

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Кулемина Александра Васильевича
«РАЗВИТИЕ РАСЧЁТНЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ МЕТОДОВ
ОБОСНОВАНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ЖИВУЧЕСТИ САМОЛЁТНЫХ
КОНСТРУКЦИЙ», представленную на соискание ученой кандидата
технических наук
по специальности 05.07.03 – «Прочность и тепловые режимы летательных
аппаратов»

Актуальность темы диссертации. На современном этапе развития авиационной техники обеспечение безопасности по критериям прочности, предполагающим возможное появление повреждений (в т.ч. в виде трещиноподобных дефектов), достигается на основе принципов эксплуатационной живучести летательных аппаратов. Вместе с тем, следует признать недостаточное развитие расчетных и экспериментальных методов анализа и обоснования живучести конструкций летательных аппаратов при наличии трещин с учетом особенностей эксплуатационного нагружения и изменения траектории трещин, а также отсутствие необходимых современных характеристик трещиностойкости материалов, получаемых на элементарных и конструктивно-подобных образцах. Кроме того, проблема обеспечения безопасной эксплуатации длительно эксплуатируемых транспортных самолётов также требует привлечения концепции эксплуатационной живучести.

Поэтому, представленная диссертационная работа, несомненно, актуальна и является значительным вкладом в развитие расчетных моделей и экспериментальных методов, позволяющих проводить анализ и обоснование эксплуатационной живучести самолетных конструкций.

Достоверность и новизна основных выводов диссертации.

Диссертационная работа изложена на 194 страницах и состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы.

Структура диссертации логично отражает последовательность решения поставленных соискателем задач, а именно: обзор и анализ отечественных и зарубежных исследований по методам обеспечения эксплуатационной живучести авиационных конструкций; разработка и верификация метода расчёта трещиностойкости тонкостенных конструкций в условиях двухосного напряжённого состояния; расчётные методы определения характеристик трещиностойкости с применением R-кривой; исследование характеристик трещиностойкости материалов длительно эксплуатируемых самолётов.

Предложены оригинальные расчетные методы прогнозирования траектории трещин с определением характеристик трещиностойкости в тонкостенных конструкциях в условиях двухосного напряжённого состояния. Проведена верификация этих методов на крупногабаритных крестообразных образцах и образцах типа двойной консольной балки (ДКБ) из обшивочных материалов фюзеляжа в условиях двухосного напряжённого состояния. Разработаны рекомендации по методу расчёта поворота трещин.

На основе разработанного экспериментально-расчетного метода впервые определены новые расчетные характеристики трещиностойкости отечественных материалов с использованием концепции R-кривых, направленные на оценку и обоснование остаточной прочности самолётных конструкций. Предложенный методический подход также продемонстрирован на примере оценки остаточной прочности образца с многоочаговыми трещинами.

Для обоснования эксплуатационной живучести длительно эксплуатируемых самолетных конструкций проведен значительный объём расчётно-экспериментальных исследований. Получены экспериментальные данные по влиянию длительной эксплуатации на характеристики усталости и трещиностойкости обшивочных авиационных материалов, которые рекомендуется учитывать при уточнении периодичности осмотров планеров длительно эксплуатируемых самолётов.

Достоверность и обоснованность основных положений и выводов в диссертационной работе подтверждается корректной постановкой задач, апробированными подходами механики разрушения, действующими стандартами испытаний, а также сопоставлением полученных расчетных результатов с результатами экспериментов.

Значимость результатов для науки и практики. Результаты диссертационной работы имеют широкий потенциал для применения в отечественной науке и практике отечественного авиастроения.

Прежде всего, следует отметить разработанный автором оригинальный метод учёта влияния двухосного напряжённого состояния тонкостенных конструкций, а также учёт влияния отклонения траектории трещин на длительность их развития и на остаточную прочность.

Обширные исследования автора позволили разработать метод получения R-кривой в качестве расчётной характеристики статической трещиностойкости материалов в условиях плоского напряжённого состояния, что, безусловно, будет способствовать повышению точности и информативности проводимых расчётных исследований живучести.

