

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук, профессора **Дудченко Александра Александровича** на диссертационную работу Федотова Алексея Александровича «Методика восстановления элементов авиационных конструкций с эксплуатационными повреждениями с помощью клеевых соединений», представленной к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.14 – Эксплуатация воздушного транспорта.

Диссертационная работа Федотова А.А. посвящена решению **актуальной задачи** созданию методики проектировочного расчета клеевых ремонтных соединений, которая может быть достаточно простой для использования её специалистом без глубокой подготовки в рассматриваемом направлении работы, и достаточно надежной в плане применяемых методов расчета вариантов проектируемого соединения. В данной работе основное направление расчета смещено в сторону анализа работы ремонтируемой конструкции. Использование такой методики в процессе разработки процедур ремонта позволяет проводить оперативный поиск оптимальной конструкции без привлечения на данном этапе дорогостоящих ресурсов по прочностному расчету (в первую очередь, пакетов программ, построенных на методах конечных элементов).

Научная новизна исследования и полученных результатов

В работе автором сформулирован метод аналитического расчета клеевых ремонтных соединений. Научную новизну работы составляют как и построенная аналитическая модель клеевого ремонта металлических конструкций композитными заплатами, так и результаты экспериментальных исследований усталостной прочности и получение характеристик деградации механических свойств образцов из полимерного композиционного материала, проведенные в испытательных машинах с применением климатической камеры при действии циклической нагрузки.

В качестве наиболее значимых результатов является обоснование доступных технологий клеевых ремонтов и области их возможного применения при ремонте эксплуатационных повреждений металлических авиационных конструкций

Достоверность и адекватность результатов подтверждена разработанным расчетным математическим методом, который позволяет получать достоверные результаты надежности клеевого ремонта места

повреждения с последующим сравнением с результатами эксперимента и расчетом аналогичной задачи другим методом.

Практическая значимость

Использование полученных результатов позволит разработать эксплуатационную документацию по ремонту воздушных судов гражданской авиации

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка сокращений и списка литературы.

Во введении раскрыта решаемая проблема и обоснована актуальность исследования, обозначены предмет и объект исследования, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, ее научная новизна и практическая значимость, перечислены основные положения, выносимые на защиту.

В первом разделе диссертационной работы анализируются существующие технологии ремонта конструкций планера самолета и дана оценка их преимуществ и недостатков с обзором имеющейся литературы по рассматриваемому вопросу. В результате исследования имеющихся методов ремонта, сделан вывод о применимости и преимуществах технологии клеевого ремонта для восстановления несущей способности алюминиевых конструкций авиационной техники. Причем, приведены технологические трудности установки клеевых ремонтных заплат и указаны ограничения области применения клеевого ремонта по температуре и кривизне ремонтируемой конструкции.

Проведенный анализ позволяет обосновано в дальнейшем разрабатывать технологию ремонта конструкции.

Во втором разделе диссертационной работы рассматриваются расчетные модели клеевого ремонта, которые позволяют определять напряженно-деформированное состояние для эллиптических включений. При этом учитывается влияние локальной заплаты на изменение исходного напряженно-деформированного состояния обшивки с учетом её кривизны при допущении, что заплата жестко прикреплена к обшивке. После этого производится оценка напряжений в клеевом слое при передаче воздействия от обшивки к заплате, а затем определяется зависимость коэффициентов интенсивности напряжений в вершине трещины от приложенной растягивающей нагрузки. В работе построено расчетное выражение для определения распределения напряжений между составляющими элементами ремонтного соединения, которое может учитывать влияние изменения температуры.

Проведенные в разделе расчетные исследования позволяют определять вклад приклеенной заплаты в изменении распределения напряжений в заплате и обшивке с учетом дефекта.

В третьем разделе рассмотрены экспериментальные исследования деградации продольного модуля упругости углепластика от циклически приложенной растягивающей нагрузки, исследовалось изменение модулей продольной и поперечной упругости углепластиковых образцов под действием циклической нагрузки при температурах -60 , $+23$, $+80$ °С, а также изменение коэффициента Пуассона под действием циклической нагрузки при тех же температурах с коэффициентом асимметрии цикла $R = 0,1$. При этом амплитуда растягивающей нагрузки задавалась как 67% от средней разрушающей нагрузки для данных образцов при заданной температуре.

