

К ВОПРОСУ РАСЧЕТА ТОНКОСТЕННЫХ КЛЕЕНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Власов Ю.Л. Кудина Л.И.

Оренбургский государственный университет, г. Оренбург

Широкое применение различных сплавов и композитных материалов при производстве летательных аппаратов обозначило существенную роль в период эксплуатации процессов квазихрупкого разрушения конструкций, т.е. разрушения путем распространения трещин. Начальные повреждения существуют в элементах конструкций как дефект материала, образуются при производстве и сборке конструкции, возникают во время эксплуатации или натурных испытаний конструкции в виде усталостных трещин, которые начинаются около технологических или конструктивных концентраторов напряжений.

Развитие методов линейной механики разрушения и их практическое использование при проектировании создали предпосылки появления надежных, безопасных и экономичных конструкций в авиа и ракетостроении. Новым подходом в определении срока службы конструкции является принцип безопасных повреждений, с помощью которого можно эксплуатировать летательный аппарат до появления трещин в силовых элементах и при этом гарантировать надежность в процессе эксплуатации.

Данный принцип основан на предположении, что во время эксплуатации в конструкции присутствуют трещины, размер которых меньше или равен минимально обнаруживаемой средствами неразрушающего контроля. Необходимо уже на стадии проектирования летательного аппарата предусмотреть, чтобы повреждение, существующее в элементе конструкции, независимо от его характера не привело к катастрофическому разрушению от действия однократной высокой нагрузки или низких, но часто повторяющихся нагрузок. При этом сочетание конструктивных особенностей, свойств материалов и уровней допускаемых напряжений должно обеспечить медленный рост и большой предельный размер повреждений. Методы, качество и периодичность осмотров должны способствовать обнаружению повреждения, до того как оно достигнет опасного размера и распространится на жизненно важные элементы конструкции. Данный принцип позволяет обеспечивать безопасность при появлении даже ранних случайных трещин неусталостного происхождения.

Задача определения остаточной прочности и долговечности клееных элементов конструкций появилась в связи с широким использованием клеевых соединений в авиакосмической технике. Для локализации и предотвращения хрупкого разрушения конструкций в период эксплуатации, и для ремонта поврежденных элементов в авиакосмической технике в последние годы активно используются приклеенные или клееклепаные подкрепляющие элементы - широкие ремонтные накладки и узкие стопоры трещин, в том числе и из конструкционных материалов.

Повышенный интерес к клеевым соединениям объясняется рядом преимуществ, которыми они обладают по сравнению с другими, например, заклепочными и сварными. Замена заклепочных соединений клеевыми позволяет значительно снизить вес конструкции и получить немалый экономический эффект. Склеивание улучшает аэродинамические характеристики поверхностей, снижает стоимость производства, а также повышает технические свойства конструкций, к которым относятся стойкость к коррозионному растрескиванию и усталостная прочность. Как следствие снижаются расходы по техническому обслуживанию, и увеличивается срок эксплуатации.

Особую актуальность приобрели клеевые соединения элементов конструкций в связи с началом использования в авиа и ракетостроении композитных материалов, обладающих повышенной жесткостью и удельной прочностью в выбранном направлении. Это обеспечивает высокую эффективность использования композитных материалов в конструкциях, где снижение веса имеет решающее значение. Использование конструкционных материалов, для которых применение стандартных механических крепежных элементов не обеспечивает требуемой прочности, способствовало быстрому развитию технологии склеивания, усложнению конструкций с клеевыми и клеомеханическими соединениями, а также совершенствованию расчетных моделей, позволяющих оценить их напряженно-деформированное состояние.

Анализ сложных проектируемых элементов конструкции ракетной техники с точки зрения безопасности повреждений не позволяет проводить испытания для каждого повреждения и каждой конфигурации. Для большинства элементов конструкции единственным экономически возможным способом проверить критерий безопасных повреждений в процессе проектирования можно только методами математического моделирования.

При создании авиа и ракетной техники и доработке конструкций важную роль играют натурные испытания, одна из основных целей которых - выявление трещиноопасных зон. Зоны с повреждениями требуют особого внимания и контроль за распространением трещин в процессе испытаний. Измерение параметров, определяющих степень опасности состояния поврежденной конструкции при нагружении, дает возможность прогнозировать поведение испытываемого объекта и принимать решение о остановке испытаний и ремонте или доработке конструкции. Прогнозирование остаточной прочности и роста трещины основано на понятии коэффициента интенсивности напряжений в вершине трещины. Для его определения на основе данных, полученных во время проведения эксперимента, необходимо разработать соответствующие методы.

Большой интерес представляет оценка долговечности конструктивных элементов в условиях нерегулярного и регулярного периодического нагружения при наличии трещин. Время роста появившейся усталостной трещины или существовавшего дефекта до критического размера, как правило, составляет значительную часть времени работы конструкции. Поэтому, не менее важное значение, кроме исследования фазы возникновения трещины и

определения ее критического размера, имеет изучение процесса роста трещин и влияния на него различных технологических и конструктивных параметров.

