

И.о. заместителя генерального
директора по науке ФАУ «ЦАГИ»,
канд. техн. наук, доцент

И.о. замес
директора по
канд. т

на диссертационную работу Акулина Петра Владимировича

представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.14. – Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов

Целью диссертационного исследования является разработка уточнённой методики расчёта прочностных и деформационных параметров щелевых обтекателей из композиционных материалов, включающей комплекс моделей для идентификации физических параметров элементарного слоя на микроуровне.

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 публикации.

В второй главе рассмотрено разрушение и накопление повреждений в слое композиционного материала, состоящем из однонаправленных углеродных волокон при малоцикловом нагружении. Для решения поставленной задачи предложена

«19» 11 2025г.

модель представительного элементарного объёма, включающая в себя алгоритм численного моделирования нелинейного поведения эпоксидной смолы с учетом снижения модуля упругости от действующих напряжений, реализованный в пользовательской среде UMAT Abaqus. Проведено сравнение полученных параметров накопления повреждений и разрушения элементарного слоя КМ с экспериментальными данными.

В третьей главе приведена модель, описывающая разрушение и накопление напряжений в слое тканого полимерного композиционного материала. Волокна тканого органопластика на микроуровне геометрически криволинейные, что обусловлено применяемым атласным плетением нитей. Отличительной чертой данной структуры КМ является то, что при растяжении материала волокна, ориентированные в направлении нагрузки, стремятся распрямиться. Возникают локальные концентраторы напряжений в матрице материала приводящие к накоплению повреждений. Наблюдается нелинейное деформирование материала. Автором получена зависимость нагрузки от относительных деформаций элементарного образца из тканого органопластика с учётом описанных особенностей деформирования при растяжении. Показано хорошее согласование полученных результатов расчёта с экспериментальными данными.

В четвёртой главе рассмотрен подход к моделированию напряжённо-деформированного состояния щелевых обтекателей из КМ в уточнённой постановке. Методика включает определение параметров накопления повреждений и нелинейного поведения на микроуровне с последующим учётом этих характеристик на макроуровне. Разработанная методика позволяет выполнять прочностные расчёты обтекателей из КМ и определять остаточные деформации конструкций. Выполнено сравнение результатов расчётов с экспериментальными данными, полученными в рамках данной работы.

В пятой главе представлены результаты натурных экспериментов, которые стали основой для валидации диссертационной работы. Диссертант получил новые данные о накоплении повреждений в тканом органопластике при его статическом растяжении вдоль основы и утка. Также были приведены экспериментальные данные о накоплении остаточных деформаций и повреждений в конструкционно аналогичных образцах щелевых обтекателей при статическом и многоцикловом нагружении консольным изгибом.

В заключении сформулированы основные выводы по результатам диссертационной работы.

Научная новизна заключается в разработке методики расчёта напряжённо-деформированного состояния щелевых обтекателей при статическом малоцикловом нагружении, в процессе которого происходит деградация свойств элементарного слоя, что ведёт к изменению первоначальной формы обтекателей и образованию зазора в конструкции летательного аппарата. В рамках данной методики предложены модели для идентификации свойств элементарного слоя, учитывающие структуру слоя на микроуровне и разрушение матрицы в процессе нагружения. Разработанные модели включают алгоритм численного моделирования напряжённо-деформированного состояния эпоксидной смолы, учитывающий влияние знака действующих в материале напряжений и физическую нелинейность материала. В

рамках исследования получены новые экспериментальные данные о деградиционных свойствах элементарных и конструктивно подобных образцов из тканого органопластика.

Практическая значимость. Предложенная методика позволяет оценивать напряженно-деформированное состояние щелевых обтекателей из композитных материалов в процессе нагружения, а также определять величину остаточных деформаций. На основе этих данных осуществляется комплекс оптимизационных доработок конструкции, направленных на предотвращение образования зазоров в конструкции при эксплуатации

Достоверность полученных результатов подтверждается сравнением с экспериментальными данными, полученными в рамках данной работы, а также опубликованными в открытых научных изданиях. Надёжность результатов, полученных в ходе натурных испытаний, обусловлена использованием сертифицированного и поверенного оборудования. Методика проведения испытаний соответствует требованиям государственных стандартов.

Публикация результатов работы. Основные результаты диссертации опубликованы в 7-ми печатных работах, в т. ч. в 3-х статьях в периодических изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Замечания по тексту диссертации:

1. Выбор кусочно-линейных функций для моделирования (рисунок 2.5) не вполне обоснован. Формула 2.12 допускает нелинейную зависимость, использование которой могло бы улучшить соответствие с результатами испытаний.
2. В формуле 2.12 последнее слагаемое – « $c_1 1^{c_2}$ », однако непонятно, в чём смысл возводить единицу в степень.
3. На рисунках 5.7 и 5.12 показаны графики зависимости параметра деградации модуля упругости от средних действующих напряжений. При малых значениях напряжений коэффициент деградации превышает единицу, что указывает на повышение жёсткости материала. Необходимо объяснить причины данного явления.
4. На странице 38 в последнем предложении говорится, что конечно-элементная модель с явными граничными условиями показывает значительные локальные всплески в зоне заделки. Однако из текста не ясно, о каких именно физических величинах идет речь.
5. В формуле 2.33 нет пояснений для обозначений F_1 и F_{66} .
6. В тексте диссертации встречаются опечатки, частые повторы слов и стилистические неточности.
 - На стр. 4 второе предложение начинается с маленькой буквы.
 - На стр. 5 при перечислении фамилий сделан перенос на следующую строку в середине предложения.
 - В формуле 2.3 используется обозначение σ_{yy} , а в пояснении обозначение σ_y .
 - На рис. 2.6 представлен график зависимости касательных напряжений, при этом ось y обозначена как σ , (ранее касательные напряжения обозначались символом τ)

- На рис. 2.13с опечатка в порядке значений вертикальной оси. «3481, 3300, 3314, 3329...».
- На рис. 2.14 на шкале по оси x следует указать большее число разрядов для избежания повторения одинаковых значений.

В целом сделанные замечания не влияют на положительную оценку работы и полученных результатов.

Диссертационная работа представляет собой завершённое научное исследование и по своей актуальности, научной новизне, уровню исполнения, объёму, а также научной и практической значимости полностью соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года. Ее автор, Акулин Петр Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.14 — Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов.

Главный научный сотрудник отделения
«Статической и тепловой прочности ЛА»,
д-р. техн. наук, профессор



В.И. Гришин

Начальник сектора отделения
«Статической и тепловой прочности ЛА»



Е.А. Левченко

Отзыв обсужден и одобрен на научно-техническом совете ФАУ «ЦАГИ» по прочности (выписка из протокола № 8 от 17.11.2025).

И.о. председателя НТС ФАУ «ЦАГИ»
по прочности



М.В. Лимонин

Секретарь НТС ФАУ «ЦАГИ» по
прочности



С.И. Елеонский

Тел.: +7 (495) 556-43-03
e-mail: Aleksandr.dzuba@tsagi.ru

Наименование организации: Федеральное автономное учреждение «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского» (ФАУ «ЦАГИ»)

Почтовый адрес: 140180 Московская обл. г. Жуковский, ул. Жуковского, д. 1

Телефон: +7 (495) 556-43-03

Электронная почта: info@tsagi.ru

Сайт: tsagi.ru

с отзывом ознакомлен 19.11.2025
Акулин П.В. Акулин