Такой подход к проведению эксперименту говорит о доверительном отношении к полученным результатам, что видно из данных таблицы 3.2 и графиков зависимости продольного модуля упругости от числа циклов нагрузки, показанных на рисунках 3.11а,б.

Как отмечает сам автор, что реальные конструкции подвергаются более сложному режиму нагружения, чем это учитывается в моделях, используемых при разработке конструкций.

Тем не менее полученные результаты позволяют с достаточной уверенностью судить о результатах проведенного ремонта.

В четвертом разделе приводится методика расчета параметров композитных клеевых ремонтных заплат для устранения дефектов в металлических элементах конструкций планера.

На основе исследований, приведенных в предыдущих разделах, строится общий алгоритм расчета параметров клеевого ремонта и разрабатывается методика подбора подходящих ремонтных заплат из композиционных материалов.

В работе разработана блок-схема расчетного алгоритма с описанием пронумерованных шагов расчета, где критерием качества ремонтного соединения будет считаться скорость развития существующего в обшивке дефекта типа трещины.

Проведена верификация аналитического расчета клеевого ремонтного соединения, в том числе и при циклическом нагружении, с использованием конечно-элементного метода и другими методами, что позволило получить ответ

о применимости выбранного способа ремонтного соединения, который дает возможность выполнять этот ремонт в сжатые сроки.

В результате проведенных исследований в диссертации построен алгоритм проектировочного расчета клеевого ремонтного соединения, построенный на основе вычислительных моделей для разных температур и разных материалов ремонтной заплаты, описанных в разделе 2, и использующий данные натурального эксперимента раздела 3. В результате даны общие рекомендации для подбора параметров и настройки расчета. Проведена верификация проектировочного расчета и проведено сравнение результатов вычислений с данными аналогичного натурального эксперимента и с данными конечно-элементного расчета.

Считаю, что диссертационная работа Федотова Алексея Александровича прошла необходимую апробацию на научно-технических конференциях, а также им опубликовано 7 печатных работах, 3 из которых опубликованы в изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией.

В качестве замечаний можно указать следующее:

1. В диссертации при рассмотрении вопросов эксплуатации конструкции после ремонта не в полной мере учитывается изменение величин амплитуд и направление приложенных нагрузок, которые могут варьироваться в широких пределах от цикла к циклу, и могут сочетаться, как отмечают другие авторы, с различными температурными, влажностными, коррозионными и эрозионными явлениями, что будет существенно влиять на характеристики усталости материала.
2. В описании модели клеевого соединения не учитывается качество подготовки поверхностей под склеивание.
3. Не учитывается характер развития дефектов в композиционном материале ремонтной заплаты.

Все приведенные замечания говорят о том, что все это требует дальнейшего проведения исследований в этом направлении в дальнейшей работе автора.

Несмотря на указанные замечания диссертационная работа Федотова Алексея Александровича «Методика восстановления элементов авиационных конструкций с эксплуатационными повреждениями с помощью клеевых соединений» является законченной квалификационной работой, имеющей

научную новизну, высокую практическую ценность. По актуальности темы, научной новизне, практической значимости и достоверности результатов диссертации соответствует, предъявляемым к кандидатским диссертациям о присуждении ученых степеней.

Данная работа отвечает всем требованиям Положения ВАК к диссертациям о присуждении ученых степеней, а ее автор, Федотов А.А., заслуживает ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.14 – Эксплуатация воздушного транспорта.

Официальный оппонент

Профессор кафедры «Проектирование и прочность авиационно-ракетных и космических изделий» Московского авиационного института (национального исследовательского университета), доктор технических наук

Дудченко Александр Александрович

Дудченко Александр Александрович
125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д.4
E-mail: mai@mai.ru, kaf602@mai.ru, Факс: +7 499 158-29-77.

Подпись Дудченко А.А. заверяю:

Заместитель начальника Управления
по работе с персоналом МАИ



Иванов Михаил Анатольевич

« 2 » 03 2022 г.