

На правах рукописи



Акулин Петр Владимирович

**Метод расчёта на прочность щелевых обтекателей несущих
поверхностей летательных аппаратов из композиционных материалов
с учётом деградации свойств матричной структуры**

Специальность 2.5.14.

«Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов»

Автореферат диссертации на соискателя ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: **Дудченко Александр Александрович**,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Азиков Николай Сергеевич**
доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник лаборатории
теории механизмов и структуры машин
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки «Институт
машиноведения им. А.А. Благоднарова»
Российской академии наук ИМАШ РАН,
г. Москва.

Федоренко Алексей Николаевич

Кандидат технических наук, старший
научный сотрудник автономной
некоммерческой образовательной
организации высшего образования
«Сколковский институт науки и технологий»
г. Москва.

Ведущая организация: Федеральное автономное учреждение
«Центральный аэрогидродинамический
институт имени профессора Н. Е.
Жуковского», МО, г. Жуковский.

Защита состоится «11» декабря 2025 г. в 14:00 часов на заседании
диссертационного совета 24.2.327.09 в федеральном государственном
бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский
авиационный институт (национальный исследовательский университет)»
(МАИ) по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте МАИ по ссылке:
https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT_ID=186151

Автореферат разослан «_____» _____ 2025 г.

Отзыв, заверенный печатью, просим направлять по адресу:

125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, Отдел учёного и
диссертационных советом МАИ

Учёный секретарь

диссертационного совета
24.2.327.09, к.т.н., доцент



Стрелец Дмитрий Юрьевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Перспективные летательные аппараты (ЛА) содержат в конструкции щелевые обтекатели, расположенные в хвостовой части крыла (ХЧК), изготовленные из полимерных композиционных материалов (ПКМ). Щелевые обтекатели способствуют повышению летно-технических характеристик ЛА за счёт перекрытия щели между крылом и механизацией на всех режимах полёта. Установка щелевых обтекателей осуществляется консольным образом на ХЧК, свободный торец опирается на обшивку механизации. При отклонении механизации нагрузка на щелевые обтекатели передаётся через консольный изгиб, поскольку свободный торец постоянно контактирует с обшивкой механизации и повторяет траекторию её движения. Структура щелевых обтекателей включает элементарные слои ПКМ из однонаправленных углеродных волокон и тканых органопластиковых волокон.

В процессе эксплуатации происходит деградация свойств внутренней структуры композиционного материала, что приводит к изменению первоначальной формы щелевых обтекателей и образованию зазора. При проектировании конструкций из полимерных композиционных материалов необходимо учитывать снижение жесткостных и прочностных характеристик монослоя ПКМ в ходе эксплуатации, связанное с возникновением и ростом трещин в матричной структуре.

Важным аспектом исследования является методика многоуровневого расчёт прочностных и деформационных параметров щелевых обтекателей с учётом деградации свойств матричной структуры и нелинейного поведения элементарного слоя.

Актуальность работы заключается в построении моделей, характеризующих поведение композиционного материала с учётом деградации матричной структуры методом численного моделирования. Данные модели позволяют определять деформационные и деградационные параметры композиционного материала, которые следует учитывать при проектировании конструкции летательных аппаратов. В работе приведено экспериментальное исследование элементарных и конструктивно подобных образцов, что формирует валидационную базу.

Степень разработанности темы исследования. Проведен широкий спектр исследований на тему деградации свойств композиционных материалов. Сложность моделирования деградации свойств композиционного материала обусловлена неоднородностью внутренней структуры ПКМ. В процессе формования изделий из композиционных материалов образуются микродефекты в матрице, а в процессе отверждения возможны смещения волокон и образование короблений. Моделирование деградации физических

свойств композиционного материала остаётся сложной задачей, которая сохраняет актуальность и требует дальнейшего изучения.

Теоретические и экспериментальные исследования свойств клеевых связующих для полимерных композиционных материалов представлены в работах Кулагиной Г.С., Железиной Г.Ф., Шульдешовой П.М., Петровой И.О., Дементьевой Л.А., Fiedler B., Hojo M., Ochiai S., Schulte K., Andoc M.

Исследования свойств углеродных и арамидных нитей представлены в работах Железиной Г.Ф., Гуляевой И.Н., Соловьевой Н.А., Cheng M., Chen W., Weerasooriya T.

Исследования механики деформирования и деградации свойств композиционных материалов представлены в работах Дудченко А.А., Лурье С.А., Васильевой В.В., Barbero E. J., Ladeveze P., Le Dantec E., Гузь А.Н.

Вопросы численного моделирования деградации свойств композиционного материала представлены в работах Garoz D., Gilabert F.A., Sevenois R.D.B., Spronk S.W.F., Van Paerepegem W., Lemanski S.L.

Цель диссертации

Целью диссертационной работы является разработка метода расчёта на прочность щелевых обтекателей несущих поверхностей летательных аппаратов из композиционных материалов с учётом деградации свойств матричной структуры и исследование в уточнённой постановке нелинейного поведения элементарного слоя тканого органопластика вследствие геометрической кривизны первичных нитей.

Задачи работы, сформулированные для достижения поставленной цели:

1. Разработать методику многоуровневого расчета прочностных и деформационных параметров щелевых обтекателей из тканых и однонаправленных ПКМ с учётом деградации свойств матрицы и геометрической кривизны волокна в элементарном слое.
2. Разработать модель для исследования напряженно-деформированного состояния элементарного слоя однонаправленных ПКМ из углеродного волокна с учётом деградации матричной структуры.
3. Разработать модель для исследования напряженно-деформированного состояния элементарного слоя тканых ПКМ с учётом деградации матричной структуры и геометрической нелинейности волокна.
4. Определить параметры деградации свойств тканого органопластика при растяжении вдоль основы и утка.
5. Определить параметры деградации свойств щелевых обтекателей из ПКМ при нагружении консольным изгибом.

Объект исследования. Объектом исследования являются щелевые обтекатели в хвостовой части крыла из ПКМ.

Предмет исследования. Деградация физических характеристик композиционного материала вследствие накопления повреждений в матричной структуре.

Научная новизна

1. Предложена методика многоуровневого расчета прочностных и деформационных параметров щелевых обтекателей из тканых и однонаправленных ПКМ с учётом деградации свойств матрицы и геометрической кривизны волокна в элементарном слое;
2. Предложена модель для исследования напряженно-деформированного состояния элементарного слоя однонаправленных ПКМ из углеродного волокна с учётом деградации матричной структуры;
3. Предложена модель для исследования напряженно-деформированного состояния элементарного слоя тканых ПКМ с учётом деградации матричной структуры и геометрической нелинейности волокна;
4. Получены новые экспериментальные данные о деградационных свойствах тканого органопластика при растяжении вдоль основы и утка;
5. Получены новые экспериментальные данные о деградационных свойствах щелевых обтекателей из ПКМ при нагружении консольным изгибом.

Теоретическая значимость работы

- Предложенная модель численного моделирования нелинейного поведения эпоксидной смолы с учётом деградации свойств и разрушения в пользовательском модуле UMAT ПК Abaqus;
- Идентифицированные параметры накопления повреждений в элементарном слое композиционного материала из однонаправленных углеродных волокон;
- Предложенная модель численного моделирования напряжённо-деформированного состояния элементарного слоя тканого органопластика с учётом прогрессирующего разрушения матрицы и геометрической кривизны волокна

Практическая значимость работы

Результаты исследования позволят проводить рациональное проектирование щелевых обтекателей из композиционного материала с учетом влияния деградации свойств. Внедрение результатов численного моделирования диссертационной работы заключается в формировании рекомендаций по рациональному проектированию конструкций из ПКМ в филиале ПАО «ОАК» – ОТА ОКБ «Сухого».

Методология и методы исследования

Методология исследования заключается в изучении физической нелинейности свойств композиционного материала, возникающей в результате накопления повреждений в матричной структуре.

При исследовании прочностных, деградационных и деформационных свойств панелей из ПКМ композиционных материалов, а также конструкционных материалов использовались методы теории упругости, пластичности, численного моделирования и экспериментальных исследований.

Положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся:

1. Методика многоуровневого расчёта прочностных и деформационных параметров щелевых обтекателей из тканых и однонаправленных ПКМ с учётом деградации свойств матрицы и геометрической кривизны волокна в элементарном слое.

2. Модель для исследования напряженно-деформированного состояния элементарного слоя однонаправленных ПКМ из углеродного волокна с учётом деградации матричной структуры.

3. Модель для исследования напряженно-деформированного состояния элементарного слоя ПКМ с учётом деградации матричной структуры и геометрической нелинейности волокна.

4. Параметры деградации свойств тканого органопластика при растяжении вдоль основы и утка.

5. Параметры деградации свойств щелевых обтекателей из ПКМ при нагружении консольным изгибом.

Степень достоверности результатов

Модели поведения композиционного материала реализованы в программном комплексе (ПК) конечных элементов Simulia Abaqus со встроенным функционалом описания пользовательских моделей материала UMAT.

Проведено сравнение результатов численного моделирования деградации свойств ПКМ при малоцикловом нагружении с результатами натурных испытаний, опубликованными в научных журналах, а также полученными в рамках данной работы.

Достоверность результатов, полученных в ходе натурных испытаний, обусловлена:

1. использованием сертифицированного и поверенного оборудования;
2. методика проведения испытаний элементарных образцов соответствует государственным стандартам ГОСТ 25.601.

Апробация результатов

Основные результаты и положения диссертации доложены и обсуждены на международных и всероссийских научных конференциях:

1. Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения» (г. Москва, 2023 г.)
2. Всероссийская научно-практическая конференция «Проблемы прочности авиационных конструкций и материалов» (г. Новосибирск, 2023 г.)
3. Международная молодежная научная конференция «XXVI Туполевские чтения» (г. Казань, 2023 г.)
4. Международная научно-практическая конференция «IX Чаплыгинские чтения» (г. Новосибирск, 2023 г.)

Содержание диссертации изложено в 7-ми публикациях, в том числе в 3-х публикациях в изданиях Перечня ВАК по специальности 2.5.14.

Личный вклад автора состоит в разработке методики расчёта прочностных и деформационных параметров щелевых обтекателей из ПКМ в уточнённой постановке. Реализован алгоритм численного расчёта напряжённо-деформированного состояния эпоксидной смолы с учётом нелинейного поведения, свойств разносопротивляемости и снижения модуля упругости от действующего нагружения. Проведён расчёт напряжённо-деформированного состояния (НДС) элементарного слоя однонаправленного и тканого ПКМ. Определены прочностные, деформационные и деградационные параметры элементарного слоя ПКМ по результатам численного моделирования. Проведён расчёт параметров деградации тканого органопластика по результатам натурных испытаний.

Структура и объем диссертации. Диссертационная 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.

Содержание диссертации

Во **Введении** обоснована актуальность темы исследования, раскрыта степень разработанности темы, сформулированы объект и предмет исследования, а также цель диссертационной работы и задачи, которые необходимо решить для её достижения, отмечаются научная новизна, теоретическая и практическая значимость проведённых исследований. Перечислены методы исследования и положения, выносимые на защиту, обоснована достоверность исследования, представлена апробация работы на конференциях и публикации, в которых изложены основные научные результаты, а также отмечен личный вклад автора и соответствие темы диссертации паспорту специальности.

В Главе 1 рассмотрено актуальное состояние вопросов расчёта прочностных и деформационных параметров конструкции из ПКМ, теоретического описания и экспериментального исследования деградации

жесткостных свойств композиционного материала, проведён анализ научных изысканий и определены задачи исследования.

В разделе 1.1 рассмотрена проблема накопления повреждений в конструкциях из композиционного материала (ПКМ). Рассмотрены причины деградации свойств композиционного материала на микро- и макроуровне.

В разделе 1.2 рассмотрен вопрос деградации свойств монослоя ПКМ вследствие разрушения матричной структуры на микроуровне. Приведен литературный обзор по экспериментальным исследованиям деградации структуры элементарного слоя ПКМ, а также по математическим моделям, описывающим данный процесс.

В разделе 1.3 рассмотрен вопрос накопления повреждений в ПКМ на макроуровне. Проведен обзор литературы по вопросу деградации свойств и развитию межслоевых трещин в ПКМ. Рассмотрены существующие расчетные методы и методики, описывающие рост трещин.

В разделе 1.4 проведён обзор литературы по вопросу рационального проектирования конструкций из ПКМ с учетом деградации свойств матричной структуры вследствие статического или малоциклового нагружения.

В разделе 1.5 проведён обзор литературы по вопросам ресурсной прочности ПКМ. Рассмотрены существующие методы оценки ресурсной прочности.

В разделе 1.6 обозначены задачи, которые будут решены в рамках данной работы.

В разделе 1.7 приведено заключение по первой главе.

В Главе 2 рассмотрен вопрос численного моделирования деградации структуры однонаправленного углеродного волокна. Для рационального проектирования конструкций летательных аппаратов из композиционных материалов необходимо учитывать снижение жесткостных и прочностных свойств в процессе эксплуатации. Одним из факторов, способствующих деградации физических свойств полимерных композиционных материалов (ПКМ), является растрескивание матричной структуры под воздействием статического и малоциклового нагружения.

Существуют методики проектирования конструкций из ПКМ, которые учитывать деградацию свойств материала от действующего нагружения. Однако основная проблема заключается в том, что эти методики требуют обширной экспериментальной базы, включающей различные параметры деградации монослоя ПКМ.

Актуальной темой является идентификация параметров деградации композиционных материалов по средствам виртуальных испытаний. Численное моделирование позволяет значительно снизить временные и финансовые затраты, а также воспроизвести испытания элементарных образцов, подверженных сложному напряженному состоянию.

В разделе 2.1 рассмотрен алгоритм численного моделирования упругопластического поведения эпоксидной смолы с учётом снижения жесткостных свойств в процессе нагружения. Условием начала пластических деформаций является критерий текучести (1). Данный критерий учитывает свойства разносопротивляемости материала.

$$f = \sigma_e^{tr} - \sigma_{yy}, \quad (1)$$

где σ_e^{tr} – эффективные пробные напряжения, σ_{yy} – предел текучести:

$$\sigma_e^{tr} = \sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x \sigma_y - \sigma_x \sigma_z - \sigma_y \sigma_z + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2) - (\sigma_{cж}^{ny} - \sigma_p^{ny})(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \quad (2)$$

$$\sigma_{yy} = \sigma_p^{ny} \sigma_{cж}^{ny} + Hp \quad (3)$$

где $\sigma_p^{ny}, \sigma_{cж}^{ny}$ – пределы пропорциональности материала при растяжении и сжатии, H – коэффициент линейного упрочнения Ньютона, p – эффективные пластические деформации.

В процессе нагружения материала происходит снижение модуля упругости материала E по следующей формуле:

$$E = E_0(1 - c_1 K^{c_2} + c_1 1^{c_2}) \quad (4)$$

$$K = \frac{\sigma_e^{tr}}{\sigma_p^{ny} \sigma_{cж}^{ny}}, \quad (5)$$

где c_1, c_2 – параметры деградации матрицы, определяемые из натурных испытаний.

На Рисунке 1 приведена блок-схема программного кода, реализованная в подпрограмме UMAT конечно-элементного комплекса Abaqus.

