

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»
МАИ (НИУ)

На правах рукописи



Акулин Петр Владимирович

**МЕТОД РАСЧЕТА НА ПРОЧНОСТЬ ЩЕЛЕВЫХ ОБТЕКАТЕЛЕЙ
НЕСУЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ
ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
С УЧЕТОМ ДЕГРАДАЦИИ СВОЙСТВ МАТРИЧНОЙ СТРУКТУРЫ**

Специальность 2.5.14.

«Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор
Дудченко Александр Александрович

Москва – 2025

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 ОБЗОРНО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ.....	11
1.1 Обзор литературы по вопросу накопления повреждения в композиционных материалах.....	11
1.2 Обзор литературы по вопросу накопления повреждения в структуре композиционного материала на микроуровне	12
1.3 Обзор литературы по вопросу накопления повреждения в структуре композиционного материала на макроуровне.....	18
1.4 Обзор литературы по вопросу накопления повреждения в конструкциях из композиционного материала.....	20
1.5 Обзор литературы по вопросу ресурса конструкций из композиционного материала	22
1.6 Постановка задачи	23
1.7 Заключение по Главе 1	24
ГЛАВА 2 МОДЕЛЬ РАСЧЕТА РАЗРУШЕНИЯ И НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ОДНОНАПРАВЛЕННОМ КОМПОЗИЦИОННОМ МАТЕРИАЛЕ	25
2.1 Конечно – элементная реализация модели нелинейного деформирования эпоксидной смолы	26
2.2 Решение задачи о накоплении повреждений в элементарном слое	33
2.2.1 Конечно – элементная модель представительного объёма однонаправленного композиционного материала	33
2.2.2 Определение влияния типа граничных условий в конечно – элементной модели на результаты численного моделирования	36
2.2.3 Валидация результатов численного моделирования деградации свойств в однонаправленном элементарном слое	38
2.3 Решение задачи об отказе несущей способности однонаправленного элементарного слоя вследствие разрушения матричной структуры	46
2.4 Заключение по Главе 2	54
ГЛАВА 3 МОДЕЛЬ РАСЧЕТА РАЗРУШЕНИЯ И НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ТКАНОМ КОМПОЗИЦИОННОМ МАТЕРИАЛЕ	55
3.1 Определение жесткостных характеристик жгута тканого композиционного материала	57

3.2 . Решение задачи о нелинейном деформировании тканого композиционного материала.....	61
3.3 Заключение по Главе 3	66
ГЛАВА 4 МОДЕЛЬ РАСЧЕТА НЕЛИНЕЙНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЩЕЛЕВЫХ ОБТЕКАТЕЛЕЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ..	67
4.1 Заключение по Главе 4.....	72
ГЛАВА 5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ	74
5.1 Экспериментальное исследование деформационных и деградационных свойств тканого органопластика от действующего растягивающего нагружения.....	75
5.2 Экспериментальное исследование деформационных и деградационных свойств щелевых обтекателей при малоцикловом консольном изгибе	83
5.3 Экспериментальное исследование деградации свойств щелевых обтекателей при многоцикловом консольном изгибе	91
5.4 Заключение по Главе 5.....	96
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	97
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	98
. ПРИЛОЖЕНИЕ А РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ КОНСТРУКТИВНО ПОДОБНЫХ ОБРАЗЦОВ	112
ПРИЛОЖЕНИЕ Б АЛГОРИТМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ	120

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Перспективные летательные аппараты (ЛА) содержат в конструкции щелевые обтекатели, расположенные в хвостовой части крыла (ХЧК), изготовленные из композиционных материалов. 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 щелевые обтекатели включает однонаправленные углеродные волокна и тканые органопластиковые волокна.

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 (ПКМ) 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 численное моделирование процессов деградации структуры однонаправленных и тканых композиционных материалов. В рамках диссертационной работы проведено экспериментальное исследование деградации свойств композиционного материала под воздействием малоциклового и многоциклового нагружения

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

Проведён 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 Paepegem 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 уточненной 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, армированные однонаправленным углеродным волокном и тканым органопластиком.

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 филиал 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 разнсопротивляемости и снижения модуля упругости от действующего нагружения. Проведён расчёта напряженно-деформированного состояния элементарного слоя однонаправленного и тканого ПКМ. Определены прочностные, деформационные и дегрaдационные параметры элементарного слоя ПКМ по результатам численного моделирования. Проведён расчёт параметров дегрaдации тканого органопластика по результатам натурных испытаний.

ГЛАВА 1 ОБЗОРНО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

В данной главе рассматривается современное состояние вопроса деградации жесткостных свойств композиционного материала, проведён анализ научных изысканий и сформулирована постановка задачи исследования.

1.1 Обзор литературы по вопросу накопления повреждения в композиционных материалах

Композиционные материалы находят широкое применение в авиационной промышленности благодаря своим физическим характеристикам. Уникальность ПКМ заключается в возможности получения необходимых физических характеристик пакета за счет варьирования углов укладок и количества слоев, а также в использовании различных материалов волокна в пакете ПКМ. Все вышеперечисленное приводит к неоднородности и анизотропии ПКМ, вследствие чего моделирование деградации физических свойств ПКМ является сложной задачей. Для более точного прогнозирования поведения ПКМ необходимо совершенствовать расчетные методы и методики, а также накапливать экспериментальную базу.

Для проектирования конструкций летательных аппаратов из ПКМ необходимы расчетные методики, позволяющие учитывать изменение жесткостных характеристик в ходе эксплуатации. Данная задача носит нетривиальный характер вследствие того, что структура ПКМ имеет сложную микромеханику. Микроструктуре ПКМ свойственны неоднородность и значительные перепады жесткостей. Это приводит к сложно-напряженному состоянию матричной структуры при простом нагружении монослоя, что в значительной мере влияет на нелинейное поведение и зарождение микротрещин в матрице материала. Помимо разрушения матричной структуры, происходит деградация границы раздела волокно-матрица на микроуровне.

Развитие микродефектов в матричной структуре приводит к появлению дефектов монослоя на макроуровне и, как следствие, преждевременному разрушению монослоя ПКМ. Необходимо учитывать, что в зоне разрушения монослоя не выполняется условие совместности деформаций пакета ПКМ, что приводит к дополнительному сдвиговому нагружению границ разделов монослоев. Всплеск напряженно-деформированного состояния на границе разделов монослоев снижает несущую способность всего пакета вследствие того, что возможно образование межслоевого расслоения, что в значительной степени уменьшает несущую способность конструкции.

Все вышесказанное приводит к тому, что для прогнозирования поведения конструкций из ПКМ необходимо понимать механику процесса разрушения на микро- и макроуровне. В работе [1] рассмотрены различные виды отказов ПКМ.

В работе [2-3] приведена иерархическая методика проектирования конструкций из ПКМ. Данный подход предлагает рассматривать поведение ПКМ на различных уровнях, поступательно переходя от микро к макро. Основания цель данного подхода заключается в определении поведения и параметров деградации ПКМ на каждом уровне с последующим их учетом на следующих этапах моделирования.

1.2 Обзор литературы по вопросу накопления повреждения в структуре композиционного материала на микроуровне

Одной из причин деградации свойств композиционного материала является зарождение и рост трещин в матричной структуре. Для более глубокого понимания процессов разрушения матрицы необходимо исследовать поведение матрицы без армирования волокном. В работе [4 - 5] проведено исследование прочностных и деформационных характеристик эпоксидной смолы.

В работе [6] изложены физико-механические свойства отечественных эпоксидных смол ВСК-14-2м и ВСК-14-2мР, используемых в качестве связующего.

В работе [7] проведено исследование, в котором рассматривается напряженно-деформированное состояние эпоксидной смолы без армирования волокном. Рассматривались два вида эпоксидной смолы, без модификаций и с

добавлением каучука. По результатам исследования выявлено, что матрица с добавлением каучука имеет большие деформации при разрушении, независимо от размеров образца. Каучук снижает многоосевое напряжение в толстостенных образцах, создавая напряженное состояние, близкое к плоскому напряжению, вследствие чего образцы деформируются в большей степени.

Для точного прогнозирования поведения матрицы необходимо рассмотреть сложное напряженное состояние. Это связано с тем, что матрица и волокно имеют различные модули упругости и коэффициенты Пуассона, что приводит к сложному напряженному состоянию в микроструктуре ПКМ.

В работе [8-9] рассматривается напряженно-деформированное состояние различных полимерных материалов, подверженных различным видам нагружения. Рассмотрены критерии пластичности, которые наиболее точно описывают результаты эксперимента.

В работе [10] рассматривается поведение различных эпоксидных смол при одноосном, двухосном и трехосном нагружении. Проведены оценка описания критериев текучести и влияние гидростатического давления на напряженно-деформированное состояние матрицы.

В работе [11] исследуется разрушение композиционного материала, подверженного нагружению перпендикулярно армированию волокон. Рассмотрено текучее разрушение и кавитационное хрупкое разрушение матрицы в процессе нагружения.

При поперечном и сдвиговом нагружении ПКМ происходит снижение физико-механических свойств ПКМ, однако при нагружении вдоль армирования волокон поведение ПКМ носит линейный характер. Это связано с физико-механическими свойствами нитей, которыми армируется матричная структура. Во многих методах, направленных на прогнозирование деградации свойств ПКМ, принимают гипотезу о том, что однонаправленные углеродные нити имеют линейные физико-механические свойства и не подвержены деградации свойств во время нагружения. Диаграмма напряженно-деформированного состояния носит линейный характер вплоть до разрушения волокна. Однако для точного

моделирования репрезентативного объема на микроуровне необходимы данные о жесткостных и прочностных свойствах, а также о геометрических параметрах нитей армирующего волокна. В работах [12 - 15] приведены исследования на тему разрушения ПКМ от сжимающей нагрузки вдоль волокна. Сжимающая нагрузка приводит к локальной потере устойчивости волокна и разрушению связующего в данной зоне, в результате чего происходит потеря несущей способности материала.

Важным фактором, влияющим на разрушение ПКМ, является масштабный эффект. В работе [16] рассматривается влияние длины волокон на поведение композиционного материала. Выявлено, что при увеличении масштабного эффекта снижаются предельные характеристики ПКМ.

В работе [17] рассматриваются жесткостные и прочностные свойства углеродных нитей марки AS4-12k (Hexcel), HTS-12k (Porcher Industrie) и опытных образцов отечественного волокна УКН и ПАН. Приведена микроструктура и геометрические параметры нитей. Также в работе [18] проведен широкий спектр структурных и физических свойств различных углеродных нитей.

На основании физических характеристик эпоксидной смолы, а также физических и геометрических параметров волокна возможно провести расчет линейных характеристик монослоя ПКМ. В работах [19-22] приведены методики для расчета параметров композиционного материала с однонаправленными волокнами. Помимо однонаправленных волокон в ПКМ применяют различные типы плетения волокна. Основным отличием является то, что в тканых структурах волокна имеет геометрическую кривизну, что сказывается на поведении материала. В работах [23 - 27] приведена методика расчета линейных жесткостных характеристик ПКМ с тканой структурой.

Наиболее актуальной задачей является определение не только линейных жесткостных свойств ПКМ, но и прогнозирование прочности и процесса деградации свойств монослоя. В работе [28] авторы используют метод электронной микроскопии для изучения структурных изменений в матрице ПКМ при различных видах нагружения. Рассмотрены композиционные материалы, армированные углеродным, стеклопластиковым и органопластиковым волокном. В ходе работы

выявлено структурное изменение матрицы ПКМ. Термореактивные эпоксидные смолы склонны к пластическим деформациям при нагружении ПКМ. Деформация микрофазовой структуры матрицы ПКМ зависит от скорости силового воздействия.

Также для исследования механики разрушения ПКМ на микроуровне зачастую используют метод конечных элементов. В настоящее время численное моделирование процессов деградации ПКМ не способно в полной мере заменить натурные испытания и требуют точной калибровки параметров по экспериментам. Но несмотря на это, численное моделирование является мощным и доступным инструментом, позволяющим исследовать поведение ПКМ на микроуровне.

Для описания поведения разрушения монослоя однонаправленного композиционного материала в работах [29- 33] рассматривается репрезентативный элементарный объем, включающий в себя матрицу, армированную волокном. Авторы используют метод конечных элементов для моделирования поведения монослоя композиционного материала и определения параметров разрушения.

В процессе эксплуатации композиционного материала происходит деградация матричной структуры, которая, в свою очередь, может привести к разрушению связей между матрицей и волокном и, как следствие, к образованию расслоения в структуре монослоя. В работе [34 - 36] представлены результаты натурных и численных экспериментов по определению прочности границы раздела матрицы и волокна композиционного материала.

При зарождении трещины в матричной структуре происходит ее развитие. Данная трещина может распространиться до соседних волокон. В случае, если адгезионная связь волокна и матрицы слабая, поперечная трещина инициирует развитие осевых трещин на границе раздела волокно-матрица [37 - 40].

Виртуальные эксперименты, основанные на методе конечных элементов, позволяют формировать феноменологические критерии разрушения композиционных материалов [41]. В работе [42] представлен трехмерный критерий разрушения композиционного материала с учетом нелинейного поведения матрицы.

В работах [43] приведена модель периодического репрезентативного элементарного объема ПКМ с учетом искривлённых однонаправленных волокон, имеющих случайную кривизну. При формовании изделий из ПКМ неизбежно происходит искривление волокна, что негативно сказывается на прочностных характеристиках. Подход, предложенный авторами, позволяет создавать высокоточные модели для исследования микромеханики ПКМ.

Композиционный материал на основе тканого наполнителя имеет ряд преимуществ, в частности, благодаря тканой структуре происходит упрочнение материала по толщине монослоя. Плетёная структура имеет лучшую ударостойкость в отличие от однонаправленных композиционных материалов. Однако стоит учитывать, что плетеная структура имеет криволинейную форму волокна. Данная особенность приводит к тому, что монослой композиционного материала теряет жесткость в направлении выкладки волокон. Также криволинейность волокон вносит значительный вклад в сложное напряженное состояние матричной структуры, что затрудняет описание деградации монослоя аналитическими методами.

В работе [44] представлен метод определения жесткостных характеристик тканого композиционного материала и прогнозирования его прочностных свойств. Монослой композиционного материала разделяется на ячейки, состоящие из матрицы и однонаправленных волокон, из которых формируется общая матрица жесткости и определяются осредненные предельные напряжения в композиционном материале. Данная модель не учитывает развитие повреждений и снижение прочностных и жесткостных характеристик ПКМ.

В работе [45] рассматривается аналитическая модель прогнозирования жесткостных и прочностных свойств тканого композиционного материала. Математическая модель позволяет прогнозировать прочность монослоя, однако не учитывает межслоевого разрушения. Также модель учитывает снижение жесткостных характеристик композиционного материала, однако полученные результаты имеют расхождения с результатами эксперимента.

В работе [46] представлена модель, описывающая поведение тканых композиционных материалов с учетом крутки нити в структуре. Закручивание нитей снижает предельные продольные характеристики, однако увеличивается прочность на разрыв нити в поперечном направлении. Данное явление объясняется возникающим давлением в структуре нити в результате крутки, которое противодействует поперечному растягивающему нагружению нити.

В работах [47-48] приведены модели, описывающие жесткостные характеристики композиционного материала. Недостаток модели заключается в том, что не учитывается в полной мере геометрическая кривизна волокон в тканом ПКМ, вследствие чего результаты расчета не согласуются в полной мере с экспериментальными данными.

В работах [49] приведены физико-механические свойства антифрикционного органопластика. Композиционный материал на основе органопластика имеет нелинейное поведение напряженно-деформированного состояния.

В работах [50-53] рассматривается нелинейное поведение тканого композиционного материала. Особенностью тканых композиционных материалов заключается в том, что волокна имеют криволинейную геометрию, вследствие чего внутри структуры возникает сложное напряженно-деформированное состояние, что снижает прочностные характеристики монослоя.

Параметры объемного наполнения волокна в значительной степени влияют на характеристики материала и развитие повреждений. Данный вопрос рассматривается в работе [54].

В работе [55] рассматриваются дисковидные и искривлённые микротрещины, образующиеся в матричной структуре при нагружении однонаправленного монослоя ПКМ.

В работе [56] рассмотрены проблемы моделирования масштабных эффектов в механике материалов с использованием градиентной теории сред с сохраняющимися дислокациями, а также возможность применения теории к оценке прочности и разрушения.

1.3 Обзор литературы по вопросу накопления повреждения в структуре композиционного материала на макроуровне

Рассмотрение поведения ПКМ на микроуровне позволяет перейти к моделированию деградации свойств пакета с различными укладками монослоев. В работе [57] предложена аналитическая модель расчета деградации пакета композиционного материала для одноосного растяжения. При нагружении ПКМ материала принято допускать, что слои деформируются совместно, однако при появлении трещины в матричной структуре снижается жесткость слоя и происходит перераспределение напряжений. Данная методика позволяет учитывать возникающие сдвиговые напряжения в зоне раскрытия трещины. Также в работе [58] представлена аналитическая модель для случая изгиба пакета ПКМ.

В работах [59] приведено исследование толстостенных композиционных оболочек. По результатам эксперимента выявлено, что в толстостенной оболочке из ПКМ возникает деформация по толщине пакета, которая приводит к разрушению матрицы и, как следствие, преждевременной потери несущей способности конструкции.

В работе [60] приведены аналитические методы прогнозирования деградации ПКМ. Авторы рассматривают моделирование развития микродефектов в слое и изменение жесткости в однонаправленных ПКМ, моделирование деградации жесткости многослойных ПКМ по масштабам длины элемента, а также модели деградации при многоцикловом нагружении. Недостатком данных моделей является необходимость определения параметров деградации из экспериментов.

В работах [61-63] приведена связь между деградацией ПКМ и физическими термодинамическими законами, основанная на энтропийном подходе. Данный метод позволяет связать поврежденность материала с его физическими характеристиками.

В работе [64] приведена модель, описывающая деградацию элементарного слоя. Описан процесс идентификации параметров деградации материала по экспериментальным данным.

Зарождение и развитие трещин на микроуровне в значительной мере влияют на функциональное межслоевое взаимодействие в структуре пакета ПКМ. Работы [65-67] посвящены межслоевому разрушению ПКМ.

В работе [68] предложена методика расчета статической прочности ПКМ с концентраторами напряжений. Автор рассматривает пакет ПКМ из углеродного волокна с внедренными стопорными слоями низкомодульного материала. Внедрение низкомодульного материала препятствует развитию трещины, вследствие чего увеличивается живучесть конструкции при статическом нагружении. В работах [69-70] приведены экспериментальные исследования по данной теме.

В работе [71] приведено численное моделирование разрушения элементарных образцов из композиционного материала с учетом различных типов дефектов, возникающих в процессе нагружения. Результаты численного моделирования имеют хорошую сходимость с экспериментом.

В работе [72] исследуется нелинейное поведение однонаправленных и тканых композиционных материалов, подверженных сдвиговому нагружению. В ходе натурных экспериментов получены диаграммы напряженно-деформированного состояния. По результатам работы можно сделать вывод, что тканая структура ПКМ имеет более высокую сопротивляемость разрушению при сдвиге. Образование трещин в структуре с однонаправленными волокнами происходит значительно раньше.

Наибольший вклад в деградацию свойств однонаправленного ПКМ вносят трещины, зародившиеся в слоях, расположенных поперечно действующей растягивающей нагрузке. Образовавшиеся трещины приводят к снижению модуля упругости и сдвига монослоя. Данный вопрос рассмотрен в работах [73-78]. В работах [79-81] рассматривается механика зарождения трещин в поперечных направлениях однонаправленного ПКМ.

При деградации происходит зарождение трещин в объеме матричной структуры. При дальнейшем нагружении структуры происходит взаимодействие

между трещинами, которое приводит к скачку деградации ПКМ. В работе [82] рассматриваются повреждения с взаимным влиянием трещин друг на друга.

Возможность варьирования углов укладки влияет на жесткостные характеристики пакета. Помимо этого, укладка монослоев в пакете ПКМ влияет на трещиностойкость. В работе [83] приведено влияние схемы укладки и различных характеристик пакета на трещиностойкость.

В работе [84] рассматривается поведение коротких поверхностных дефектов в анизотропной структуре ПКМ при действующем сжимающем нагружении.

1.4 Обзор литературы по вопросу накопления повреждения в конструкциях из композиционного материала

Для рационального проектирования конструкций из ПКМ необходимо учитывать деградацию структуры. Существует множество методов и методик, направленных на моделирование процесса деградации свойств ПКМ. Однако многие из них не получили широкого применения в авиационной промышленности. Возможность практического применения методов расчета при проектировании реальных конструкций летательных аппаратов является зачастую не раскрытым вопросом. В наши дни большинство конструкторских бюро используют численное моделирование для оценки запасов прочности конструкции. Однако глобальные конечно-элементные модели самолета имеют низкую степень детализации, что не позволяет учитывать многие факторы разрушения композиционного материала. Создание конечно-элементных моделей высокой степени детализации позволяет учитывать локальные напряжения и деградацию структуры ПКМ, однако применимы для элементов конструкции, прочность которых можно оценить изолированно от всего планера самолета. Создание и расчет конечно-элементных моделей с высокой степенью детализации конструкции всего планера – чрезвычайно трудоемкий процесс и требуют значительных вычислительных ресурсов. Вследствие этого необходимы методики, раскрывающие вопрос моделирования деградации и повреждения композиционного материала в глобальных конечно-элементных моделях разной степени детализации.

В работе [85] приведена методика рационального проектирования конструкции отсека фюзеляжа из композиционного материала с учетом массовых, прочностных и жесткостных критериев.

В работе [86] получено аналитическое решение задачи напряженно-деформированного состояния лопаток авиационных двигателей из слоистых композиционных материалов.

В работе [87] приведена методика рационального проектирования узла крепления вертолетной лопасти, позволяющая обеспечить прочность конструкции с учетом усталостной долговечности.

В работе [88] приведена методика расчёта прочностных и деформационных параметров лопасти вертолёт из КМ с межслоевыми дефектами.

В работе [89] приведён широкий базис дефектов, возникающих в процессе эксплуатации конструкций из композиционного материала. Приведены рекомендации по ремонту конструкций. Данные материалы имеют высокую практическую значимость.

В работе [90] приведена методика численного моделирования разрушения панелей из композиционного материала. Проведен динамический анализ ударного воздействия, в ходе которого в структуре ПКМ образовались повреждения. Влияние образовавшихся повреждений на прочность панели ПКМ исследована методом конечных элементов в статической постановке.

В работе [91] исследуется механизм повреждения тонкостенных панелей из ПКМ в процессе установки крепежа с натягом. При установке крепежа в композиционные панели происходит разрушение структуры на микроуровне из-за возникающих сжимающих напряжений.

В работе рассматриваются [92] методики оценки вибрационной прочности лопаток из композиционного материала.

1.5 Обзор литературы по вопросу ресурса конструкций из композиционного материала

Для обеспечения надежности авиационных конструкций важнейшим этапом является расчет ресурсной прочности конструкций. Данная тематика не утратила своей актуальности в наши дни. Сложность прогнозирования ресурсной прочности ПКМ заключается в большом количестве входных параметров, влияющих на ресурсную прочность материала:

- объем циклов нагружения;
- вид напряженно-деформированного состояния;
- тип конструкции;
- уровень эксплуатационных нагрузок;
- тип композиционного материала;
- качество изготовления конструкций.

В работе [93] широко рассматривается вопрос ресурсной прочности и существующих методик расчета для деталей из ПКМ, применяемых в отечественном и зарубежном авиастроении.

В настоящее время можно классифицировать методы оценки ресурсной прочности следующим образом:

1. Статистическая оценка ресурсной прочности. Данный метод основан на экспериментальных данных или на летном опыте эксплуатации авиационной техники. Методики прогнозирования ресурсной прочности, основанные на данном методе, являются достаточно точными. Главный недостаток данного метода заключается в сложности прогнозирования новых конструкций, так как требуется широкий базис экспериментов или опыта применения конструкций.

2. Методы, основанные на кривых прочности, зависящих от напряжений в конструкции с концентраторами и в регулярной зоне конструкции. Данный метод широко применяется на практике, однако зачастую требует введения поправочных эмпирических коэффициентов.

3. Метод, основанный на кривой прочности, зависящий от действующих деформаций в зоне концентратора и регулярной зоне. Считается, что данный метод

является наиболее точным, однако является трудоемким, в связи с чем редко применяется на практике.

В работе [94] приведены экспериментальные данные оценки ресурсной прочности стеклопластика и углепластика при нагружении продольным изгибом.

В работах [95-97] рассматривается вопрос разрушения ПКМ материала от действующего циклического нагружения. На основании данных работ можно сделать вывод, что при циклическом нагружении значительную роль играет адгезионная связь волокна и матрицы. При недостаточной прочности границы раздела происходит ресурсное разрушение в виде расслоения ПКМ.

В работе [98] рассматривается вопрос определения ресурсной прочности конструкции. Приведена связь между предельными характеристиками материала при статическом растяжении, действующими концентраторами напряжений и ресурсной прочностью.

Зачастую разрушение конструкции связано с концентраторами напряжений в зонах крепежа. В работе [99] приведены рекомендации по проектированию конструкции из ПКМ в зоне болтовых отверстий. Внедрение втулок в болтовое соединение конструкции позволяет значительно увеличить ресурс конструкции. Стоит отметить, что ресурсная прочность зависит от степени нагружения конструкции из-за различных усталостных параметров ПКМ.

1.6 Постановка задачи

По проведённому анализу существующих исследований на тему деградации свойств однонаправленных углеродных и тканых органопластиковых композиционных материалов можно сделать заключение, что для рационального проектирования конструкций из композиционных материалов необходимо уточнение существующих методик расчёта деградации их свойств. Большинство методов и методик расчёта напряженно-деформированного состояния включают экспериментальные параметры деградации материала. Однако зачастую данные параметры не определены для широкого спектра ПКМ, а экспериментальное исследование является трудоёмким и дорогостоящим процессом, требующим специального оборудования.

В данной работе разработана методика численного моделирования напряженно-деформированного состояния с учётом разрушения матричной структуры в подпрограмме UMAT программного комплекса Abaqus. Данный алгоритм позволит определять значения параметров деградации однонаправленных углеродных композиционных материалов, которые впоследствии могут быть использованы для проектирования авиационных конструкций из ПКМ. Полученные результаты численного моделирования валидированы по результатам натурных испытаний.

Тканые композиционные материалы имеют в своей структуре криволинейные волокна, что приводит к локальным всплескам напряжений в матричной структуре и, как следствие, к разрушению. Кроме того, криволинейные волокна, ориентированные вдоль направления растягивающего нагружения, стремятся выпрямиться, что может привести к нелинейному поведению напряженно-деформированного состояния материала. В данной работе разработана методика численного моделирования напряженно-деформированного состояния тканого органопластика с учётом прогрессирующего разрушения матричной структуры и геометрической кривизны волокна при растяжении. Полученные результаты численного моделирования валидированы по результатам натурных испытаний.

Определение параметров деградации композиционных материалов является трудоёмким процессом, и для многих марок ПКМ эти параметры не определены. При проектировании конструкций летательных аппаратов данные параметры имеют высокую практическую значимость. В рамках данной работы рассчитаны параметры деградации для элементарных образцов из тканого органопластика и конструктивно подобных образцов по результатам экспериментального исследования.

1.7 Заключение по Главе 1

1. Проведён обзор и анализ литературы по вопросам механики разрушения и деградации свойств однонаправленных и тканых композиционных материалов.
2. Сформулирована постановка задачи диссертационной работы.

ГЛАВА 2 МОДЕЛЬ РАСЧЕТА РАЗРУШЕНИЯ И НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ОДНОНАПРАВЛЕННОМ КОМПОЗИЦИОННОМ МАТЕРИАЛЕ

Модель расчёта напряженно-деформированного состояния однонаправленного ПКМ из углеродного волокна с учётом деградации матричной структуры

В данной главе рассматривается алгоритм численного моделирования деградации матричной структуры однонаправленного ПКМ из углеродного волокна.

В настоящее время наиболее достоверным методом определения различных параметров материала являются натурные испытания. Однако данный метод имеет высокие экономические и временные затраты. Помимо этого, реализация испытаний, в которых рассматривается поведение ПКМ под воздействием сложного напряженного состояния, является нетривиальной задачей. Одним из перспективных методов исследования является численное моделирование поведения ПКМ с учетом различных типов деградации структуры. Данный метод требует меньших временных и экономических затрат, однако для получения достоверных результатов требуется точная калибровка математической модели по результатам натурных испытаний. Вследствие этого численное моделирование поведения ПКМ является рациональным методом исследования, который позволяет в связке с натурными испытаниями определять различные параметры материала и исследовать механику деградации ПКМ на микроуровне.

В настоящее время проектирование конструкции из ПКМ с учетом деградации структуры требует использование многомасштабного иерархического подхода. Данный подход заключается в том, что на начальных этапах рассматривается поведение элементарных образцов ПКМ и определяются параметры деградации монослоя. После определения параметров деградации элементарных образцов происходит переход на следующий уровень, в котором

рассматривается поведение пакета ПКМ, состоящего из монослоев с различными укладками. На данном этапе определяются параметры межслоевого разрушения. Полученные параметры материала позволяют проводить рациональное проектирование конструкций из ПКМ с учетом различных типов деградации и разрушения структуры.

Численное моделирование позволяет рассмотреть поведение периодического репрезентативного объема ПКМ на микроуровне и определить параметры деградации монослоя, которые лягут в основу рационального проектирования конструкции из ПКМ.

2.1 Конечно – элементная реализация модели нелинейного деформирования эпоксидной смолы

Зачастую в роли матрицы ПКМ выступают эпоксидные смолы. Данный материал подвержен образованию микротрещин, которые впоследствии могут привести к нарушению связей между матрицей и волокном или межслойному расслоению материала. В данном параграфе рассматривается численное моделирование поведения связующего с учетом нелинейного поведения.

Структура ПКМ на микроуровне имеет значительные перепады жесткости на границах раздела волокна и матрицы. Также эпоксидные смолы и углеродные волокна имеют различные коэффициенты Пуассона. Это приводит к возникновению сложного напряженно-деформированного состояния в матричной структуре при простом нагружении монослоя ПКМ. Помимо этого, матричная структура имеет свойства разной сопротивляемости, как правило, эпоксидная смола наиболее эффективно сопротивляется деградации свойств при сжимающей нагрузке. При растягивающем нагружении в структуре эпоксидной смолы происходит зарождение трещин. При дальнейшем нагружении происходит распространение и раскрытие трещин. Однако стоит учитывать, что при обратном нагружении (сжатии) материала происходит закрытие трещин и частичное восстановление жесткостных свойств. Также эпоксидная смола имеет свойства разномодульности, однако жесткостные характеристики для сжатия и растяжения имеют незначительные отличия.

Для описания нелинейного поведения матричной структуры ПКМ используется модель пластического течения, реализованная в подпрограмме UMAT конечно-элементного комплекса Abaqus. В руководстве для пользователей ПК Abaqus [100] приведён пример реализации математической модели пластического течения по Мизесу с изотропным упрочнением. В данной модели проведены следующие изменения:

1. Изменен критерий текучести для описания свойств разной сопротивляемости материала и учёта влияния гидростатического давления на пластическое течение;
2. Введена функция снижения модуля упругости от действующих напряжений;
3. Введён критерий отказа материала;

Матрица ПКМ является изотропным материалом, и для описания упругих свойств необходимы параметры модуля упругости E и коэффициента Пуассона μ .

Следующие уравнения описывают линейный закон Гука:

$$\sigma^{tr} = \sigma + \Delta \sigma^{tr} \quad (2.1)$$

$$\Delta \sigma^{tr} = C \Delta \varepsilon \quad (2.2)$$

где σ^{tr} – пробные напряжения, $\Delta \sigma^{tr}$ – приращения пробного напряжения, $\Delta \varepsilon$ – приращения упругой деформации, C – матрица жесткости.

Условием начала пластических деформаций является критерий текучести [101] $f > 0$. Данный критерий является доработанным критерием Мизеса и позволяет учитывать свойства разной сопротивляемости материала.

$$f = \sigma_e^{tr} - \sigma_{yy} \quad (2.3)$$

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

$$\sigma_e^{tr} = \sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x \sigma_y - \sigma_x \sigma_z - \sigma_y \sigma_z + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2) - (\sigma_{сж}^{ny} - \sigma_p^{ny})(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \quad (2.4)$$

$$\sigma_{yy} = \sigma_p^{ny} \sigma_{сж}^{ny} + H p \quad (2.5)$$

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

Следующие уравнения описывают направление пластического движения [100]:

$$n = \frac{\dot{\sigma}^{tr}}{\sigma_e^{tr}} \quad (2.6)$$

$$\dot{\sigma}^{tr} = \dot{\sigma}^{tr} - P \quad (2.7)$$

где P – тензор гидростатического давления.

Следующие уравнения описывают приращение эффективной пластической деформации Δp :

$$\Delta p = \Delta p + d \Delta p \quad (2.8)$$

$$d \Delta p = \frac{\sigma_e^{tr} - 3G \Delta p - \sigma_{yy}}{3G + H} \quad (2.9)$$

Следующие уравнения описывают приращение упругой $\Delta \varepsilon^e$ и пластической $\Delta \varepsilon^p$ деформации:

$$\Delta \varepsilon^p = \frac{3}{2} \Delta p \frac{\dot{\sigma}^{tr}}{\sigma_e^{tr}} \quad (2.10)$$

$$\Delta \varepsilon^e = \Delta \varepsilon - \Delta \varepsilon^p \quad (2.11)$$

Уравнение (12) описывает снижение модуля упругости матрицы в зависимости от действующих напряжений:

$$E = E_0 (1 - c_1 K^{c_2} + c_1 1^{c_2}) \quad (2.12)$$

$$K = \frac{\sigma_e^{tr}}{\sigma_p^{nc} \sigma_{сж}^{nc}} \quad (2.13)$$

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

На Рисунке 2.1 приведён алгоритм (Приложение Б) математической модели, реализованный в пользовательской среде UMAT ПК Abaqus. Если условие текучести материала не выполняется $f > 0$, материал находится в упругой области, снижение модуля упругости не происходит. При выполнении $f > 0$ инициализируется процесс снижения модуля упругости материала (2.12). Параметр (2.13) принимает значение больше единицы $\sigma_d > 1$. На Рисунке 2.2 приведена

диаграмма снижения модуля упругости E от σ_d , где параметр $c_1=0.57$, $c_2=2.5$. Стоит отметить, что разработанный алгоритм запоминает минимальное значение модуля упругости, достигнутое в процессе расчёта, и принимает его за истинное значение при нахождении материала в упругой или пластической области при обратной разгрузке.