Начальным этапом для расчета остаточной прочности и долговечности составного элемента конструкции с повреждением является анализ распределения напряжений и деформаций. Поэтому актуальной проблемой для задач проектирования и испытания конструкций авиа и ракетной техники является разработка эффективных расчетных и расчетно-экспериментальных методов определения напряженно деформируемого состояния плоских многослойных клееных элементов из изотропных и анизотропных материалов весьма.

Разрушение композитного материала - одна из наиболее сложных областей механики деформируемого твердого тела. Применение методов теории упругости и линейной механики разрушения к этим материалам усложнено, в основном, из-за анизотропии и неоднородности структуры конструкционных материалов. Но существует ряд подходов, в которых с некоторыми допущениями, разрушение конструкционных материалов можно согласовать с подходами линейной механики разрушения.

Предложенный С. Поу деформационный критерий разрушения волокон перед вершиной трещины в слоях, несущих основную нагрузку, позволяет определять критический коэффициент интенсивности напряжений для трещины в композитном материале любой толщины и укладки по характеристикам разрушения для однонаправленного материала, за исключением случаев расщепления и расслоения материала.

В тонкостенных конструкциях для предотвращения развития трещин используются стопоры трещин, ребра жесткости, широкие накладки, присоединенные с помощью заклепок, точечной сварки или клеевым соединением. В хорошо спроектированных бездефектных конструкциях использование комбинированных соединений (клеемеханических, клеесварных) не дает какого-нибудь существенного преимущества по сравнению с клеевым соединением. Однако механический крепеж, при разрушении адгезионного слоя, может сдерживать или даже предотвращать развитие дефекта.

Важно, чтобы при анализе механики клееных конструкций, предлагаемая модель клеевого соединения должна быть достаточно простой с математической точки зрения и в то же время достаточно реалистичной с точки зрения физической интерпретации.

Простейшей моделью клеевого соединения являются жестко соединенные упругие мембраны. Предполагается, что в этой модели толщина клеевого слоя равна нулю, и распределением напряжений по толщине слоев можно пренебречь. Если не учитывать толщину и податливость клеевого слоя, то это может привести к незначительным контактным напряжениям внутри области склеивания и высокой концентрации касательных напряжений вдоль границы, и, как следствие, к неоправданно заниженной расчетной предельной нагрузке.

Другая модель конструкции может рассматриваться как неоднородная среда, в которой клеевой слой и слои склеиваемого материала, представляют собой трехмерное деформируемое множество. Данная модель может

применяться только для простейших геометрических конструкций из-за сложности математического аппарата, необходимого для ее описания.

Во многих работах, посвященных клеевым соединениям, используются модели, занимающие среднее положение между ранее указанными моделями и отличаются различной степенью приближений и упрощений. Например, существует получившая широкое распространение модель, в которой элементы клеевого соединения представлены в виде мембран, соединенных клеевым слоем конечной толщины, работающим только на сдвиг.

К.Арин и Т. Свифт на основе решения задачи о действии сосредоточенной силы в бесконечной ортотропной и изотропной пластине с прямолинейным разрезом и с использованием модели контакта по линии провели обширные расчетные и расчетно-экспериментальные исследования для пластин с трещинами и приклеенными узкими ребрами.

В.Н. Максименко и В.Н. Павшук методом интегральных уравнений решили задачи о деформировании бесконечной пластины с криволинейными трещинами, отверстиями и произвольно расположенными приклеенными и клееклепаными стопорами трещин. Они исследовали влияние на остаточную прочность поврежденной панели: жесткостных параметров элементов, размеров и взаимного расположения трещины, отверстия, подкрепления; упруго-пластического поведения материалов клея и заклепок; частичного повреждения клеевого слоя, разрыва подкрепляющего элемента, заклепок.

Для торможения образовавшихся в тонкостенной конструкции трещин вместе с одномерными подкрепляющими элементами используются широкие приклеенные или клееклепанные накладки из высокопрочных конструкционных материалов, которые устанавливаются во время ремонта конструкции. Эти ремонтные мероприятия представляют собой довольно эффективное средство усиления листовых элементов конструкций с концентраторами напряжений и блокирования трещин. Р.Джонс и Р. Кэллинан провели обширные исследования в этом направлении, используя для расчетов метод конечных элементов и подход, разработанный ранее Р. Митчеллом, Р. Вули, Д. Чивиром, который позволяет учитывать линейное изменение касательных напряжений по толщине клееной конструкции. Аналогичные задачи методом конечного элемента для случая кругового выреза или прямолинейной трещины, металлической или композитной накладки, клеевого или клеемеханического способа присоединения решали Т.К. Бегеев, Н.С. Галкина и В.И. Гришин. Р. Чандра с соавторами рассмотрел проблему численного и экспериментального определения коэффициента интенсивности напряжений в вершинах трещины, подкрепленной накладкой, а также исследовал закономерности роста трещины при нагружении, имитирующим спектр полетных нагрузок. Д. Картрайт, А. Юнг, Г. Доурик, и Д. Рук определяли аналитическим способом коэффициент интенсивности напряжений в вершинах прямолинейной трещины в изотропной пластине, подкрепленной прямоугольной или эллиптической изотропной накладкой.