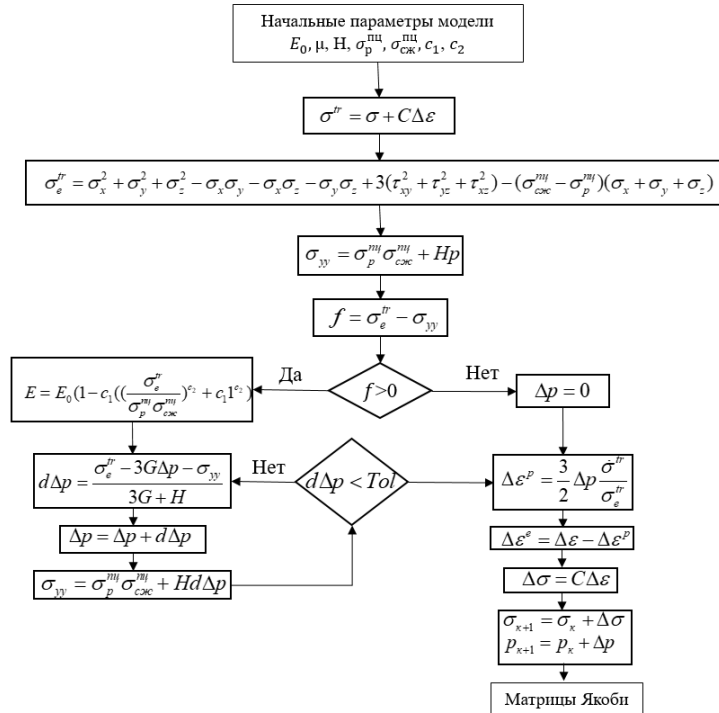


Рисунок 1 – Блок-схема программного кода

Проведена валидация разработанной модели с экспериментальными данными. Проведено сравнение результатов расчета численного моделирования напряженно-деформированного состояния эпоксидной смолы с экспериментальными данными, опубликованными в открытых источниках. Рассмотрены растягивающее, сжимающее и сдвиговое нагружение. На Рисунке 2 приведены результаты расчета.

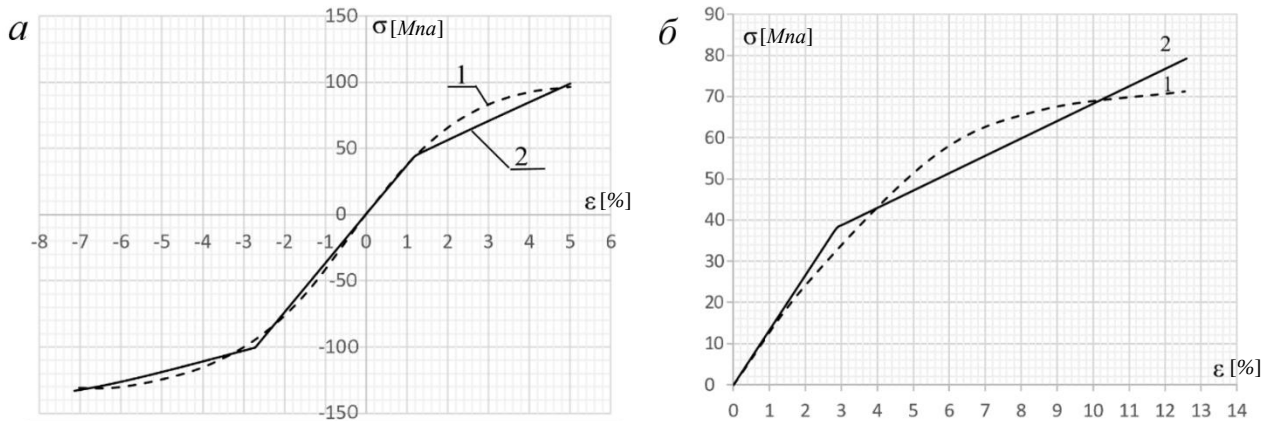


Рисунок 2 – Диаграмма напряженно-деформированного состояния эпоксидной смолы (1 – натурный эксперимент, 2 – численное моделирование):

a – нормальные растягивающие и сжимающие напряжения (МПа) от деформаций ϵ %

б – сдвиговые напряжения (МПа) от деформаций ϵ %

В разделе 2.2 получены параметры деградации элементарного слоя однонаправленного углеродного ПКМ методом конечного элемента. Однонаправленный монослой композиционного материала представляет собой представительный элементарный объем (англ. RVE – Representative Volume Element), имеющий форму куба с длиной ребра 40 мкм и случайным распределением углеродных волокон (Рисунок 3). Модель матрицы учитывает упругопластическое поведение материала с учётом снижения модуля упругости в ходе нагружения. Волокно обладает линейными ортотропными характеристиками.

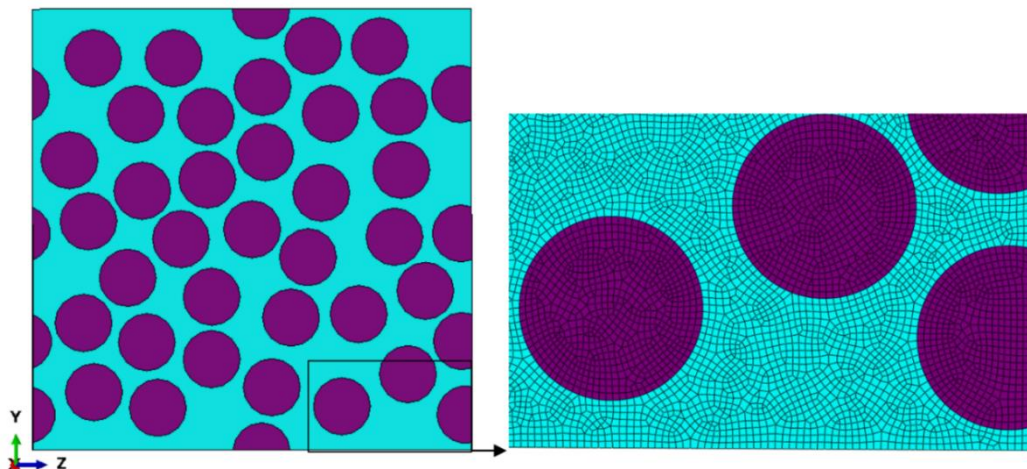


Рисунок 3 – Представительный элементарный объем

Проведён расчёт напряжённо-деформированного состояния представительного элементарного объёма от действующего сдвигового нагружения с углом укладки волокна 45° и 67° (Рисунок 4).

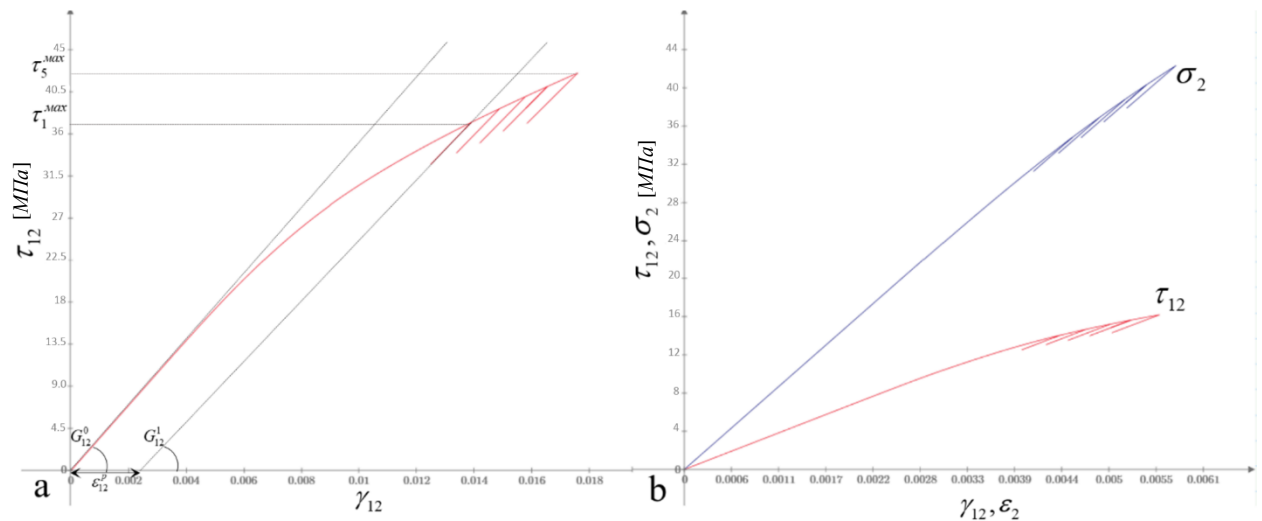


Рисунок 4 – Зависимость средних сдвиговых и поперечных нормальных напряжений (МПа) от действующих деформаций ϵ, γ % в монослое:
а – угол армирования волокна 45° , б – угол армирования волокна 67°

На основании полученных результатов проведена идентификация параметров деградации и нелинейного поведения элементарного слоя ПКМ. Модель накопления повреждения элементарного слоя ПКМ, приведённая в работах Р. Ladeveze, включает следующие параметры: Y_c , Y_0 , b , b' – отвечают за зарождение и рост трещин в монослое, a , R_0 , β , α – связывают нелинейное поведение с деградацией свойств монослоя. Проведено сравнение полученных параметров в ходе численного моделирования с экспериментальными данными и существующими математическими моделями, результаты которых опубликованы в открытых источниках (Таблица 1).