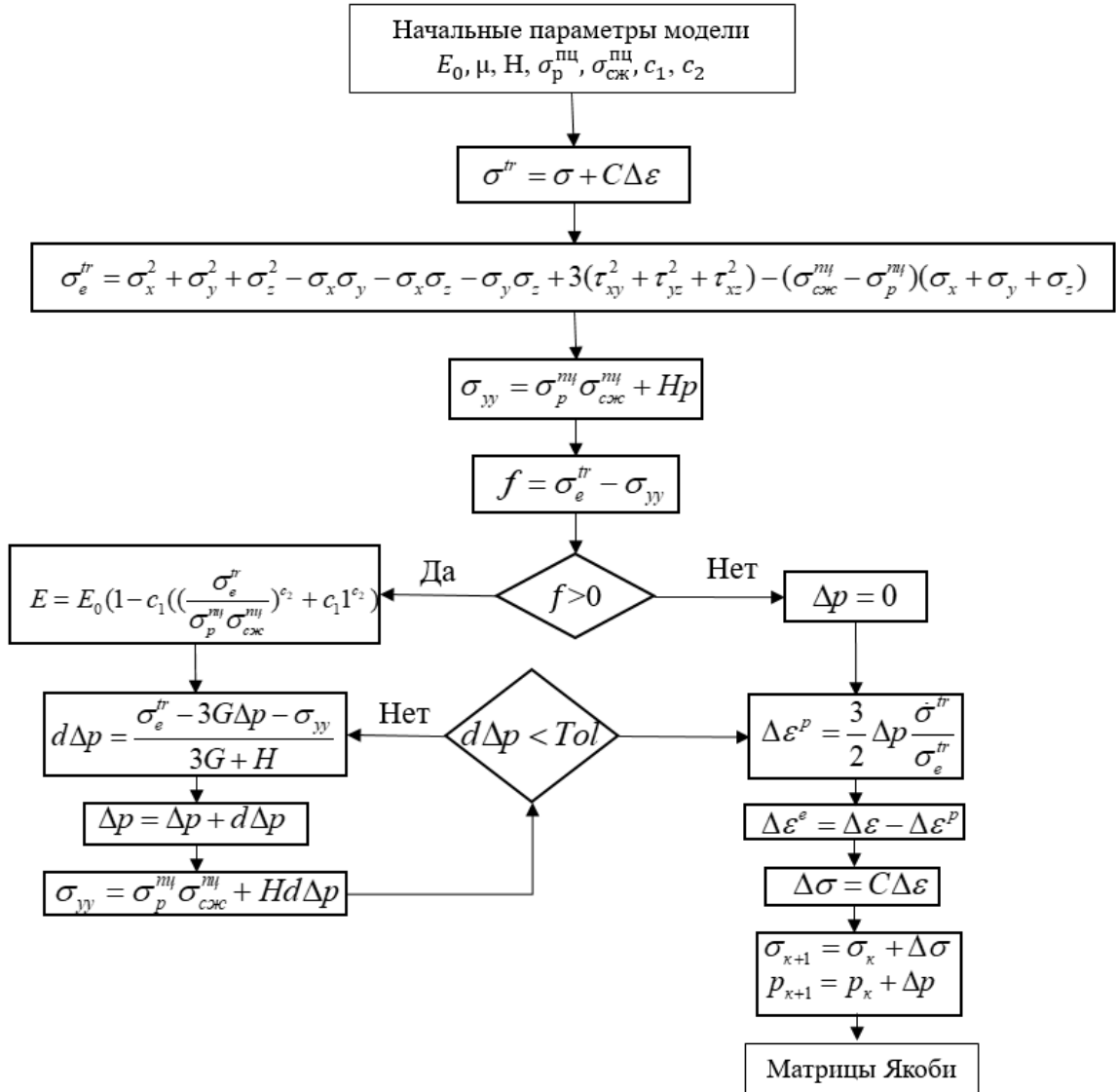


Рисунок 2.1 Алгоритм численного моделирования НДС эпоксидной смолы.

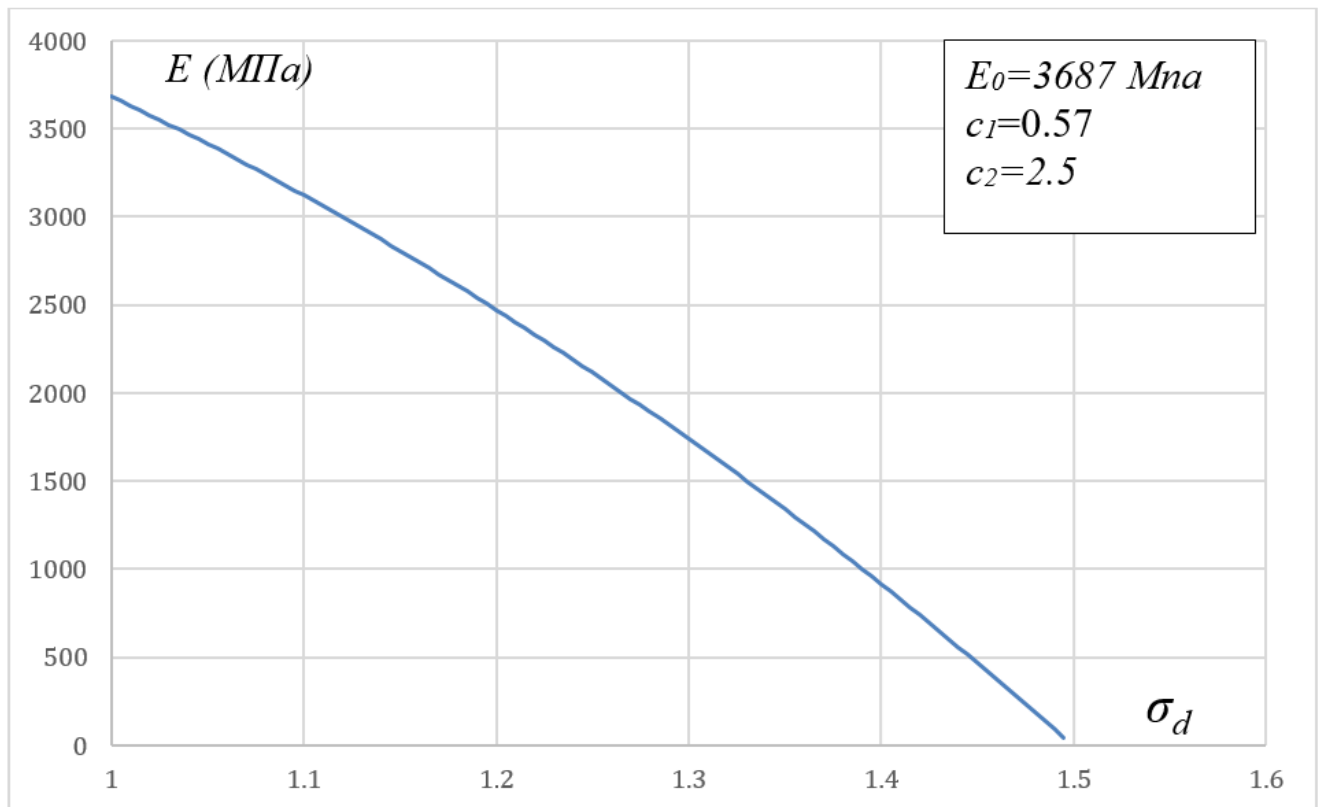


Рисунок 2.2 Деградация модуля упругости E эпоксидной смолы от σ_d

В работе [59] приведена диаграмма напряженно-деформированного состояния эпоксидной смолы при сжимающем, растягивающем и сдвиговом нагружении. Эпоксидная смола испытывалась изолированно, без включения волокон в состав структуры. По результатам испытаний проведена валидация математической модели. Стоит отметить, что в работе [59] нет данных о снижении жесткостных характеристик эпоксидной смолы в ходе нагружения, вследствие этого математическая модель не учитывает снижения модуля упругости и разрушения структуры. Данные параметры математической модели будут валидированы по результатам испытания монослоя ПКМ в последующих главах.

Геометрические характеристики конечной элементной модели приведены на Рисунке 2.3. Модель состоит из объемных элементов типа C3D8 [100]. Граничные условия наложены в виде перемещений узлов на торцах КЭМ. В Таблице 2.1 приведены физические характеристики эпоксидной смолы.

Таблицы 2.1 – Физические характеристики эпоксидной смолы

E (Mna)	3687
μ	0.39
σ_p^{ny} (Mna)	43
$\sigma_{сж}^{ny}$ (Mna)	98
H (Mna)	1961

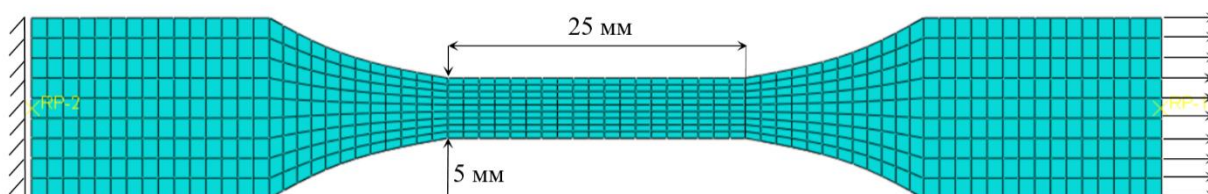


Рисунок 2.3 – Общий вид конечной элементной модели

На Рисунке 2.4 приведены действующие пластических деформации в образце, подверженному растяжению, полученные в ходе численного моделирования.

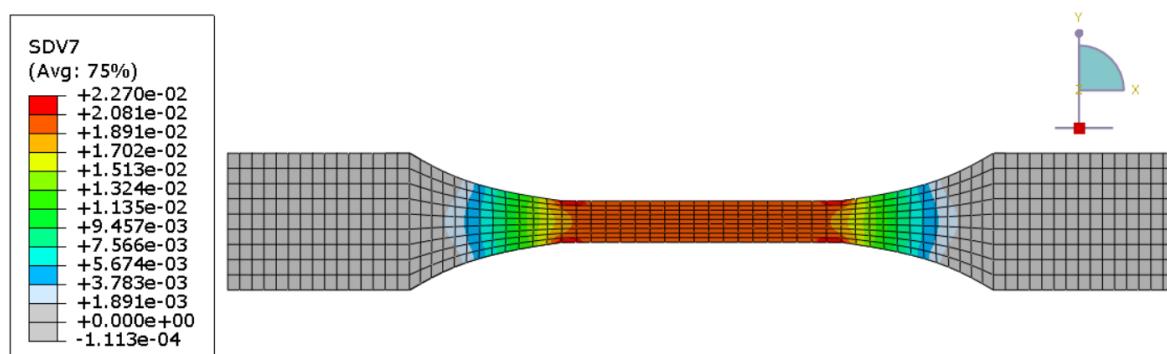


Рисунок 2.4 – Пластические деформации при растяжении образца

На Рисунках 2.5-2.6 приведена диаграмма напряженно-деформированного состояния образцов из эпоксидной смолы, полученные в ходе численного моделирования и натурных испытаний [59]. На основании полученных данных можно сделать вывод, что математическая модель удовлетворительно описывает нелинейное поведение эпоксидной смолы и свойства разной сопротивляемости материала. Стоит отметить, что недостатком математической модели является линейное упрочнение материала.

По результатам натурных испытаний [59], растягивающая деформация разрушения образца составила 4-5 %. Сдвиговая и растягивающая деформация разрушения составила 35 и 50 %. Математическая модель удовлетворительно описывает поведение эпоксидной смолы при растяжении. При этом вводится гипотеза, что деформативные способности при сжатии и сдвиге эпоксидной смолы с армированным волокном будут значительно ниже. Вследствие этого рассматривался участок деформаций при сжатии до 7 % и при сдвиге до 13 %.

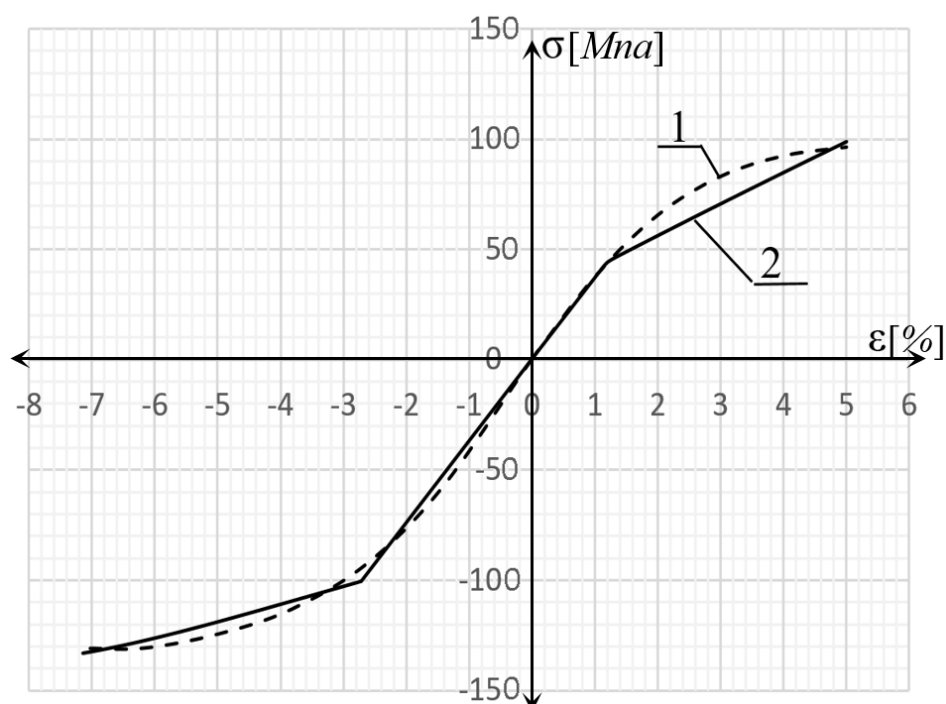


Рисунок 2.5 – Диаграмма нормальных напряжений (МПа) от деформаций %:
1 – натурный эксперимент [59], 2 – численное моделирование

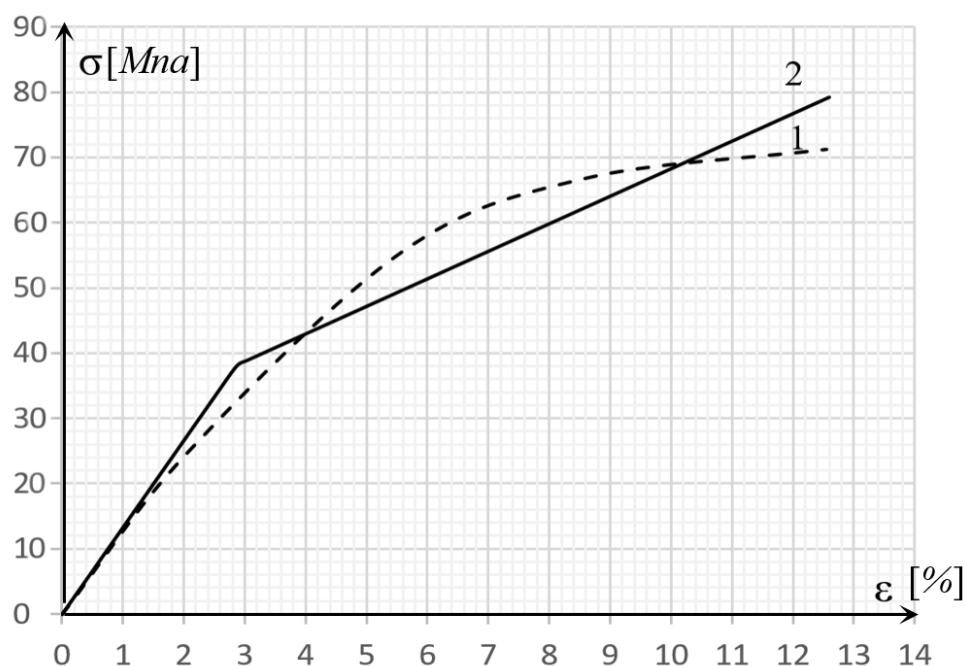


Рисунок 2.6 – Диаграмма сдвиговых напряжений (МПа) от деформаций %:
1 – натурный эксперимент [59], 2 – численное моделирование

2.2 Решение задачи о накоплении повреждений в элементарном слое

2.2.1 Конечно – элементная модель представительного объёма однонаправленного композиционного материала

В данном параграфе рассматривается численное моделирование деградации свойств однонаправленного композиционного материала вследствие разрушения матричной структуры. Рассмотрен репрезентативный объем структуры композиционного материала на микроуровне (Рисунок 2.7). Геометрические размеры ячейки составляют 40 на 40 мкм.

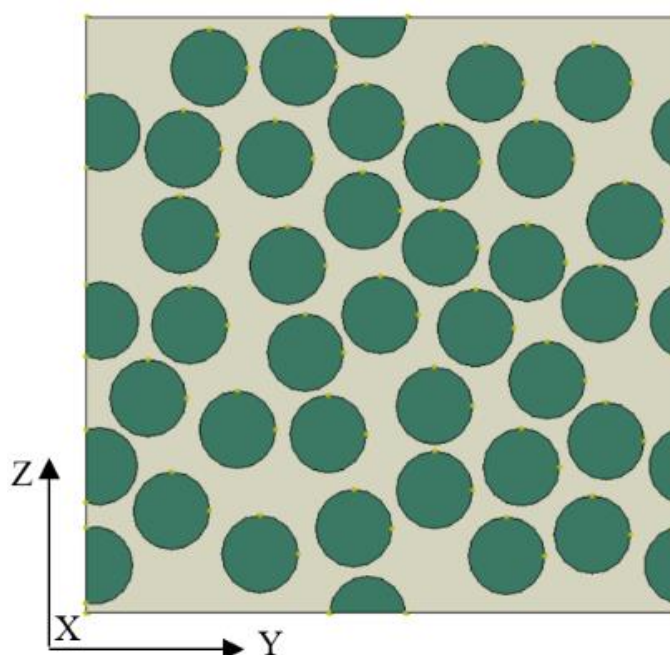


Рисунок 2.7 Общий вид конечно-элементной модели

Репрезентативный объем состоит из эпоксидной смолы и случайным образом распределённых однонаправленных волокон углеродного волокна. Геометрия структуры ПКМ на микроуровне сформирована в программном комплексе MSC Digimat [102]. Моделирование случайного распределения волокон позволяет рациональнее воспроизводить микроструктуру ПКМ, что подтверждается электронной микроскопией [2]. Углеродные волокна имеют цилиндрическую геометрию с радиусом 2.6 мкм. Суммарное количество волокон в объеме ячейки составило 38 штук, объемная доля наполнения волокном 50 %. Модель ячейки ПКМ состоит из 50506 объемных элементов типа C3D8. Волокно имеет ортотропные линейные характеристики, приведенные в Таблице 2.2. Свойства эпоксидной смолы приведены в Таблице 2.3.

Таблицы 2.2 – Характеристики углеродного волокна

E_1 (ГПа)	276
E_2 (ГПа)	15
μ	0.2
G_{12} (ГПа)	15
G_{23} (ГПа)	7

Таблицы 2.3 – Физические характеристики эпоксидной смолы

$E (Mna)$	3687
μ	0.39
$\sigma_p^{ny} (Mna)$	42.6
$\sigma_{сжс}^{ny} (Mna)$	98
$H (Mna)$	1961
c_1	0.57
c_2	2.5

Конечно-элементная модель имеет периодические граничные условия (РВС). Данное нагружение накладывает уравнения связи (2.14) на узловые элементы модели. В работах [113, 104-106] представлены математическое описание и принципы реализации периодических граничных условий:

$$u_j^{i+} - u_j^{i-} = \varepsilon_{ij} l_i \quad (2.14)$$

где u_j^i – узловые перемещения, а l_i – необходимое смещение для обеспечения деформации ε_{ij} .

Для рассмотрения различных типов нагружения ячейки ПКМ необходимо выполнить преобразования (2.15), нагружения из глобальной в локальную систему координат (Рисунок 2.8).

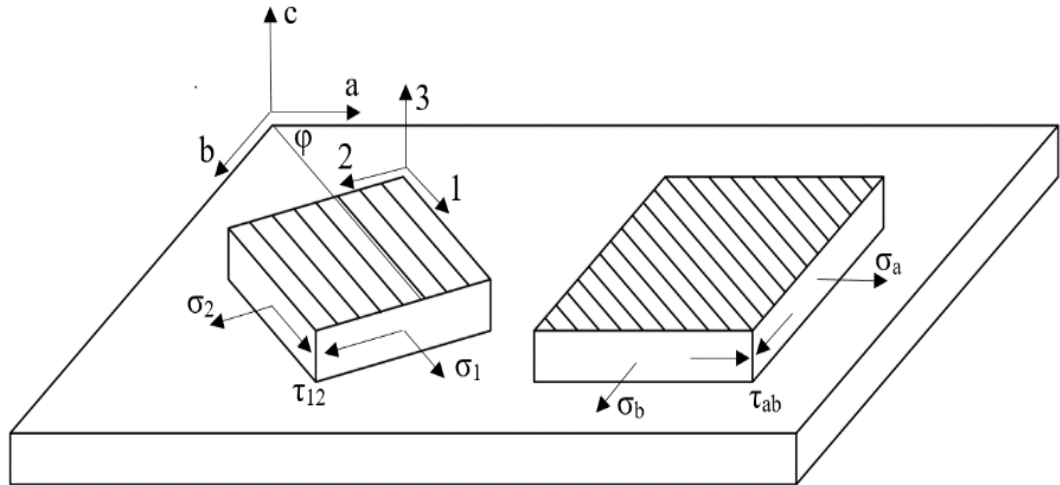


Рисунок 2.8 Элемент однонаправленного ПКМ в осях монослоя (1, 2, 3) и в осях конструкции (a, b, c)

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_1 &= \varepsilon_a \cos^2 \varphi + \varepsilon_b \sin^2 \varphi + \varepsilon_{ab} \sin \varphi \cos \varphi \\
 \varepsilon_2 &= \varepsilon_a \sin^2 \varphi + \varepsilon_b \cos^2 \varphi - \varepsilon_{ab} \sin \varphi \cos \varphi \\
 \varepsilon_{12} &= (\varepsilon_b - \varepsilon_a) \sin 2\varphi + \varepsilon_{ab} \cos 2\varphi
 \end{aligned}
 \tag{2.15}$$

2.2.2 Определение влияния типа граничных условий в конечно – элементной модели на результаты численного моделирования

В данном параграфе приведены результаты численного моделирования НДС микроструктуры ПКМ. Рассмотрено два типа граничных условий, периодические и узловые перемещения в явном виде. Рассмотрен случай поперечного растягивающего нагружения ячейки ПКМ. На Рисунке 2.9 приведены средние напряжения от деформаций ячейки ПКМ.

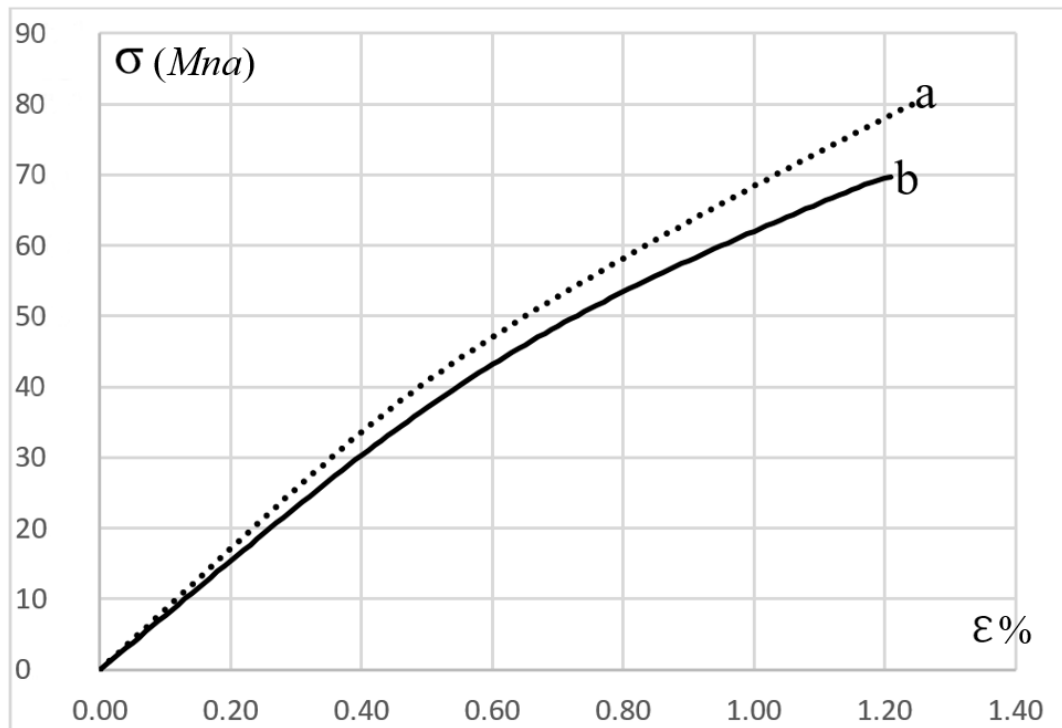


Рисунок 2.9 Средние напряжения (МПа) от деформаций ячейки ПКМ с заданными периодическими граничными условиями (a); средние напряжения (МПа) от деформаций ячейки ПКМ с явными граничными условиями (b)

На Рисунке 2.10 приведены результаты расчета НДС, на основании которых можно сделать вывод, что периодические граничные условия являются рациональным выбором для моделирования поведения ПКМ на микроуровне. Конечно-элементная модель с явными граничными условиями имеет значительные локальные всплески в зоне заделки.

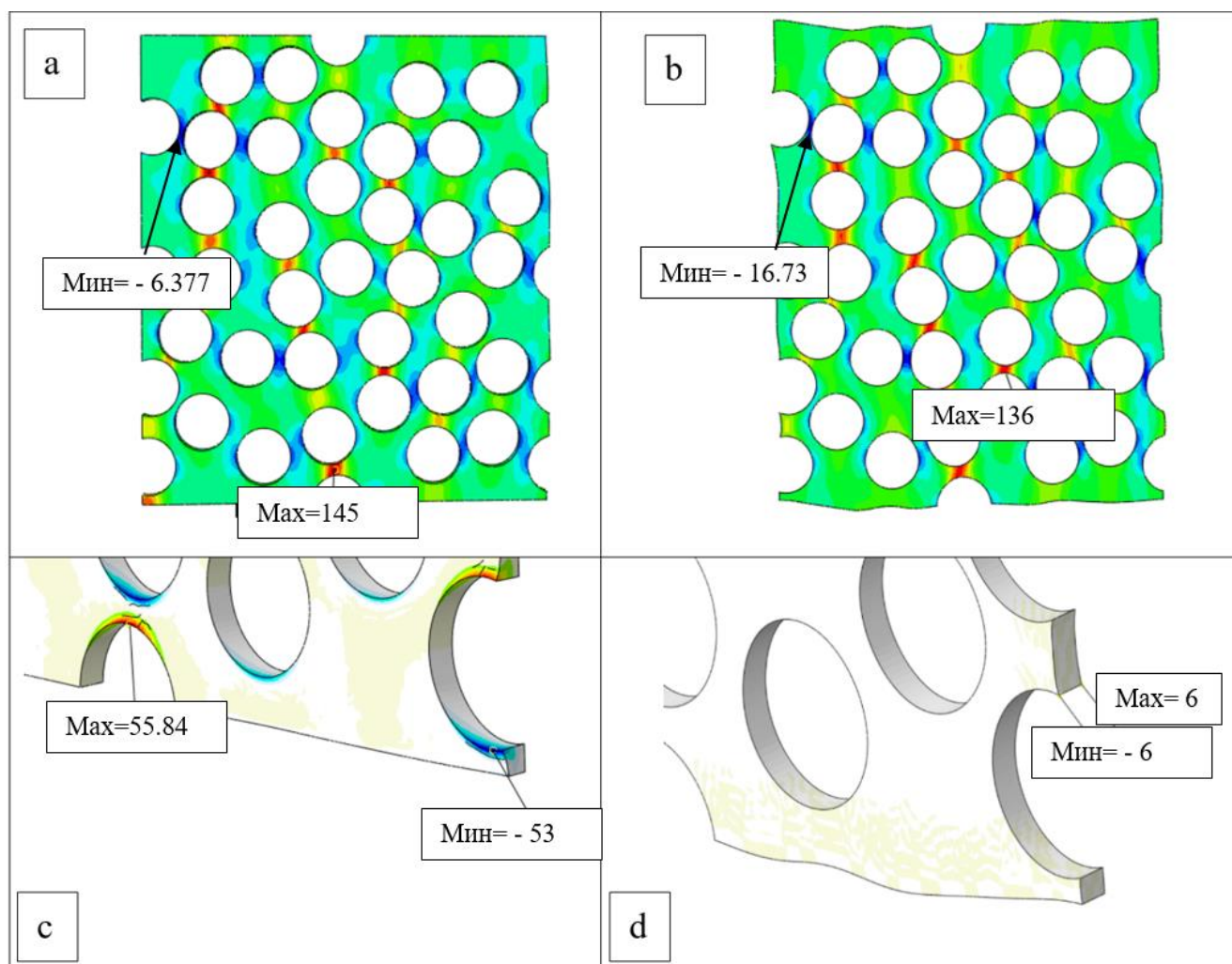


Рисунок 2.10 а – Нормальные напряжения σ_y (МПа) (явные граничные условия); б – Нормальные напряжения σ_y (МПа) (РВС); в – Напряжения τ_{xy} (МПа) (явные граничные условия); д – Напряжения τ_{xy} (МПа) (РВС)

2.2.3 Валидация результатов численного моделирования деградации свойств в однонаправленном элементарном слое

Проведена валидация численного решения деградации свойств ПКМ при малоцикловом нагружении (5 циклов нагружения). Рассмотрено сдвиговое нагружение в плоскости xu ячейки ПКМ с углом армирования 45 и 67 градусов. На основании результатов численного моделирования получены параметры деградации свойств ПКМ при малоцикловом нагружении. Проведено сравнение полученных параметров деградации с результатами экспериментов, приведенных в открытых источниках [29, 64, 107, 108]. На данном этапе не вводился критерий

разрушения материала. Валидация критерия разрушения матричной структуры будет рассмотрена в следующих главах.

В Таблице 2.4 приведены жесткостные характеристики ячейки ПКМ, полученные в ходе численного моделирования.

Таблицы 2.4 Упругие свойства монослоя

E_1 (Mna)	138175
E_2 (Mna)	7070
G_{12} (Mna)	2892
G_{23} (Mna)	2696

На Рисунке 2.11 представлено снижение модуля упругости в матричной структуре в ходе сдвигового нагружения.

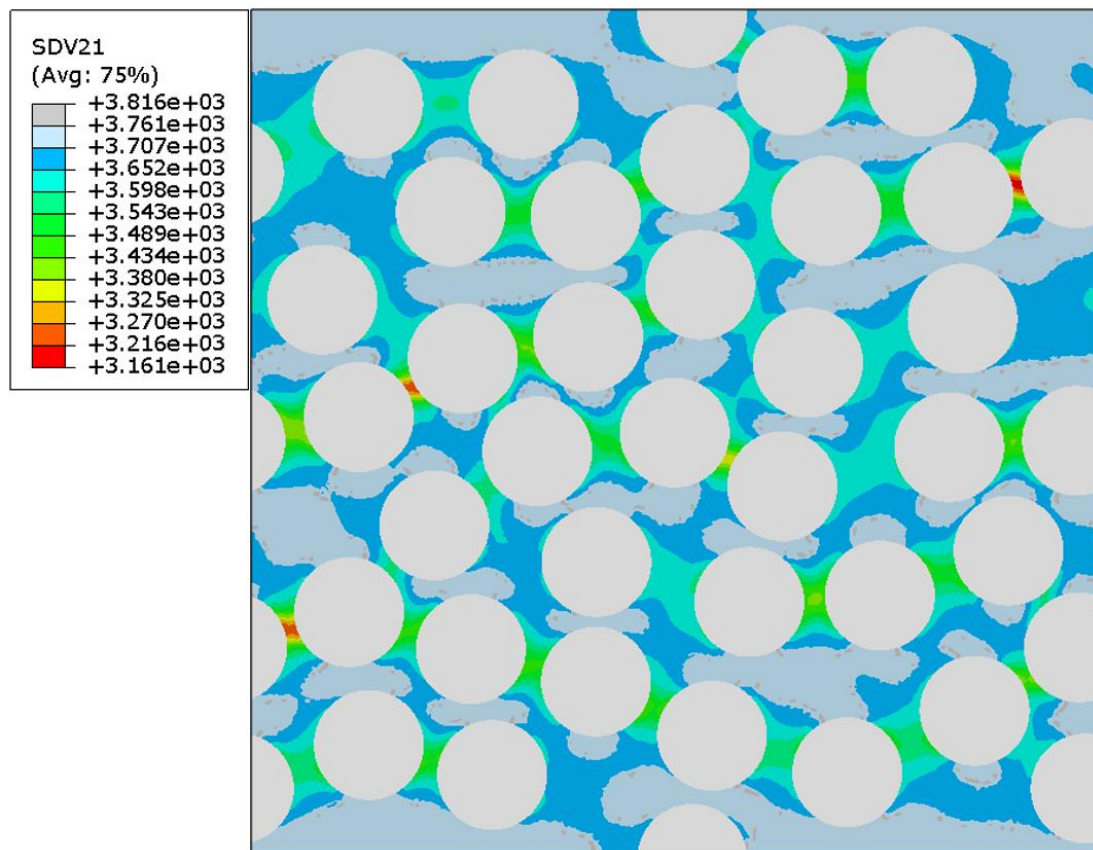


Рисунок 2.11 Снижение модуля упругости (МПа) в матричной структуре ячейки ПКМ с углом армирования 67 градусов

Формула 2.16 описывает нахождения средних действующих напряжений в микроячейке ПКМ:

$$\sigma_i = \frac{\sum_{k=1}^N \sigma_i^k V^k}{\sum_{k=1}^N V^k} \quad (2.16)$$

где σ_i^k – напряжение в элементе, V^k – объем элемента, N – номер элемента.

На Рисунке (2.12) диаграмма средних напряжений (Мпа) от средних деформаций ячейки ПКМ с углом армирования 45 и 67 градусов. На диаграмме представлены пять циклов разгрузки, на основании которых найдены параметры снижения жесткостных свойств ячейки ПКМ.

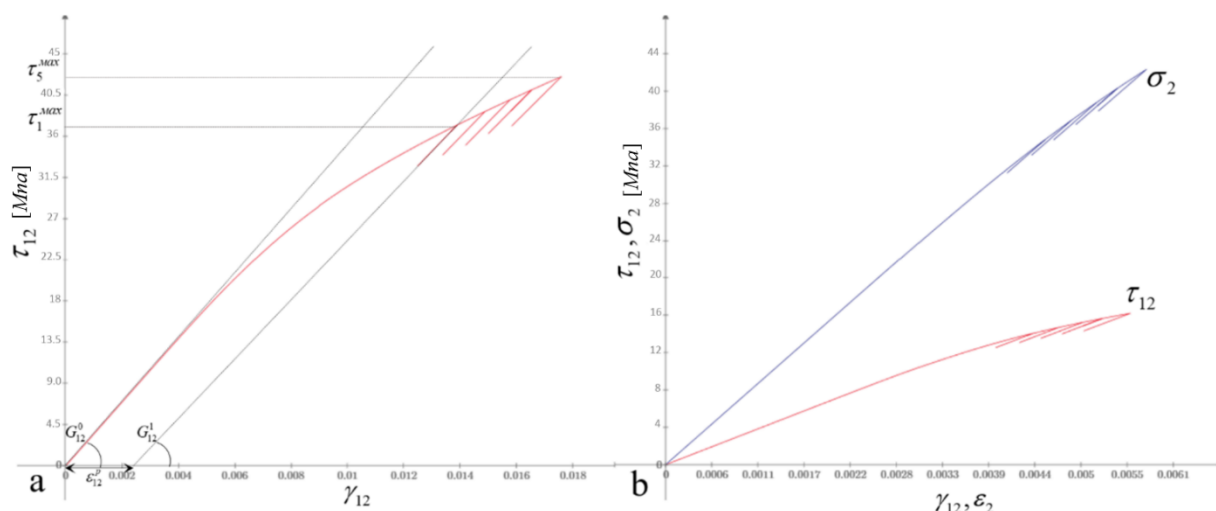


Рисунок 2.12 Действующие средние напряжения τ_{12} (Мпа) с углом армирования 45 градусов (а);

действующие средние напряжения τ_{12} и σ_2 (Мпа) с углом армирования 67 градусов (b)

На Рисунке 2.13 приведена диаграмма снижения приведенного модуля упругости E_2 (Мпа) и сдвига G_{12} (Мпа) ячейки ПКМ от действующих средних напряжений (Мпа). Значение жесткостных характеристик ячейки ПКМ определялись как наклон кривой НДС на этапе разгрузки (Рисунок 2.12).

