела композиционных материалов
Научно-технического центра
конструкции космических кораблей,
орбитальных комплексов, средств выведения
ПАО «РКК «Энергия»
кандидат технических наук

Николай Иванович
Копылов

Начальник отдела технических
исследований и экспериментов
Центра полезной нагрузки ПАО «РКК «Энергия»,
кандидат технических наук

Игорь Владимирович
Чурило

Ученый секретарь
Публичного акционерного общества «Ракетно-
космическая корпорация «Энергия» имени
С. П. Королёва»
доктор физико-математических наук

Ольга Николаевна
Хатунцева

Публичное акционерное общество «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва»
Почтовый адрес: 141070 Московская обл., г. Королев, ул. Ленина д. 4а
Телефон: 8 (495) 513-67-26
Официальный сайт: <http://energia.ru>
Электронная почта: post2@rsce.ru