Таблица 1 – Параметры деградации элементарного монослоя

Параметры	КЭМ	Натурный эксперимент	Погрешность расчета
Y_c (Мпа)	5.7	5.98	5%
Y_0 (Мпа)	0.08	0.016	20%
b	1.5	2.32	54%
b'	0.5	0.5	0%

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что предложенный алгоритм удовлетворительно описывает поведение композиционного материала с учетом деградации матричной структуры. Следует отметить, что экспериментальные данные по параметрам деградации монослоя для многих материалов определены не в полном объеме, а также имеют разброс, что затрудняет валидацию математической модели. Для

получения более репрезентативных результатов, необходимы дополнительные экспериментальные исследования поведения композиционных материалов.

Разработанная модель позволяет более точно описывать некоторые параметры деградации монослоя по сравнению с существующими численными исследованиями в данной области. Численное моделирование деградации структуры монослоя композиционного материала остаётся актуальной задачей, требующей дальнейшего совершенствования расчетных методик, что позволит с большей точностью определять прочностные, деформационные и деградационные параметры элементарного слоя, которые будут учтены при расчете прочностных и деформационных параметров щелевых обтекателей из ПКМ.

В разделе 2.3 решена задача численного моделирования разрушения однонаправленного композиционного материала из-за отказа матричной структуры. Разрушение матричной структуры ПКМ происходит вследствие комбинированного сдвигового и поперечного нагружения.

Алгоритм численного моделирования нелинейного поведения матрицы дополнен критерием разрушения. Для корректного описания механики разрушения матричной структуры композитного материала (ПКМ) необходимо использовать критерий прочности, учитывающий различия в сопротивляемости растяжению и сжатию материала. В матричной структуре возникает сложное напряженно-деформированное состояние из-за значительных перепадов жесткостей на границе раздела волокно-матрица. На основании этого критерий прочности должен учитывать все компоненты тензора напряжений.

В данной работе использован критерий прочности, основанный на удельной потенциальной энергии формоизменения, предельное значение которого линейно зависит от среднего напряжения σ . Данный критерий позволяет учитывать разные пределы прочности материала при растяжении и сжатии $\sigma_{сж}^s, \sigma_p^s$.

$$U_\phi = \frac{1}{4G} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 2(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)] \quad (6)$$

$$U_\phi = [U] \quad (7)$$

$$[U] = a\sigma + b = \frac{a}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \quad (8)$$

$$a = \frac{1+\mu}{E}(\sigma_{сж}^s - \sigma_p^s) \quad (9)$$

$$b = \frac{1+\mu}{E}\sigma_{сж}^s\sigma_p^s$$

Общий вид критерия разрушения (10) построен на основе преобразования уравнений (6) и (8)

$$\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x\sigma_y - \sigma_x\sigma_z - \sigma_y\sigma_z + F_{66}3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2) - (\sigma_{сж}^s - \sigma_p^s)(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) = \sigma_{сж}^s\sigma_p^s \quad (10)$$

Конечная элементная модель идентична модели, рассмотренной в разделе 2.2, представляет собой периодический элементарный объём.

Проведено численное моделирование разрушения элементарного слоя композиционного материала от действующего комбинированного поперечного нагружения и сдвигового нагружения τ_{12} и τ_{23} (Рисунок 5).

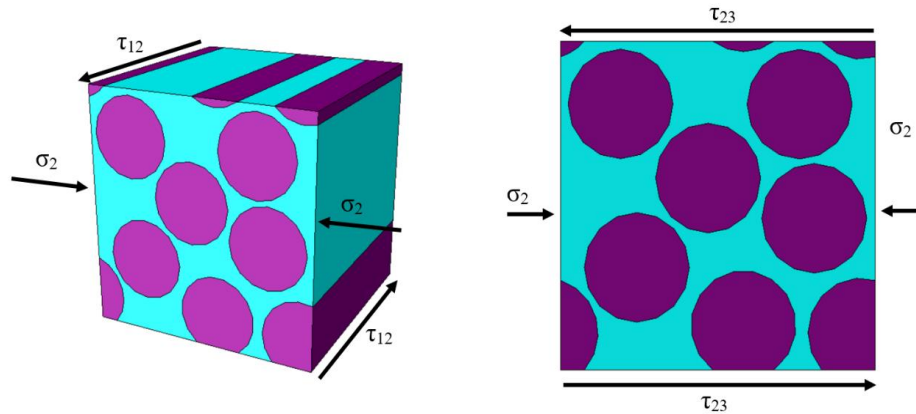


Рисунок 5 – Комбинированное нагружение КЭМ

На Рисунке 6 представлено зарождение трещин в представительном элементарном объёме от действующего сдвигового нагружения τ_{23} . Зарождение трещин происходит на границе раздела волокна и матрицы. Данная зона имеет значительные перепады жесткости, что приводит локальным всплескам напряжений и, как следствие, появлению трещин. На Рисунке 7 приведено распределение эквивалентных напряжений в поперечном сечении представительного объёма для двух характерных точек процесса зарождения и роста трещин.

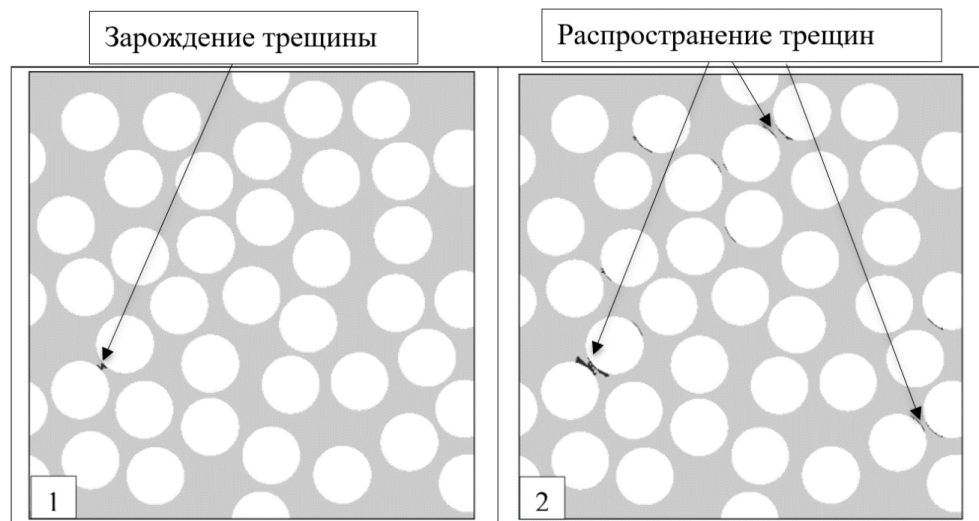


Рисунок 6 – Зарождение трещин в структуре ПКМ

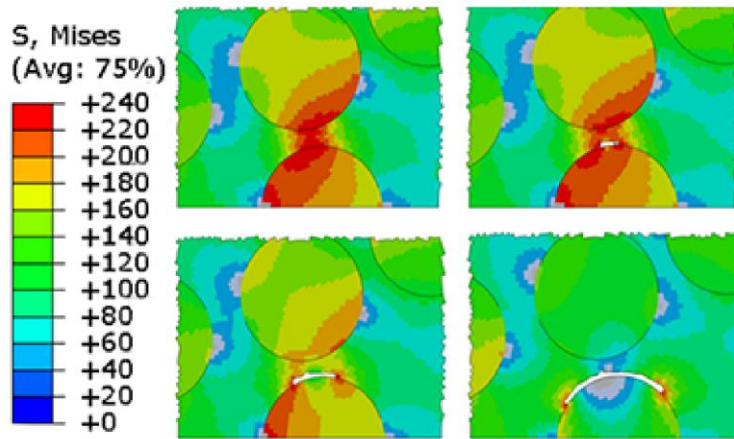


Рисунок 7 – Эквивалентные напряжения (МПа) при распространении трещины в матрице от действующего сдвигового нагружения τ_{12}

На Рисунках 8-9 приведены результаты численного моделирования разрушения монослоя ПКМ от действующего комбинированного нагружения поперечным растяжением, сжатием и сдвигом τ_{12} и τ_{23} . Проведено сравнение полученных результатов численного моделирования с критерием разрушения Tsai-Wu.