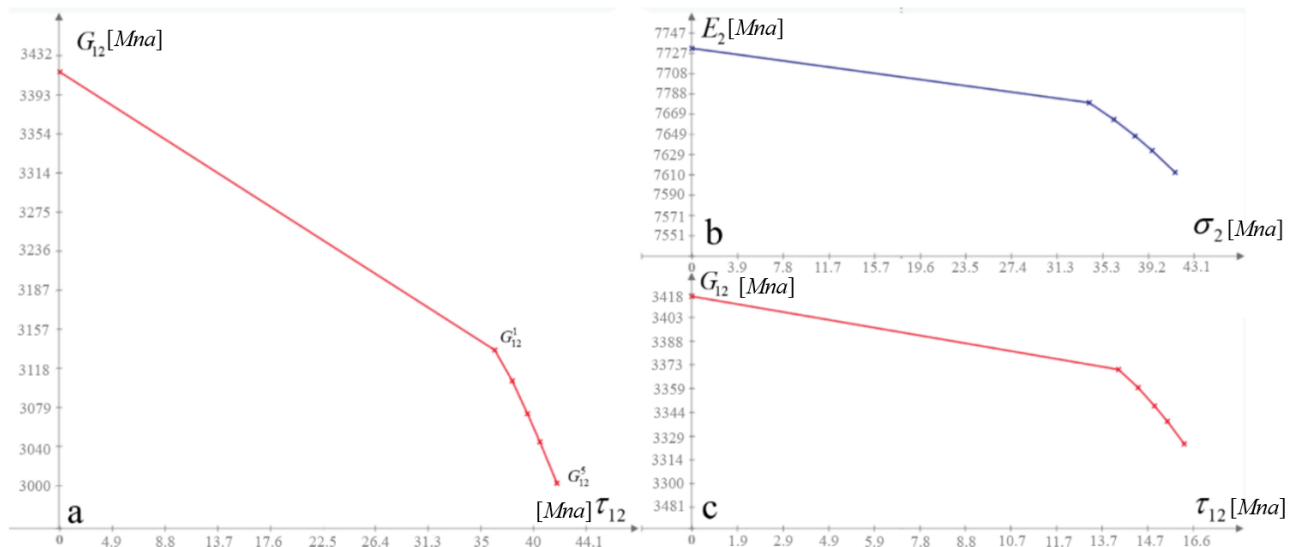


Рисунок 2.13 Модуль сдвига G_{12} (МПа) от средних напряжений (МПа)

ячейки ПКМ с углом армирования 45 градусов (а);

модуль упругости E_2 и модуль сдвига G_{12} (МПа) от средних напряжений (МПа) ячейки ПКМ с углом армирования 45 градусов (b, c)

На основании результатов численного моделирования получены параметры деградации композиционного материала. В работах [29, 64, 109] приведены математическая модель, описывающая деградацию ПКМ, и методика идентификации параметров деградации. Далее будут кратко описаны данные параметры.

Параметры d и d' характеризуют снижение жесткостных характеристик композиционного материала:

$$d = 1 - \frac{G_{12}^0}{G_{12}^i} \quad (2.17)$$

$$d' = 1 - \frac{E_2^0}{E_2^i}$$

где E_2^0, G_{12}^0 – начальные жесткостные характеристики ПКМ (без повреждения), E_2^i, G_{12}^i – действующие жесткостные характеристики ПКМ после цикла нагружения $i = 1..5$.

Параметры Y_d и Y'_d описывают развитие повреждений ПКМ. Данные параметры описывают повреждения аналогично скорости выделения энергии при распространении трещины. Для ячейки с углом армирования 45 градусов

напряжения σ_2 являются пренебрежимо малыми, вследствие этого определены параметры разрушения, зависящие только от сдвиговых деформаций и напряжений.

$$Y_d = \frac{\tau_{12}^2}{2G_{12}^0(1-d)^2} \quad (2.18)$$

$$Y_d = \frac{\sigma_2^2}{2E_2^0(1-d)^2}$$

где σ_2, τ_{12} – максимальные значения напряжений, достигнутые в цикле $i=1..5$ (Рисунок 2.12а, $\tau_i^{\max}$).

На Рисунке 2.14 приведена диаграмма $\sqrt{Y_d + bY_d}$ от d для ПКМ с углом укладки 45 градусов. Параметры bY_d принимаются близкими к нулю и не учитываются. Линейная аппроксимация полученных значений имеет вид:

$$y = 0.4178x - 0.1217 \quad (2.19)$$

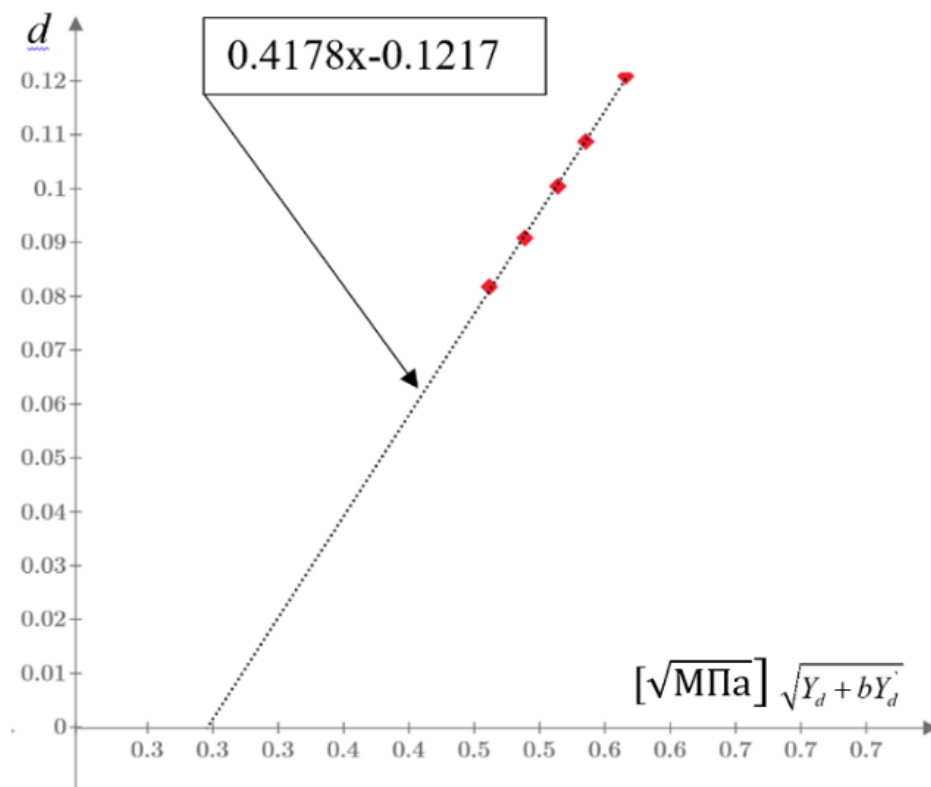


Рисунок 2.14 Параметр снижения жесткости d от параметра $\sqrt{Y_d}(\sqrt{\text{МПа}})$ для ПКМ с укладкой 45 градусов

На основании линейной аппроксимации определены параметры Y_c и Y_0 :

$$Y_c = \frac{1}{0.4178^2} \quad (2.20)$$

$$Y_0 = 0.1217^2 Y_c \quad (2.21)$$

Следующим шагом определены параметры накопления пластических деформаций p и изотропного упрочнения $R(p)+R_0$ ячейки ПКМ с углом армирования 45 градусов. На Рисунке 2.15 приведена диаграмма p от $R(p)+R_0$ для ячейки ПКМ с углом армирования 45 градусов:

$$p = \int_0^{\varepsilon_{12}^p} 2(1-d)d\varepsilon_{12}^p \quad (2.22)$$

$$R(p) + R_0 = \frac{\tau_{12}}{(1-d)} \quad (2.23)$$

где ε_{12}^p и τ_{12} — остаточные пластические деформации и максимальные действующие сдвиговые напряжения для циклов $i=1..5$ (Рисунок 2.12а).

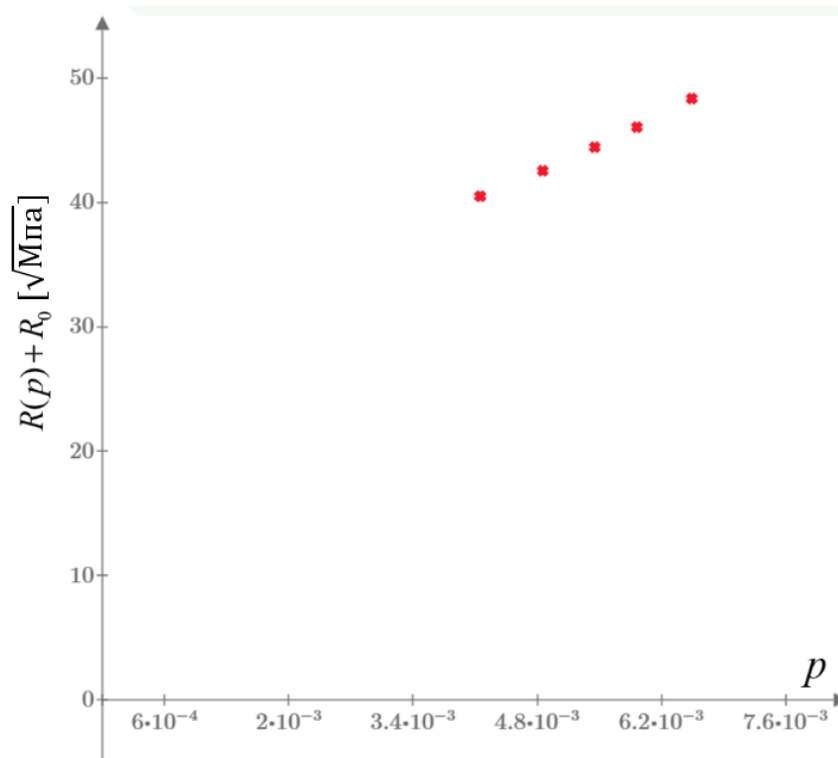


Рисунок 2.15 Накопление пластических деформаций p от параметра

$R(p) + R_0(\sqrt{\text{MPa}})$ для ячейки с углом армирования 45 градусов

Параметры, отвечающие за описание нелинейного поведения ячейки ПКМ с углом армирования 45 градусов, определены. Следующий шаг направлен на определение параметров разрушения для ячейки ПКМ с углом армирования 67 градусов. В данном случае напряжения σ_2 вносят существенный вклад в НДС ячейки, вследствие этого параметры разрушения зависят от сдвиговых и нормальных напряжений.

Параметры Y_d и Y'_d для ячейки с углом армирования 67 градусов определяются аналогичным образом (20-21). Параметры идентификации b , b' , a определяются по формулам (2.24-2.26).

$$b = \frac{(\sqrt{Y_c}d + \sqrt{Y_0})^2 - Y_d}{Y'_d} \quad (2.24)$$

$$b' = d'/d \quad (2.25)$$

$$a^2 = \frac{\varepsilon_2^p \sigma_{12} (1 - d')^2}{2\varepsilon_{12}^p \sigma_2 (1 - d)^2} \quad (2.26)$$

Параметры накопления пластических деформаций p и изотропного упрочнения $R(p) + R_0$ ячейки ПКМ с углом армирования 67 градусов определяются по формулам (2.27-2.28).

$$p = \int_0^{\varepsilon_{12}^p} 2(1-d) \sqrt{1 + \frac{a^2 \sigma_2^2 (1-d)^2}{\tau_{12}^2 (1-d')^2}} d\varepsilon_{12}^p \quad (2.27)$$

$$R(p) + R_0 = \sqrt{\frac{\tau_{12}^2}{(1-d)^2} + \frac{a^2 \sigma_2^2}{(1-d')^2}} \quad (2.28)$$

На Рисунке 2.16b приведена диаграмма $\sqrt{Y_d}$ от d и $\sqrt{Y_d + bY'_d}$ от d' для ПКМ материала с углом укладки 45 и 67 градусов.

На Рисунке 2.16a приведена диаграмма p от $R(p) + R_0$ для ячейки ПКМ с углом армирования 45 и 67 градусов. Для данных значений найдена аппроксимирующая функция. Параметры R_0 , β , α являются членами данной функции.

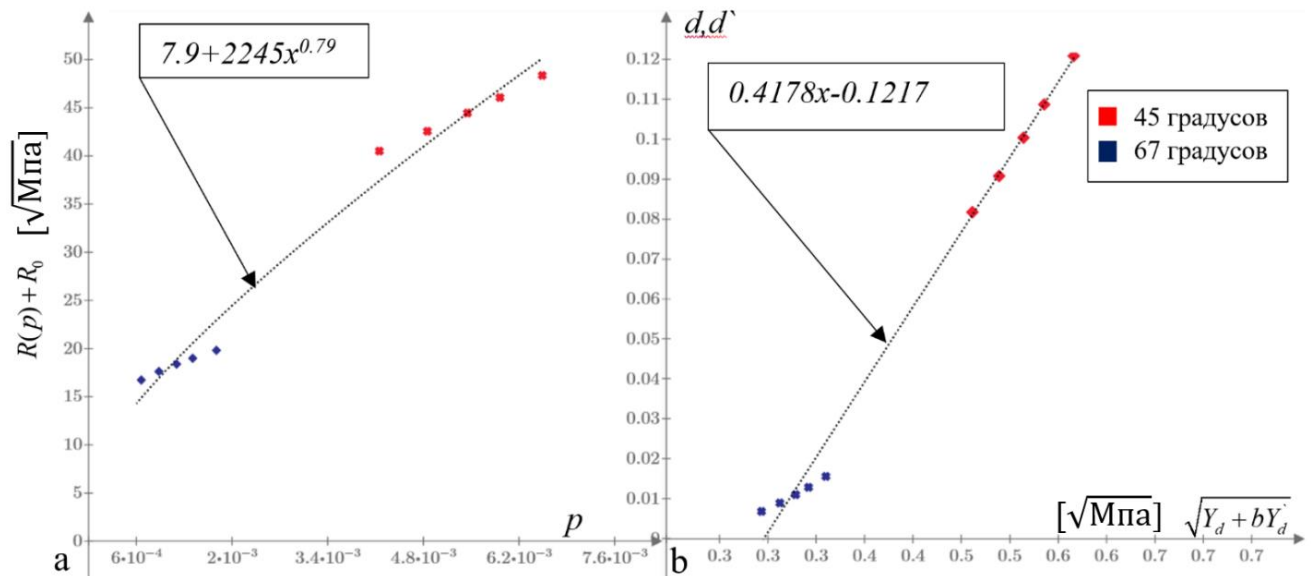


Рисунок 2.16 Накопление пластических деформаций p от параметра $R(p) + R_0(\sqrt{MPa})$ для ячейки с углом армирования 45 и 67 градусов (a); параметры снижения жесткости d от параметра $\sqrt{Y_d + bY_d'}(\sqrt{MPa})$ для ПКМ с укладкой 45 и 67 градусов (b)

В Таблице 2.5 приведены параметры деградации ячейки ПКМ, полученные в ходе численного моделирования. Проведено сравнение с экспериментальными данными, приведенными в работах [29, 64, 107, 108]. По результатам валидации параметров деградации ПКМ можно сделать заключение, что математическая модель деградации матричной структуры ПКМ, используемая в данной работе, приемлемо описывает нелинейное поведение ПКМ.

Таблица 2.5 Параметры деградации монослоя ПКМ

	Численное моделирование Волокно/матрица AS4/Toho113	Параметры деградация монослоя полученные в работах [64, 108,109,29]	Погрешность расчета
Y_c (МПа)	5.7	5.98	4.9%
Y_0 (МПа)	0.08	0.0695	13%
b	1.5	2.32	42%
b^*	0.5	0.5	0%
a	0.25		
R_0 (МПа)	7.9		
β (МПа)	2245		
α	0.79		

2.3 Решение задачи об отказе несущей способности однонаправленного элементарного слоя вследствие разрушения матричной структуры

В данном параграфе рассмотрено разрушение однонаправленного композиционного материала из-за отказа матричной структуры. Разрушение матричной структуры ПКМ происходит вследствие сдвигового нагружения, нормального растяжения или сжатия поперек армирования волокон. В работе [110] проведено численное моделирование разрушения ПКМ, по результатам исследования сформирована феноменологическая модель разрушения ПКМ.

Алгоритм численного моделирования нелинейного поведения матрицы, рассмотренный в главе 2.1, 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. Кроме того, в матричной

структуре возникает сложно напряжённое-деформированное состояние из-за значительных перепадов жёсткостей на границе раздела волокно-матрица. На основании этого критерий прочности должен учитывать все компоненты тензора напряжений. В работе [102] приведён критерий прочности, удовлетворяющий данным требованиям для изотропного однородного материала. Далее будет кратко описан критерий прочности, используемый в алгоритме численного моделирования.

Критерий прочности основан на удельной потенциальной энергии формоизменения (2.29), предельное значение которого линейно зависит от среднего напряжения σ . Данный критерий включает в себя значения разрушающих напряжений материала при растяжении и сжатии $\sigma_{сж}^6 \sigma_p^6$.

$$U_\phi = \frac{1}{4G} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 2(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)] \quad (2.29)$$

$$U_\phi = [U] \quad (2.30)$$

$$[U] = a\sigma + b = \frac{a}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \quad (2.31)$$

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

$$b = \frac{1+\mu}{E}\sigma_{сж}\sigma_p \quad (2.32)$$

Преобразуя уравнения (3.31) и (2.29), возможно записать общий вид критерия разрушения (3.33)

$$\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x\sigma_y - \sigma_x\sigma_z - \sigma_y\sigma_z + F_{66}3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2) - F_1(\sigma_{сж}^6 - \sigma_p^6)(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) = \sigma_{сж}^6 \sigma_p^6 \quad (2.33)$$

где, $\sigma_{сж}^6 \sigma_p^6$ – предельные напряжения материала при сжатии и растяжении.

Рассмотрена ячейка композиционного материала, включающая в себя 38 волокон (Рисунок 2.17). Модель состоит из объёмных элементов в количестве 50506 штук, подробное описание модели приведено в главе (2.2.1). В модели реализованы периодические граничные условия.

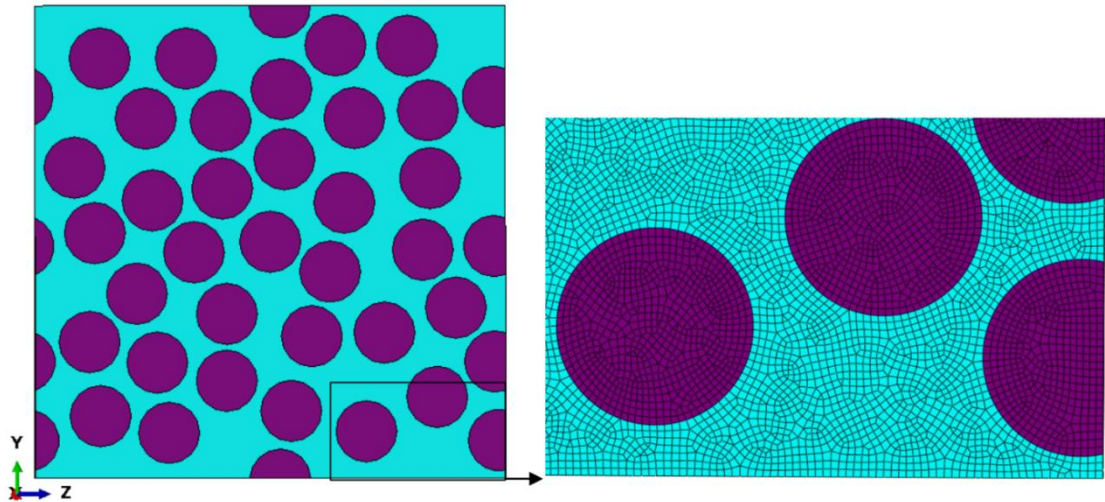


Рисунок 2.17 Модель ячейки композиционного материала, включающая 38 углеродных нитей

Паспортные характеристики рассматриваемого монослоя ПКМ приведены в Таблице 2.6. Проведена валидация результатов численного моделирования разрушения ячейки ПКМ от действующих нормальных напряжений поперек армирования волокна и сдвиговых напряжений τ_{12} . В Таблицах 7-8 приведены физические параметры материалов, используемые в конечно-элементной модели.

Таблица 2.6 – Паспортные характеристики монослоя однонаправленного углеродного волокна

	E_1 (ГПа)	E_2 (МПа)	G (МПа)	μ	σ_+^1 (МПа)	σ_-^1 (МПа)	σ_+^2 (МПа)	σ_-^2 (МПа)	τ^{12} (МПа)
КМКУ	112.7	8090	5001	0.4	882	882	44	114	73,5

Таблица 2.7 – Физические характеристики углеродного волокна в конечной элементной модели

E_1 (ГПа)	240
E_2 (ГПа)	19.4
μ	0.28
G_{12} (ГПа)	28.4
G_{23} (ГПа)	5.8

Таблица 2.8 – Физические характеристики матрицы в конечно-элементной модели

E (МПа)	3687
μ	0.39
σ_p^{ny} (МПа)	42.65
$\sigma_{сж}^{ny}$ (МПа)	98
H (МПа)	1961
F_{66}	0.15
F_1	1
$\sigma_{сж}^e$ (МПа)	226
$\sigma_{сж}^e$ (МПа)	49

Проведено численное моделирование разрушения ячеек композиционного материала от действующего комбинированного поперечного нагружения и сдвигового нагружения τ_{12} и τ_{23} . (Рисунок 2.18, 2.19).

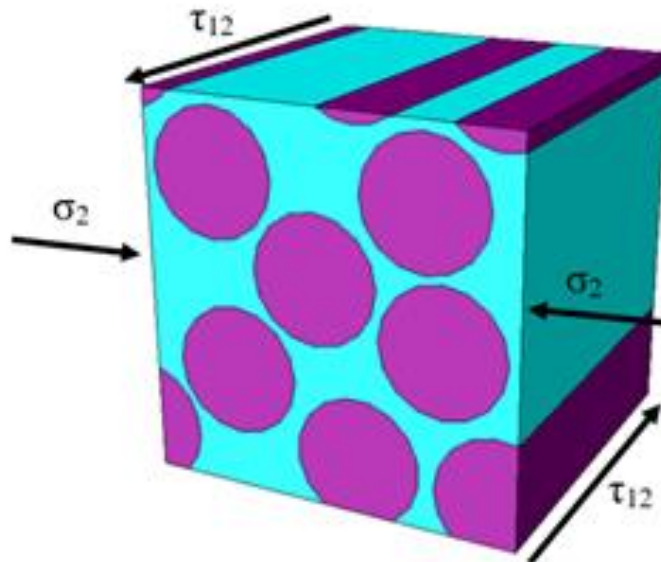


Рисунок 2.18 Комбинированное нагружение ячейки ПКМ τ_{12} и σ_2

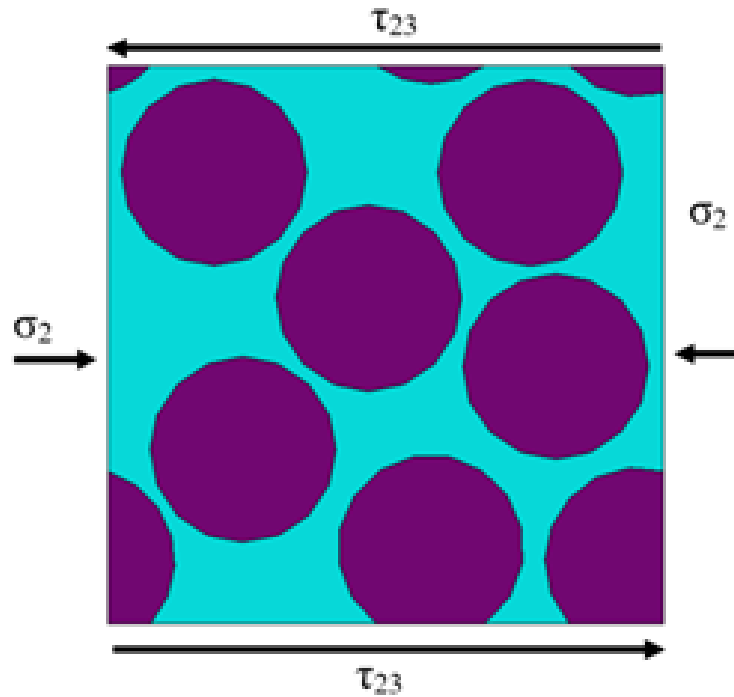


Рисунок 2.19 Комбинированное нагружение ячейки ПКМ τ_{23} и σ_2

Предполагается, что при первичном разрушении структуры матрицы происходит зарождение трещины, которая развивается с высокой скоростью и приводит к полной потере несущей способности монослоя. Вследствие этого в процессе численного моделирования введено допущение, что потеря несущей способности ячейки ПКМ происходит при первичном разрушении элемента матричной структуры.

На Рисунке 2.20-2.21 приведены типовые этапы развития трещины в структуре ячейки ПКМ при действующем сдвиговом нагружении τ_{12} и τ_{23} . Стоит отметить, что для моделирования роста трещины в матричной структуре требуются значительные вычислительные мощности.

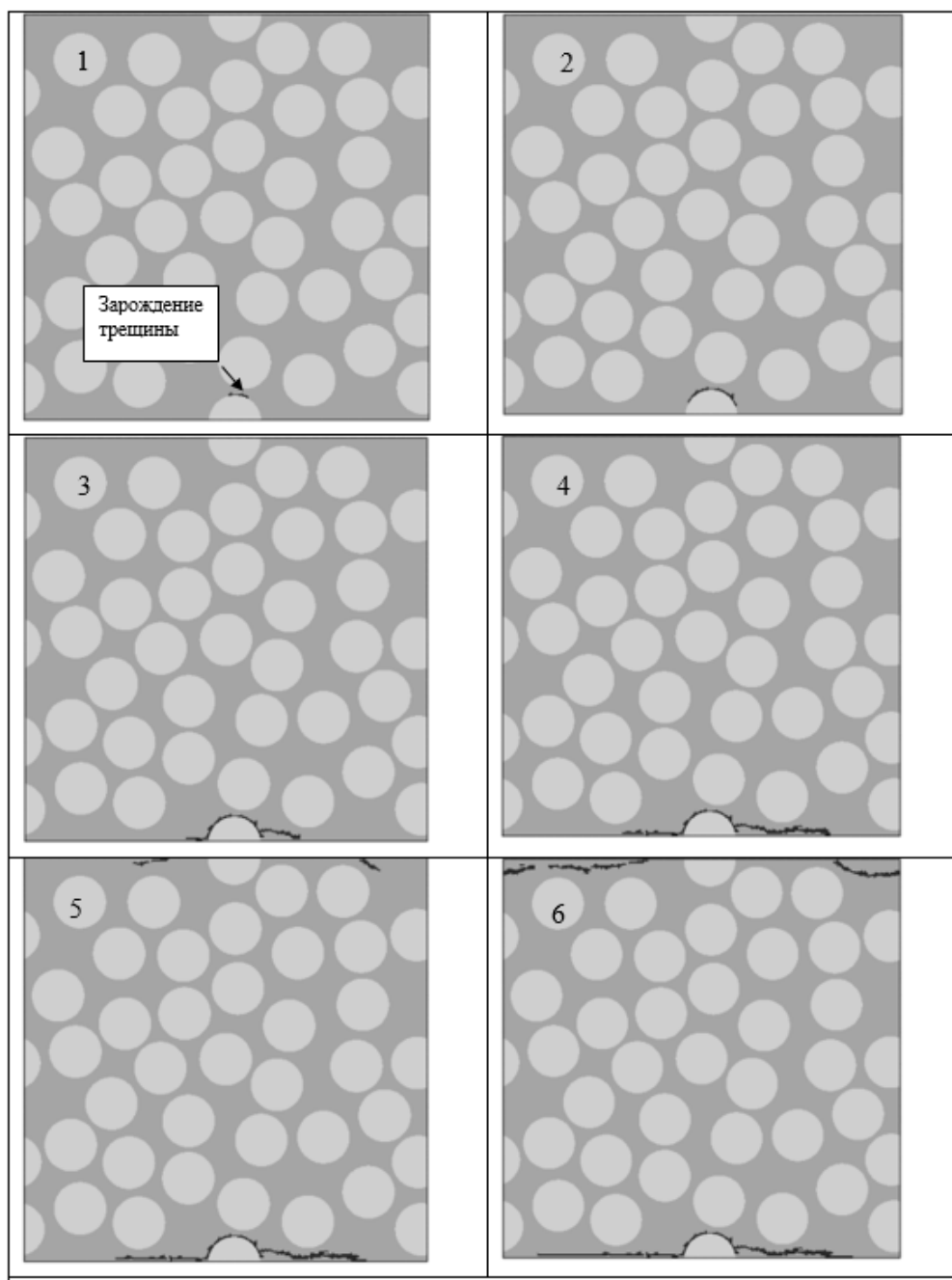


Рисунок 2.20 Этапы распространения трещины в матричной структуре при сдвиговом нагружении в плоскости τ_{12}

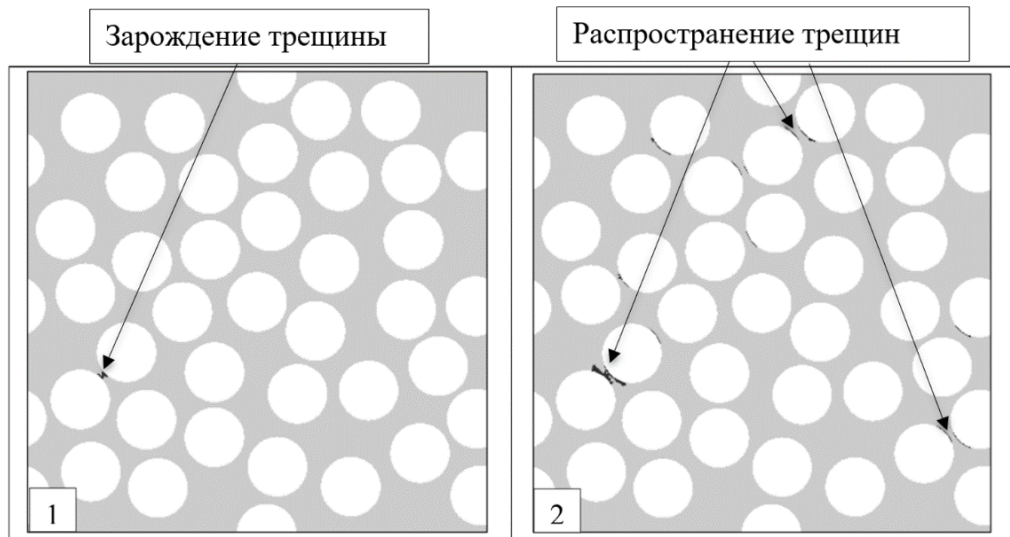


Рисунок 2.21 Этапы распространения трещины в матричной структуре при сдвиговом нагружении в плоскости τ_{23}

На Рисунке 2.22 приведены эквивалентные напряжения, действующие на границе распространения трещины. Зарождение трещины происходит на границе раздела матрицы и волокна с последующим распространением в матричной структуре.

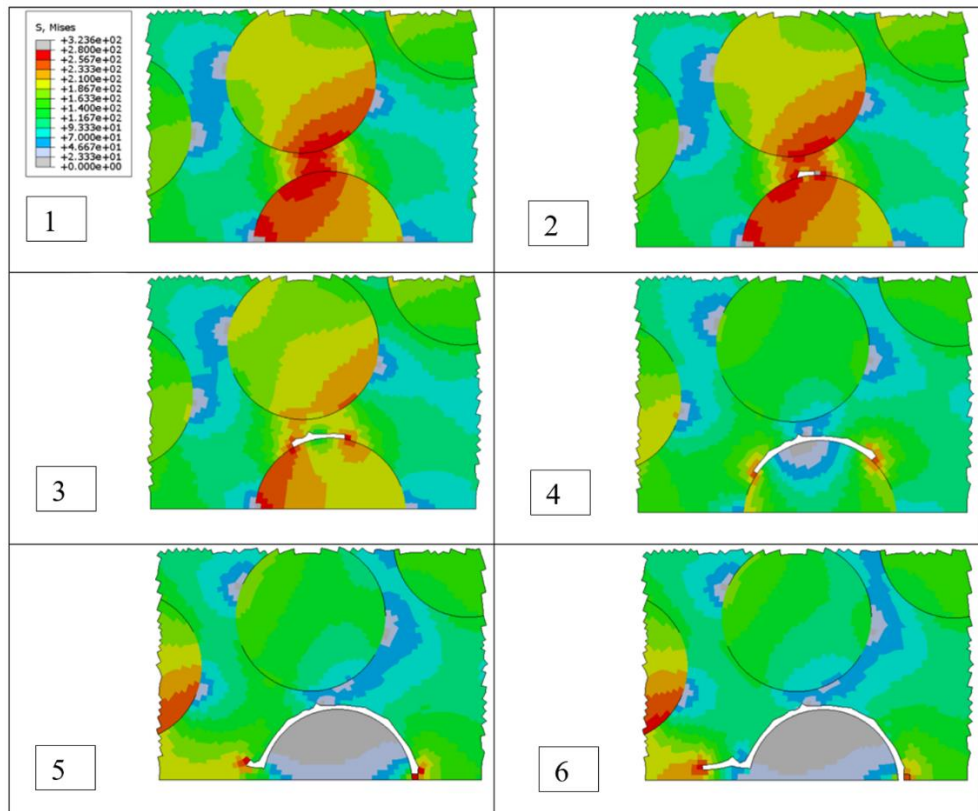


Рисунок 2.22 Эквивалентные напряжения (Mpa) при распространении трещины в матрице от действующего сдвигового нагружения τ_{12}

На Рисунках 2.23-2.24 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. В работах [111-112] подробно рассматриваются различные критерии прочности композиционных материалов, в том числе Tsai-Wu.

