

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу  
Акулина Петра Владимировича «Метод расчёта на прочность щелевых  
обтекателей несущих поверхностей летательных аппаратов из  
композиционных материалов с учётом деградации свойств матричной  
структуры», представленной на соискание учёной степени кандидата  
технических наук по специальности

2.5.14. – «Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов»

Диссертационная работа Акулина П.В. посвящена решению научной проблемы разработки методики расчёта конструкций летательных аппаратов из композиционных материалов, позволяющей выполнять прочностные расчёты щелевых обтекателей из таких материалов в уточнённой постановке.

### **Актуальность темы диссертации.**

В процессе эксплуатации щелевые обтекатели из композиционных материалов накапливают повреждения в матричной структуре, вследствие чего происходит снижение жесткостных и прочностных свойств обтекателя и изменение первоначальной геометрической формы обтекателей. Развитие повреждений в композиционном материале является сложным процессом из-за высокой анизотропии свойств композиционного материала и значительных перепадов жёсткости материала на границе раздела волокна и матрицы на микроуровне. Помимо этого, значительное влияние в зарождение и развитие трещин вносит геометрическая кривизна волокон в тканых композиционных материалах.

Актуальной задачей является расчёт прочностных и деформационных параметров элементов конструкции из композиционных материалов с учётом накопления повреждений в матричной структуре. Данное направление требует уточнения существующих методик расчёта.

### **Общая характеристика работы.**

Диссертационная работа Акулина П.В. имеет чёткую структуру.

УЧЕБНО-НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ ЦЕНТР  
КОРРЕСПОНДЕНЦИИ  
И КОНТРОЛЯ ИСПОЛНЕНИЯ  
ДОКУМЕНТОВ МАИ  
«20» 11 2025г.

Работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы, приложения А с результатами испытаний, приложения Б с алгоритмом численного моделирования поведения эпоксидной смолы. Работа содержит 123 страниц, 77 рисунков, 18 таблиц. Список литературы содержит 124 наименования.

Во **Введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, указана научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, обоснована степень достоверности, перечислены положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации результатов работы и публикациях.

**Глава 1** посвящена обзору современного состояния исследований по вопросу накопления повреждений в конструкциях из композиционного материала. *В разделе 1.1* проанализирована проблема накопления повреждений в конструкциях из полимерных композиционных материалов. Рассмотрены причины ухудшения свойств композиционного материала как на микро, так и на макроуровне. *В разделе 1.2* проведён анализ работ по вопросу разрушения матричной структуры композиционных материалов на микроуровне. Приведены работы с экспериментальными исследованиями. *В разделе 1.3* проведён обзор вопроса накопления повреждений на макроуровне. Рассмотрена механика зарождения межслоевых трещин в элементах конструкции из композиционных материалов. *В разделе 1.4* рассмотрены существующие методики рационального проектирования конструкций из композиционного материала с учётом деградации свойств в процессе эксплуатации. *В разделе 1.5* рассмотрено актуальное состояние вопроса по расчёту ресурсной прочности композиционных конструкций. *В разделе 1.6* ставятся задачи исследования. *сформулировано* заключение по первой главе.

**В Главе 2** рассмотрен вопрос численного моделирования прочностных и деградационных параметров элементарного слоя композиционного

материала, включающего в себя однонаправленные углеродные волокна. В разделе 2.1 Приведена модель численного моделирования поведения напряжённо-деформированного состояния эпоксидной смолы с учётом физической нелинейности, свойств разной сопротивляемости и снижения модуля упругости от действующих напряжений. Выполнена валидация математической модели на основе результатов экспериментального исследования. В разделе 2.2 разработана модель для исследования напряженно-деформированного состояния элементарного слоя полимерного композиционного материала, включающего однонаправленные углеродные волокна, с учётом деградации свойств матричной структуры. Идентифицированы параметры накопления повреждений в слое по модели Р. Ladeveze. Проведена валидация модели на основании экспериментальных данных. В разделе 2.3 определены параметры разрушения элементарного слоя композиционного материала вследствие отказа матричной структуры. Рассмотрено комбинированное сдвиговое и поперечное нагружение. Проведено сравнение полученных результатов численного моделирования с критерием разрушения Tsai-Wu.

В Главе 3 рассмотрен вопрос численного моделирования прочностных и деградационных параметров элементарного слоя тканых композиционных материалов, включающего атласное плетение арамидных волокон. В разделе 3.1 получены жесткостные характеристики жгута тканого композиционного материала. В разделе 3.2 разработана модель для исследования напряженно-деформированного состояния элементарного слоя тканых полимерных композиционных материалов с учётом деградации матричной структуры и геометрической кривизны волокна. Проведена валидация математической модели по результатам экспериментального исследования.