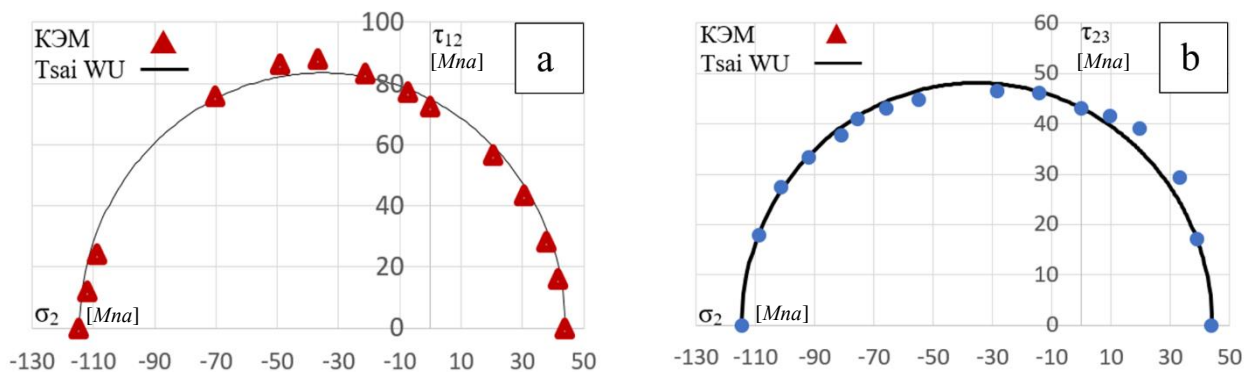


Рисунок 8 – Комбинация разрушающих напряжения (МПа) в ПКМ.

a – поперечные напряжения σ_2 и сдвиговые τ_{12}

b – поперечные напряжения σ_2 и сдвиговые τ_{23}

Математическая модель, учитывающая нелинейное поведение матрицы, удовлетворительно описывает разрушение монослоя.

Численное моделирование не позволяет полностью отказаться от натурных испытаний, поскольку для проведения виртуального моделирования необходимо идентифицировать параметры модели. Однако математическая модель, валидированная по результатам натурных испытаний при простом поперечном нагружении и сдвиговом нагружении монослоя, позволяет проводить виртуальные испытания разрушения монослоя при сложных видах нагружения. Вследствие этого виртуальное моделирование является эффективным инструментом, позволяющим рассматривать деградацию и разрушение монослоя в дополнение к натурным испытаниям и значительно

снизить количество необходимых натуральных испытаний при проектировании конструкций из ПКМ.

Разработана модель для исследования напряженно-деформированного состояния элементарного слоя однонаправленных ПКМ из углеродного волокна на микроуровне с учётом физической нелинейности и накоплением повреждений в связующем. Идентифицированы параметры накопления повреждений и прочностные характеристики, которые позволяют проводить прочностные расчёты щелевых обтекателей из ПКМ в уточнённой постановке.

В Главе 3 рассмотрен вопрос численного моделирования напряженно-деформированного состояния тканых арамидных композиционных материалов. Структуру тканых композиционных материалов приведена на Рисунке 9. Монослой ПКМ состоит из матрицы и переплетенных между собой жгутов. Жгут состоит из матрицы и первичных нитей.

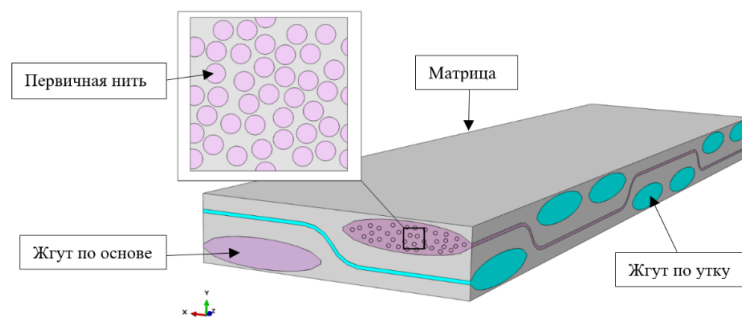


Рисунок 9 – Структура монослоя тканого композиционного материала

Структура ПКМ включает в себя криволинейные волокна, вследствие чего напряженно-деформированное состояние элементарного слоя имеет нелинейный характер. При растяжении материала вдоль нитей, криволинейные волокна, ориентированные вдоль направления нагружения, стремятся распрямиться (Рисунок 10). В матричной структуре, препятствующей распрямлению волокна, возникает всплеск напряжений, который приводит к образованию трещин и деградации свойств материала.

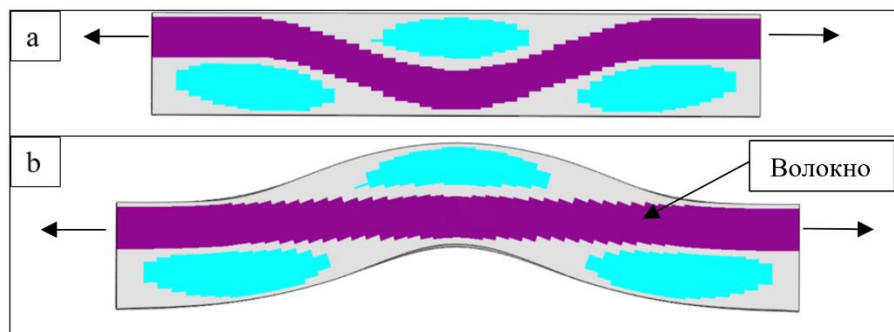


Рисунок 10 – Недеформированное состояние волокон (a); деформированное состояние волокон (b)

Численное моделирование напряженно-деформированного состояния монослоя тканого ПКМ с учетом геометрической кривизны волокна и прогрессирующего разрушения матричной структуры позволит идентифицировать прочностные и деформационные параметры монослоя, которые лягут в основу прочностного расчета щелевых обтекателей из ПКМ в уточненной постановке.

В разделе 3.1 получены жесткостные характеристики структуры жгута тканого органопластика. Интегральные характеристики структуры жгута получены посредством численного моделирования. Модель структуры жгута представляет собой представительный элементарный объем со случайным распределением волокон (Рисунок 11а). Подобные модели позволяют достоверно описывать подведение ПКМ на микроуровне, однако для реализации полноценной модели монослоя тканого ПКМ с учетом типа саржевого плетения требуют значительных временных и вычислительных ресурсов. Для решения данной проблемы была реализована упрощенная модель представительного элементарного объема жгута ПКМ. Упрощенная модель состоит из двухмерных элементов с заданными ортотропными характеристиками первичных аромидных нитей. Объемные элементы моделируют матричную структуру. Двухмерные и объемные элементы связаны общими узлами. Упрощенная модель структуры жгута (Рисунок 11б) не требует значительных вычислительных ресурсов и позволяет перейти в дальнейшем к рассмотрению полноценной структуры тканого композиционного материала.

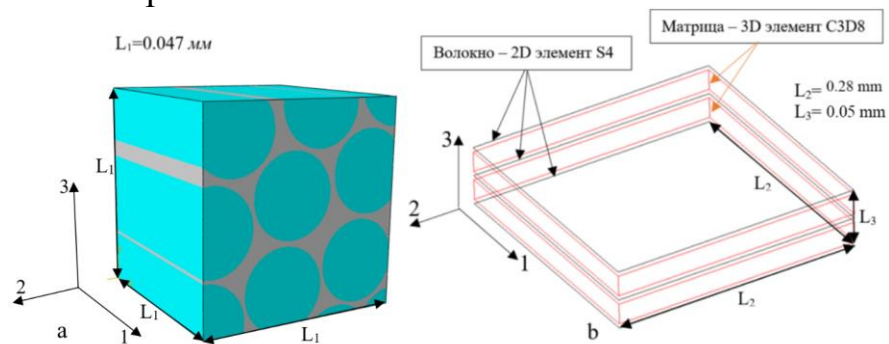


Рисунок 11 – Модель представительного объема жгута ПКМ (а); упрощенная модель структуры жгута ПКМ (б)

Проведена идентификация параметров упрощенной модели структуры жгута (Таблицы 2-3). В таблице 4 приведено сравнение интегральных жесткостных характеристик представительных элементарных объемов структуры жгута. Модели имеют схожие интегральные характеристики, что с приемлемым уровнем допущений на начальном этапе проектирования, позволяет использовать упрощенную модель для моделирования полноценной структуры тканого ПКМ.