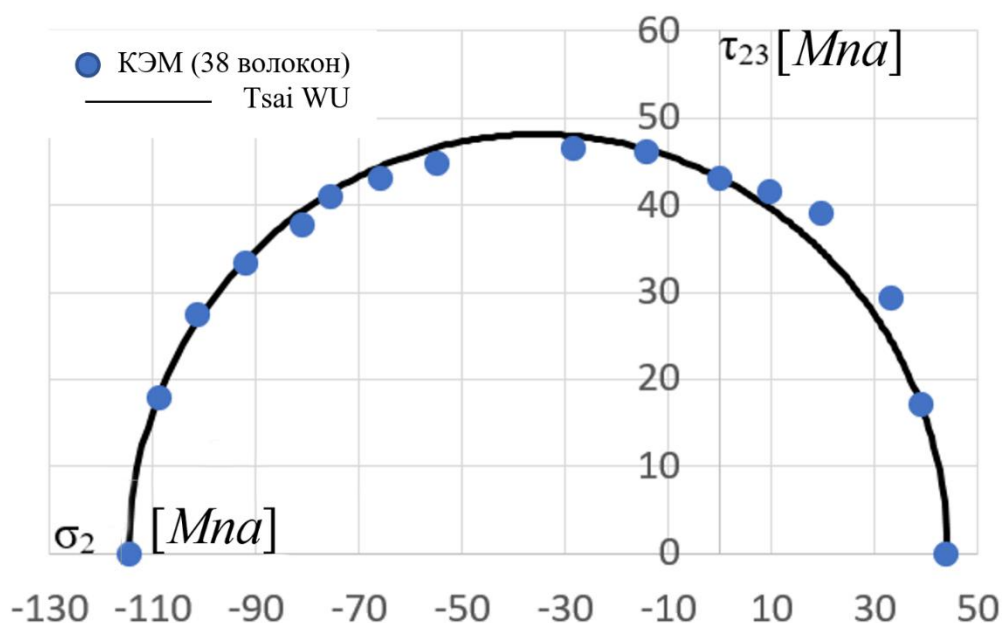


Рисунок 2.23 Разрушение монослоя ПКМ (МПа)

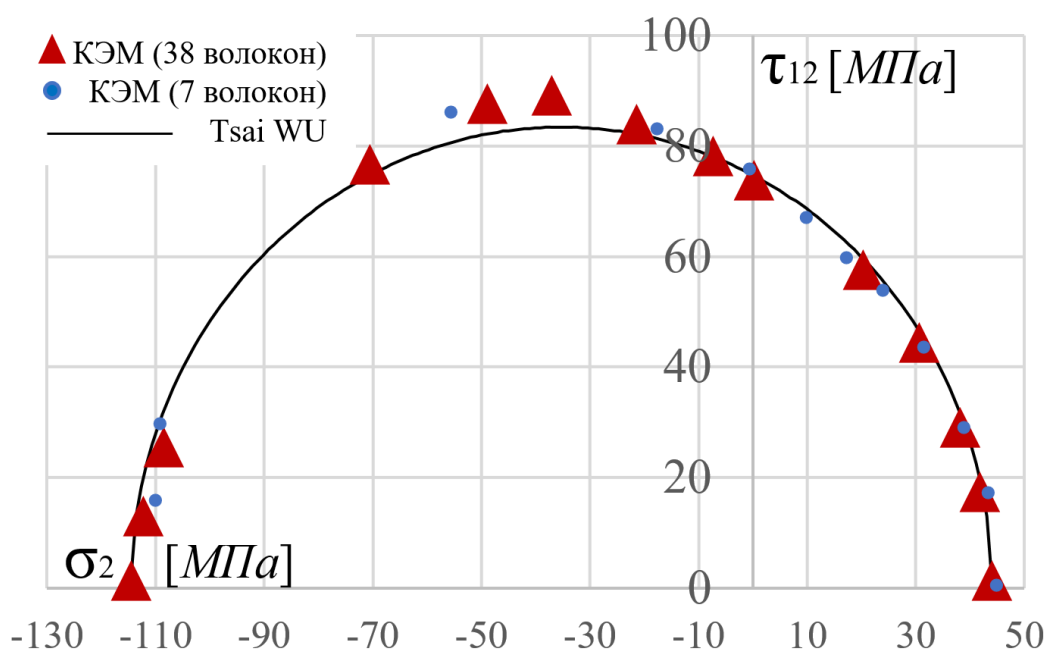


Рисунок 2.24 Разрушение монослоя ПКМ (МПа)

2.4 Заключение по Главе 2

Проведено численное моделирование накопления повреждений и отказа монослоя однонаправленного ПКМ вследствие разрушения матричной структуры. По результатам исследования можно сделать вывод, что математическая модель, описывающая нелинейное поведение матрицы с заложенным критерием отказа, удовлетворительно описывает прочностные, деформационные и деградационные параметры монослоя. Полученные параметры монослоя на микроуровне позволяют перейти к расчёту прочности щелевых обтекателей с учётом особенностей поведения материала. Средняя погрешность расчёта не превышает 14 %.

Численное моделирование не позволяет в полной мере отказаться от натурных испытаний вследствие того, что для проведения виртуального моделирования необходимы уточняющие параметры. Однако математическая модель, валидированная по результатам натурных испытаний при простом поперечном нагружении и сдвиговом нагружении монослоя, позволяет проводить виртуальные испытания разрушения монослоя при сложном нагружении. Вследствие этого виртуальное моделирование является эффективным инструментом, позволяющим рассматривать деградацию и разрушение монослоя в дополнение к натурным испытаниям.

Стоит отметить, что моделирование распространения трещины также имеет плохую сходимость вследствие того, что использовался неявный метод интегрирования, который не предназначен для решения задач с резким изменением жесткости структуры. Для данного типа задач рациональней использовать явный метод интегрирования.

ГЛАВА 3 МОДЕЛЬ РАСЧЕТА РАЗРУШЕНИЯ И НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ТКАНОМ КОМПОЗИЦИОННОМ МАТЕРИАЛЕ

Тканые ПКМ из органических волокон обладают уникальными физическими свойствами, в частности, данный материал эффективно рассеивает энергию удара [113-115], имеет высокие показатели ресурсной прочности. Однако стоит заметить, что по полученным экспериментальным данным, приведенным в главе [116], можно сделать вывод, что монослой композиционного материала обладает нелинейными жесткостными характеристиками. Вследствие этого для рационального проектирования конструкции из данного материала линейных жесткостных характеристик недостаточно. В данной главе приведено численное моделирование микроструктуры тканых ПКМ из органопластиковых волокон, по результатам которых будут получены уточненные жесткостные характеристики материала.

В данной главе рассматривается численное моделирование нелинейного поведения тканых арамидных композиционных материалов. Предполагается, что нелинейные жесткостные характеристики тканых органопластиков связаны с геометрической нелинейностью волокна. В ходе продольного растяжения монослоя на начальных этапах нагружения происходит обтяжка волокна (Рисунок 3.1), в ходе которой происходит изменение жесткостных характеристик монослоя.

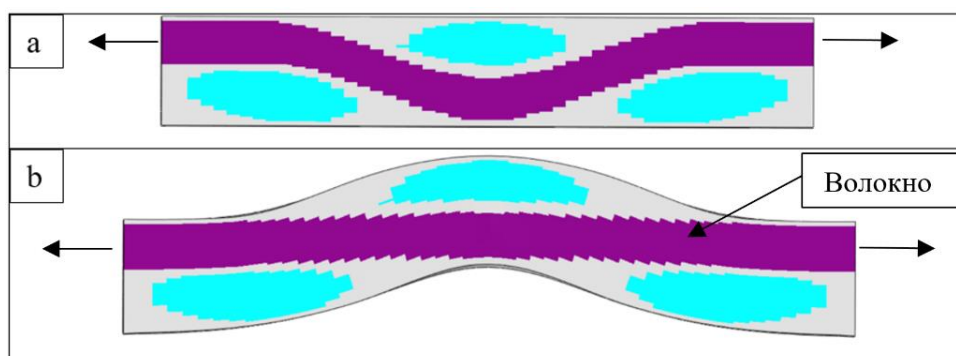


Рисунок 3.1 Недеформированное состояние волокон (a);
деформированное состояние волокон (b)

Также стоит отметить, что плетеная структура ПКМ отрицательно сказывается на прочностных характеристиках монослоя при сжимающей нагрузке.

Предполагается, что вследствие геометрической кривизны волокон местная потеря устойчивости происходит значительно раньше, чем у ПКМ с однонаправленной структурой.

Структуру тканых композиционных материалов можно описать следующим образом (Рисунок 3.2). Монослой ПКМ состоит из матрицы и переплетенных между собой жгутов. Жгут состоит из матрицы и первичных нитей. Вследствие этого для описания напряженно-деформированного состояния ПКМ с плетеной структурой необходимо рассмотреть следующие этапы:

1. Моделирование микроструктуры жгута, состоящего из матрицы и первичного волокна. Рассматривается подробная модель микроструктуры.
2. Моделирование микроструктуры жгута, состоящего из матрицы и первичного волокна. Рассматривается упрощенная модель микроструктуры. Данная модель ляжет в основу моделирования монослоя.
3. Моделирование микроструктуры монослоя тканого ПКМ, состоящего из жгутов и матрицы.

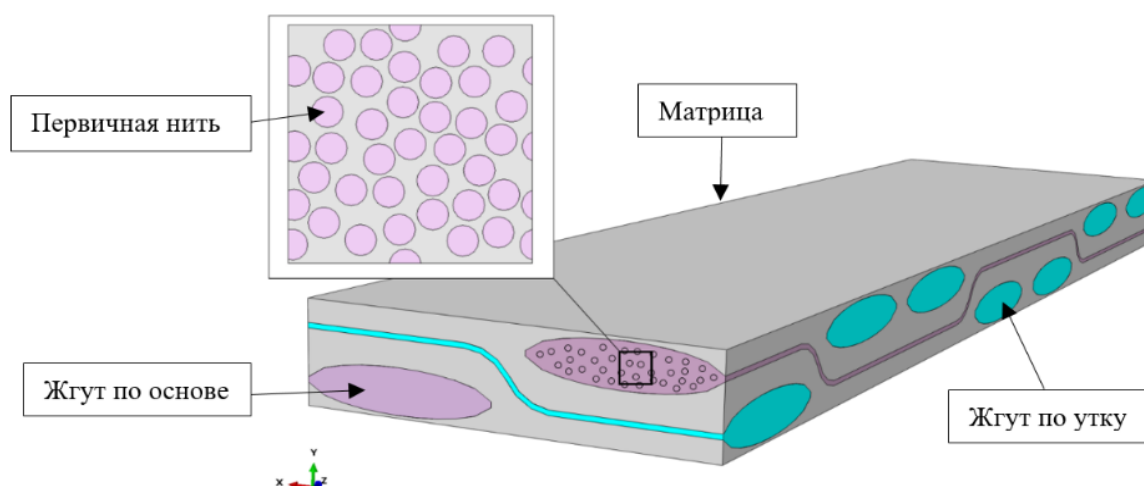


Рисунок 3.2 Структура тканого монослоя композиционного материала

Численное моделирование НДС элементарного слоя тканого органопластика на микроуровне позволит идентифицировать прочностные, деформационные и деградационные параметры материала с учётом геометрической нелинейности

волокна и разрушением связующего, что позволит проводить рациональное проектирование конструкций из ПКМ с тканой структурой.

3.1 Определение жесткостных характеристик жгута тканого композиционного материала

В данном параграфе приведено численное моделирование жесткостных характеристик микроструктуры жгута тканого ПКМ из арамидных волокон. Определение данных параметров жгута позволит перейти к численному моделированию микроструктуры тканого композиционного материала с учетом геометрической нелинейности волокна.

Первичные нити волокна состоят из материала СВМ. В Таблице 3.1 приведены жесткостные, прочностные и геометрические параметры первичной нити, опубликованные в работах [115-117]. Стоит отметить, что определение жесткостных параметров первичной нити путем натурных испытаний является нетривиальной задачей, и некоторые жесткостные параметры материала СВМ остаются неизвестными. Вследствие этого недостающие жесткостные параметры первичной нити взяты из работы [118], где рассматривается аналогичный зарубежный материал *Kevlar KM2*. На Рисунке 3.3 схематично изображена первичная нить с системой координат, в которой приведены жесткостные и прочностные характеристики.

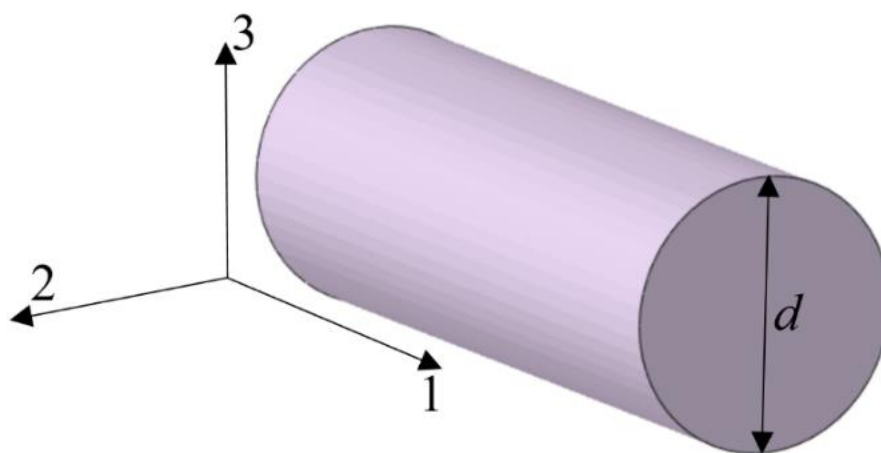


Рисунок 3.3 Первичная нить СВМ

Таблица 3.1 – Параметры первичной нити материала *CBM* и *Kevlar KM2*

Материал	d мкм	ρ г/см ³	σ_t^1 ГПа	ε_t^1 %	E_1 ГПа	$E_{2,3}$ ГПа	μ_{12}	μ_{23}	G_{12} ГПа	G_{13} ГПа	G_{23} ГПа
CBM	14	1.48	4.5	3.5	110	-	-	-	-	-	-
Kevlar KM2	12	1.44	3.88	4.5	85	1.34	-	0.24	24.4	24.4	1.34

d – диаметр первичной нити, ρ – плотность, σ_t^1 – предел прочности при растяжении вдоль волокна, ε_t^1 – предельные деформация растяжения вдоль волокна, E – модуль упругости, μ – коэффициент Пуассона, G – Модуль сдвига.

Материалом матрицы являются эпоксидные клеевые связующие марки ВСК-14. В Таблице 3.2 приведены жесткостные и прочностные свойства матрицы [6, 119]. Недостающие свойства взяты из работы [59], в которой приведены результаты испытаний связующего марки Toho #113 производителя Toho-Rayon Ltd.

Таблица 3.2 – Характеристики матричной структуры

	ВПС-14	Toho #113
E (МПа)	3687	3893
μ	-	0.39
τ_B (МПа)	13.7	58.8
σ_s^+ (МПа)	49	49
σ_s^- (МПа)	-	225

В данном параграфе рассмотрены две конечные элементные модели:

1. Модель репрезентативного периодического объема жгута ПКМ на микроуровне (Рисунок 3.5а). Данная модель представляет собой однонаправленные первичные нити цилиндрической формы и матричную структуру. Принято допущение, что первичные нити не имеют крутки в структуре

жгута. На Рисунке 3.4 приведена фотография структуры рассматриваемого тканого ПКМ материала.

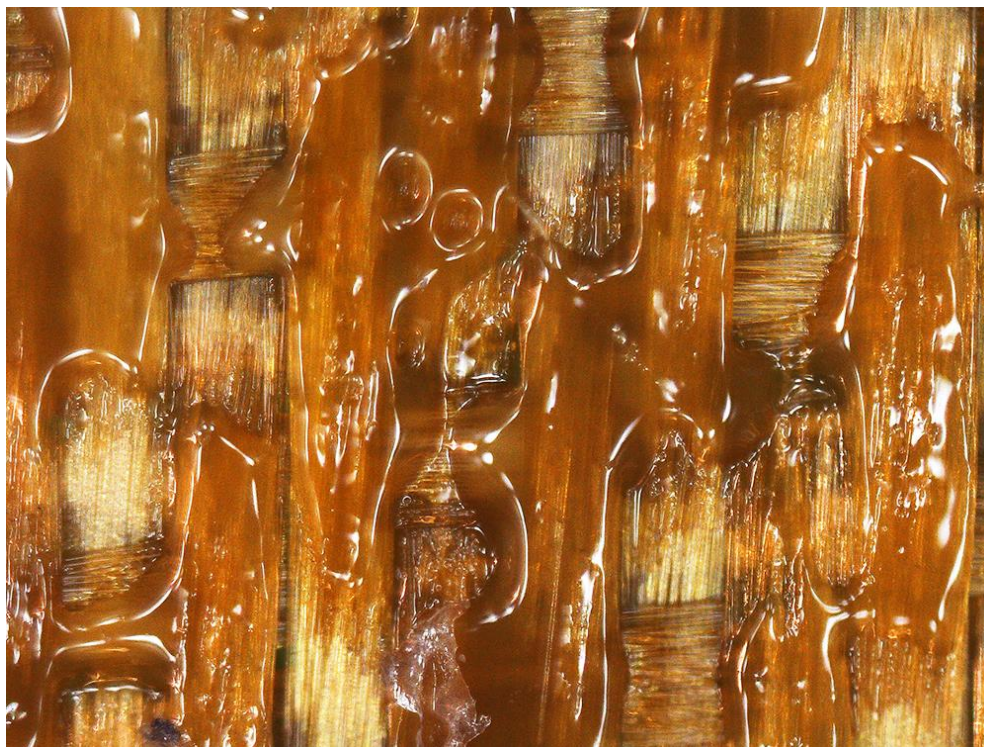


Рисунок 3.4 Структура препрега тканого ПКМ

Объемная доля наполнения волокна принята равной 80 %. Расчет жесткостных свойств проводился в ПК Abaqus. Модель состоит из объемных элементов типа C3D8. Свойства материалов приведены в Таблице 3.1-3.2. По результатам моделирования однонаправленного ПКМ (глава 2) можно сделать вывод, что подобные модели достоверно описывают жесткостные параметры ПКМ, однако главным недостатком является тот факт, что данные модели требуют значительных вычислительных ресурсов. Вследствие этого данная модель подходит для моделирования сравнительно небольших репрезентативных периодических объемов. Полноценное моделирование структуры монослоя тканого ПКМ с данной детализацией является нерациональным и требует для расчета суперкомпьютерных технологий.

2. Упрощенная модель структуры жгута (Рисунок 3.5b). Данная модель требует незначительных вычислительных ресурсов и позволяет перейти в дальнейшем к рассмотрению полноценной структуры тканого композиционного

материала. Упрощенная модель состоит из двухмерных элементов с заданными ортотропными характеристиками первичных нитей СВМ. Объемные элементы моделируют матричную структуру. Двухмерные и объемные элементы связаны общими узлами. В Таблице 3.3, 3.4 приведены характеристики материалов, используемые в упрощенной модели. Толщина двухмерных элементов, моделирующих волокно, подбиралась таким образом, чтобы объемное наполнение волокна в структуре составило 80 %.

Таблица 3.3 – Характеристики первичных нитей в двухмерной постановке

	t <i>мм</i>	E_1 <i>ГПа</i>	E_2 <i>МПа</i>	μ_{12}	G_{12} <i>ГПа</i>	G_{13} <i>ГПа</i>	G_{23} <i>ГПа</i>
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 3.4 – Характеристики связующего

	E (МПа)	μ
Связующие	2942	0.39

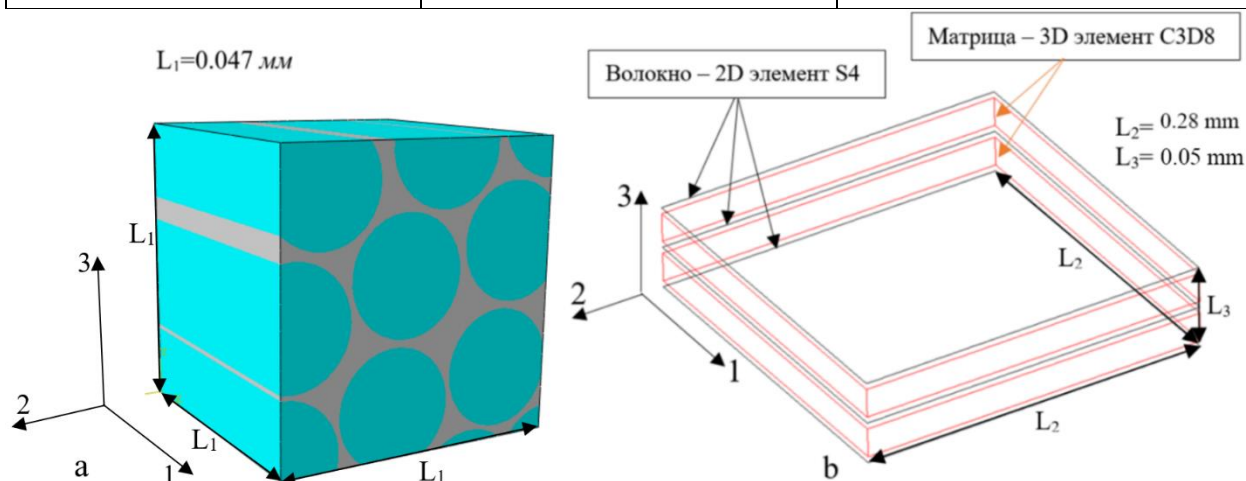


Рисунок 3.5 Модель репрезентативного периодического объема жгута ПКМ (a); упрощенная модель структуры жгута ПКМ (b)

В Таблице 3.4 приведены жесткостные характеристики структуры жгута, полученные в ходе численного моделирования двух конечных элементных

моделей. По результатам моделирования можно сделать вывод, что рассмотренные КЭМ имеют близкие жесткостные характеристики. Полученные жесткостные характеристики жгута позволяют перейти к рассмотрению характеристик монослоя тканого ПКМ с учетом геометрической нелинейности.

Таблица 3.4 – Жесткостные характеристики жгута

	E_1 <i>МПа</i>	E_2 <i>МПа</i>	G_{12} <i>МПа</i>	G_{13} <i>МПа</i>	G_{23} <i>МПа</i>
Подробная КЭМ	86740	1725	10143	10143	1372
Упрощенная КЭМ	87014	2969	8977	8977	1313

3.2 . Решение задачи о нелинейном деформировании тканого композиционного материала

В данном параграфе приведено численное моделирование жесткостных свойств монослоя тканого органопластика с учетом геометрической нелинейности. Предполагается, что кривизна волокон влияет на нелинейное поведение монослоя ПКМ. В следствие этого для рационального проектирования конструкций из ПКМ с плетеной структурой необходимо уточнение нелинейных характеристик материала. Численное моделирование позволяет проводить многомасштабное моделирование свойств композиционного материала с учетом геометрической нелинейности волокна.

На Рисунках 3.6-3.7 приведены фотографии структуры тканого органопластика. Средняя ширина жгута принята равной 0.28 мм. На полотне с шириной стороны 4 мм располагается 13 жгутов. Препрег органопластика имеет атласное переплетение 8/3.

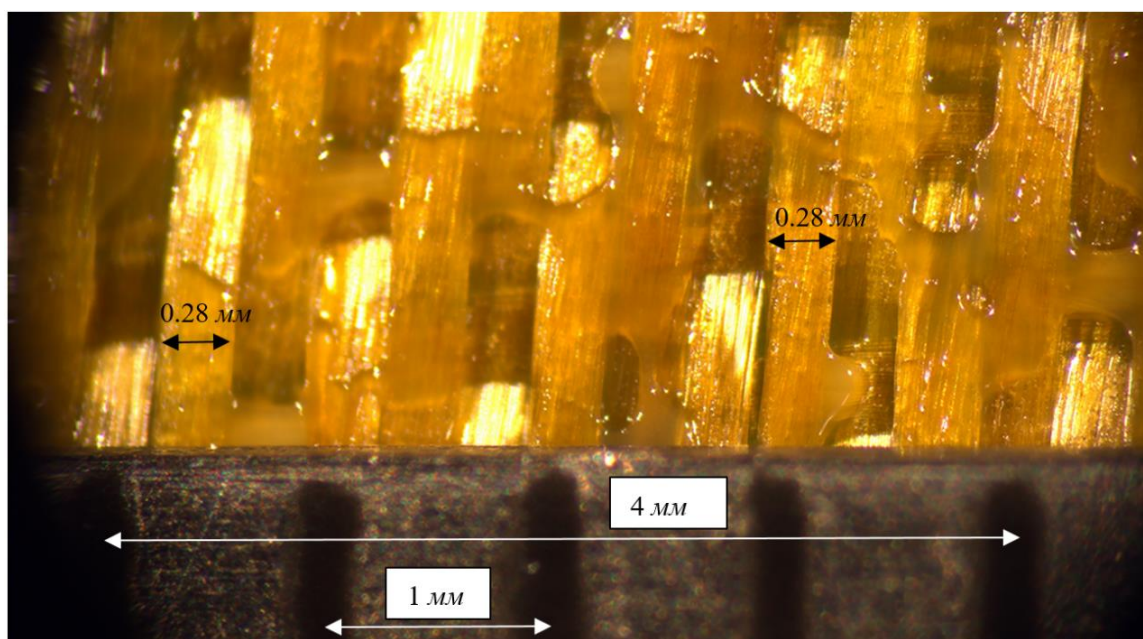


Рисунок 3.6 Геометрические характеристики структуры

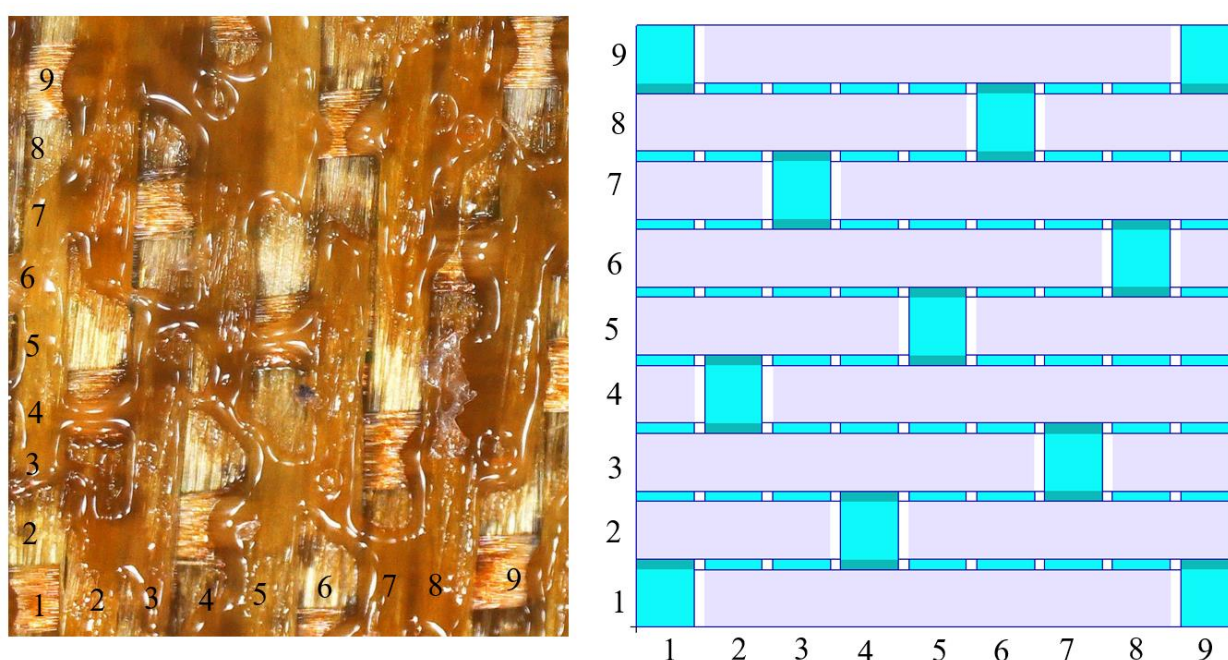


Рисунок 3.7 Атласное переплетение 8/3 структуры органопластика

На Рисунке 3.8 приведен общий вид конечно-элементной модели с геометрическими характеристиками. Модель состоит из двухмерных элементов типа S4 с ортотропными характеристиками, моделирующими волокно структуры. Двухмерные элементы связаны посредством объемных элементов с изотропными характеристиками связующего материала. Толщина монослоя принята равной 0.1 мм, длина и ширина модели равна 2.92 мм. Количество жгутов по основе и утку 9

штук. Упругие характеристики связующего и волокна получены в главе 3.1 и приведены в Таблице 3.5-3.6. Анализ проводился с учётом физической нелинейности матрицы, применён критерий пластичности Друкера-Прагера. Диаграмма напряженно-деформированного состояния материала соответствует данным, приведённым в [59]. Вопрос нелинейного поведения матричной структуры рассмотрен в главе 2.1. Применён встроенный в ПК Abaqus критерий разрушения Ductile damage и Shear damage [100].

Таблица 3.5 – Характеристики первичных нитей в двухмерной постановке

	t <i>мм</i>	E_1 <i>ГПа</i>	E_2 <i>МПа</i>	μ_{12}	G_{12} <i>МПа</i>	G_{13} <i>МПа</i>	G_{23} <i>МПа</i>	σ_1^+ <i>МПа</i>
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								

Таблица 3.6 – Характеристики связующего

	E <i>МПа</i>	μ	σ_1^+ <i>МПа</i>	σ_1^- <i>МПа</i>	τ_B <i>МПа</i>
Связующие	2942	0.39	88	147	59

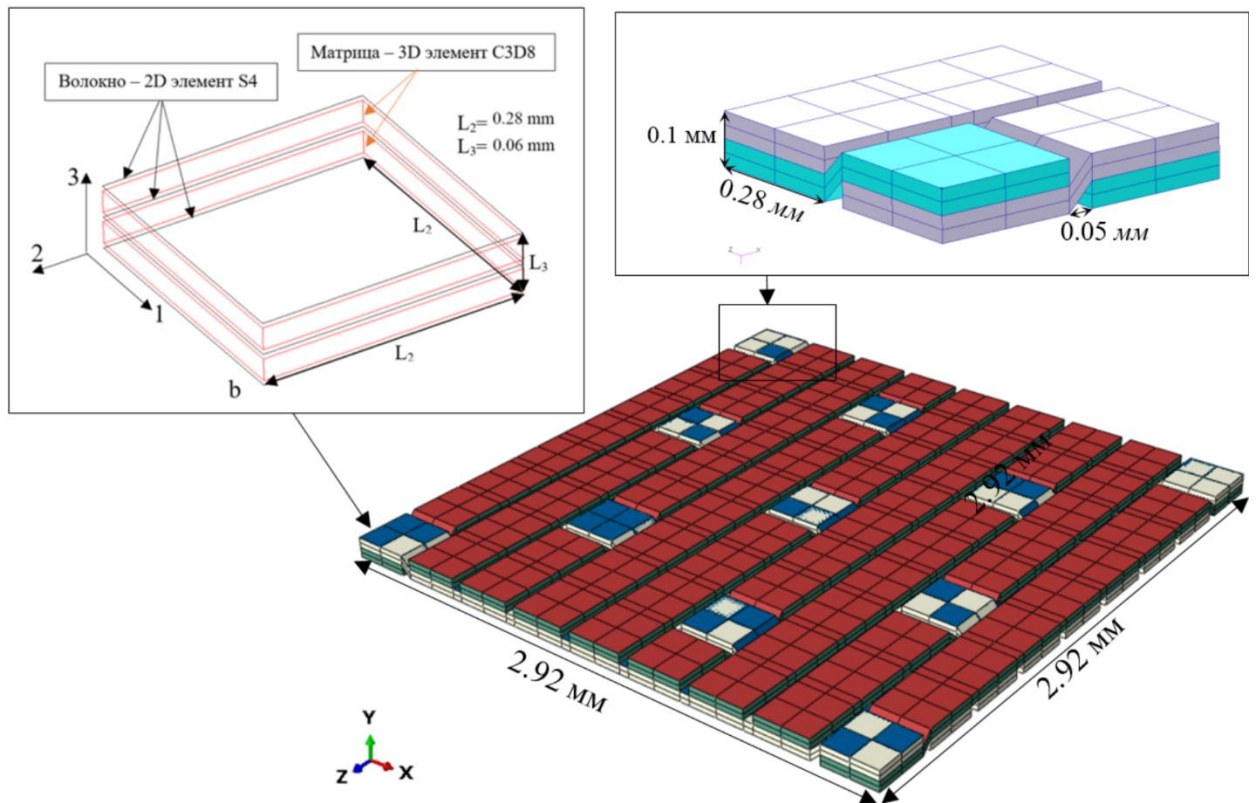


Рисунок 3.8 Структура КЭМ

Нагрузки на КЭМ приложены в виде узловых перемещений (Рисунок 3.9). Для моделирования разрыва волокон ПКМ использовался явный решатель Abaqus (Explicit) в квазистатической постановке.

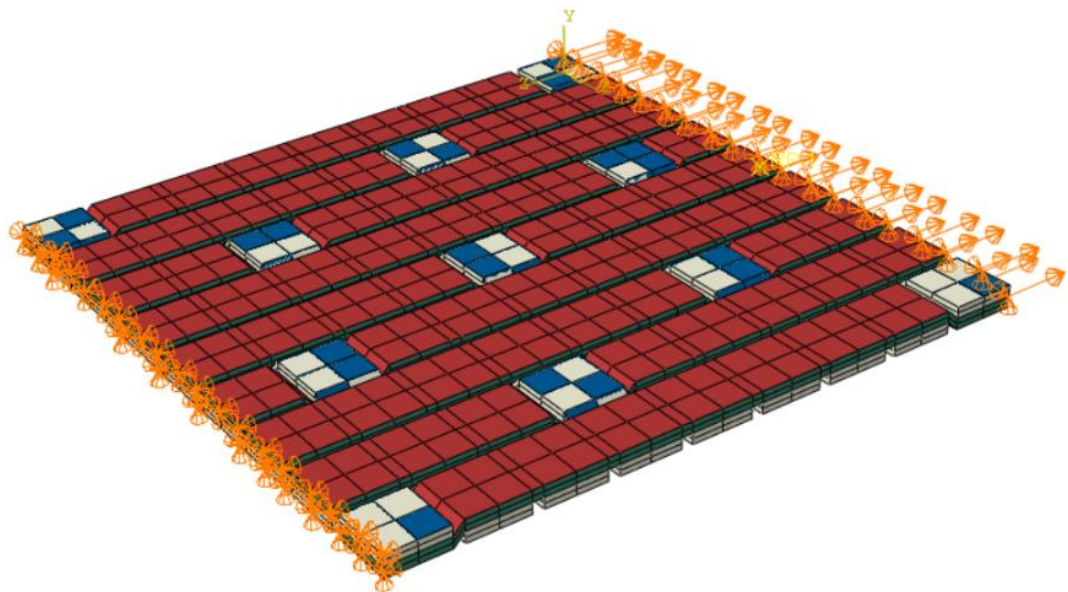


Рисунок 3.9 Граничные условия

Проведено сравнение результатов численного моделирования с натурными испытаниями. На Рисунке 3.10 приведён общий вид элементарного образца №А6 из органопластика. Ширина рабочей части 40.4 мм, длина рабочей части 100 мм, общая длина 250 мм. Толщина рабочей части 2.1 мм. Количество слоёв 18, угол армирования 0 градусов. Подробная информация о ходе и результатах испытаний приведена в главе 4.1.