Заслуживают внимания уникальные результаты экспериментальных исследований деградации основных прочностных характеристик материалов образцов, вырезанных из конструкции планеров самолётов после длительной эксплуатации со сроком службы 28, 44, 45 и 48 лет. Полученные механические характеристики позволят оценивать возможность продления ресурса, а также уточнять периодичность осмотров планеров длительно эксплуатируемых самолётов.

Оценка диссертации. Диссертация написана достаточно подробно и иллюстрирована графиками, схемами и фотографиями. По содержанию диссертации можно поставить некоторые вопросы и сделать следующие замечания:

1. На с. 66 автор отмечает, что «расчёт поворота трещин для ДКБ образцов с длиной начального надреза $a_n < 141$ мм, то, с учётом

принятых начальных условий ($K_{II}=0$), отклонение трещины по расчёту не прогнозируется». Как автор может объяснить наблюдаемое явление с точки зрения физики и механики разрушения?

2. Автором рекомендуется при расчёте траектории роста трещины в ДКБ образцах с длинами надрезов $a_n \approx 40 - 90$ мм принимать отношение $K_{II}/K_I = 0.0075 \div 0.015$ (с. 68). Из каких соображений выбрано это отношение? Зависит ли оно от геометрических параметров образца и материала?
3. На с. 93 автор отмечает, что «Для расчёта траектории развития трещины необходимо задать начальный угол трещины θ_0 ». Из каких физических соображений назначается этот угол для крестообразных образцов? Является ли этот угол константой материала, размеров и геометрии трещины и образца, параметров двухосности напряженного состояния?
4. В выводах к главе 3 расчетную R-кривую рекомендовано включить в Справочник по расчётным характеристикам авиационных металлических конструкционных материалов. Является ли эта расчетная R-кривая характеристикой материала или она зависит от толщины и ширины рассчитываемого элемента конструкции, а также от наличия стрингеров?
5. Автор предложил расчетные методы прогнозирования траектории трещин с определением характеристик трещиностойкости в тонкостенных конструкциях в условиях двухосного напряжённого состояния. Однако из текста диссертации не совсем ясно как изменение траектории трещины влияет (или может повлиять) на расчетные R-кривые и диаграммы усталостного роста трещины, что весьма важно при анализе и обосновании эксплуатационной живучести.

Сделанные замечания не отражаются, однако, на положительном решении по диссертации.

Заключение. Диссертация представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, посвященную расчетным моделям и экспериментальным методам, позволяющих проводить анализ и обоснование эксплуатационной живучести самолетных конструкций.

Основное содержание диссертации отражено в периодической печати и доложено на конференциях и семинарах. Автореферат диссертации в целом правильно и полно отражает ее содержание.

Диссертация удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, А.В. Кулемин, заслуживает искомой ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.03 – «Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов» за развитие расчетных и экспериментальных методов обоснования эксплуатационной живучести самолетных конструкций.

Официальный оппонент,
Заведующий отделом
прочности, живучести и безопасности
машин Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова
Российской академии наук,
докт. техн. наук, профессор,
Заслуженный деятель науки РФ
Матвиенко Юрий Григорьевич



Ю.Г. Матвиенко

10.01.2022 г.

101000 Москва, М. Харитоньевский пер., 4
Тел.: (499) 135 12 04
E-mail: ygmatvienko@gmail.com

Подписи Ю.Г. Матвиенко заверяю:



Согласен с отзывом
Кулемин А.В.

С отзывом ознакомлен *Кулемин А.В.*
11.01.2022 г.

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Кулемина Александра Васильевича
**«Развитие расчётных и экспериментальных методов обоснования
эксплуатационной живучести самолётных конструкций»** (научный руководитель
– д.т.н. Нестеренко Г.И.), представленной на соискание учёной степени кандидата
технических наук по специальности 05.07.03 - «Прочность и тепловые режимы
летательных аппаратов»

Эксплуатационная живучесть самолетных конструкций является одним из важнейших факторов обеспечения безопасности эксплуатации как современных, так и «стареющих» самолетов. При всех достижениях в развитии методов обоснования эксплуатационной живучести нельзя утверждать, что все вопросы и проблемы в этой области успешно решены. В этом плане **актуальность темы** диссертационной работы не вызывает сомнений.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы из 103 наименований. Общий объем работы составляет 194 страницы, включая 107 рисунков и 16 таблиц.