Таблица 2 – Жесткостные характеристики волокна в упрощенной КЭМ

	t мм	E_1 ГПа	E_2 МПа	μ_{12}	G_{12} ГПа	G_{13} ГПа	G_{23} ГПа
СВМ	0.013	108	9.8	0.3	9.8	9.8	1.3

t – толщина, E – Модуль упругости, μ – коэффициент Пуассона, G – модуль сдвига.

Таблица 3 – Жесткостные характеристики матрицы в упрощенной КЭМ

	E (МПа)	μ
Связующие	2942	0.39

Таблица 4 – Интегральные жесткостные характеристики

	E_1 МПа	E_2 МПа	G_{12} МПа	G_{13} МПа	G_{23} МПа
Подробная КЭМ	86740	1725	10143	10143	1372
Упрощённая КЭМ	87014	2969	8977	8977	1313

В разделе 3.2 рассмотрено численное моделирование напряженно-деформированного состояния монослоя тканого органопластика с учетом типа саржевого плетения, нелинейной геометрии волокна и прогрессирующего разрушения матричной структуры в ходе нагружения. Рассмотрено растягивающее нагружение монослоя вдоль волокон основы. На Рисунке 12 приведена конечная элементная модель монослоя тканого органопластика с атласным плетением 8/3.

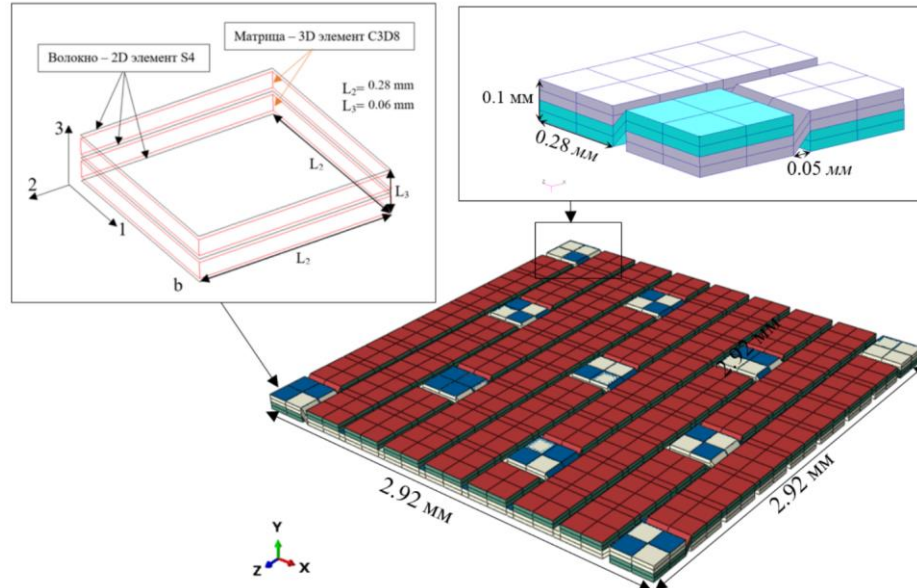


Рисунок 12 – Структура КЭМ монослоя тканого органопластика

Использован явный метод интегрирования Abaqus (Explicit) в квазистатической постановке. В модели реализовано упругопластическое поведение матрицы. Применён встроенный в ПК Abaqus критерий разрушения Ductile damage и Shear damage. В Таблице 5 приведены жесткостные и прочностные свойства матрицы. Волокно обладает упругими ортотропными свойствами (Таблица 6).

Таблица 5 – Жесткостные и прочностные свойства матрицы

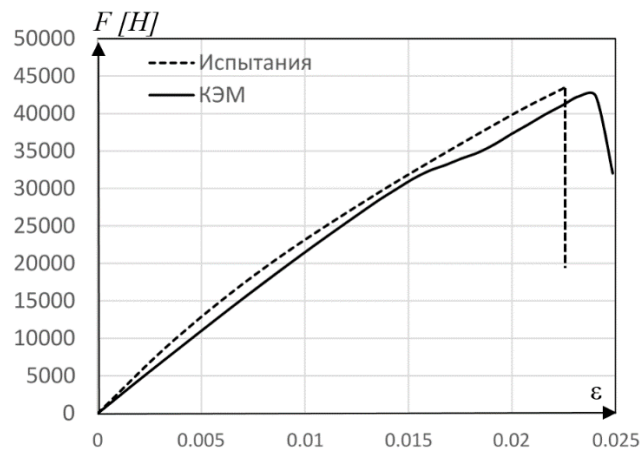
	E МПа	μ	σ_1^+ МПа	σ_1^- МПа	τ_b МПа
Связующие	2942	0.39	88	147	59

Таблица 6 – Жесткостные и прочностные свойства волокна

	t мм	E_1 ГПа	E_2 МПа	μ_{12}	G_{12} МПа	G_{13} МПа	G_{23} МПа	σ_1^+ МПа
СВМ	0.013	108	1	0.3	9806	9806	1314	3727

t – толщина, E – модуль упругости, μ – коэффициент Пуассона, G – модуль сдвига, σ_1^+ – предельные растягивающие напряжения вдоль волокна

На Рисунке 13 приведены результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния тканого органопластика от действующего растяжения. Проведено сравнение с экспериментальными данными.

Рисунок 13 – Действующая растягивающая F сила (Н) от деформаций ε %

В ходе нагружения происходит разрушение матричной структуры, в зоне искривления волокна, при этом волокна продолжают воспринимать нагрузку и разрушаются значительно позднее. Результаты численного моделирования деформационных свойств тканого органопластика имеют удовлетворительное совпадение с результатами испытаний.

Разработана модель для исследования напряженно-деформированного состояния элементарного слоя тканых ПКМ из арамидных волокон на микроуровне с учётом физической нелинейности и накоплением повреждений в связующем, а также геометрической кривизны волокна. Идентифицированы прочностные и деформационные параметры элементарного слоя тканого ПКМ, которые позволяют проводить прочностные расчёта щелевых обтекателей из ПКМ в уточнённой постановке

В Главе 4 рассмотрено численное моделирование напряженно-деформированного состояния конструктивно подобного образца (КПО) щелевого обтекателя из ПКМ [2]. Для моделирования НДС конструктивно подобных образцов был использован многоуровневый подход. В Главе 2

рассмотрено поведение однонаправленного углеродного волокна с учётом деградации матричной структуры на микроуровне. В главе 3 рассмотрено поведение тканого органопластика с учётом кривизны нитей и разрушения матричной структуры на микроуровне. Полученные результаты позволяют перейти к численному моделированию НДС КПО с учётом нелинейного поведения монослоя.

Задачей численного моделирования является определение остаточных деформаций, образовавшихся в ходе консольного изгиба КПО. На Рисунке 14 приведена конечная элементная модель и граничные условия. Рассмотрено 4 цикла нагружения КПО:

1. Перемещение толкателя на 3 мм, разгрузка;
2. Перемещение толкателя на 6 мм, разгрузка;
3. Перемещение толкателя на 9 мм, разгрузка;
4. Перемещение толкателя на 12 мм, разгрузка.