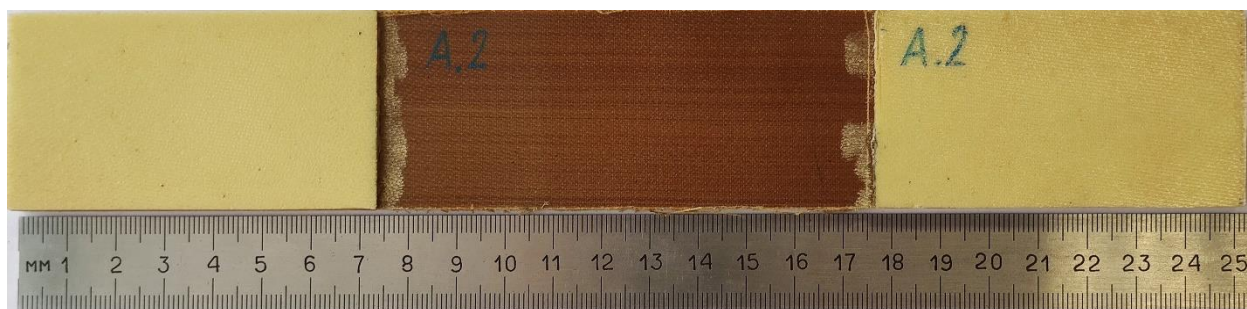


Рисунок 3.10 Элементарный образец

На Рисунке 3.11 приведены результаты натурных испытаний и численного моделирования разрыва органопластика вдоль основы. Получена действующая сила (H) от деформаций образца. Результаты численного моделирования умножены на масштабный коэффициент $k=260$:

$$k = \frac{n^{обр}}{n^{КЭМ}} L \quad (3.1)$$

где $n^{обр}$ – количество продольных жгутов в образце А2, $n^{КЭМ}$ – количество продольных жгутов в КЭМ, L – количество слоев в пакете образца А2.

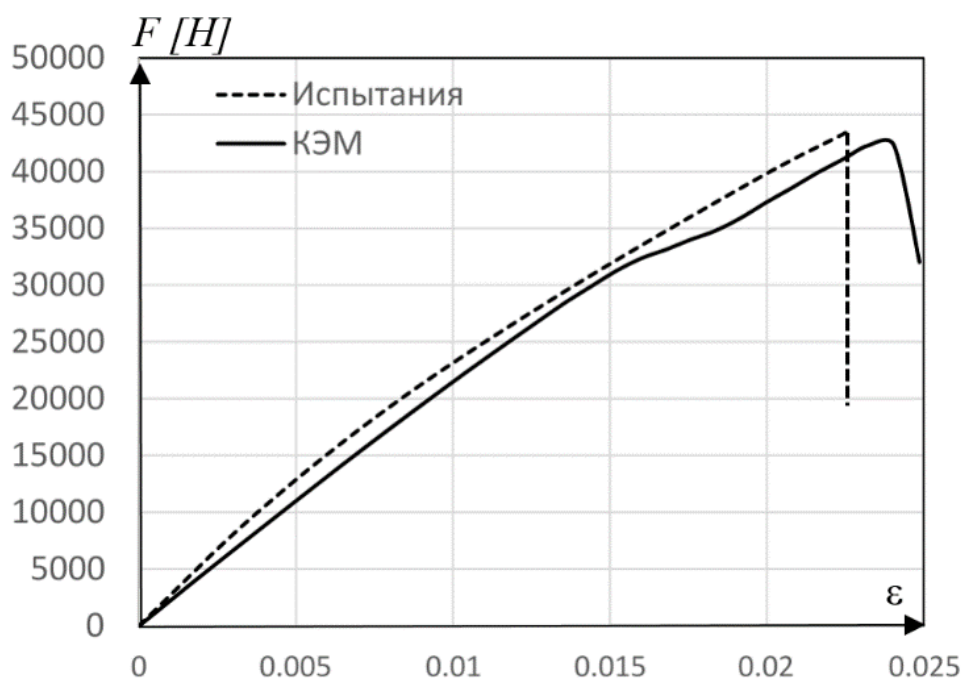


Рисунок 3.11 Действующая растягивающая F сила (H) от деформаций

3.3 Заключение по Главе 3

По результатам численного моделирования можно сделать вывод, что 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 тканного органопластика имеют удовлетворительное совпадение с результатами испытаний, погрешность расчёта не превышает 5%. Разработанная методика позволяет определять прочностные, деформационные и деградационные параметры элементарного слоя тканого органопластика на микроуровне в уточнённой постановке. Результаты расчёта позволяют перейти к расчёту прочности конструкций из тканых ПКМ с учётом особенностей поведения монослоя.

ГЛАВА 4 МОДЕЛЬ РАСЧЕТА НЕЛИНЕЙНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЩЕЛЕВЫХ ОБТЕКАТЕЛЕЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

В данной главе рассматривается численное моделирование напряженно-деформируемого состояния конструктивно подобного образца (КПО) из композиционного материала. КПО состоит из однонаправленных углеродных и тканых органопластиковых волокон [123].

Для моделирования НДС КПО использован многомасштабный 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.

В Главе 5 приведены результаты экспериментального исследования деформационных свойств КПО от действующего малоциклового консольного изгиба. В ходе исследования выявлено, что при нагружении и последующей разгрузке в образцах наблюдаются остаточные деформации.

Основной задачей численного моделирования является определение остаточных деформаций, образовавшихся в ходе консольного изгиба КПО. На Рисунке (4.1) приведены геометрические параметры и схема армирования КПО.

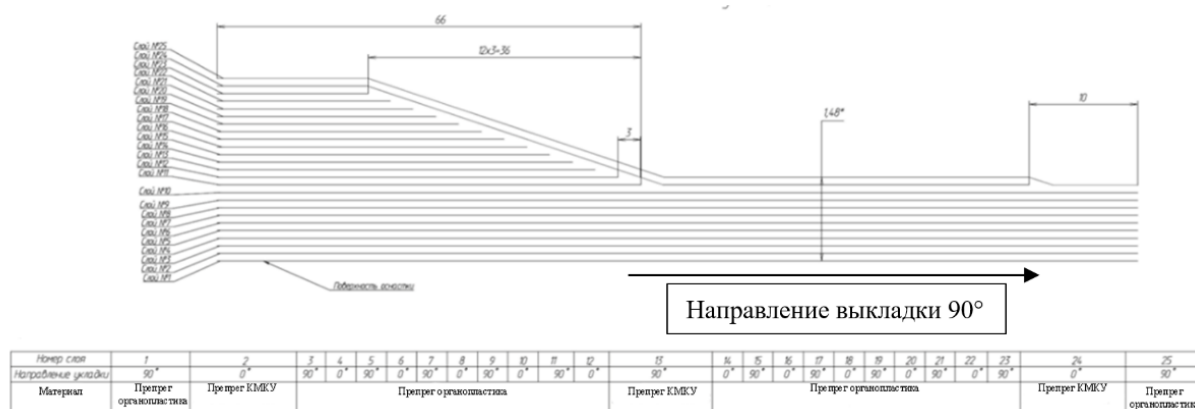


Рисунок 4.1 Геометрические характеристики КПО и схема укладок ПКМ

Конечно-элементная модель конструктивно подобного образца (КПО) реализована в программном комплексе Abaqus. Расчёт проводился в статической нелинейной постановке (Static, General). Монослой КПО смоделированы объёмными элементами типа C3D8 (Рисунок 4.2). Модель материала тканого органопластика учитывает нелинейное поведение, описанное в Главе 3. Для проведения расчёта введены следующие гипотезы:

1. Свойства однонаправленных углеродных волокон имеет линейное поведение;
2. Свойства тканого органопластика идентичны при растяжении и сжатии.

На Рисунке (4.2) приведены граничные условия, реализованные в конечно-элементной модели. Образец закреплён с левого торца; в Главе 5 подробно описана схема испытательного стенда. Нагружение КПО происходит за счёт вертикального перемещения толкателя. 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.

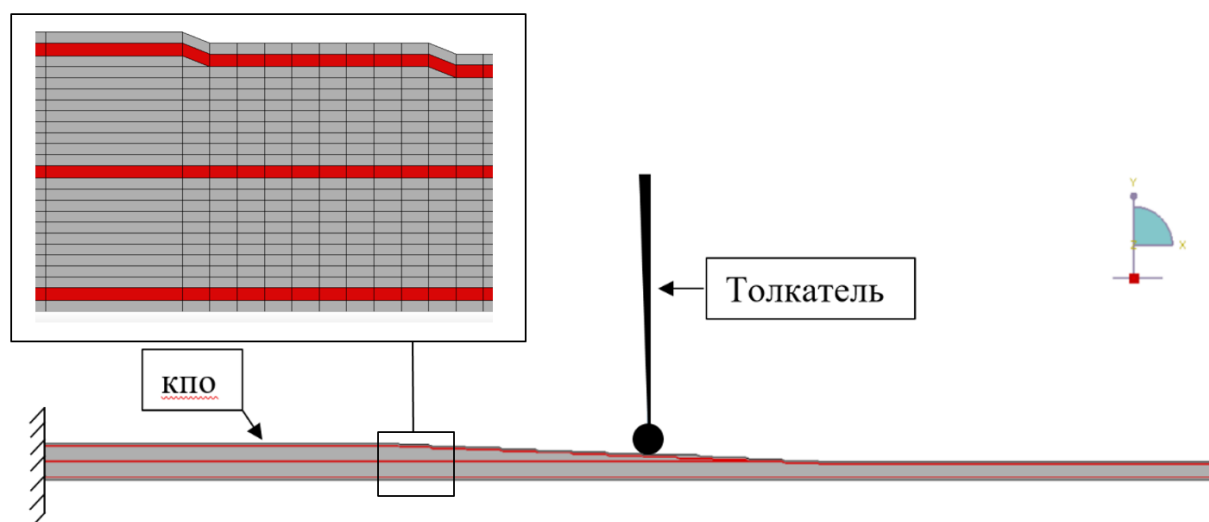


Рисунок 4.2 Общий вид и граничные условия КЭМ

На Рисунке 4.3 показано напряженно-деформируемое состояние образца при каждом цикле нагружения. На Рисунке 4.4 представлены остаточные деформации КПО, полученные входе численного моделирования. На Рисунке 4.5 также представлены фотографии КПО с остаточными деформациями после испытаний.

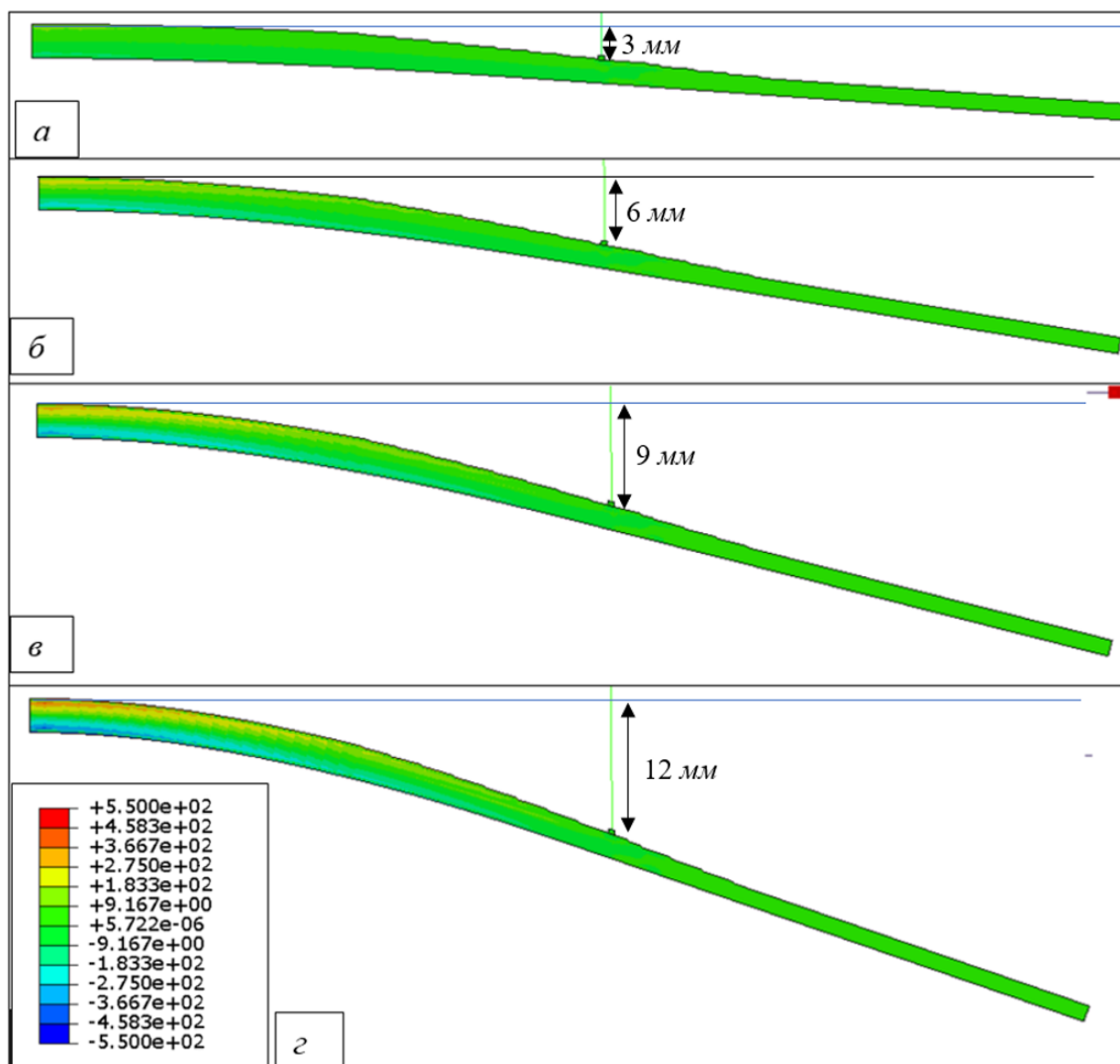


Рисунок 4.3 Напряженно-деформированное (МПа) состояние КПО;
 а – Нагружение КПО по средствам перемещения толкателя на 3 мм,
 б – Нагружение КПО по средствам перемещения толкателя на 6 мм,
 в – Нагружение КПО по средствам перемещения толкателя на 9 мм,
 г – Нагружение КПО по средствам перемещения толкателя на 12 мм

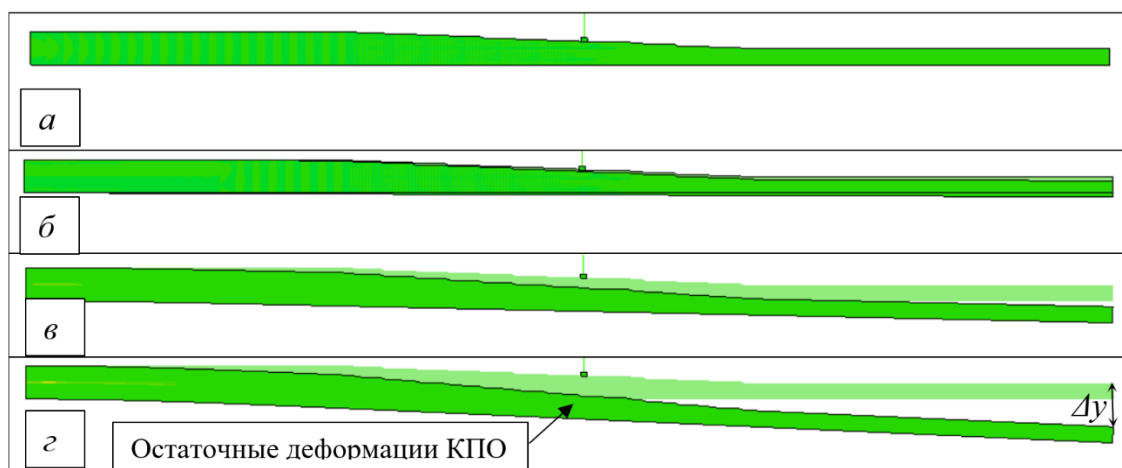


Рисунок 4.4 Остаточные деформации КПО:

а – после нагружения КПО по средствам перемещения толкателя на 3 мм,
б – после нагружения КПО по средствам перемещения толкателя на 6 мм,
в – после нагружения КПО по средствам перемещения толкателя на 9 мм,
г – после нагружения КПО по средствам перемещения толкателя на 12 мм

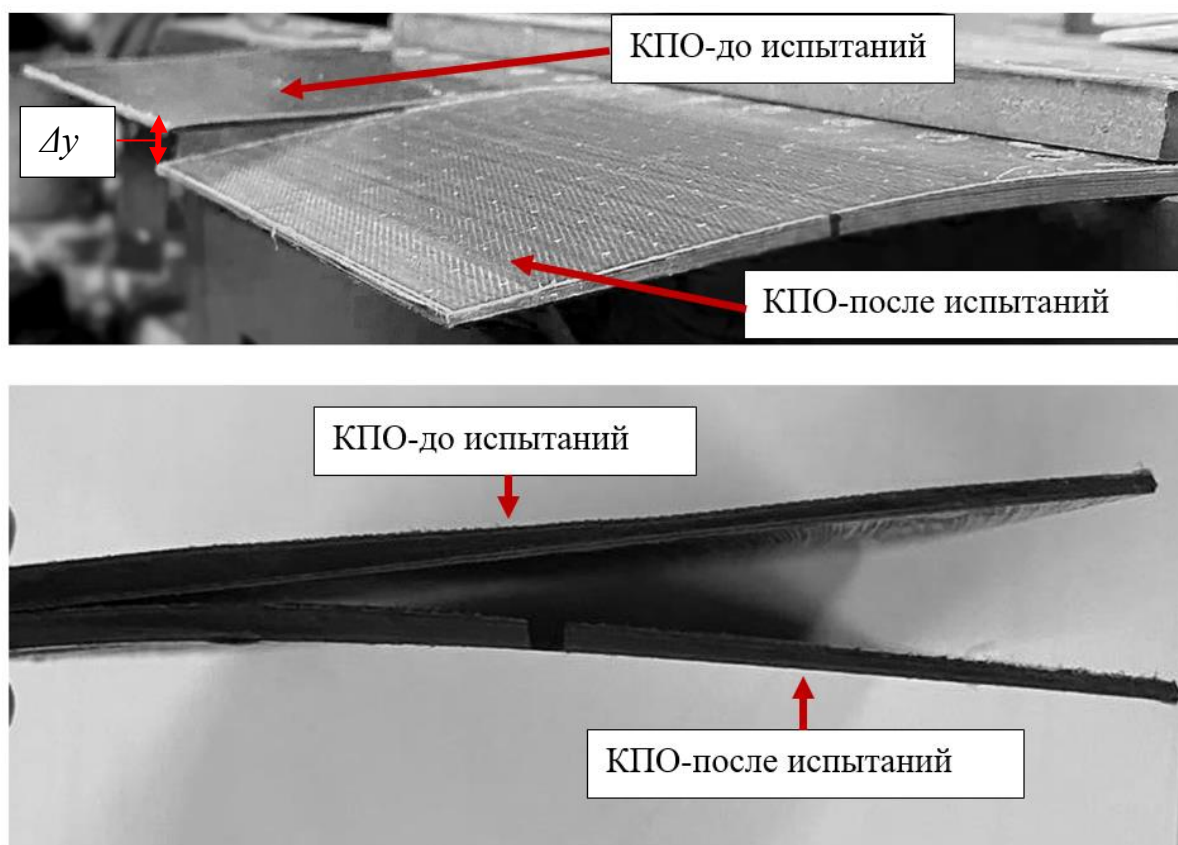


Рисунок 4.5 Остаточные деформации КПО полученные входе
 экспериментального исследования

Приведено сравнение результатов численного моделирования и экспериментального исследования КПО. На Рисунке 4.6 показана действующая сила F (Н) в толкателе (траверсе разрывной машины) в зависимости от перемещений толкателя y (мм) (перемещения траверсы разрывной машины). По результатам сравнения можно сделать вывод, что численное моделирование имеет хорошее совпадение с экспериментальными данными.

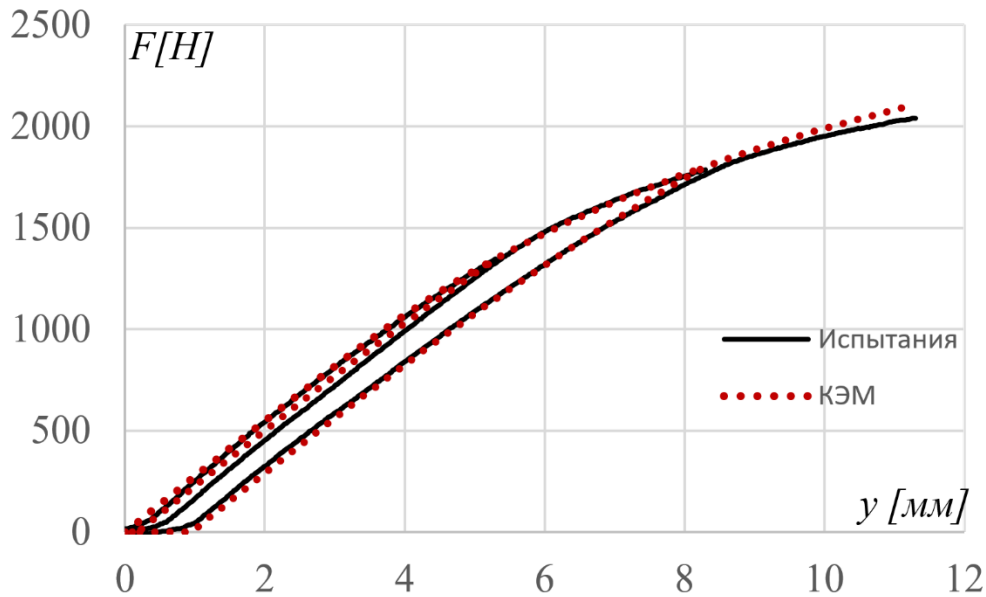


Рисунок 4.6 действующая сила F (Н) толкателя на КПО от перемещений y (мм) толкателя

На Рисунке (4.7) приведены результаты численного моделирования и экспериментального исследования. Образцы нагружались 4 циклами нагружения. Каждый цикл включает нагружение с последующей разгрузкой КПО. В каждом цикле после разгрузки проводилось измерение остаточных перемещений крайней кромки образца Δy . На Рисунке (4.4г) изображены остаточные перемещения Δy от истории нагружения образца (перемещения толкателя y (мм)). По результатам сравнения можно сделать вывод, что численное моделирование удовлетворительно совпадает с экспериментальными данными.

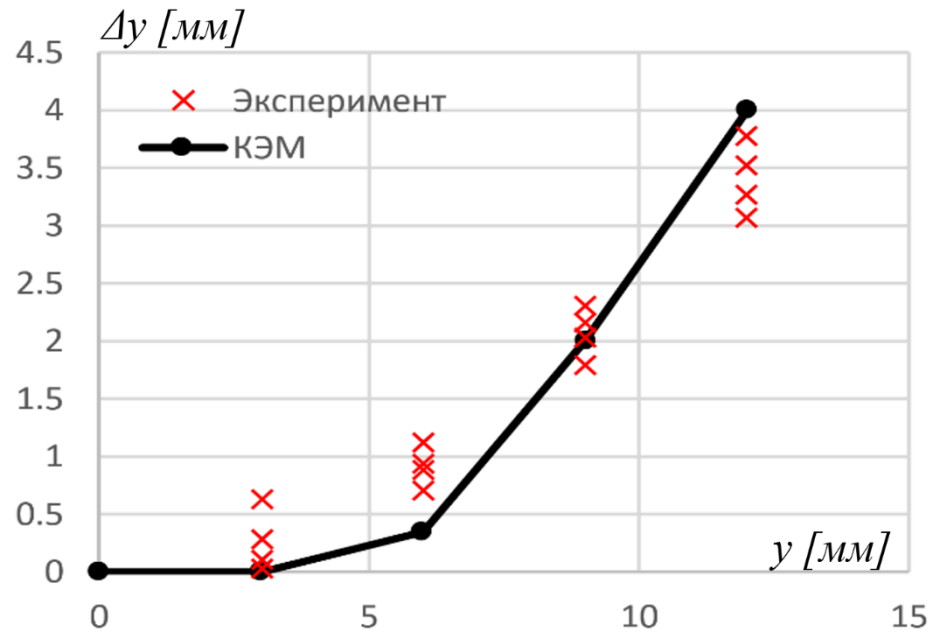


Рисунок 4.7 Остаточные перемещения Δy (мм) крайней кромки КПО от истории нагружения в виде перемещения толкателя y (мм)

4.1 Заключение по Главе 4

Решена задача численного моделирования напряженно-деформируемого состояния КПО с учётом нелинейного поведения монослоя тканого органопластика. Получены остаточные деформации КПО в зависимости от истории нагружения. Проведено сравнение с экспериментальными данными. По результатам сравнения можно сделать вывод, что численное моделирование удовлетворительно совпадает с результатами эксперимента и может быть использовано в проекторочных расчетах при конструировании летательных аппаратов.

Для проведения расчёта НДС КПО использован многомасштабный подход, который позволил учесть нелинейное поведение материала. На начальных этапах рассмотрено поведение тканого органопластика композитного материала ПКМ на микроуровне с учётом кривизны волокна и прогрессирующего разрушения матричной структуры. Полученные результаты на микроуровне легли в основу расчёта КПО на макроуровне с учётом нелинейного поведения.

По результатам расчёта НДС однонаправленного углеродного ПКМ на микроуровне с учётом деградации матричной структуры введена гипотеза о том,

что монослой углеродного волокна имеет линейное поведение. Это связано с тем, что тканый органопластик обладает большей нелинейностью по сравнению с однонаправленным углеродным волокном. Также принимая во внимание, что объёмная доля содержания углеродного волокна в сравнении с тканым органопластиком мала, принято допущение о том, что для рассматриваемого КПО влияние деградации углеродного волокна на деформативные свойства несущественно.

Рассмотренный многомасштабный подход позволяет проводить рациональное проектирование конструкций летательных аппаратов

ГЛАВА 5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Для рационального проектирования авиационных конструкций из композиционных материалов необходимо учитывать снижение жесткостных свойств материала в ходе нагружения. Одной из причин снижения физических свойств композиционного материала является деградация матричной структуры. Разрушение матрицы в однонаправленных композиционных материалах происходит при поперечном и сдвиговом нагружении [29]. При продольном нагружении материала деградация матричной структуры является незначительной вследствие того, что основную нагрузку воспринимают волокна наполнителя. Отличительной чертой композиционных материалов на основе тканых наполнителей от однонаправленных заключается в том, что волокно имеет криволинейную геометрию вследствие плетеной структуры нитей. Геометрическая кривизна волокна вызывает локальные всплески напряжений в матричной структуре и, как следствие, разрушение [44-53]. В работе [120] рассматриваются деградационные и деформативные свойства конструктивно-подобных образцов из тканого органопластика [113-114], подверженные изгибному нагружению. В конструкциях из композиционного материала на основе тканого наполнителя, воспринимающих изгибное нагружение, необходимо учитывать изменение жесткостных параметров монослоев, так как это приводит к перераспределению напряжений по толщине пакета. Также матрице композиционного материала присуще свойство разной сопротивляемости, вследствие которого деградация характеристик при растяжении и сжатии материала может отличаться. Различие параметров деградации материала при растяжении и сжатии приводит к смещению нейтральной линии изгиба в конструкции из композиционных материалов. Полученные параметры деградации композиционного материала позволяют проводить рациональное проектирование авиационных конструкций с учетом изменяющихся жесткостных характеристик в ходе нагружения.

В данной главе приведены результаты исследования деградации свойств экспериментального органопластика на основе тканого наполнителя. Рассмотрены элементарные образцы с укладкой 0 и 90 градусов, подверженные растягивающему нагружению.

Приведены результаты исследования деформационных свойств конструктивно-подобных образцов, состоящих из органопластика и углепластика. Нагружение соответствует консольному изгибу. Рассмотрено малоцикловое и многоцикловое нагружение.

5.1 Экспериментальное исследование деформационных и деградационных свойств тканого органопластика от действующего растягивающего нагружения

В данном параграфе приведены результаты исследования деградации свойств экспериментального органопластика на основе тканого наполнителя при малоцикловом растяжении. Структура органопластика состоит из первичных нитей параамидного типа [117, 121] и матрицы из расплавленного эпоксидного связующего [119, 6]. Зарубежным аналогом данного материала является *Kevlar* [118]. В работе [59] приведены результаты экспериментального исследования свойств зарубежной эпоксидной смолы марки Toho #113 производителя Toho-Rayon Ltd

Объектом испытаний являются элементарные образцы из экспериментального органопластика (Рисунок 5.1, 5.2), изготовленного методом вакуум-автоклавного формования. Образцы разделены на две группы, каждая группа состоит из пяти образцов. Группа *A* состоит из однонаправленных образцов, вырезанных в направлении армирования (0 °), группа *B* состоит из однонаправленных образцов, вырезанных в поперечном направлении (90 °). В Таблице 3.7 приведены геометрические размеры образцов.

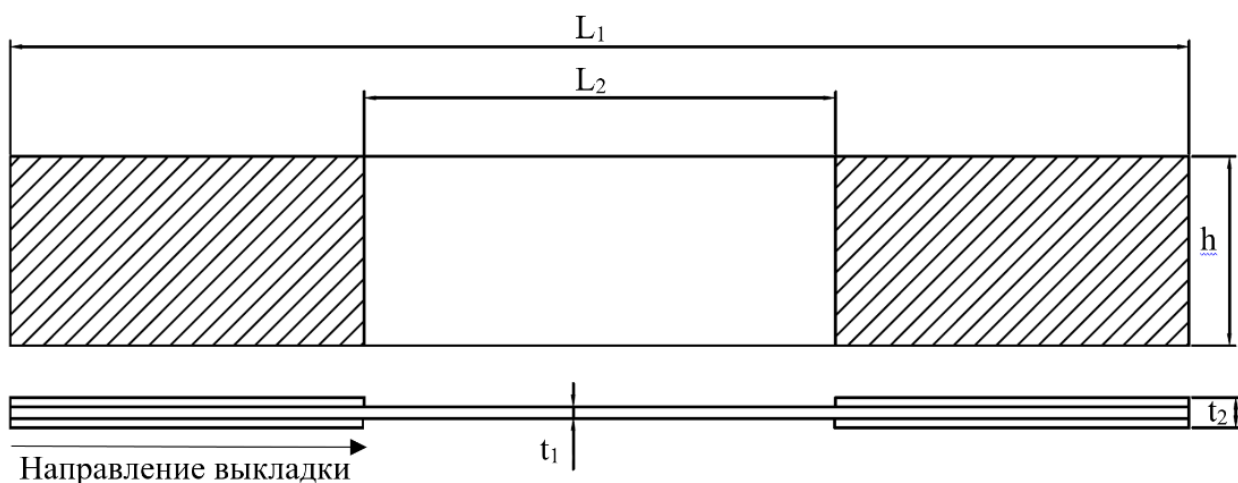


Рисунок 5.1 Эскиз образца

Таблица 3.7 – Геометрические размеры образцов

	L_1 (мм)	L_2 (мм)	h (мм)	t_1 (мм)	t_2 (мм)
Группа А	250	100	40,4	2,1	7,1
Группа В	250	100	40,4	2,4	7,4

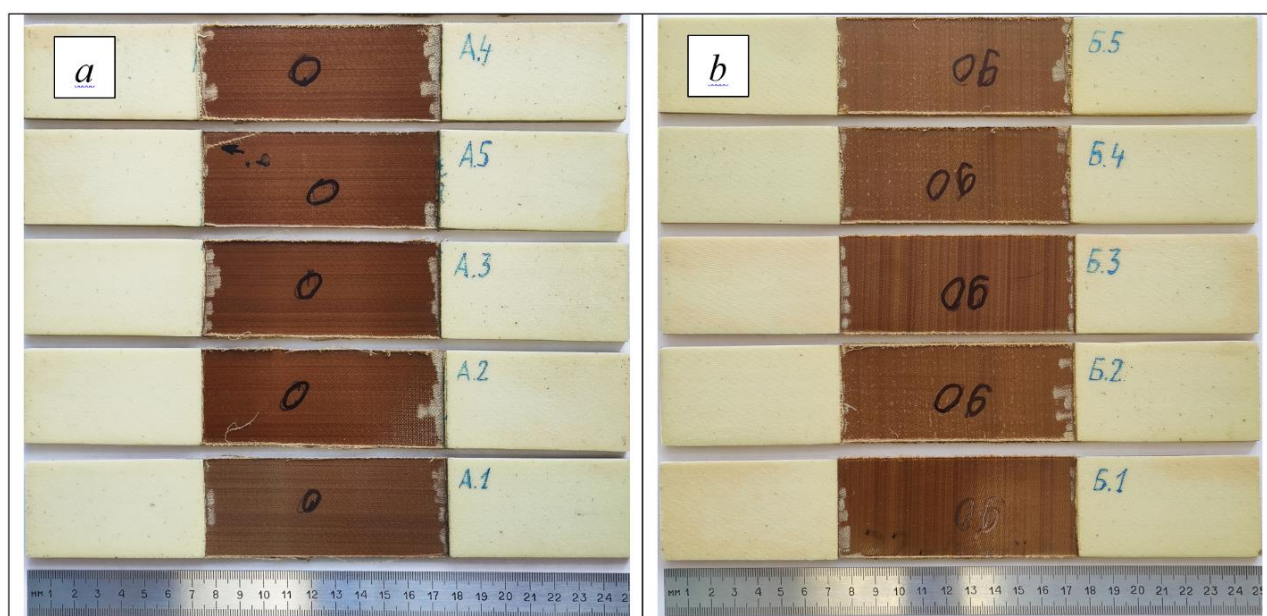


Рисунок 5.2 Группа А (а), группа Б (b)

Образцы испытывались согласно ГОСТ 25.601 на аттестованном оборудовании – машина испытательная Instron 5989. Образцы подвергались монотонно возрастающей циклической нагрузке. Каждый цикл состоит из этапа нагружения и разгрузки, суммарное количество циклов $n = 5$. Пяти циклов

нагружения достаточно, чтобы определить параметры деградации материала от статического нагружения, при этом влияние ресурсной усталости материала на параметры деградации незначительны. На всех этапах нагружения проводилась запись действующей силы и перемещений траверсы разрывной машины. На одном образце из группы устанавливались тензорезисторы для измерения деформаций. На основании показаний тензорезисторов введены уточняющие коэффициенты пересчета деформаций по показаниям перемещений траверсы разрывной машины для оставшихся образцов.

На Рисунках 5.3-5.6, 5.8-5.11 приведены диаграммы напряженного-деформированного состояния образцов группы *A* и *B*. Образцы А3 и В5 являются незачетными, экспериментальные данные не приведены. Расчет параметра деградации модуля упругости материала проводился по следующей формуле:

$$d = \frac{E_i}{E_0} \quad (4.1)$$

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

Модуль упругости E_i определялся как тангенс угла наклона диаграммы напряженного-деформированного состояния на этапе разгрузки. На Рисунках 5.7, 5.12 приведены диаграммы параметров деградации модуля упругости от действующих средних напряжений в образце. Средние напряжения определялись как отношение силы к площади поперечного сечения образца.