Многослойные клееные элементы конструкций находят широкое применение в авиа и ракетостроении. Это объясняется их более высокой

вязкостью разрушения по сравнению с монолитными элементами той же толщины. Например, материалы типа АЛ10Р (многослойные алюминиевые пластины, армированным органическими арамидными волокнами) или типа СИАЛ (стеклопластик и алюминий) обладают некоторыми уникальными свойствами. Они обладают хорошими статическими и усталостными характеристиками, особенно в направлении волокон. При этом для них применимы технологические процессы обработки традиционных металлических листовых материалов. Сильное замедление или прекращение роста трещин этих материалов объясняется тем, что позади движущейся в тонких алюминиевых листах вершины трещины, армирующие волокна остаются целыми и удерживают раскрытие трещины, а также снимают часть нагрузки с листов.

Ф. Эрдоган и К. Арин рассматривали слои как мембраны, соединенные склеивающим слоем конечной толщины, работающим только на сдвиг. В работе предложено аналитическое решение задачи для случая двухслойной панели с одной прямолинейной трещиной в металлическом слое и неповрежденным композитным слоем. М. Джесит и Ф. Эрдоган разработали две модели клевого слоя. Одна приближенная в виде комбинации пружин, работающих на растяжение и сдвиг, другая континуальная, в которой не используются какие-либо упрощающие предположения. М. Ратвани предложил метод с учетом влияния изгибной жесткости слоев в зоне повреждения и провел исследования роста усталостной трещины в двухслойной клееной металлической панели.

На основании теоретических и экспериментальных исследований процесса роста усталостных трещин было установлено, что в общем случае плоского напряженного состояния определяющим параметром скорости роста трещины при циклическом нагружении, является соответствующее циклическое изменение коэффициентов интенсивности напряжений. Характер изменения нагрузок по времени может быть как регулярным, так и нерегулярным. Так как в большинстве случаев изменения напряжений носят случайный характер во времени, необходимо рассчитать длительность роста усталостной трещины под действием такого спектра нагружения.

Для определения статистических характеристик значений случайных нагрузок используют кривые их повторяемости, которые показывают вероятное число повторений нагрузки, равной или большей данной. Эти кривые получаются в результате соответствующих методик обработки действительных процессов измерения во времени нагрузок, замеренных на конструкциях.

Если известен закон изменения во времени эксплуатационных нагрузок, то необходимо использовать какой-нибудь метод подсчета циклов. Например, метод максимумов, экстремумов, размахов, полных циклов с различными видоизменениями. Наиболее широкое распространение для подсчета числа циклов получили метод полных циклов и метод дождя.

Распространение усталостной трещины под действием нерегулярных нагрузок в элементах конструкций прогнозируется интегрированием зависимостей, связывающих скорость роста трещины и параметры цикла изменения

коэффициента интенсивности напряжений, которые представляются кинетической диаграммой усталостного разрушения материала. Предложено много способов аналитического представления кинетических диаграмм, среди них наиболее известны формулы Р. Формана, П. Пэриса, Г.П. Черепанова и др. Они подразделяются на теоретические и эмпирические. Отличаются числом учитываемых физико-механических констант материала и вводимых эмпирических параметров, и имеют различные области применимости. В первом случае интегрирование производится по каждому циклу нагрузки с использованием различных моделей замедления и требует значительных вычислительных затрат, разработки алгоритмов и программ расчета коэффициента интенсивности напряжений, но более достоверно описывает процесс разрушения. Во втором случае внешние нагрузки приводятся к эквивалентному пульсирующему циклу по повреждаемости с последующим интегрированием, что дает большие погрешности в прогнозировании роста трещины, но значительно снижает трудоемкость работ.

Можно сделать вывод, что задачи определения напряженного деформируемого состояния, остаточной прочности и остаточной долговечности клееных конструкций исследовались различными методами многими авторами в различных постановках вопроса. Однако, работы, в которых разрабатывались методики расчета для анизотропных клееных многослойных пластин с трещинами или однослойных, подкрепленных двумерными подкрепляющими элементами, практически отсутствуют. Разработка методики решения таких задач и исследование влияния геометрических и жесткостных характеристик конструкции, различных способов присоединения листов на напряженно-деформируемое состояние, остаточную прочность, процесс роста трещин при циклических нагрузках представляется актуальной.

Список литературы

- 1 Берт, Ч. Расчет пластин. Композиционные материалы. Т. 5. Анализ и проектирование конструкций / Ч. Берт. – М.: Машиностроение, 1978. – С. 154-209.*
- 2 Брушковский, А.Л., Брушковская И.Д. Унификация приближенных методов расчета заклепочных и клееклепанных соединений / А.Л.Брушковский, И.Д. Брушковская // Вопросы механики деформируемого твердого тела. - 1983. - №4. – С. 5-10.*
- 3 Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях переменных во времени. – М.: Машиностроение. 1977. – 324 с.*
- 4 Крысин В.Н. Слоистые клееные конструкции в самолетостроении. – М.: Машиностроение, 1980. – 228 с.*