В Главе 4 разработана методика многоуровневого расчёта прочностных и деформационных параметров щелевых обтекателей из тканых и однонаправленных полимерных композиционных материалов в уточнённой постановке, включающая идентификацию прочностных, деградационных и

деформационных параметров элементарного слоя щелевых обтекателей на микроуровне (главы 2 и 3). Проведено сравнение полученных результатов расчёта с экспериментальными данными.

**В Главе 5** приведено экспериментальное исследование деградационных и деформационных свойств элементарных и конструктивно подобных образцов из полимерных композиционных материалов. Полученные результаты легли в основу валидационного базиса работы.

**В Заключение** сформулированы основные результаты по диссертационной работе.

#### **Научная новизна**

Научная новизна работы заключается в разработке методики многоуровневого расчёта прочностных и деформационных параметров щелевых обтекателей из тканых и однонаправленных полимерных композиционных материалов в уточнённой постановке, включающая в себя модели по идентификации прочностных, деформационных и деградационных параметров элементарного слоя на микроуровне. Получены новые экспериментальные данные о деградации свойств элементарного слоя тканого органопластика при растяжении вдоль основы и утка, а также щелевых обтекателей из полимерных композиционных материалов при консольном изгибе.

**Теоретическая значимость работы** обусловлена возможностью расчёта прочностных и деформационных параметров щелевых обтекателей из композиционного материала в уточнённой постановке. Автором разработан алгоритм численного моделирования напряжённо-деформированного состояния эпоксидной смолы с учетом деградации свойств и разрушения, реализованный в пользовательском модуле UMAT для ПК Abaqus.

**Практическая значимость** диссертационной работы определяется разработанной методикой многоуровневого расчёта прочностных и деформационных параметров щелевых обтекателей, которая позволяет

идентифицировать проектировочные параметры конструкции на начальных этапах проектирования конструкции летательных аппаратов.

**Достоверность результатов** обеспечивается применением апробированных аналитических и численных методов расчета, и подтверждается путем сравнения расчетных результатов с экспериментальными данными.

**Степень обоснованности выводов, сформулированных в диссертации**, обеспечена использованием разработанных методик и моделей и опирается на теоретические основы механики разрушения композиционных материалов. Результаты численного исследования подтверждаются экспериментальными данными.

Достоверность результатов, полученных в ходе натурных испытаний, обусловлена:

1. использованием сертифицированного и поверенного оборудования;
2. методикой проведения испытаний элементарных образцов, которая соответствует государственному стандарту ГОСТ 25.601.

#### **Соответствие публикаций и автореферата диссертационной работе**

Автореферат и список публикаций полностью отражают содержание диссертации. Основные результаты диссертационного исследования представлены в 7-ми публикациях, в том числе в 3-х публикациях в изданиях Перечня ВАК по специальности 2.5.14.

Автореферат в полной мере отражает основное содержание диссертации.

По содержанию диссертации имеются некоторые **замечания**:

1. Не соблюдается размерность данных: размерность исходного материала дана в системе СИ, результаты расчетов приведены в системе СГС;
2. В разделах 5.2 и 5.3, по мнению оппонента, не хватает ссылок на ГОСТ. В диссертации использована терминология: «малоцикловое нагружение», «многоцикловое нагружение». В последнем случае

приведена величина 768000 циклов. В тексте отсутствует информация каким периодам эксплуатации изделия они соответствует?

3. В тексте встречается термин «остаточные перемещения». Чем они вызваны? Если пластическими деформациями связующего, то каков их уровень в препреге до и после формования? В диссертации не приводятся относительные или абсолютные значения остаточных перемещений. Предложена борьба с этими перемещениями в виде предварительного натяга. Не указан уровень натяга в зависимости от величины остаточных перемещений.

Данные замечания не влияют на значимость полученных автором научных и практических результатов и общую положительную оценку диссертации.

### **Выводы**

Рассмотренная диссертационная работа Акулина Петра Владимировича посвящена решению актуальной научной проблемы разработки методики расчёта, позволяющей проводить прочностные расчёты щелевых обтекателей из композиционных материалов в уточнённой постановке. Диссертация является законченной научно-квалификационной работой и выполнена на высоком научном уровне. Диссертация соответствует предъявляемым к кандидатским диссертациям требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК РФ, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. N 842 (ред. от 11.09.2021). Автор работы, Акулин Петр Владимирович, заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.14 – Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов.

Официальный оппонент – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории теории механизмов и структуры машин Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Института машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук.

Адрес: 101000, Москва, Малый Харитоньевский переулок, д.4

E-mail: Nik\_Azikov@mail.ru

Телефон +7 (916) 491-5007

Н.С. Азиков

11.11.2025

Подпись Н.С. Азикова удостоверяю

Зам. начальника отдела кадров ИМАШ РАН С.А. Демидова



С отзывом ознакомлен  
Акулиничев П.В. Акулиничев 20.11.2025