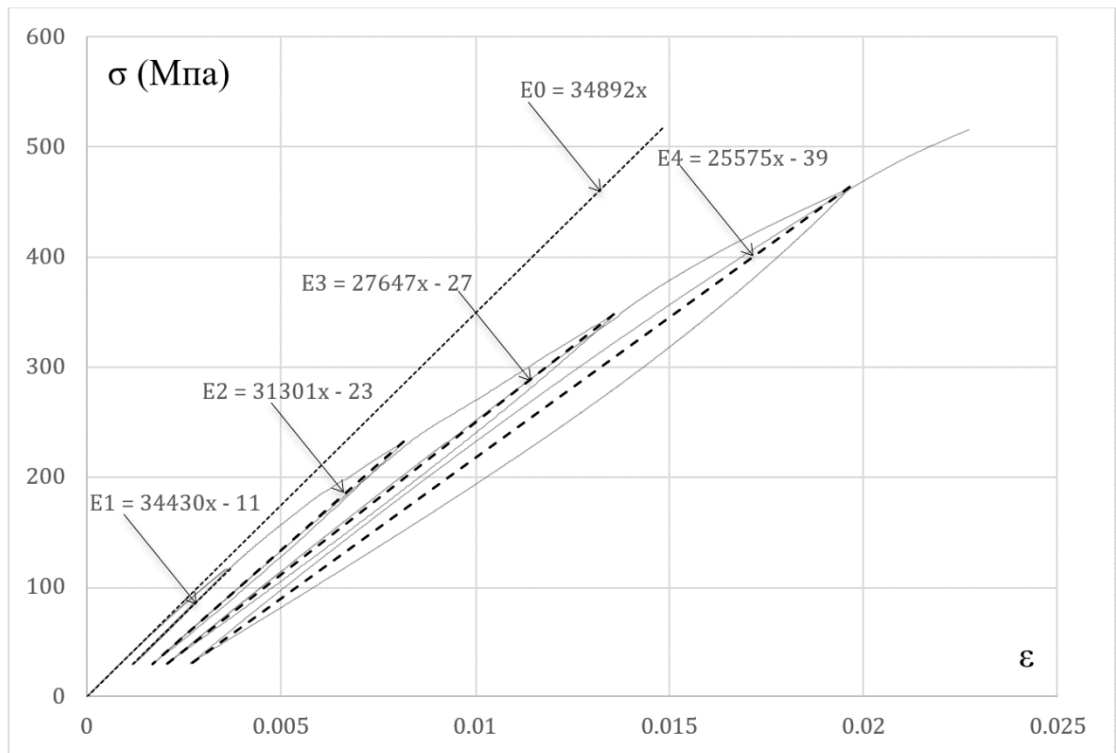


Рисунок 5.3 Диаграмма напряженно-деформированного ($МПа$) состояния образца A_1

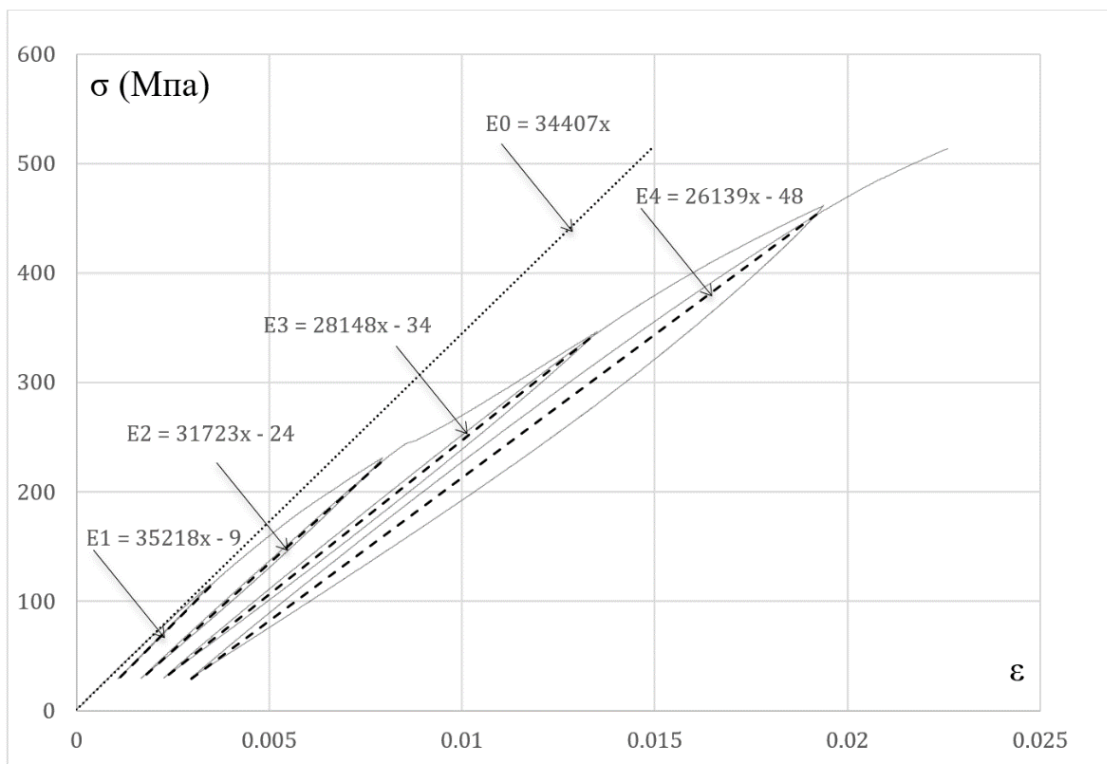


Рисунок 5.4 Диаграмма напряженно-деформированного состояния ($МПа$) образца A_2

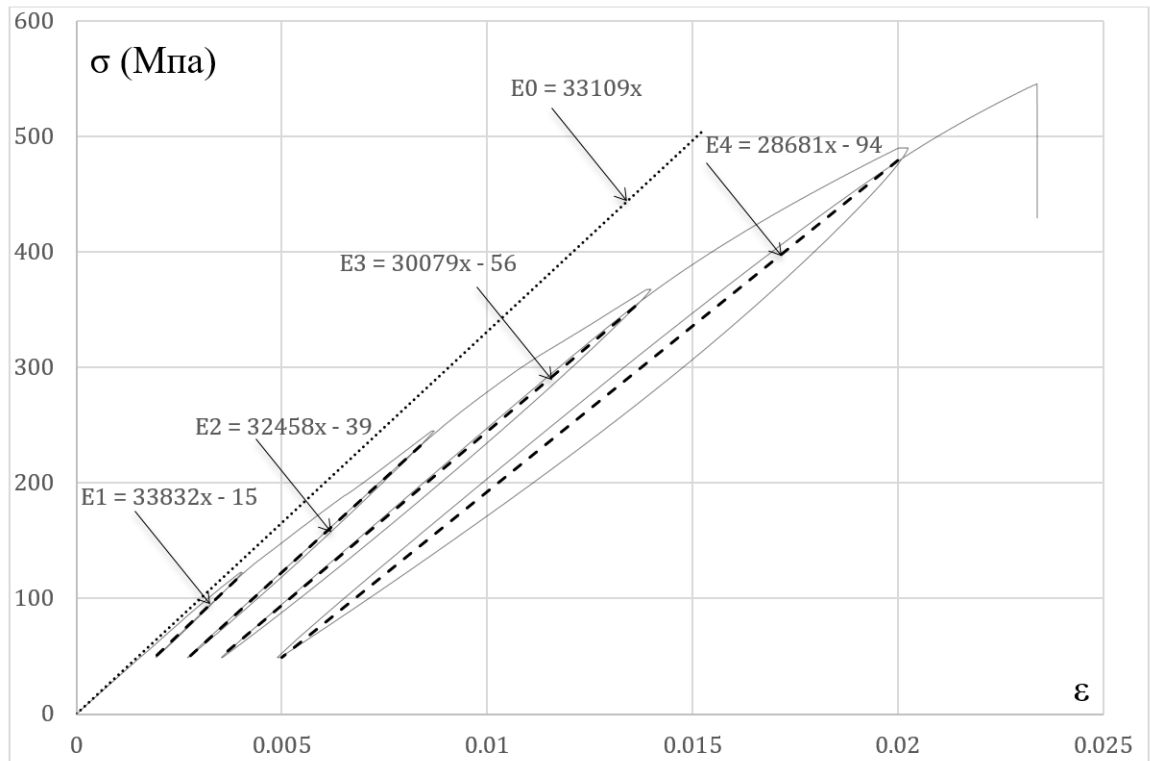


Рисунок 5.5 Диаграмма напряженно-деформированного состояния (МПа) образца A_4

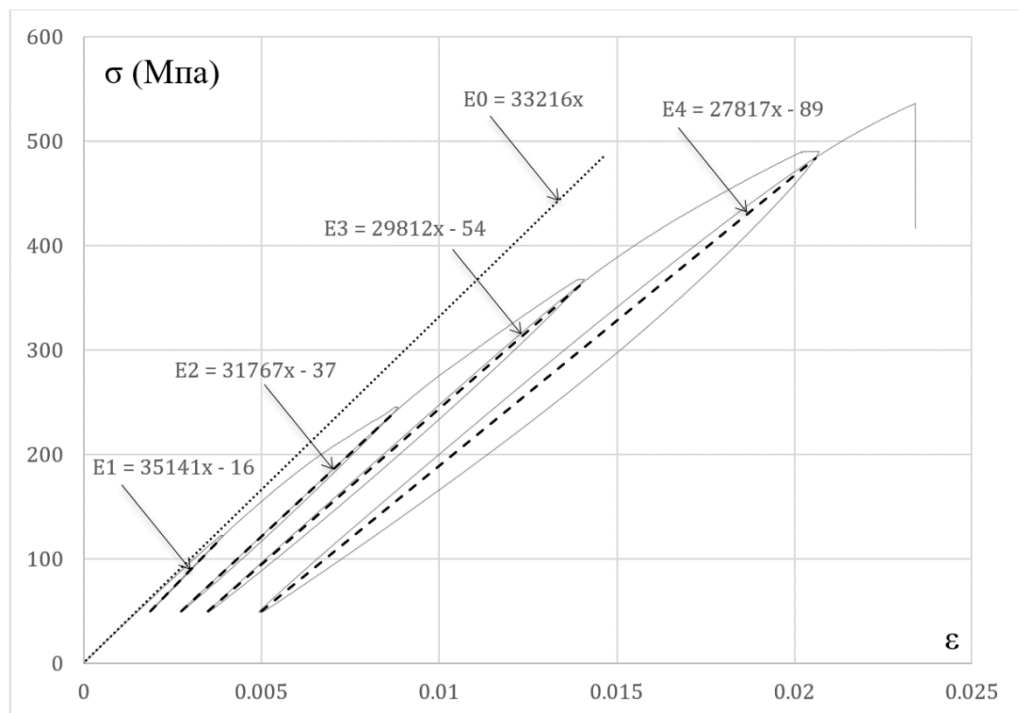


Рисунок 5.6 Диаграмма напряженно-деформированного состояния (МПа) образца A_5

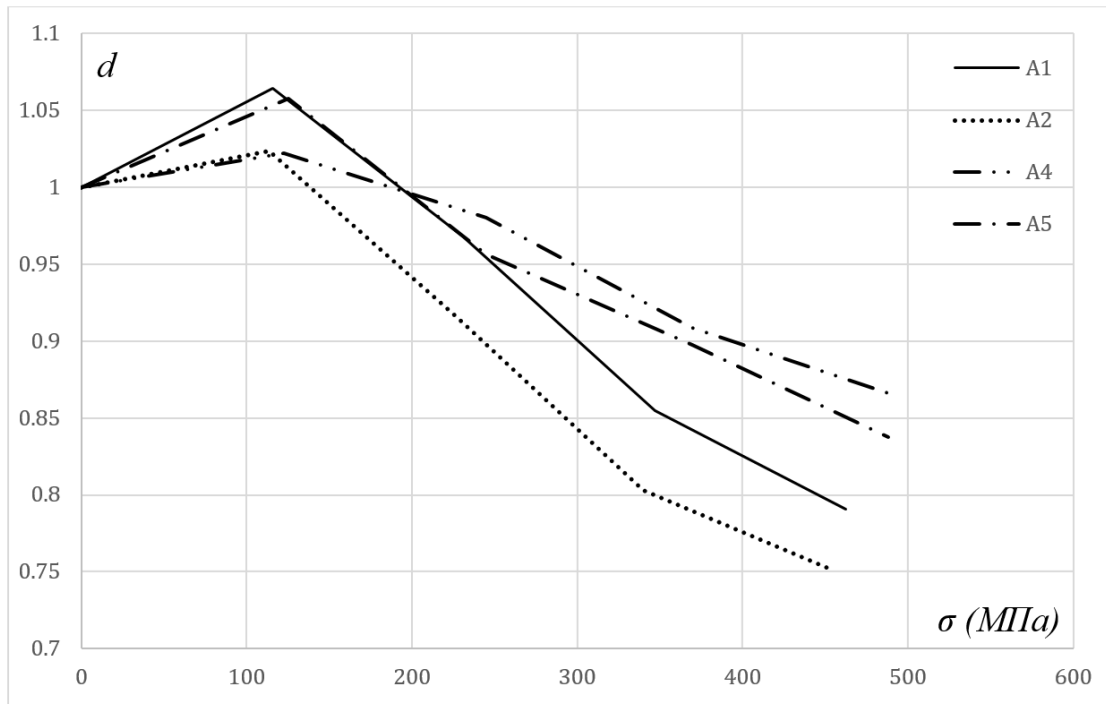


Рисунок 5.7 Параметр деградации модуля упругости от действующих средних напряжений (МПа) для образцов группы А

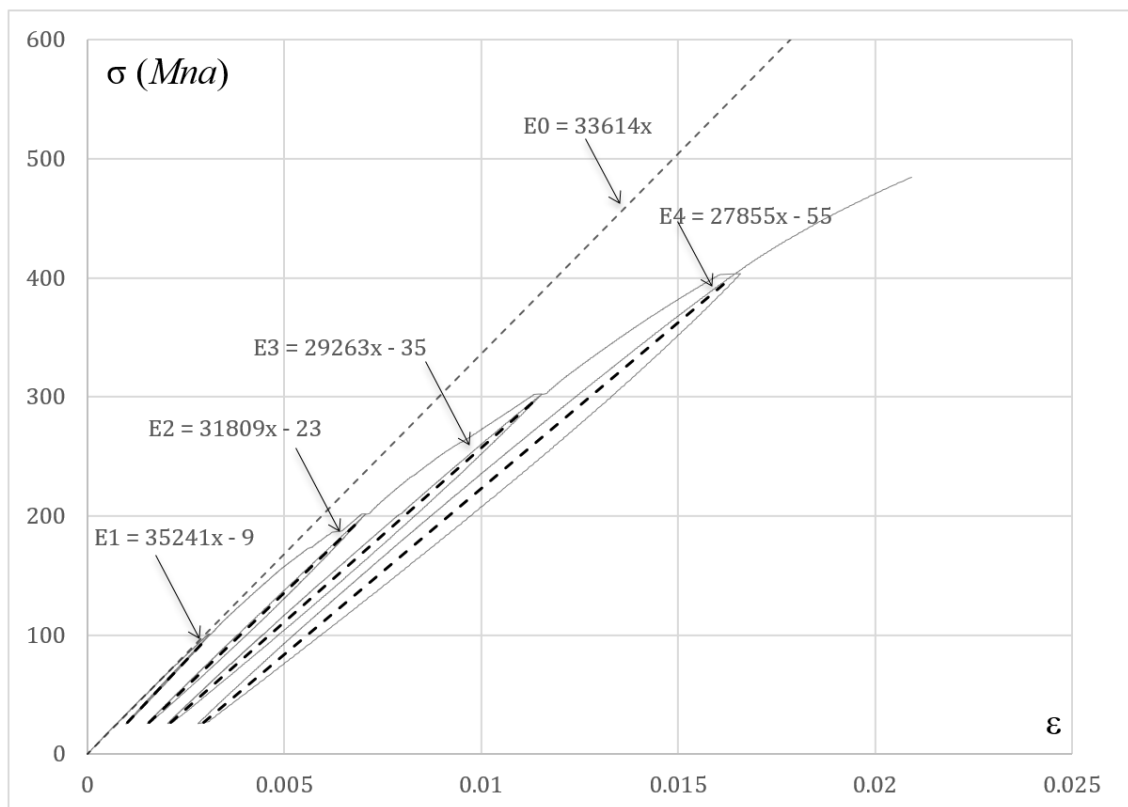


Рисунок 5.8 Диаграмма напряженно-деформированного состояния (МПа) образца

B_1

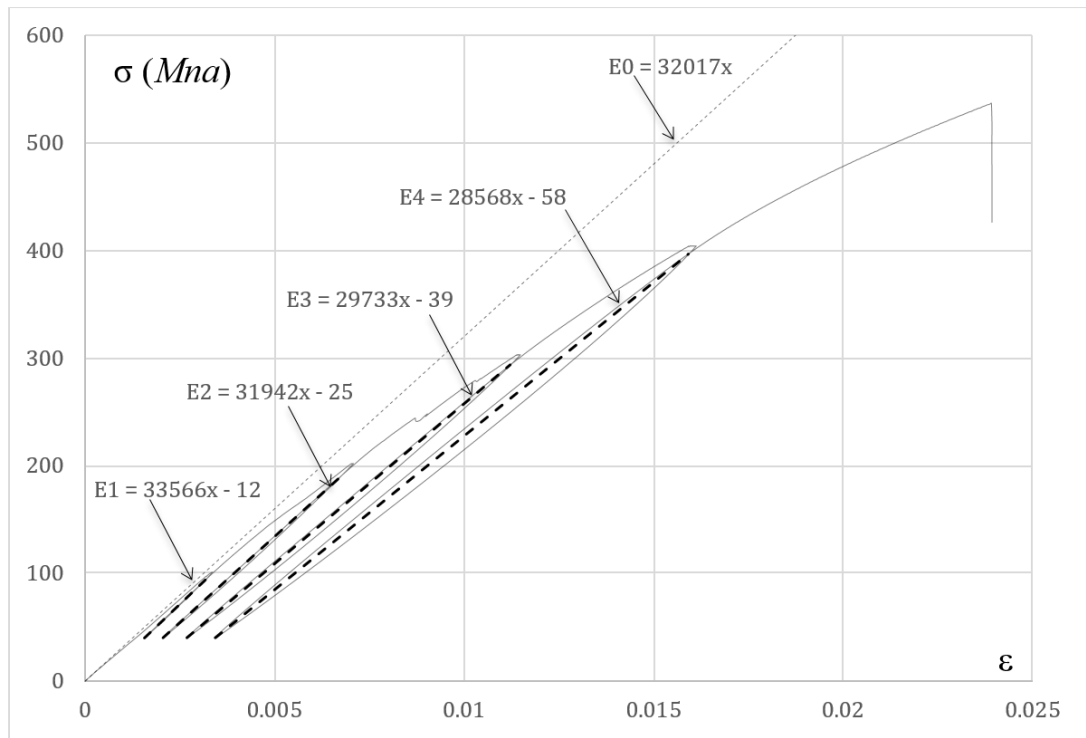


Рисунок 5.9 Диаграмма напряженно-деформированного состояния (МПа) образца B_2

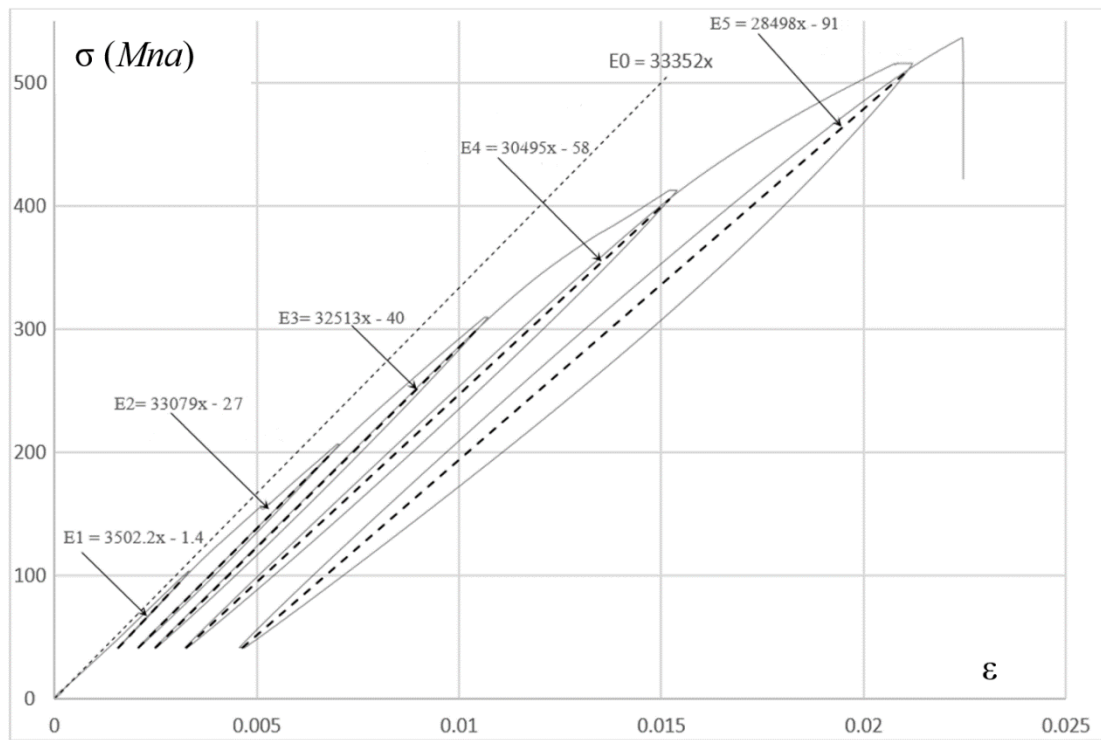


Рисунок 5.10 Диаграмма напряженно-деформированного состояния (МПа) образца B_3

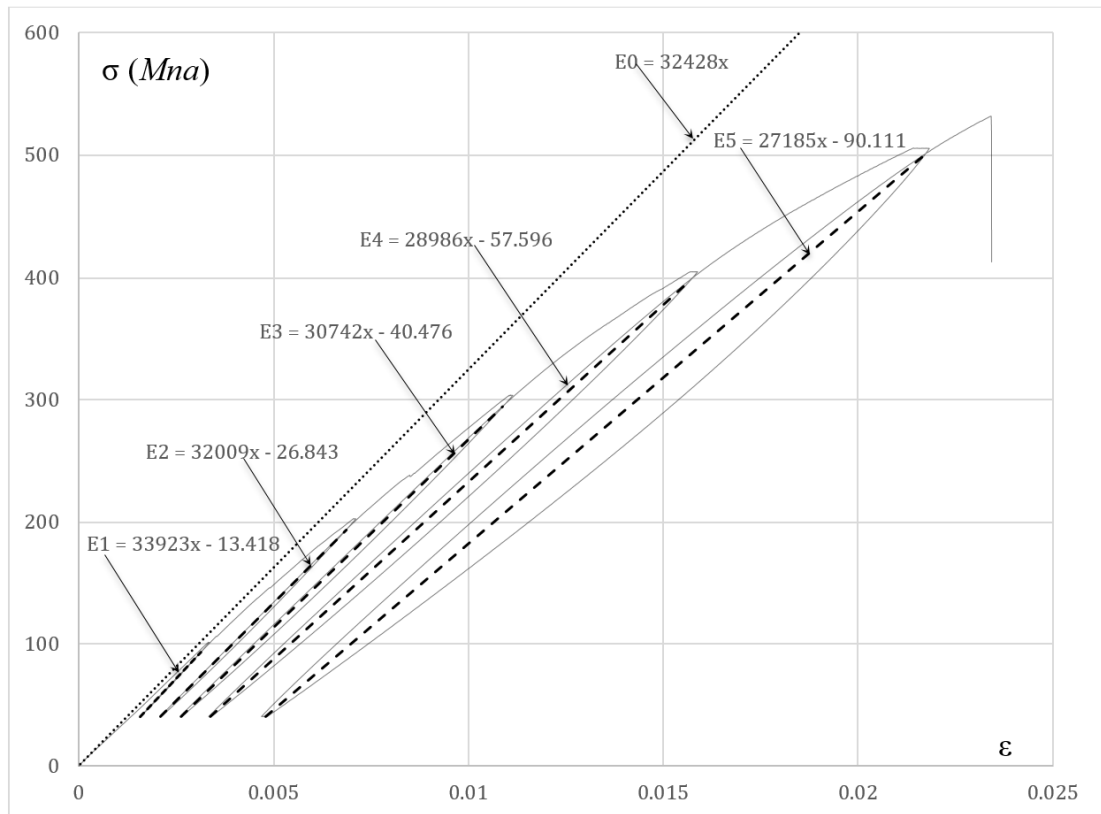


Рисунок 5.11 Диаграмма напряженно-деформированного состояния (МПа)
образца B_4

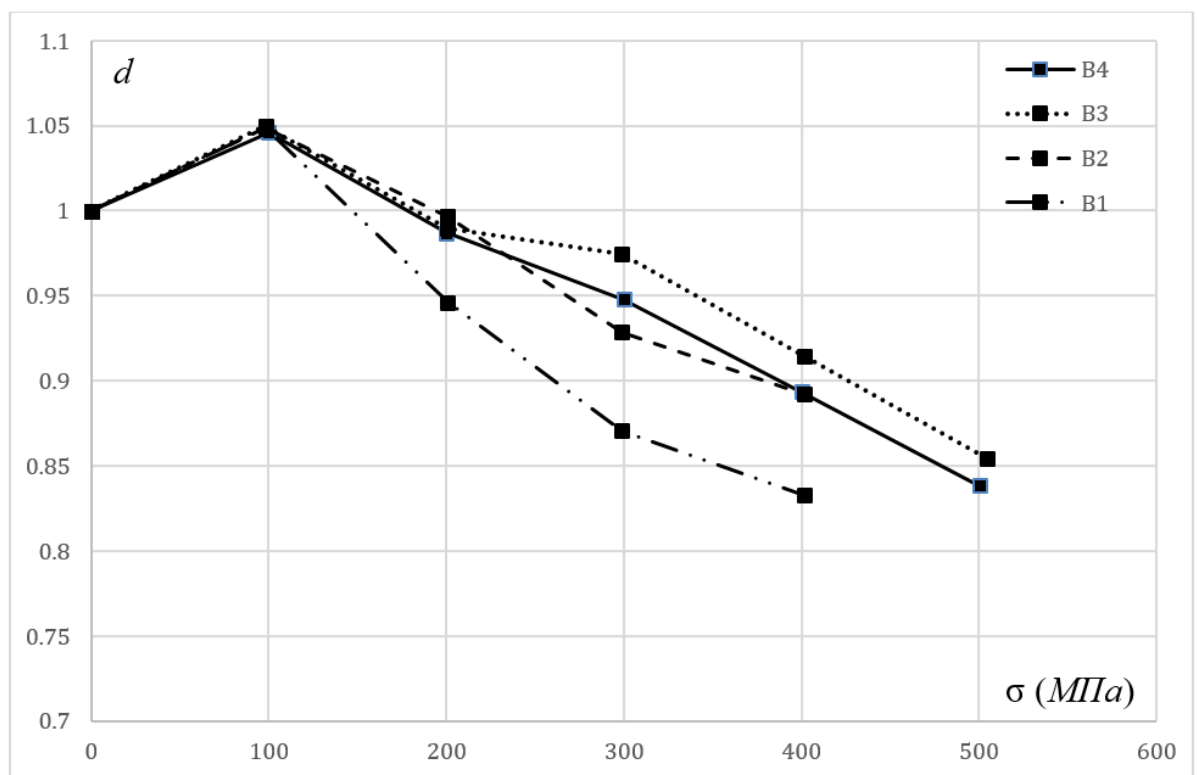


Рисунок 5.12 Параметр деградации модуля упругости от действующих средних напряжений (МПа) для образцов группы Б

На Рисунке 5.13 приведен общий вид образца после испытаний. Разрыв волокна наблюдается в рабочей зоне элементарного образца.



Рисунок 5.13 Разрушение образца Б4

По результатам экспериментального исследования можно сделать вывод, что в органопластике с тканой структурой происходит снижение жесткостных характеристик из-за нормального растяжения. Предполагается, что в структуре материала происходит разрушение матрицы вследствие криволинейной геометрии волокна. Процесс растрескивания матрицы начинается при нагрузке, равной 30% от предельной.

Кроме того, растрескивание матрицы во время растяжения негативно сказывается на предельных характеристиках материала при обратном сжимающем нагружении.

5.2 Экспериментальное исследование деформационных и деградационных свойств щелевых обтекателей при малоцикловом консольном изгибе

В данном параграфе приведены результаты экспериментального исследования деформационных свойств конструктивно-подобных образцов (КПО) из ПКМ. Методика проведения испытаний опирается на ГОСТ-33845-2016. Пакет КПО состоит из элементарных слоёв углеродного и органопластикового волокна с отверженным связующим. В ходе эксплуатации летательного аппарата гибкие элементы из ПКМ воспринимают нагружение типа консольного изгиба. Вследствие деградации свойств ПКМ в элементах конструкции, подверженных изгибному нагружению, происходит перераспределение напряжений по толщине пакета. Помимо этого, предполагается, что деградация свойств ПКМ от

действующего растягивающего и сжимающего нагружения отличается вследствие свойств разносопротивляемости матрицы. Отличие параметров деградации материала от типа нагружения способствует смещению нейтральной линии изгиба. Все вышесказанное приводит к изменению геометрической формы гибких элементов в ходе нагружения. При полной разгрузке данные элементы конструкции не восстанавливают первоначальную форму.

Конструктивно-подобные образцы испытывались группами по 5 штук. Натурные испытания проводились в нормальных климатических условиях. Образцы подверглись неразрушающему контролю перед проведением натурных испытаний на отсутствие механических повреждений.

На Рисунке 5.14 приведена схема удержания и нагружения образцов. Образцы подвергались монотонно возрастающему циклическому нагружению, в виде перемещений толкателя Δu вдоль установочной оси по направлению к профилю. Количество циклов нагружения $n=4$. Четыре цикла нагружения достаточно, чтобы определить параметры деградации КПО от статического нагружения, при этом влияние ресурсной усталости материала на параметры деградации незначительны

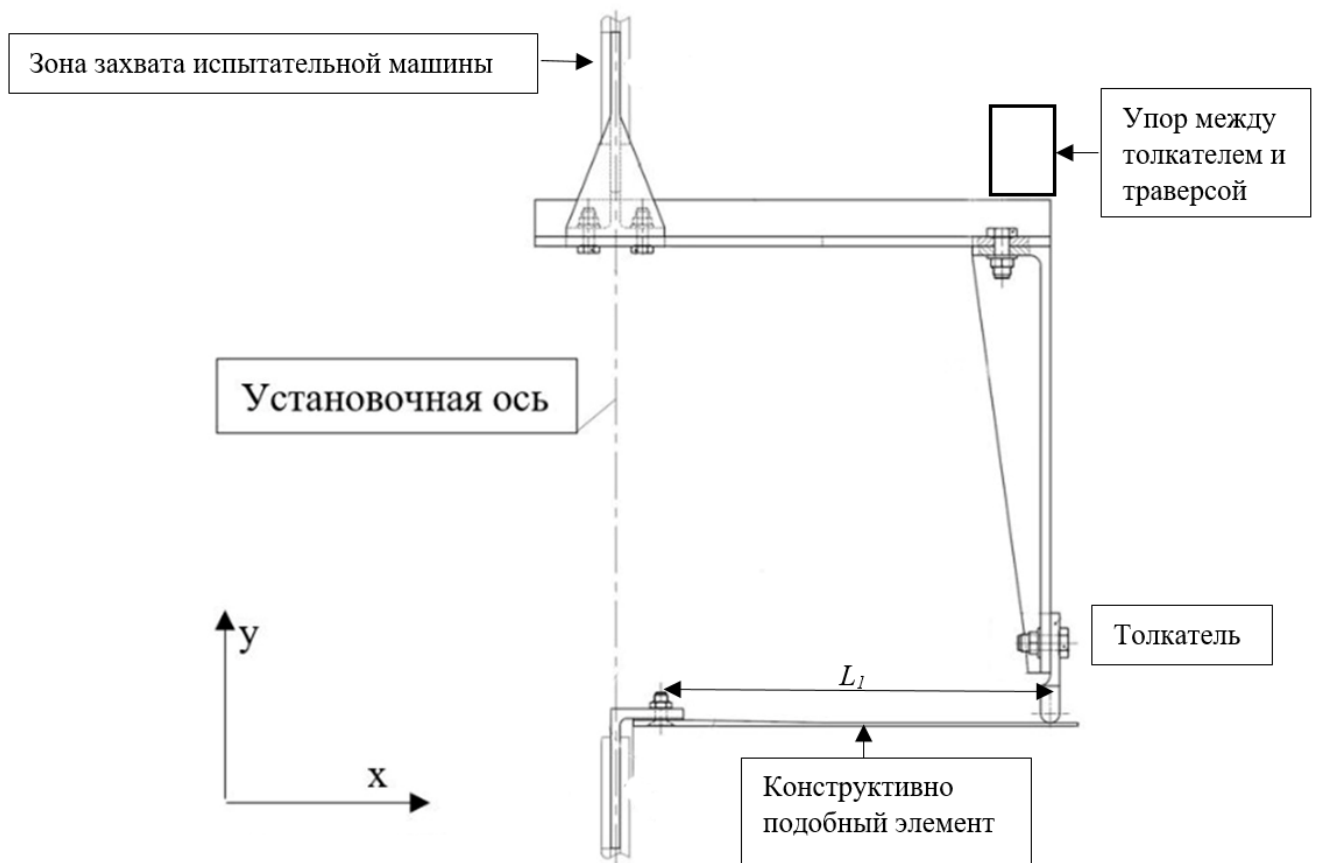


Рисунок 5.14 Схема испытательного стенда

После каждого шага нагружения происходила разгрузка и измерение остаточных перемещений $y_{ост}$ (Рисунок 5.15). Проведена запись действующей силы и перемещений траверсы испытательной машины, на основании которых определен параметр d – снижение жесткостных характеристик образцов (Рисунок 5.16):

$$d = \frac{S_i}{S_0} \quad (4.2)$$

где d – параметр снижения жесткости, S_0 – начальный тангенс угла наклона кривой, S_i – тангенс угла наклона кривой, измеренный после каждого цикла нагружения.