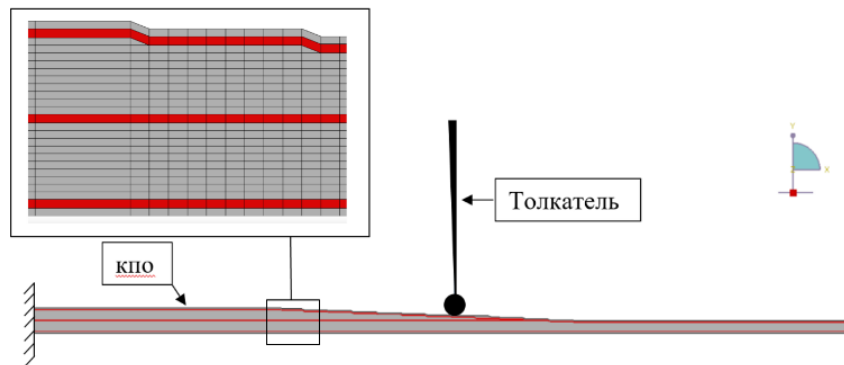


Рисунок 14 – Общий вид и граничные условия КЭМ

На Рисунке 15 представлены остаточные деформации КПО, полученные в ходе численного моделирования и экспериментального исследования.

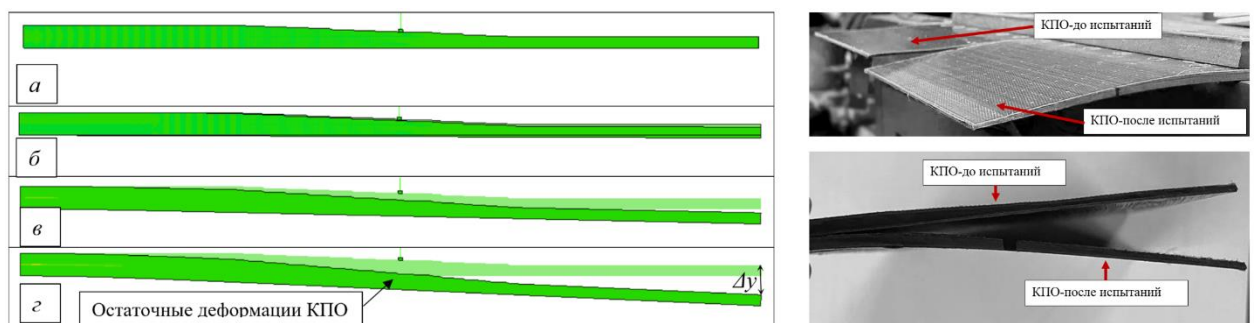


Рисунок 15 – Остаточные деформации КПО

На Рисунке 16 приведена действующая сила F (кгс) в толкателе в зависимости от перемещений толкателя y (мм), полученных в ходе численного и экспериментального исследования. На Рисунке 17 приведены остаточные перемещения Δy крайней кромки КПО после нагружения и последующей разгрузки, полученные в ходе численного и экспериментального исследования.

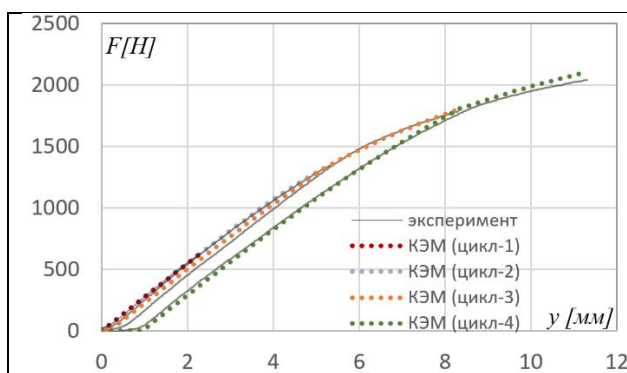


Рисунок 16 – Действующая сила F (Н) толкателя на КПО от перемещений y (мм) толкателя

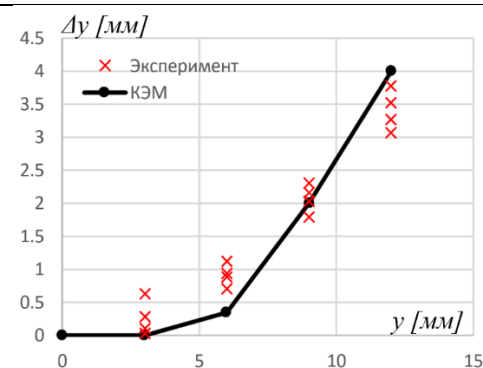


Рисунок 17 – Остаточные перемещения Δy (мм) крайней кромки КПО от истории нагружения в виде перемещения толкателя y (мм)

Разработана методика многоуровневого расчета прочностных и деформационных параметров щелевых обтекателей из тканых и однонаправленных ПКМ в уточнённой постановке, включающая в себя идентификацию прочностных и деформационных параметров элементарного слоя щелевых обтекателей на микроуровне. Результаты расчёта согласуются с экспериментальными данными. Практическая значимость методики заключается в определении конструктивных параметров щелевых обтекателей, позволяющих минимизировать вероятность возникновения зазора в ходе эксплуатации.

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

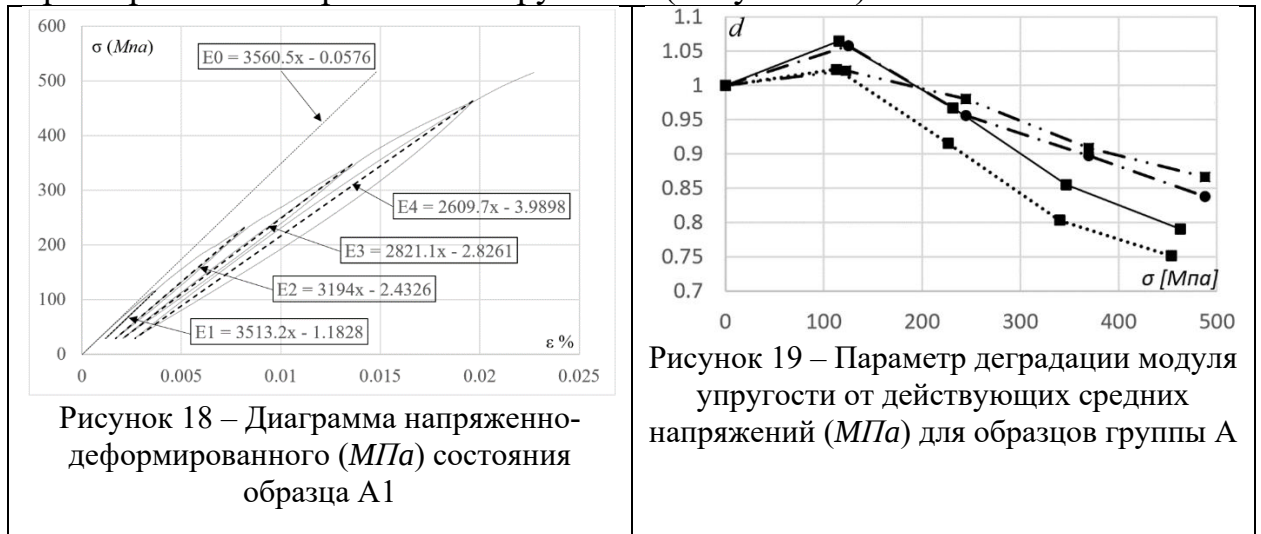
В разделе 5.1 приведены результаты экспериментального исследования деградационных свойств элементарных образцов из органопластика [3]. Образцы испытывались на растяжение, согласно ГОСТ 25.601, на аттестованном оборудовании. Образцы разделены на две группы, каждая группа состоит из пяти образцов. Группа А состоит из однонаправленных образцов, вырезанных в направлении армирования (0°), группа Б состоит из однонаправленных образцов, вырезанных в поперечном направлении (90°). Образцы подвергались монотонно возрастающей циклической растягивающей нагрузке. Каждый цикл состоит из этапа нагружения и разгрузки.

По результатам экспериментального исследования проведён расчёт параметра деградации модуля упругости по следующей формуле:

$$d = \frac{E_i}{E_0}, \quad (11)$$

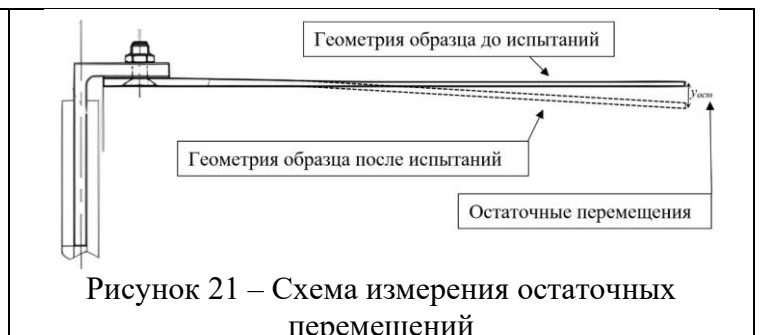
где d – параметр деградации материала, E_0 – начальный модуль упругости материала, E_i – модуль упругости материала, рассчитанный после каждого цикла нагружения.