По теме диссертации опубликовано 24 печатные работы, 4 из которых в научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Во **введении** автор обосновал актуальность рассматриваемых задач, их практическую значимость и применимость. Сформулированы цели и задачи исследования.

В **первой главе** приведён обзор отечественных и зарубежных исследований по методам повышения характеристик эксплуатационной живучести конструкций крыла и фюзеляжа транспортных самолётов.

Во **второй главе** приведена процедура и представлены результаты экспериментальных исследований трещиностойкости образцов типа двойной консольной балки (ДКБ) и крестообразных образцов в условиях двухосного напряжённого состояния. На основании верификации критериев расчёта поворота трещин, а также с учётом предложенных автором рекомендаций, разработан метод расчёта поворота трещин в образцах ДКБ и крестообразных образцах. Разработаны

рекомендации по учёту двухосного напряжённого состояния на скорость роста трещин и на остаточную прочность тонкостенных конструкций.

Третья глава посвящена отработке метода получения R -кривой в качестве расчётной характеристики статической трещиностойкости материалов в условиях плоского напряжённого состояния, а также приведён разработанный метод расчётного определения вязкости разрушения K_{IC}^Y для образцов с центральной трещиной различной ширины по параметрам R -кривой.

В **четвертой главе** представлены прочностные характеристики современных отечественных и зарубежных материалов конструкций крыла и фюзеляжа, полученные как лично автором, так и при его участии, в испытательной лаборатории комплекса прочности ФГУП «ЦАГИ», а также результаты экспериментальных исследований по оценке влияния длительной эксплуатации самолётов на характеристики усталости, трещиностойкости и механические свойства материалов конструкции фюзеляжа и крыла четырех транспортных самолётов, имеющих сроки службы 28, 44, 45 и 48 лет.

В **заключении** приведены основные выводы по полученным результатам.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

1. Разработан и верифицирован метод расчёта траектории роста трещин в крестообразных образцах, а также предложены рекомендации по учёту поворота трещин в обшивке на характеристики трещиностойкости.

2. Разработан метод получения расчётной R -кривой, включая формат представления R -кривых в Справочнике расчётных значений характеристик авиационных материалов.

3. Разработан метод расчётного определения вязкости разрушения K_{IC}^Y для плоских образцов различной ширины по параметрам R -кривой.

4. Получены оценки деградации основных прочностных характеристик материалов самолётов после длительной эксплуатации (срок службы 28, 44, 45 и 48 лет).

Практическая значимость заключается в повышении точности и информативности расчётной оценки характеристик трещиностойкости тонкостенных конструкций вследствие:

– использования разработанного метода учёта влияния на длительность роста усталостной трещины и на остаточную прочность конструкции двухосного напряжённого состояния и отклонения траектории трещины;

– более широкого внедрения в практику метода расчёта остаточной прочности с использованием R -кривых.

Использование разработанного метода расчётного определения вязкости разрушения K_{IC}^y для плоских образцов различной ширины по параметрам R -кривой, позволит отказаться от проведения испытаний на трещиностойкость плоских образцов малой ширины (200 – 750 мм), что существенно сократит объём проводимых испытаний в рамках специальной квалификации.

Проведённая оценка деградации основных прочностных характеристик материалов образцов, вырезанных из конструкции планеров списанных самолётов после длительной эксплуатации, будет учитываться при продлении ресурсов, а также при уточнении периодичности осмотров планеров длительно эксплуатируемых самолётов.

Достоверность результатов расчётных исследований влияния двухосного напряжённого состояния и отклонения траектории роста трещин на характеристики трещиностойкости конструкций обеспечивается верификацией предложенного метода расчёта на результатах испытаний крестообразных образцов в лаборатории комплекса прочности ЛА ФГУП «ЦАГИ».

Разработанный метод получения расчётной R -кривой, а также предложенный метод расчётного определения вязкости разрушения K_{IC}^y для плоских образцов различной ширины по параметрам R -кривой основаны на результатах большого объёма (более 300 образцов шириной 750-1200 мм) испытаний по определению R -кривых конструкционных материалов (самолётов MC-21, SSJ-100 и др.), проведённых автором в рамках специальной квалификации в испытательной лаборатории комплекса прочности ЛА ФГУП «ЦАГИ».