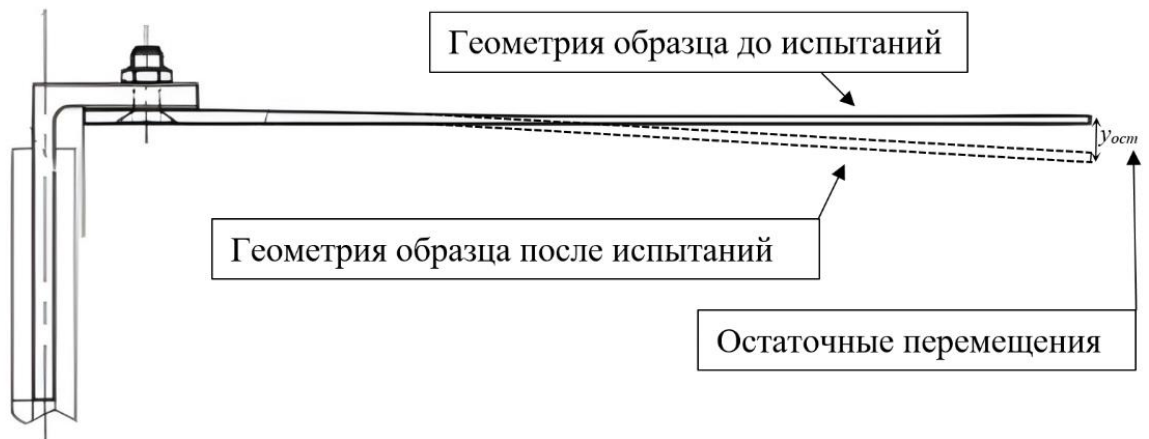
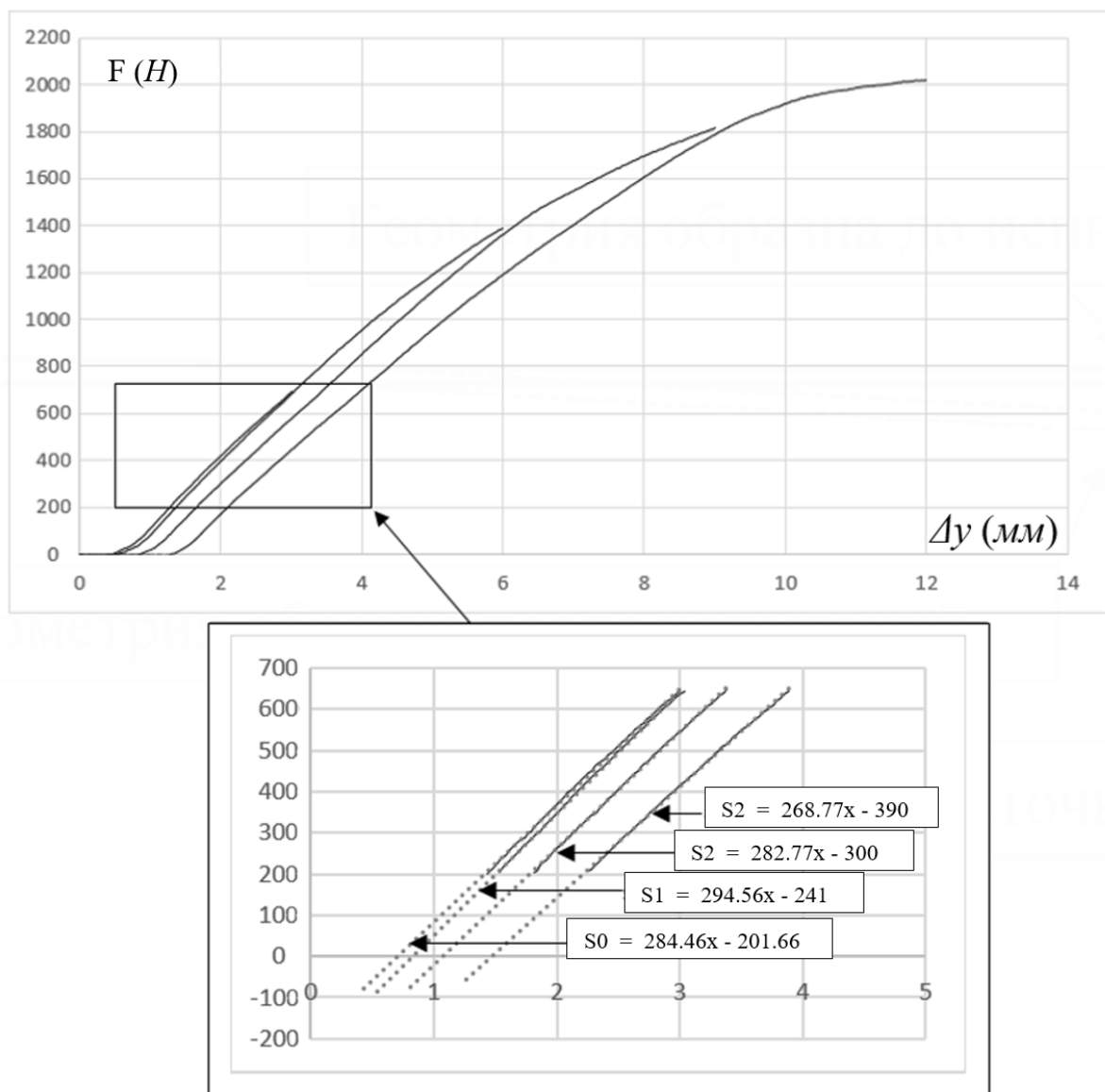


Рисунок 5.15 Схема измерения остаточных перемещений

Рисунок 5.16 Определение параметра d снижения жесткостных характеристик образцов

На Рисунках 5.17-5.18 приведена схема армирования и геометрические характеристики конструктивно подобных образцов.

Образцы группы А имеют идентичные геометрические параметры, длина образцов 100 мм. Образец А1 армирован органопластиком под углом $\pm 45^\circ$, 0° , 90° . Образец А2 армирован органопластиком под углом $0-90^\circ$.

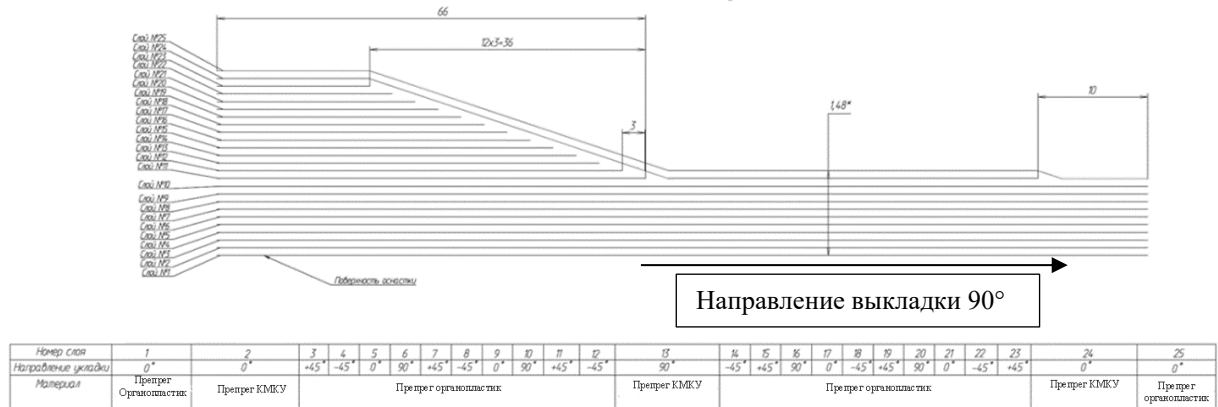


Рисунок 5.17 Геометрические характеристики и схема армирования образца А1
Длина 100 (мм) А1

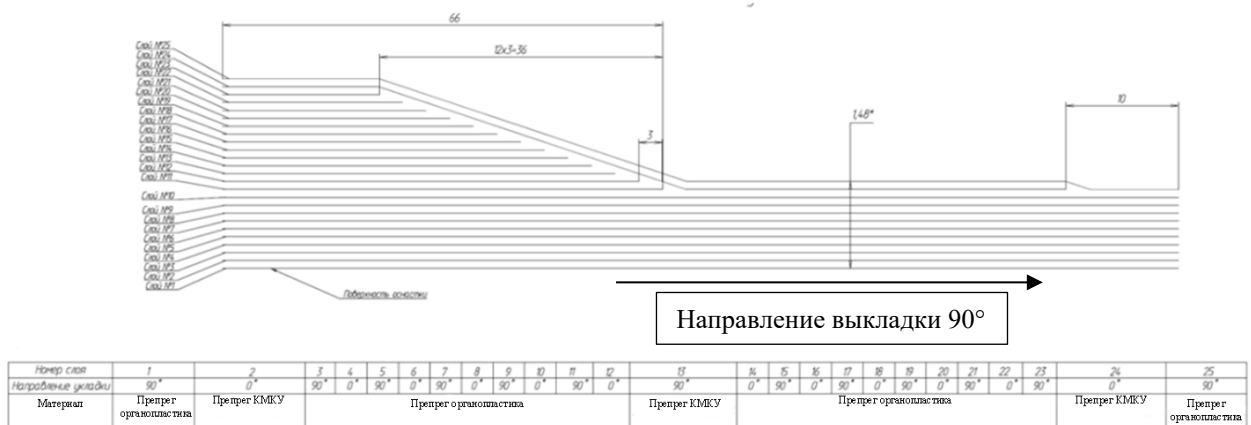


Рисунок 5.18 Геометрические характеристики и схема армирования образца А2.
Длина 100 (мм) А2

На Рисунках 5.19-5.20 приведена диаграмма действующей силы F от перемещений траверсы испытательной машины Δu (толкателя). С каждым последующим циклом, у толкателя увеличивается свободный ход на начальных этапах нагружения, что свидетельствует об образовании зазора между толкателем и образцом, вследствие изменения геометрической формы образца.

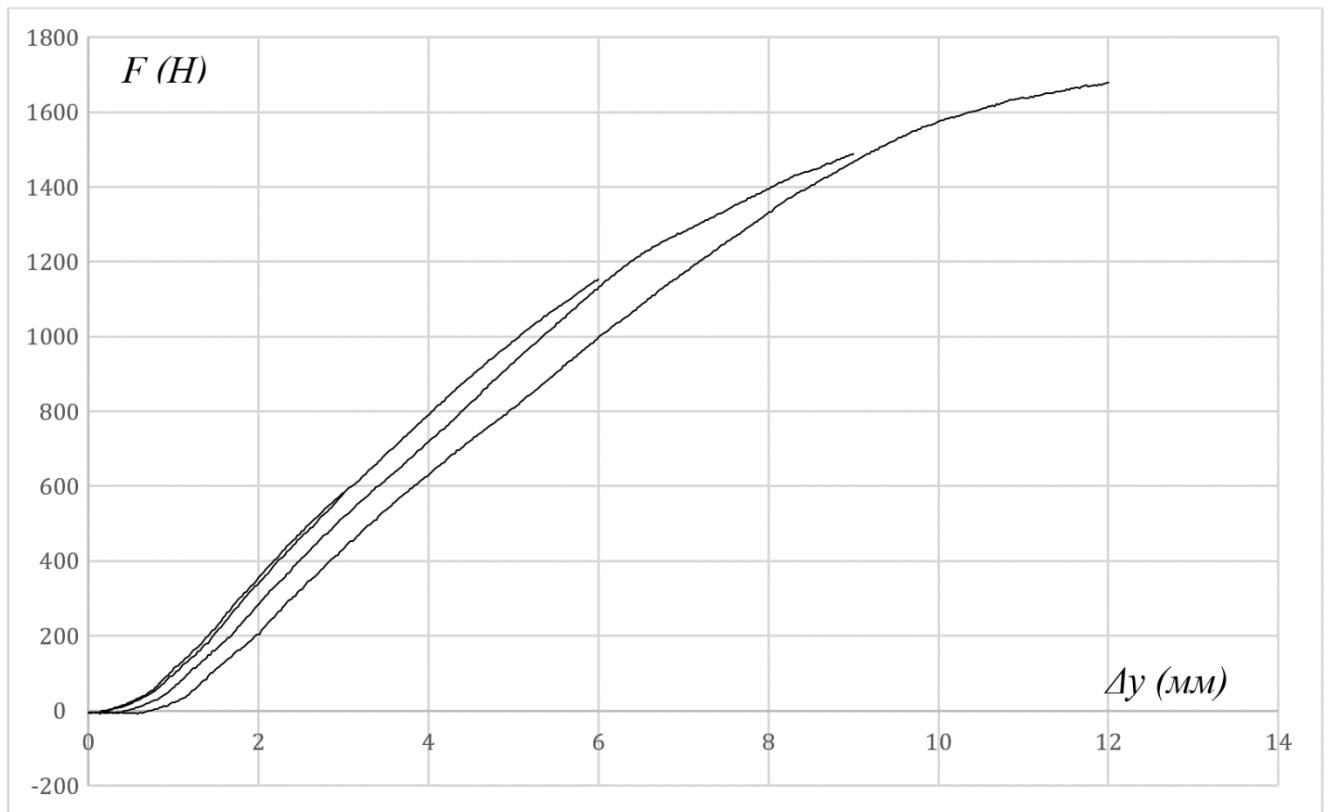


Рисунок 5.19 Диаграмма сила F (H) в траверсе от перемещений толкателя Δy (мм).

Образец А1

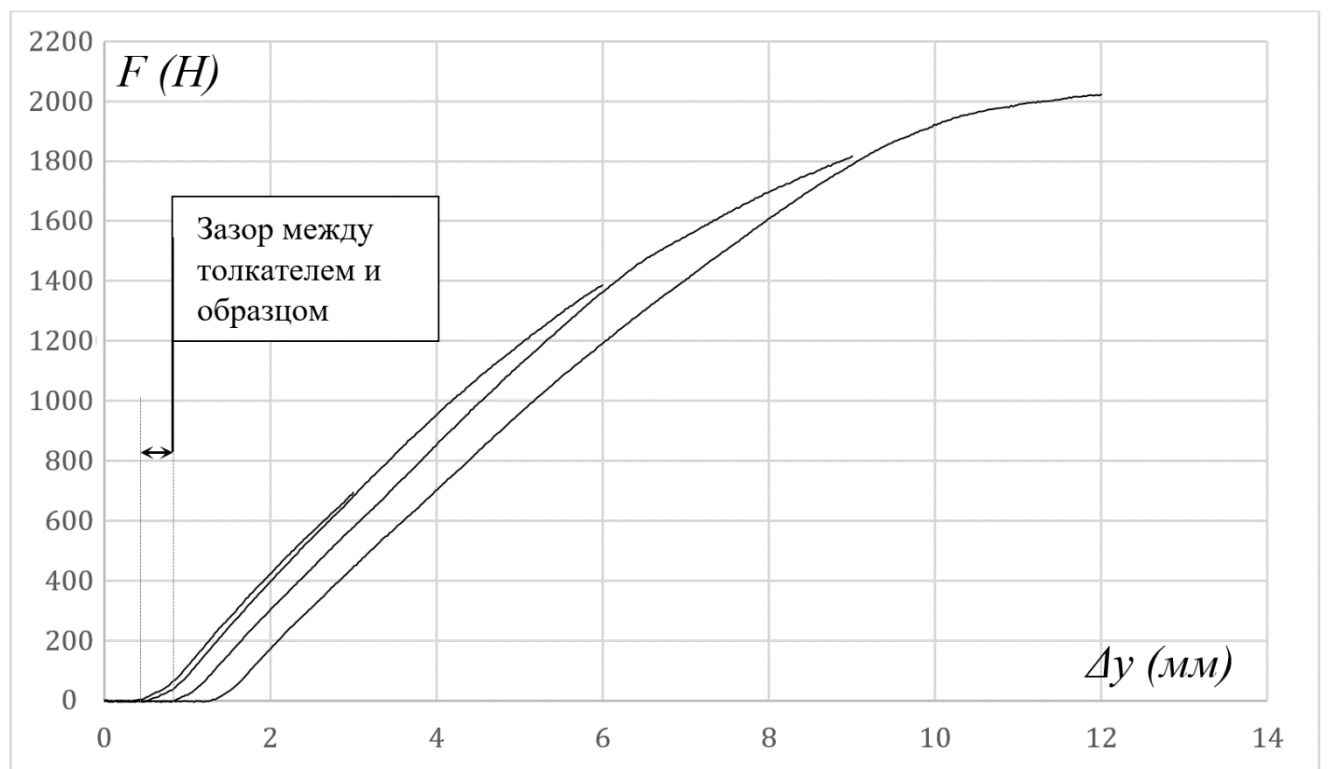


Рисунок 5.20 Диаграмма сила F (H) в траверсе от перемещений толкателя Δy (мм).

Образец А2

На Рисунке 5.21 приведены остаточные перемещения $y_{ост}$ образцов полученные входе экспериментального исследования. Предполагается, что изменение геометрической формы образцов вызвано деградацией структуры ПКМ. Также стоит заметить, что образцы с укладкой $\pm 45, 0, 90^\circ$ имеют меньшие остаточные перемещения $y_{ост}$, в сравнении с образцами $0, 90^\circ$.

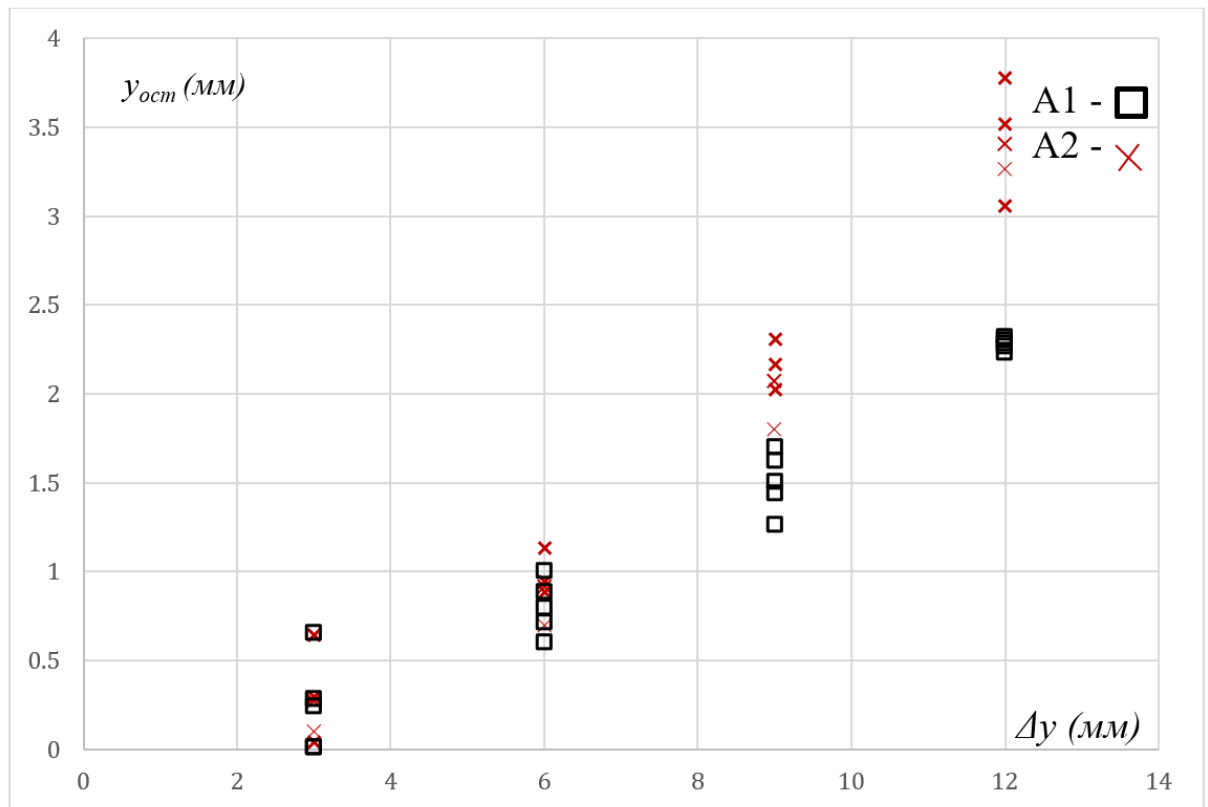


Рисунок 5.21 Зависимость образование остаточных перемещений $y_{ост}$ (мм) от приложенной нагрузки Δy в виде перемещений упора (мм). Образцы A1-A2

На Рисунках 5.22 приведён параметр деградации жёсткости образцов d от нагружения Δy (перемещение толкателя) полученный по результатам натурных испытаний.

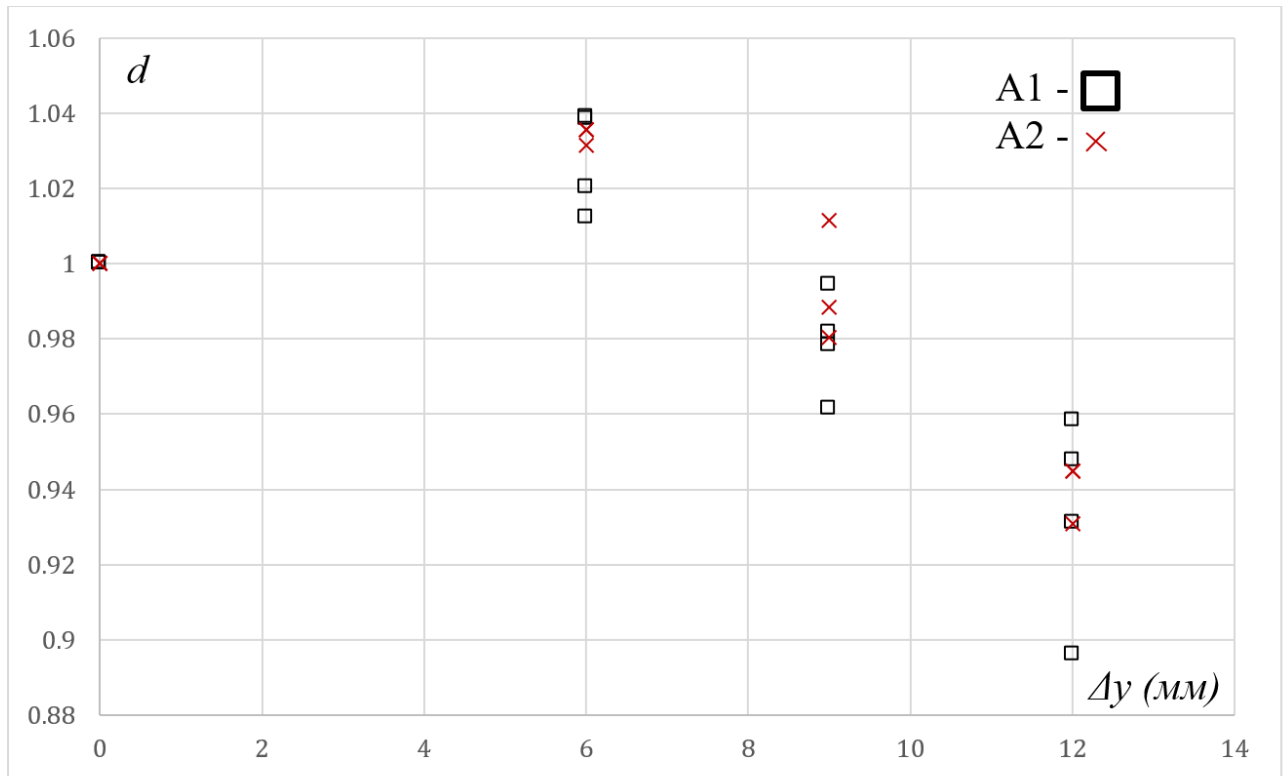


Рисунок 5.22 Параметр снижения жесткостных характеристик образца d от нагружения (перемещений траверсы). A1-2

По результатам экспериментального исследования можно сделать вывод о том, что при консольном изгибе конструктивно подобных образцов происходит изменение геометрической формы, вследствие чего, возможно образование зазора между щелевым обтекателем и прилегающей к нему конструкции. Предполагается, что изменение формы образцов в первую очередь связано с нелинейным поведением тканого органопластика.

Образец B имеет в структуре однонаправленные углеродные волокна, ориентированные продольно к нагружению. Считается, что при нагружении вдоль волокна, материал имеет линейную диаграмму деформирования, а деградация матричной структуры незначительна. По результатам испытаний элементарных образцов (Глава 4.1) из тканого органопластика выявлено, что деградация структуры происходит при нагружении вдоль волокна, а диаграмма напряжённо-деформируемого состояния имеет нелинейное поведение. Вследствие этого,

основной вклад в образование остаточных перемещений вносит тканый органоупластик.

Образцы *A1*, *A2* имеют в структуре различные укладки органоупластика, геометрические параметры данных образцов идентичны. По полученным экспериментальным данным, можно сделать вывод, что образцы *A1* с укладкой $\pm 45^\circ$, 0° , 90° имеют меньшие остаточные перемещения, по сравнению с образцом $0^\circ/90^\circ$.

Полученные экспериментальные данные имеют практическую значимость в части проектирования авиационных конструкций. Экспериментальные данные показывают о возникновении остаточных перемещений в образцах из композиционного материала, которые необходимо учитывать при рациональном проектировании конструкций. Возможным решением данной проблемы является монтаж гибких элементов с преднатягом, который нивелирует образование остаточных перемещений в ходе эксплуатации.

5.3 Экспериментальное исследование деградации свойств щелевых обтекателей при многоцикловом консольном изгибе

Получены параметры деградации свойств конструктивно подобных образцов при многоцикловом нагружении [124], методика испытаний опирается на ГОСТ. 33845-2016. На Рисунок 5.23 приведены геометрические параметры образца, в Таблице 3.8 приведены углы армирования волокна в конструктивно подобном образце. Образец изготавливался методом вакуум-автоклавного формования. Структура образца состоит из однонаправленного углеродного волокна и тканого органоупластика. Физические характеристики ПКМ приведены в Таблице 3.9.

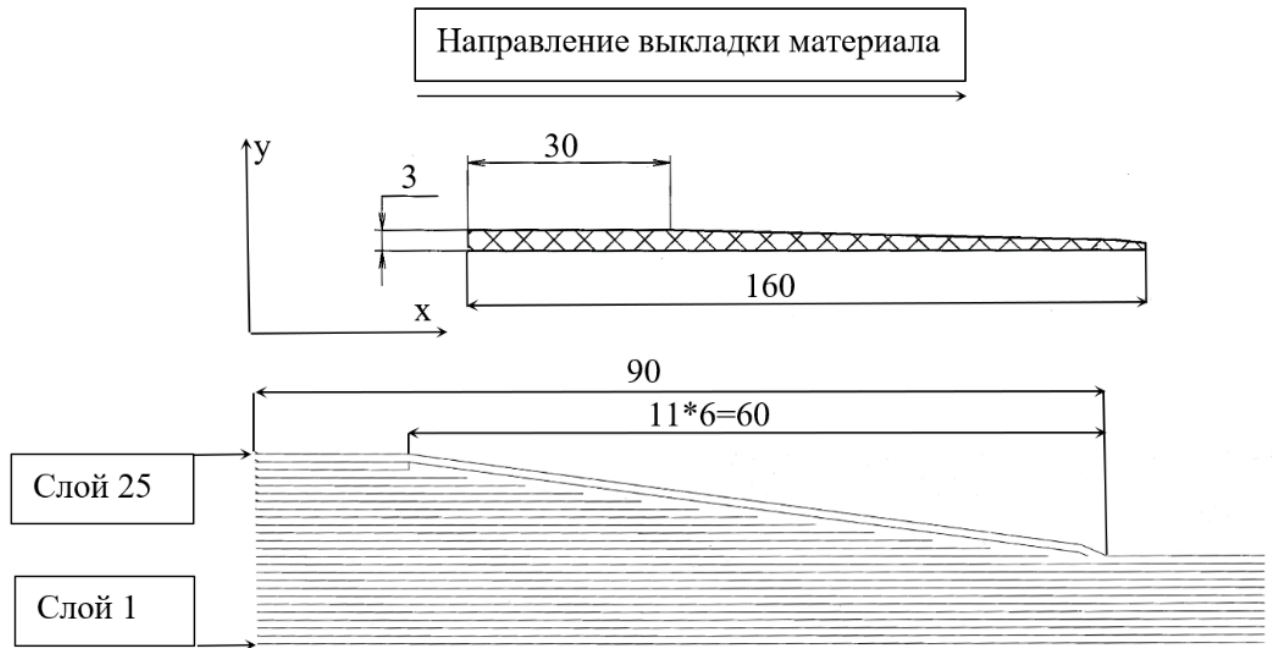


Рисунок 5.23 Геометрические параметры (мм) образца

Таблица 3.8 – Схема армирования образца

№ слоя	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
угол укладки	0	0	45	-45	0	90	45	-45	0	90	45	-45	90
Материал	О	У	О	О	О	О	О	О	О	О	О	О	У
№ слоя	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
угол укладки	-45	45	90	0	-45	45	90	0	-45	45	0	0	
Материал	О	О	О	О	О	О	О	О	О	О	У	О	

*материал «О - органопластик, У - углепластик»

Таблица 3.8 – Физические характеристики материала

Материал	E_1 <i>ГПа</i>	E_2 <i>ГПа</i>	G_{12} <i>ГПа</i>	μ_{12}	Толщина монослоя <i>мм</i>
Органит	31	31	11.8	0,12	0,12
Углепластик	118	8.5	9.5	0,3	0,14

На Рисунке 5.24 приведена схема испытательного стенда. Два образца через оснастку устанавливались в испытательную машину. Нагружение образцов реализовано по средствам проталкивания клина. Данное нагружение имитирует консольный изгиб образцов. Рассмотрено два режима нагружения, отгиб образца на $y=10$ и $y=20,5$ мм по средствам проталкивания клина. На контактирующие поверхности образца и клина нанесено антифрикционное покрытие [122]

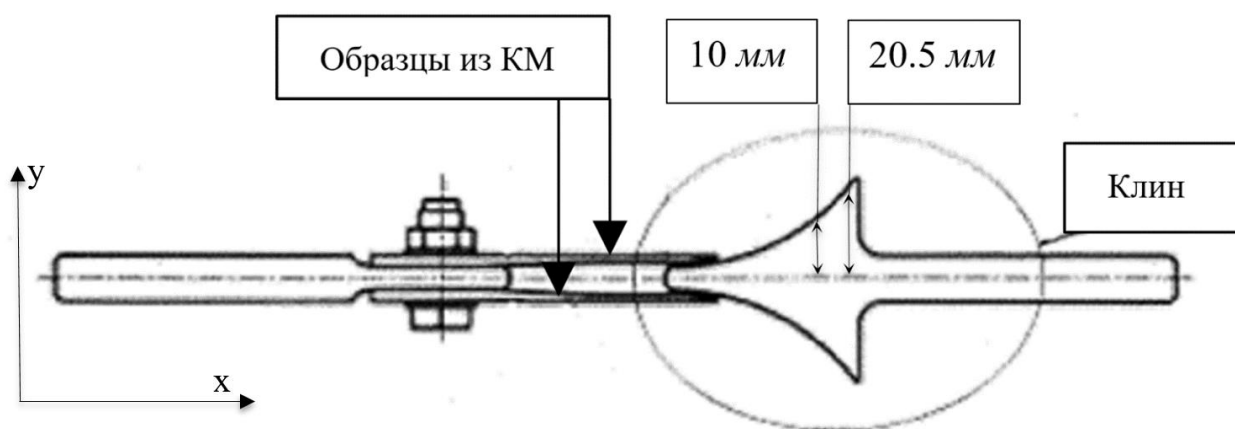


Рисунок 5.24 Схема испытательного стенда

На Рисунке 5.25 представлена программа ресурсных испытаний. Образцы нагружались циклическими перемещениями с суммарным числом циклов $n = 768000$. Первую половину циклов образец нагружался перемещением $y = 10$ мм, далее происходило нагружение образца перемещением равным $y = 20,5$ мм.

Для оценки снижения жесткостных свойств образцов, входе ресурсных испытаний, проведена запись действующей силы и перемещений в траверсе в момент проталкивания клина. Запись проводилась через каждые 192000 циклов.

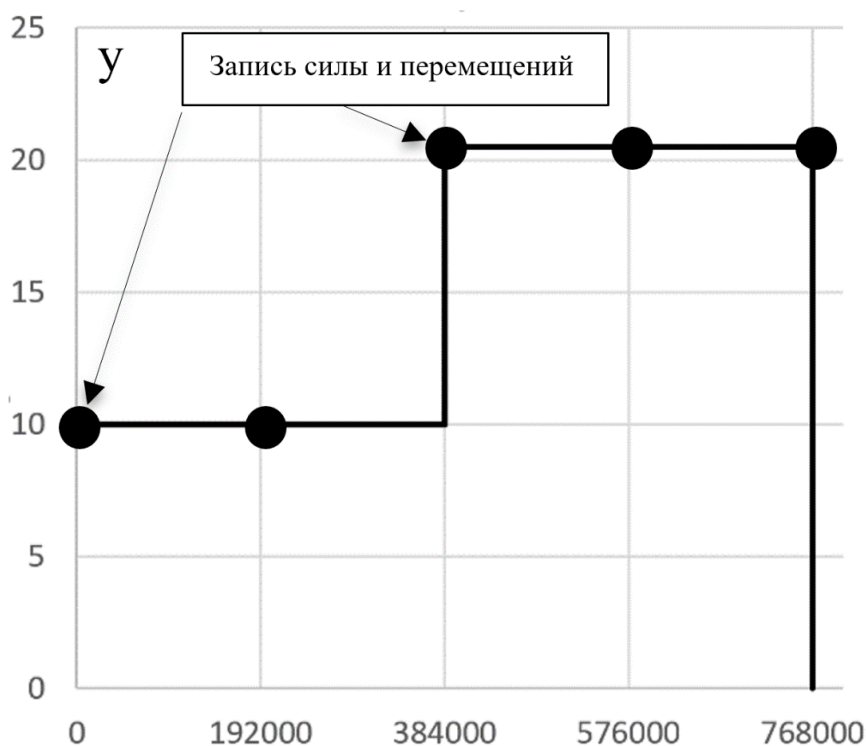


Рисунок 5.25 Объем ресурсных испытаний

На Рисунке 5.26 приведена действующая сила F (H) в траверсе от отгиба образца u ($мм$). На основании полученных данных рассчитан параметр деградации жёсткости образца от количества циклов нагружения (Рисунок 5.27).

$$d = \frac{S_i}{S_0} \quad (4.3)$$

где d – параметр снижения жесткости, S_0 – начальный тангенс угла наклона кривой, S_i – тангенс угла наклона кривой при повторном нагружении.

Для определения параметра S проведена аппроксимация экспериментальных данных методом наименьших квадратов на участке нагружения 40-100 H .

По результатам ресурсных испытаний можно сделать вывод, что конструктивно подобный образец не разрушился. Снижение жесткостных характеристик образца составило 6%. В ходе испытаний наблюдалось образование зазора между образцом и клином, что свидетельствует об изменении геометрической формы образца от действующего нагружения.

