

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Устинова А.А. «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 работы

Рецензируемая работа посвящена одной из актуальнейших проблем современных конструкционных материалов, связанных с прогнозированием и определением устойчивости клеевых соединений при статическом и динамическом нагружении изделий в различных условиях их эксплуатации. Известно, что в настоящее время полимерные клеи всё чаще применяются для соединения листовых конструкционных материалов (металлов и композитов) в производстве и ремонте аэрокосмических конструкций. В отличие от механических соединений, клеевые соединения обеспечивают существенный выигрыш в весе и герметичности конструкций. Однако, при длительной эксплуатации, особенно в условиях космического пространства, влажных средах, динамических нагрузках клеевые соединения склонны к разрушению вследствие критического или докритического роста дефектов – трещин под воздействием внешних нагрузок. Очевидно, что это обуславливает необходимость разработки, прежде всего, аналитических и экспериментальных методов оценки стабильности соединений, методов прогнозирования несущей способности и долговечности конструкционных клеевых соединений в каждом конкретном случае, при заданной геометрии, способа нагружения и размерах дефекта.

Выбранное диссертантом направление исследований, связанное с количественной оценкой устойчивости конструкционных клеевых соединений к критическому и докритическому росту трещин, несомненно

представляет фундаментальный и практический интерес. Автор убедительно показал, что наилучшие возможности для этого решения поставленной задачи открывает метод линейной упругой механики разрушения, позволяющий определять критические значения энергетических и силовых параметров нагрузки на трещину, оценить кинетику докритического подрастания дефектов, определить долговечность клеевых соединений.

Общая характеристика работы

Аналитический обзор литературы содержит большое число современных источников, касающихся экспериментальных исследований, численного моделирования и расчета критической трещиностойкости жестких конструктивных клеевых соединений с использованием стандартных конфигураций образцов. Также приведены сведения об использовании численного моделирования для оценки устойчивости клеевых соединений к критическому и докритическому росту трещин. При этом отмечено, что данных о применении численных методов для оценки устойчивости межслоевых трещин к квазистатическому усталостному нагружению в литературе фрагментарно, чем подчеркивается актуальность выбранного направления исследований. Надеюсь, что разработанный автором методический подход позволит получать необходимую для прогнозирования базу экспериментальных данных о устойчивости конструктивных клеевых соединений и специфики их поведения в тех или иных условиях эксплуатации.

Научная новизна

В диссертации разработаны 3D модель критического роста трещины и методика оценки кинетики докритического роста трещин в конструктивных клеевых соединениях. Модель основана на современном методе «имплантации» в традиционный метод конечных элементов модели «когезионной зоны». Для этого был использован программный пакет ANSYS®, который позволяет создавать такие модели применительно к иницированию и росту трещин в конструктивных клеевых соединениях, в

том числе геометрически сложной конфигурации. Принципиально важно, что апробация разработанной модели производилась на реальных клеевых соединениях на основе пластин алюминиевого сплава Д-16 и трех типов конструкционных эпоксидных клеев марок ВК-9, ЭПК-1 и К-300-61, которые в настоящее время широко используются в производстве и ремонте аэрокосмических конструкций.

При «имплантации» в метод конечных элементов модели когезионной зоны между двумя частями твердотельной конечно-элементной модели вводится связанный с ними тонкий промежуточный (когезионный) слой с отдельной сеткой специальных интерфейсных конечных элементов. Механическое поведение этого слоя подчиняется определённому закону – закону когезионной зоны (ЗКЗ).

В основной части работы, в рамках решения поставленных задач, экспериментально определены необходимые параметры выбранных конструкционных клеевых соединений, а также закономерности изменения максимального напряжения и максимального раскрытия когезионной зоны при длительной выдержке. С использованием этих данных, проведена разработка конечно-элементных моделей с использованием метода конечных элементов и модели когезионной зоны, а также алгоритма и расчетной методики. Диссертантом убедительно на примере нескольких систем показано, что предлагаемая 3D модель позволяет при критическом росте трещины конструкционного клеевого соединения рассчитывать нагрузку начала расслоения при минимальном объеме вычислений. Была проведена проверка модели на адекватность, полученные с её помощью результаты совпадают с экспериментальными с небольшой погрешностью.