Экспериментальные исследования основных прочностных характеристик материалов конструкции планеров самолётов после длительной эксплуатации проведены в испытательной лаборатории комплекса прочности ЛА ФГУП «ЦАГИ» в соответствии с действующими стандартами испытаний.

Можно отметить **наиболее существенные новые научные результаты, полученные автором.**

В диссертационной работе решены важные практические задачи по разработке и верификации метода расчёта трещиностойкости (длительности роста трещин и остаточной прочности) тонкостенных конструкций в условиях двухосного напряжённого состояния; по разработке метода получения расчётной R -кривой для включения её в Справочник расчётных характеристик авиационных материалов; по разработке метода расчётного определения вязкости разрушения K_{IC}^y для плоских образцов различной ширины по параметрам R -кривой; по оценке деградации основных прочностных характеристик материалов, вырезанных из конструкции планеров списанных самолётов после длительной эксплуатации.

Основные результаты диссертационной работы формулируются следующим образом:

1. Разработанный метод учёта влияния двухосного напряжённого состояния тонкостенных конструкций, а также учёта влияния отклонения траектории трещин на длительность их развития и на остаточную прочность, позволит более точно оценивать эксплуатационную живучесть самолётных конструкций.

2. Разработанный метод получения расчётной R -кривой, а также формат представления R -кривых в Справочнике, позволит более широко применять R -кривые для расчётных исследований трещиностойкости конструкций, тем самым позволит повысить точность и информативность проводимых расчётных исследований живучести.

3. Разработанный метод расчётного определения вязкости разрушения K_{IC}^y для плоских образцов различной ширины по параметрам R -кривой, после его верификации на статистически обоснованном объёме накопленных экспериментальных данных, позволит отказаться от проведения испытаний на трещиностойкость плоских образцов малой ширины (200 – 750 мм), что существенно сократит объём проводимых испытаний в рамках специальной квалификации.

4. Проведённые экспериментальные исследования и оценка деградации основных прочностных характеристик материалов образцов, вырезанных из конструкции планеров списанных самолётов после длительной эксплуатации (срок службы 28, 44, 45 и 48 лет), будут учитываться при продлении ресурсов, а также при уточнении периодичности осмотров планеров длительно эксплуатируемых самолётов.

К несомненным достоинствам работы следует отнести уникальный для кандидатских диссертаций объем выполненных расчетно-экспериментальных исследований.

Замечания к работе сводятся к следующему.

1. В автореферате в Список публикаций по теме диссертации включены шесть годовых научно-технических отчетов, которые считаются публикациями только в диссертациях под грифом ДСП.
2. Выводы к четвертой главе, где представлены результаты экспериментальных исследований по оценке влияния длительной эксплуатации самолётов на характеристики усталости, трещиностойкости и механические свойства материалов конструкции фюзеляжа и крыла четырех транспортных самолётов, несколько противоречат выводам, представленным ранее в работах научного руководителя диссертации д.т.н. профессора Нестеренко Г.И.
3. Вывод о том, что оценка деградации основных прочностных характеристик материалов будет учитываться при продлении ресурсов, а также при уточнении периодичности осмотров планеров длительно эксплуатируемых самолётов, необходимо подкрепить соответствующими положениями в Рекомендательном циркуляре РЦ 25.571-1А.

В целом, диссертационная работа Кулемина А.В. представляет собой законченное научное исследование, имеющее несомненную практическую ценность и соответствует требованиям ВАК при Министерстве образования и науки РФ к кандидатским диссертациям, а ее автор, А.В. Кулемин, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.03 - «Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов».

Содержание автореферата правильно отражает основные результаты диссертации.

Начальник департамента
усталостной прочности и ресурса
АО «АэроКомпозит», доктор технических наук

Стрижиус Виталий Ефимович

Подпись заверяю:

Директор по персоналу и общим вопросам
АО «АэроКомпозит»

Стрижиус В.Е.

27.12.2021г.

Буланова В.С.

Сотзовым ознакомлен
Кулемин А.В. 28.12.2021г.