На Рисунке 18 приведена диаграмма НДС состояния, полученная в ходе испытаний, на основании которой проведён расчет снижения жесткостных характеристик материала от нагружения (Рисунок 19).

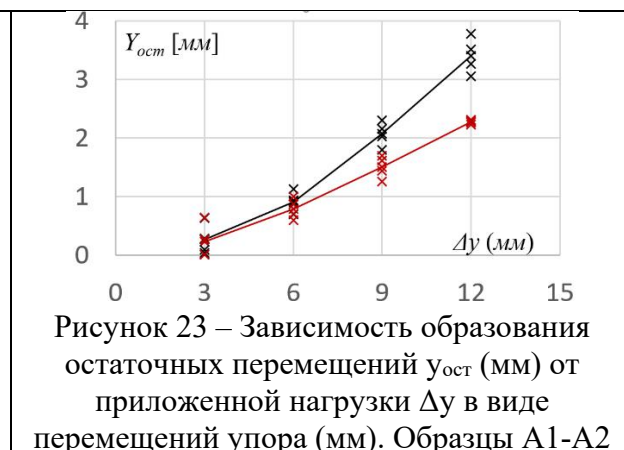
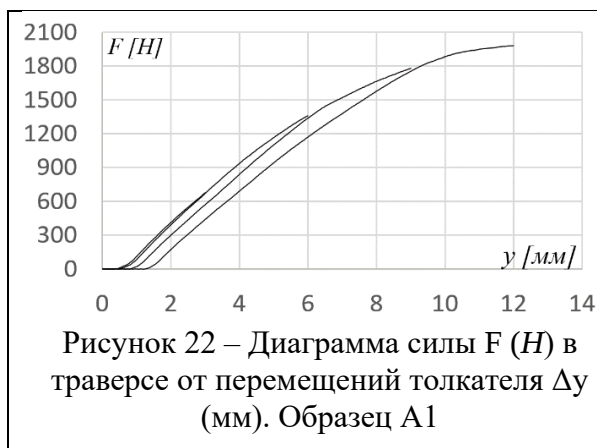


В органопластике с тканой структурой происходит снижение жесткостных характеристик при нормальном растяжения материала, что вызвано разрушением матричной структуры вследствие криволинейной геометрии волокна

В разделе 5.2 приведены результаты экспериментального исследования деформативных свойств конструктивно подобных образцов с различными геометрическими характеристиками и укладками ПКМ. Цель данного исследования заключается в определении остаточных деформаций в КПО. Нагружение образцов соответствует консольному изгибу. На Рисунке 20 приведена схема удержания и нагружения образцов. Образцы подвергались монотонно возрастающему циклическому нагружению, в виде перемещений толкателя Δu вдоль установочной оси по направлению к профилю. После каждого шага нагружения происходили разгрузка и измерение остаточных перемещений $u_{ост}$ (Рисунок 21).



Проведена запись действующей силы и перемещений траверсы испытательной машины (Рисунок 22). На Рисунке 23 приведены остаточные перемещения крайней кромки КПО от действующей нагрузки в виде перемещений толкателя Δu .



При консольном изгибе целевых обтекателей происходит изменение геометрической формы, вследствие чего происходит образование зазора между обтекателем и механизацией. Предполагается, что изменение формы КПО в первую очередь связано с нелинейным поведением тканого органопластика.

В разделе 5.3 приведены результаты экспериментального исследования деградации свойств КПО от действующего многоциклового нагружения [1]. Приведена зависимость изменения жесткостных характеристик КПО от количества циклов нагружения (Рисунок 24). Суммарное количество циклов $n=768000$. Образец нагружался консольным изгибом.

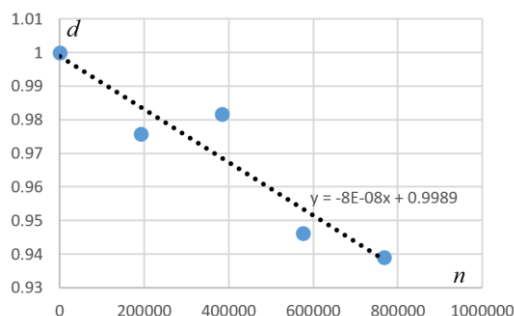


Рисунок 24 – Параметр d снижения жесткости от количества циклов нагружения n

Заключение

Разработана методика расчёта композиционных конструкций летательных аппаратов на прочность с учётом деградации свойств матричной структуры.

Основные новые научные результаты, полученные в диссертационной работе, состоят в следующем:

1. Предложена методика многоуровневого расчета прочностных и деформационных параметров щелевых обтекателей из тканых и однонаправленных ПКМ с учётом деградации свойств матрицы и геометрической кривизны волокна в элементарном слое. Погрешность расчёта не превышает 14%;
2. Предложена модель расчёта напряженно-деформированного состояния однонаправленных ПКМ из углеродного волокна с учётом деградации матричной структуры. Получены прочностные и деградационные параметры материала, погрешность расчёта не превышает 14%;
3. Предложена модель расчёта напряженно-деформированного состояния тканых ПКМ с учётом деградации матричной структуры и геометрической нелинейности волокна. Получены прочностные и деформационные параметры материала при растяжении, погрешность расчёта не превышает 5%;
4. Получены новые экспериментальные данные о деградационных свойствах тканого органопластика при растяжении вдоль основы и утка, по средствам натурных испытаний;
5. Получены новые экспериментальные данные о деградационных свойствах щелевых обтекателей из ПКМ при нагружении консольным изгибом, по средствам натурных испытаний

Перспективы дальнейшей разработки темы

Дальнейшее развитие предлагаемого подхода должно быть ориентированно на разработку методики расчёта прочности и деформационных параметров конструкции с учётом деградации свойств материала при многоцикловом нагружении.

Основные научные результаты диссертации изложены в работах, опубликованных соискателем учёной степени:

Научные статьи в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, входящих в Перечень Высшей аттестационной комиссии Российской Федерации по специальности 2.5.14.

1. Акулин П.В., Насонов Ф.А. Дegradaция свойств композиционного материала при многоцикловом нагружении // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия "Машиностроение". – 2025. – №1. – С. 4-13.
2. Акулин П.В. Накопление повреждений в композиционных панелях при малоцикловом нагружении // Вестник Московского авиационного института. – 2023. – №2. – С. 84-90.
3. Акулин П.В., Гаврилов Г.А. Влияние структуры многослойного композиционного материала на деградацию свойств // Вестник Московского авиационного института. – 2023. – №3. – С. 78-84.

Материалы международных и всероссийских научных конференций

1. Акулин П.В. Накопление повреждений в композиционных панелях при малоцикловом нагружении // Сборник тезисов работ международной молодежной научной конференции XLIX Гагаринские чтения. 11-14 апреля 2023 г. – Москва : Изд-во «Перо», 2023. – С. 542-543
2. Акулин П.В., Дудченко А. А. Проектирование конструкций гибких элементов // Материалы конференции всероссийской научно-практической конференции проблемы прочности авиационных конструкций и материалов. 6-9 сентября 2023 г. – Новосибирск : Изд-во «СибНИА», 2023. – С. 8-10
3. Акулин П.В. Сравнительные испытания деградации свойств композиционного материала с различной укладкой пакета // Материалы конференции XXVI международной молодёжной научная конференция «Туполевские чтения (школа молодых учёных)». 9-10 ноября 2023 г. – Казань : Изд-во «ИП Сагиев А.Р.», 2023. – С. 11-16
4. Акулин П.В., Медведкова А. О. Дegradaция свойств монослоя композиционного // Труды IX международной научно-практической конференции «Чаплыгинские чтения». 9-10 апреля 2024 г. – Новосибирск : Изд-во «СибНИА», 2024. – С. 26-28