Алгоритм и расчетная методика, разработанные условия докритического роста трещины при квазистатической моде нагружения I, основываются на суммировании микро-шагов роста трещины на длину когезионной зоны, что является оригинальным решением. Получаемые в

результате G-V диаграммы позволяют прогнозировать статическую долговечность конструкционных клеевых соединений, при условии задания начального дефекта и климатических условий.

Данные алгоритм и расчетная методики для условий докритического роста трещины при квазистатической моде нагружения I также были проверены на адекватность: расчетные данные совпадают с экспериментальными.

В работе впервые получены локальные деформационно-прочностные свойства когезионной зоны при разрыве по моде нагружения I и критический параметр трещиностойкости G_{IC} клеевых соединений на основе пластин алюминиевого сплава Д-16 и трех типов конструкционных эпоксидных клеёв марок ВК-9, ЭПК-1 и К-300-61. Экспериментально определены кинетические зависимости изменения локальных свойств и кривые докритического роста трещин в лабораторных условиях при длительном нагружении клеевых соединений на основе ВК-9.

Таким образом можно утверждать, что диссертантом разработана и апробирована на реальных клеевых системах оригинальная 3D модель критического роста трещины в конструкционных клеевых соединениях, а также алгоритм и расчетная методика, которые позволяют, соответственно, оценивать трещиностойкость и кинетику докритического роста дефектов в конструкционных клеевых соединениях.

Практическая значимость

Методика применения модели когезионной зоны в методе конечных элементов была адаптирована для конструкционных клеевых соединений в критических и квазистатических докритических условиях нагружения, что позволяет использовать их при проектировании и расчете таких соединений в элементах конструкций авиационной и ракетно-космической техники. Одновременно с этим был минимизирован объём вычислений для получения достоверных результатов.

Достоверность полученных результатов не вызывает сомнений. В

диссертации приведен большой объём экспериментальных материалов, полученных в лабораторных условиях. Показано хорошее совпадение численных расчётов с многочисленными экспериментальными данными, что подтверждает достоверность модели и ее возможности ее использования в прогнозировании трещиностойкости клеевых соединений.

Замечаний к оформлению диссертации не имею.

Диссертация не лишена недостатков:

1. К сожалению, диссертант не уделил должного внимания структурно-морфологическим изучением клеевых соединений. Отсутствие этой информации не позволило идентифицировать характер разрушения соединений, идентифицировать структуру соединений и положение устья трещины и дефекта, уточнить понятие «когезионная зона» и ее геометрические характеристики.
2. Не идентифицирован механизм образования трещины на различных стадиях ее роста, а, главное, место ее локализации.
3. Не охарактеризована структура адгезионного соединения, что принципиально для детализации разрабатываемой модели.

Указанные замечания не снижают научной ценности и актуальности диссертационной работы, и будут учтены Устиновым А.А. в последующих исследованиях.

Заключение:

В целом представленная диссертация выполнена на высоком научно-методическом 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 докритического роста трещины, а

также методика определения необходимых для них 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 и прогнозирования их эксплуатационных свойств.

Автореферат и опубликованные работы полностью отражают 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.

Чалых Анатолий Евгеньевич
Академик РАН
д.х.н. проф. 02.00.04.

главный научный сотрудник

Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН

119991 Россия. Москва
Ленинский пр., 31 кор.4
Тел. 8(916)6018901
e-mail: Chalykh@mail.ru

Подпись Чалых А.Е. заверяю:

Ученый секретарь ИФХЭ РАН, к.х.н.



Гладких Н.А.

08.11.2021