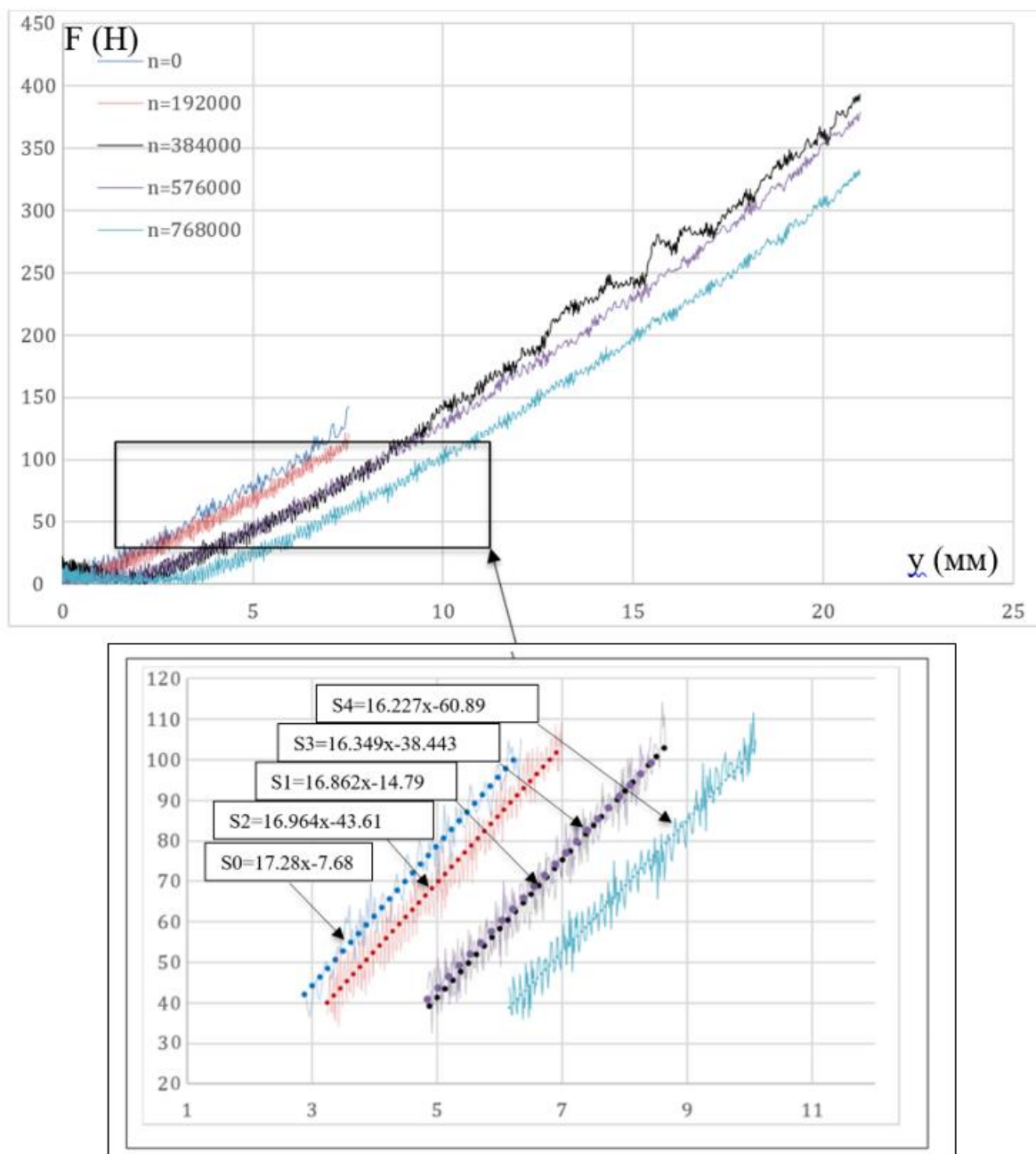


Рисунок 5.26 Силы F (H) в трассе от перемещений отгиба образца (мм)

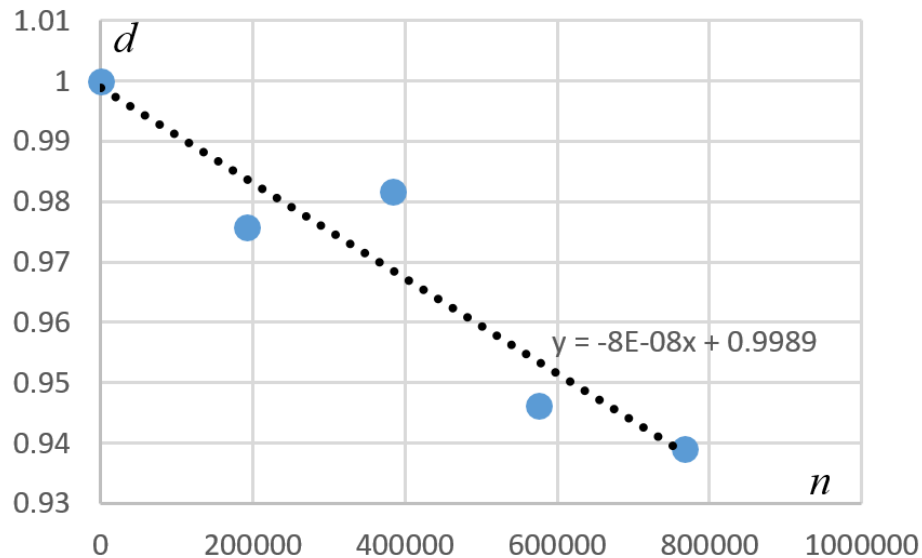


Рисунок 5.27 Параметр снижения жёсткости от количества циклов нагружения

5.4 Заключение по Главе 5

Полученные результаты исследования в Главе 5 легли в основу валидационного базиса.

1. Проведены испытания элементарных образцов из тканого органопластика при действующем малоцикловом, монотонно возрастающем растягивающем нагружении. Рассчитаны параметры деградации свойств монослоя от действующего нагружения.

2. Проведены испытания щелевых обтекателей из композиционного материала при действующем малоцикловом, монотонно возрастающем консольном изгибе. Рассчитаны параметры снижения жесткостных характеристик щелевых обтекателей от действующего нагружения.

3. Проведены испытания щелевых обтекателей из композиционного материала при действующем многоцикловом консольном изгибе. Рассчитаны параметры снижения жесткостных характеристик щелевых обтекателей от количества циклов нагружения.

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 однонаправленного 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Овчинский А. С. Процессы отказа и разрушения композиционных материалов. — М.: Наука, 1988. — 276.
2. Llorca J, González C, Molina-Aldaregúa JM, Segurado J, Seltzer R, Sket F, et al. Multiscale modeling of composite materials: a roadmap towards virtual testing // *Adv. Mater.* — 2011. — Vol. 23. — P. 5130–5147.
3. Pogosyan M., Nazarov E., Bolshikh A., Koroliskii V., Turbin N., Shramko K. Aircraft composite structures integrated approach: a review // *J. Phys.: Conf. Ser.* — 2021. — Vol. 925, № 1. — 012005.
4. Asp L. E, Berglund L. A. Effects of a composite-like stress state on the fracture of epoxies // *Compos. Sci. Technol.* — 1995. — Vol. 53. — P. 27–37.
5. Nichols D. J. Effect of stress biaxiality on the transverse tensile // *Composites Materials: Testing and Design.* — Philadelphia: ASTM, 1986. — ASTM STP 893. — P. 109–114.
6. Петрова А. П., Лукина Н. Ф., Мельников Д. А., Беседнов К. Л., Павлюк Б. Ф. Исследование свойств отвержденных клеевых связующих // *Труды ВИАМ.* — 2017. — № 10 (58).
7. Kawabata S. Strength of epoxy resin under multiaxial stress field // *Proceedings of the 4th International Conference on Composite Materials (ICCM-4).* — Vol. 1. — Tokyo, Japan, 25–28 October 1982. — P. 161–168.
8. Bowden P. B., Jukes J. A. The plastic flow of isotropic polymers // *J. Mater. Sci.* — 1972. — Vol. 7. — P. 52–56.
9. Quinson R., Perez J., Rink M., Pavan A. Yield criteria for amorphous glassy polymers // *J. Mater. Sci.* — 1997. — Vol. 32. — P. 1371–1379.
10. Asp L. E., Berglund L. A., Talreja R. A criterion for crack initiation in glassy polymers subjected to a composite like stress state // *Compos. Sci. Technol.* — 1996. — Vol. 56. — P. 1291–1301.

11. Asp L. E., Berglund L. A., Talreja R. Prediction of matrix-initiated transverse failure in polymer composites // *Compos. Sci. Technol.* — 1996. — Vol. 56. — P. 1089–1097.
12. Soutis C., Fleck N. A., Smith P. A. Failure prediction technique for compression loaded carbon fiber-epoxy laminates with open holes // *J. Compos. Mater.* — 1991. — Vol. 25. — P. 1476–1498.
13. Fleck N. A. Compressive failure of fiber composites // *Adv. Appl. Mech.* — 1997. — Vol. 33. — P. 44–117.
14. Грузь А. Н. Механика разрушения композиционных материалов при сжатии. — Киев: Наукова Думка, 1990. — 210 с.
15. Tsampas S. A., Greenhalgh E. S., Ankerson J., Curtis P. T. On compressive failure of multi-directional fiber-reinforced composites // *Compos. Part A.* — 2012. — Vol. 43. — P. 454–468.
16. Буров А. Е., Кокшаров И. И., Москвичев В. В. Моделирование разрушения и трещиностойкость волокнистых металлокомпозитов. — Новосибирск: Наука, 2003. — 173 с.
17. Литвинов В. Б., Кобец Л. П., Токсанбаев М. С. Структурно-механические свойства высокопрочных углеродных волокон // *Композиты и наноструктуры.* — 2011. — № 3. — С. 36–50.
18. Kobets L. P., Deev I. S. Carbon fibres: structure and mechanical properties // *Compos. Sci. Technol.* — 1997. — Vol. 57. — P. 1571–1580.
19. Канаун С. К. Метод самосогласованного поля в задаче об эффективных свойствах упругого композита // *Прикладная механика и техническая физика.* — 1975. — № 4. — С. 194.
20. Архипов И. К., Герлейн О. В. Корреляционные характеристики пластической жесткости формоизменения хаотически армированного композита // *Изв. вузов. Математика.* — 1982. — № 7. — С. 66–70.

21. Фокин А. Г., Шермергор Т. Д. Вычисление эффективных упругих модулей композиционных материалов с учетом многочастичных взаимодействий // Прикл. мех. техн. физ. — 1969. — № 1. — С. 51.
22. Фокин А. Г., Шермергор Т. Д. Эффективные модули упругости композита, составленного из анизотропных слоев // Мех. полимеров. — 1975. — № 3. — С. 408.
23. Vandeurzen Ph., Ivens J., Verpoest I. A three-dimensional micro-mechanical analysis of woven-fabric composites. I. Geometric analysis // Compos. Sci. Technol. — 1996. — Vol. 56. — P. 1303–1315.
24. Vandeurzen Ph., Ivens J., Verpoest I. A three-dimensional micro-mechanical analysis of woven-fabric composites: II. Elastic analysis // Compos. Sci. Technol. — 1996. — Vol. 56. — P. 1317–1327.
25. Naik N. K., Ganesh V. K. Prediction of on-axes elastic properties of plain weave fabric composites // Compos. Sci. Technol. — 1992. — Vol. 45. — P. 135–152.
26. Hahn H. T., Pandey R. A micromechanics model for thermo-elastic properties of plain weave fabric composites // J. Eng. Mater. Technol. — 1994. — Vol. 116. — P. 517–523.
27. Aitharaju V. R., Averill R. C. Three-dimensional properties of woven-fabric composites // Compos. Sci. Technol. — 1999. — Vol. 59. — P. 1901–1911.
28. Деев И. С., Каблов К. Н., Кобель Л. П., Чурсова Л. В. Исследование методом сканирующей электронной микроскопии деформации микрофазовой структуры полимерных матриц при механическом нагружении // Труды ВИАМ. — 2014. — № 7. — Ст. 06.
29. Garoz D., Gilabert F. A., Sevenois R. D. B., Spronk S. W. F., Van Paepegem W. Material parameter identification of the elementary ply damage mesomodel using virtual micro-mechanical tests of a carbon fiber epoxy system // Composite Structures. — 2017. — Vol. 181. — P. 391–404.

30. Naya F., Lopes C. S., González C., Llorca J. Computational micromechanics strategies for the analysis of failure in unidirectional composites // Numerical Modelling of Failure in Advanced Composite Materials. — 2015. — P. 411–433.
31. Böhm H. J., Eckschlager A., Han W. Multi-inclusion unit cell models for metal matrix composites with randomly oriented discontinuous reinforcements // Comput. Mater. Sci. — 2002. — Vol. 25. — P. 42-53.
32. Segurado J., González C., Llorca J. A numerical investigation of the effect of particle clustering on the mechanical properties of composites // Acta Mater. — 2003. — Vol. 51. — P. 2355-2369.
33. González C., Llorca J. Mechanical behavior of unidirectional fiber-reinforced polymers under transverse compression: Microscopic mechanisms and modeling // Compos. Sci. Technol. — 2007. — Vol. 67. — P. 2795–2806.
34. Mandell J. F., Chen J. H., McGarry F. J. A microdebonding test for in situ assessment of fibre/matrix bond strength in composite materials // Int. J. Adhes. Adhes. — 1980. — Vol. 1. — P. 40–44.
35. Zidi M., Carpentier L., Chateauminois A., Sidorof F. Interface characterization in fiber-reinforced polymer–matrix composites // Compos. Sci. Technol. — 2000. — Vol. 60. — P. 429–436.
36. Rollin M., Jouannigot M. S., Lamon J., Pailler R. Characterization of fibre/matrix interfaces in carbon/carbon composites // Compos. Sci. Technol. — 2009. — Vol. 69. — P. 1442–1449.
37. Dzenis Y. A., Qian J. Analysis of micro damage evolution histories in composites // Int. J. Solids Struct. — 2001. — Vol. 38, No. 10. — P. 1831–1854.
38. Tsai S. W., Hahn H. T. Introduction to composite materials. Lancaster, PA: Technomic Publishing Company; 1980. — 319 p.
39. Reifsnider K. L. Modeling of the interphase in polymer-matrix composite material systems // Composites. — 1994. — Vol. 25, No. 7. — P. 461–469.

40. Paipetis A., Galiotis C. Modelling the stress transfer efficiency of carbon-epoxy interfaces // *Proc. R. Soc. A.* — 2001. — Vol. 457. — P. 1555–1577.
41. Dávila C. G., Camanho P. P., Rose C. A., Pinho S. T. Failure Criteria for FRP Laminates // *Journal of Composite Materials.* — 2005. — Vol. 39, No. 4. — P. 323–345.
42. Pinho S. T., Iannucci L., Robinson P. Physically-based failure models and criteria for laminated fibre-reinforced composites with emphasis on fibre kinking: Part I: Development // *Compos. Part A.* — 2006. — Vol. 37. — P. 63–73.
43. Catalanotti G., Sebaey T. A. An algorithm for the generation of three-dimensional statistically Representative Volume Elements of unidirectional fibre-reinforced plastics: Focusing on the fibres waviness // *Compos. Struct.* — 2019. — Vol. 227. — Article 111272.
44. Huang Z. M. The mechanical properties of composites reinforced with woven and braided fabrics // *Compos. Sci. Technol.* — 1999. — Vol. 60. — P. 479–498.
45. Scida D., Aboura Z., Benzeggagh M. L., Bocherens E. A micro-mechanics model for three-dimensional elasticity and failure of woven-fiber composite materials // *Compos. Sci. Technol.* — 1999. — Vol. 59, No. 4. — P. 505–517.
46. Chou T. W., Ito M. An analytical and experimental study of strength and failure behavior of plain weave composites // *Journal of Composite Materials.* — 1998. — Vol. 32, No. 1. — P. 2–30.
47. Ishikawa T., Chou T. W. One-dimensional micromechanical analysis of woven-fabric composites // *AIAA Journal.* — 1983. — Vol. 21, No. 12. — P. 1714–1721.
48. Ishikawa T., Chou T. W. Stiffness and strength behavior of woven-fabric composites // *Journal of Materials Science.* — 1982. — Vol. 17, No. 9. — P. 3211–3220.
49. Кулагина Г. С., Коробаева А. В., Ильичев А. В., Железина Г. Ф. Физические и физико-механические свойства антифрикционного органопластика

на основе комбинированного тканного наполнителя и эпоксидного связующего // Труды ВИАМ. — 2017. — № 10 (58). — С. 69–78.

50. Blackletter D. M., Walrath D. E., Hansen A. C. Modeling damage in a plain weave fabric-reinforced composite material // Journal of Composite Technologies and Research. — 1993. — Vol. 15. — P. 136–142.

51. Barbero E. J., Lonetti P., Sikkil K. K. Finite element continuum damage modeling of plain weave reinforced composites // Composites Part B: Engineering. — 2006. — Vol. 37, No. 2. — P. 137–147.

52. Lomov S. V., Ivanov D., Truong T. C., Verpoest I., Baudry F., Vanden Bossche K., Xie H. Experimental methodology of study of damage initiation and development in textile composites in uniaxial tensile test // Composites Science and Technology. — 2008. — Vol. 68, No. 12. — P. 2340–2349.

53. Daggumati S., van Paepegem W., Degrieck J., Xu J., Lomov S. V., Verpoest I. Local damage in a 5-harness satin weave composite under static tension: Part II – Meso-FE modelling // Composites Science and Technology. — 2010. — Vol. 70, No. 13. — P. 1926–1933.

54. Фудзии Т., Дзако М. Механика разрушения композиционных материалов / Пер. с японского. — М.: Мир, 1982. — 232 с.

55. Clarke D. A., Bader M. Q. Direct observation of fiber fracture in a model composite // J. Mater. Sci. Lett. — 1986. — Vol. 5, No. 9. — P. 903–904.

56. Лурье С. А., Потупчик Е. М., Дудченко А. А., Семернин А. В. Применение градиентных моделей механики сред к моделированию поврежденности и разрушения материалов // Конструкции из композиционных материалов. — 2007. — № 3. — С. 7–12.

57. Barbero E. J., Barbero J. C., Ugena C. N. Analytical solution for plane stress/strain deformation of laminates with matrix cracks // Composite Structures. — 2015. — Vol. 132. — P. 621–632.

58. Barbero J., Barbero J. C. Analytical solution for bending of laminated composites with matrix cracks // *Composite Structures*. — 2016. — Vol. 135. — P. 140–155.
59. Fiedler B., Hojo M., Ochiai S., Schulte K., Andoc M. Failure behavior of an epoxy matrix under different kinds of static loading // *Composites Science and Technology*. — 2001. — Vol. 61. — P. 1615–1624.
60. Дудченко А. А., Лурье С. А. Моделирование процессов роста поврежденности и деградации механических свойств слоистых композитов. — М.: Изд-во МАИ, 2019. — 160 с.
61. Канаун С. К., Чудовский А. И. О квазихрупком разрушении // *Механика твердого тела*. — 1970. — № 3. — С. 185–186.
62. Канаун С. К., Чудовский А. И. О разрушении деформируемых тел // *Прикладная механика и техническая физика*. — 1970. — № 3. — С. 105–110.
63. Soborejo A. B. O. Use of entropy principles in estimating reliability functions for creep rupture characteristics of engineering materials at high temperatures // *Proceedings of the International Conference on Strength of Metals and Alloys, Tokyo*, 1967. — Sendai, 1968. — P. 252–256.
64. Ladeveze P., Le Dantec E. Damage modelling of the elementary ply for laminated composites // *Composites Science and Technology*. — 1992. — Vol. 43. — P. 257–267.
65. Межслойные эффекты в композиционных материалах / Под ред. Н. Пэйгано. — М.: Мир, 1993. — 346 с.
66. Болотин В. В. Дефекты типа расслоений в конструкции из композиционных материалов // *Механика композиционных материалов*. — 1984. — № 2. — С. 239–255.

67. Drzal L. T., Madhucar M. Fiber-matrix adhesion and relationship to composite mechanical properties // *Journal of Materials Science*. — 1993. — Vol. 28. — P. 569–610.
68. Трунин Ю. П. Модели статической прочности конструкции с концентраторами напряжений, изготовленные из полимерных композиционных материалов со встроенными стопперами трещин // *Ученые записки ЦАГИ*. — 1993. — № 1. — С. 145–156.
69. Ушаков А. Е., Подлипная Т. Г. Экспериментальное исследование прочности углепластиковых панелей со стопперами трещин при наличии конструктивных вырезов // *Механика композиционных материалов*. — 1987. — № 3. — С. 493–498.
70. Трунин Ю. П., Ушаков А. Е., Шалун Г. Б., Файзрахманов Н. Г. Экспериментальное исследование методов обеспечения эксплуатационной живучести углепластиковых конструкций при одноосном растяжении // *Механика композиционных материалов*. — 1986. — № 5. — С. 931–933.
71. Lemanski S. L., Wang J., Sutcliffe M. P. F., Potter K. D., Wisnom M. R. Damage mechanisms in composites under fatigue loading // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. — 2013. — Vol. 48. — P. 26–36.
72. Liang Y., Wang H., Gu X. In-plane shear response of unidirectional fiber reinforced and fabric reinforced carbon/epoxy composites // *Polymer Testing*. — 2013. — Vol. 32. — P. 594–601.
73. Rosen B. W., Dow N. F. Mechanics of failure of fibrous composites // *Fracture* / Ed. H. Liebowitz. — New York: Academic Press, 1972. — Vol. 7. — P. 300–366.
74. Rosen B. W. Tensile failure of fibrous composites // *AIAA Journal*. — 1964. — Vol. 2, No. 10. — P. 1985–1991.

75. Васильев В. В., Тарнопольский Ю. М. Композитные материалы: Справочник. — М.: Машиностроение, 1990. — 512 с.
76. Vasiliev V. V., Morozov E. V. Advanced mechanics of composite materials and structural elements. — 3rd ed. — Amsterdam: Elsevier, 2013. — 832 p.
77. Harris B. A historical review of the fatigue behavior of fibre-reinforced plastics // Fatigue in composites / Ed. B. Harris. — Cambridge: Woodhead Publishing Ltd and CRC Press, 2003. — P. 1–35.
78. Jain J. R., Ghosh S. Damage evolutions in composites with a homogenization-based continuum damage mechanics model // International Journal of Damage Mechanics. — 2009. — Vol. 18, No. 6. — P. 533–568.
79. Кривобродов В.С., Лисковский А.М. Энергоемкость процесса разрушения и прочность композиционных материалов. — 1987. — Т6. — С. 999-1006.
80. Highsmith A. L., Reifsnider K. L. Stiffness-Reduction Mechanisms in Composite Laminates // Damage in Composite Materials / Ed. K. L. Reifsnider. — ASTM STP No. 775. — Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1982. — P. 103–117.
81. Crossman F. W., Wang A. S. D. The dependence of transverse cracking and delamination on ply thickness in graphite/epoxy laminates // Damage in Composite Materials / Ed. K. L. Reifsnider. — ASTM STP No. 775. — Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1982. — P. 118–139.
82. Ромалис Н. Б., Тамуж В. П. Разрушение структурно-неоднородных тел. — Рига: Зинатне, 1989. — 224 с.
83. Ле Ким Кыонг, Лурье С.А., Дудченко А.А. Об оценке трещиностойкости при межслойном разрушении слоистых композитов. — М.: Механика композиционных материалов и конструкций. — 2012. — № 1. — Т. 18. — с. 83-91.

84. Митрофанов О.В., Шкурин М.В., Дудченко А.А. Оценка геометрически нелинейного поведения коротких поверхностных дефектов анизотропной структуры в композиционных панелях при сжатии // инженерный журнал: наука и инновации. — 2024. — №4 (148).

85. Дудченко А. А., Кончая Рохас Р. А. Рациональное проектирование конструкций отсека фюзеляжа гражданских самолетов из композиционных материалов. // Конструкции из композиционных материалов. — 2011. №2, — С. 21-34.

86. Дудченко А.А., Нуримбетов А. У. Деформация естественно-закрученных многослойных анизотропных лопаток авиационных двигателей. // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. Москва: ФГУП «ВИМИ» — 2015. — № 2. — С. 46–54.

87. Маскайкина А. А., Дудченко А. А. Алгоритм расчета накопления повреждений на примере узла крепления вертолетной лопасти // Инженерный журнал: наука и инновации. — 2021. — № 7(115).

88. Димитриенко Ю. И., Юрин Ю. В. Конечно-элементное моделирование повреждаемости и долговечности композитных элементов конструкций с дефектами типа расслоения // Математическое моделирование и численные методы. — 2017. — № 3. — С. 49–70.

89. Heslehurst R. B. Defects and Damage in Composite Materials and Structures. — Boca Raton: CRC Press, 2014. — 154 p.

90. Ryabov A. A., Maslov E. E., Strelets D. Y., Slobodchikov V. G. Computational Analysis of Compressed Stiffened Composite Panels with Impact Damage. Aerospace 2019. 6(3), 25.

91. Song D., Li Y., Zhang K., Cheng H., Liu P., Hu J. Micromechanical analysis for microscopic damage initiation in fiber/epoxy composite during interference-fit pin installation // Mater. Design. — 2016. — Vol. 89. — P. 36–49.

92. Нурымбетов А. У., Дудченко А. А. Современное состояние вопроса анализа собственных частот и форм колебаний конструкции из композиционных материалов // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. — 2018. — № 4. — С. 323–336.
93. Стрижиус В. Е. Методы расчета усталостной долговечности элементов авиаконструкций. — М.: Машиностроение, 2012. — 272 с.
94. Стебенев В. Н. Методика оценки сопротивления усталости соединений // Сопротивление усталости элементов конструкции. — Труды ЦАГИ, 1981, т. 2117, с. 42–54.
95. Портнов Е. А., Блазнов А. Н., Савин В. Ф., Старцев О. В. Исследование усталостной прочности армированных неорганическими волокнами полимерных композиционных материалов // Научно-технический вестник Поволжья. — 2014. — № 6. — С. 310–313.
96. Микельсон М. Я. Малоцикловая усталость армированных композитов // В кн.: Разрушение конструкций из композитных материалов. — Рига: Зинатне, 1986. — 234 с.
97. С.В. Панин, А.А. Богданов, В.О. Алексенко, С.А. Бочкарева, П.С. Любутин, И.Л. Панов, Д. Тянь. Анализ деградации свойств при усталости слоистых полимерных композитов (полиэфирэфиркетон/полиэфиримид, ПЭЭК/ПЭИ) и препрега на основе углеволоконной ткани с использованием корреляции цифровых изображений. Физическая мезомеханика 2024. 27, №3. — С. 58-78.
98. Тикутэн Т., Фудзии Т., Оцуки М. // Доклады 3-го симпозиума по облегчению конструкций. — 1962. — Т. 11.
99. An Z.-Q., Shu M.-S., Cheng Y.-J., Guo X., Cheng X.-Q. Tensile fatigue properties of composite/metal bolted joints with 3-pin and sleeves // Cailiao Gongcheng (Journal of Materials Engineering). — 2021. — Vol. 49, № 12. — P. 164–174.
100. Abaqus 2018 Analysis User's Guide / Ed. Simulia. — 2018.

101. Каркашадзе Г. Г. Механическое разрушение горных пород [Mechanical destruction of rocks]. — Москва: Московский государственный горный университет, 2004. — 221 с.
102. Digimat 2022.2 Getting Started Guide / Ed. Simulia. — 2018.
103. Barbero E. J. Finite Element Analysis of Composite Materials using Abaqus. — Boca Raton: CRC Press, —2013, — 407 p.
104. Pahr D. H., Böhm H. J. Assessment of Mixed Uniform Boundary Conditions for Predicting the Mechanical Behavior of Elastic and Inelastic Discontinuously Reinforced Composites // Computer Modeling in Engineering & Sciences. — 2008. — Vol. 34, No. 2. — P. 117–136.
105. Tian W., Qi L., Chao X., Liang J., Fu M. Periodic boundary condition and its numerical implementation algorithm for the evaluation of effective mechanical properties of the composites with complicated micro-structures // Composites Part B: Engineering. — 2019. — Vol. 162. — P. 1–10.
106. Xia Z., Zhang Y., Ellyin F. A unified periodical boundary conditions for representative volume elements of composites and applications // International Journal of Solids and Structures. — 2003. — Vol. 40. — P. 1907–1921.
107. Ladevèze P., Lubineau G. On a damage mesomodel for laminates: micromechanics basis and improvement // Mechanics of Materials. — 2003. — Vol. 35. — P. 763–775.
108. Kleisner V., Zemčík R., Kroupa T. Identification and verification of the composite material parameters for the Ladevèze damage model // Materiali in Tehnologije. — 2011. — Vol. 45. — P. 567–570.
109. Ladevèze P. A damage computational method for composite structures // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. — 1992. — Vol. 44. — P. 79–87.
110. Sun Q., Zhou G., Meng Z., Guo H., Chen Z., Liu H., Kang H., Keten S., Su X. Failure criteria of unidirectional carbon fiber reinforced polymer composites informed by a computational micromechanics model // Composites Science and Technology. —

2019. — Vol. 172. — P. 59–81.

111. Гриневич Д. В., Яковлев Н. О., Славин А. В. Критерии разрушения полимерных композиционных материалов // Научно-технический журнал «Вестник ВИАМ». — 2019. — № 7. — С. 92–111.

112. Tsai S. W., Wu E. M. A General Theory of Strength for Anisotropic Materials // Journal of Composite Materials. — 1971. — Vol. 5, No. 1. — P. 58–80.

113. Шульдешова П. М., Деев И. С., Железина Г. Ф. Особенности разрушения арамидных волокон СВМ и конструкционных органопластиков на их основе // Труды ВИАМ. — 2016. — № 2 (38). — С. 11.

114. Zhelezina G. F., Gulyaev I. N., Soloveva N. A. Aramide organic plastics of new generation for aviation designs // Aviatsionnye Materialy i Tekhnologii. — 2017. — No. S. — P. 368–378.

115. Старцев В. О., Антипов В. В., Славин А. В., Горбовец М. А. Современные отечественные полимерные композиционные материалы для авиастроения (обзор) // Авиационные материалы и технологии. — 2023. — № 2 (71). — С. 10.

116. Токарев А. В. Супернити НПП «Термотекс» // Материалы 2-й Междунар. науч.-практ. конф. «Полимерные материалы XXI века». — М.: ТПП РФ, 2017. — С. 1–16.

117. Морозова Т. В., Дворцевая А. М., Куприянова Е. В., Осипчик В. С. Исследование перспективных арамидных волокон Русар-С в средствах индивидуальной бронезащиты // Успехи в химии и химической технологии. — 2019. — № 6. — С. 65–67.

118. Cheng M., Chen W., Weerasooriya T. Mechanical properties of Kevlar KM2 single fiber // Journal of Engineering Materials and Technology. — 2005. — Vol. 127, No. 2. — P. 197–203.

119. Петрова А. П., Дементьева Л. А., Лукина Н. Ф., Чурсова Л. В. Клеевые связующие для полимерных композиционных материалов на угле и стеклонаполнителях // Труды ВИАМ. — 2015. — № 9. — С. 11.

120. Акулин П. В., Гаврилов Г. А. Влияние структуры многослойного композиционного материала на деградацию жесткостных характеристик конструкции летательного аппарата // Вестник Московского авиационного института. — 2023. — № 3. — С. 78–84.

121. Старцев В. О., Антипов В. В., Славин А. В., Горбовец М. А. Современные отечественные полимерные композиционные материалы для авиастроения (обзор) // Авиационные материалы и технологии. — 2023. — № 2 (71). — С. 122–144.

122. Насонов Ф. А., Кулагина Г. С., Демина А. С., Железина Г. Ф., Морозов Б. Б., Соловьева Н. А., Шульдешова П. М. Применение композитов со специальными самосмазывающимися антифрикционными покрытиями в авиационной отрасли // Материалы XLIII Всероссийской конференции «Наука и технологии»: в 2 т. — М.: РАН, 2023. — Т. 1. — С. 21–27.

123. Акулин П.В. Накопление повреждений в композиционных панелях при малоцикловом нагружении // Вестник МАИ. — 2023. — №2. — С. 84-90.

124. Акулин П.В., Насонов Ф.А. Дegradация свойств композиционного материала при многоцикловом нагружении // Вестник МГТУ Баумана «машиностроение». — 2025. — №1. — С. 4-13.

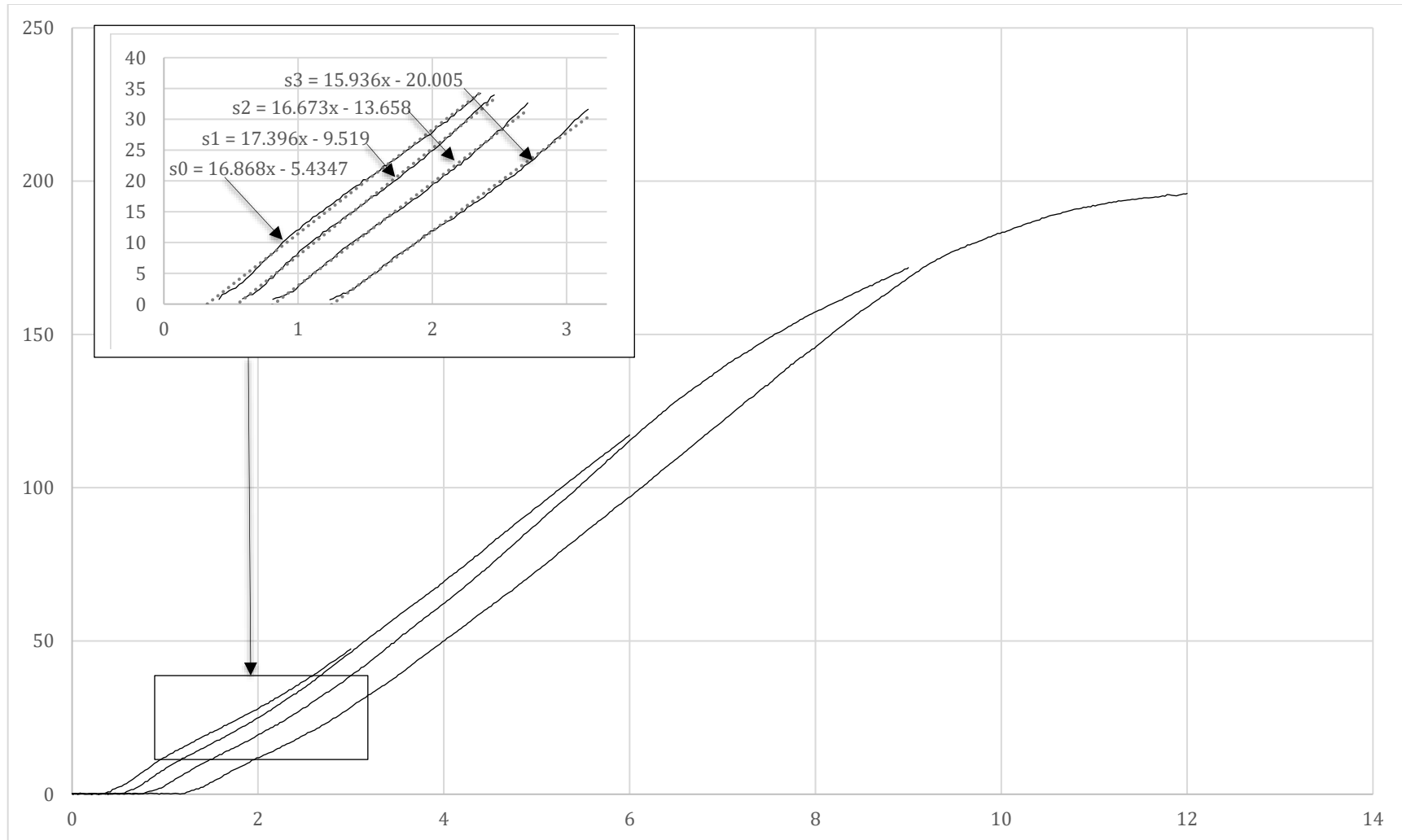
ПРИЛОЖЕНИЕ А РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ КОНСТРУКТИВНО ПОДОБНЫХ ОБРАЗЦОВ

Рисунок 6.1 Диаграмма сила F (кгс) в траверсе от перемещений толкателя Δy (мм). Образец А2-1

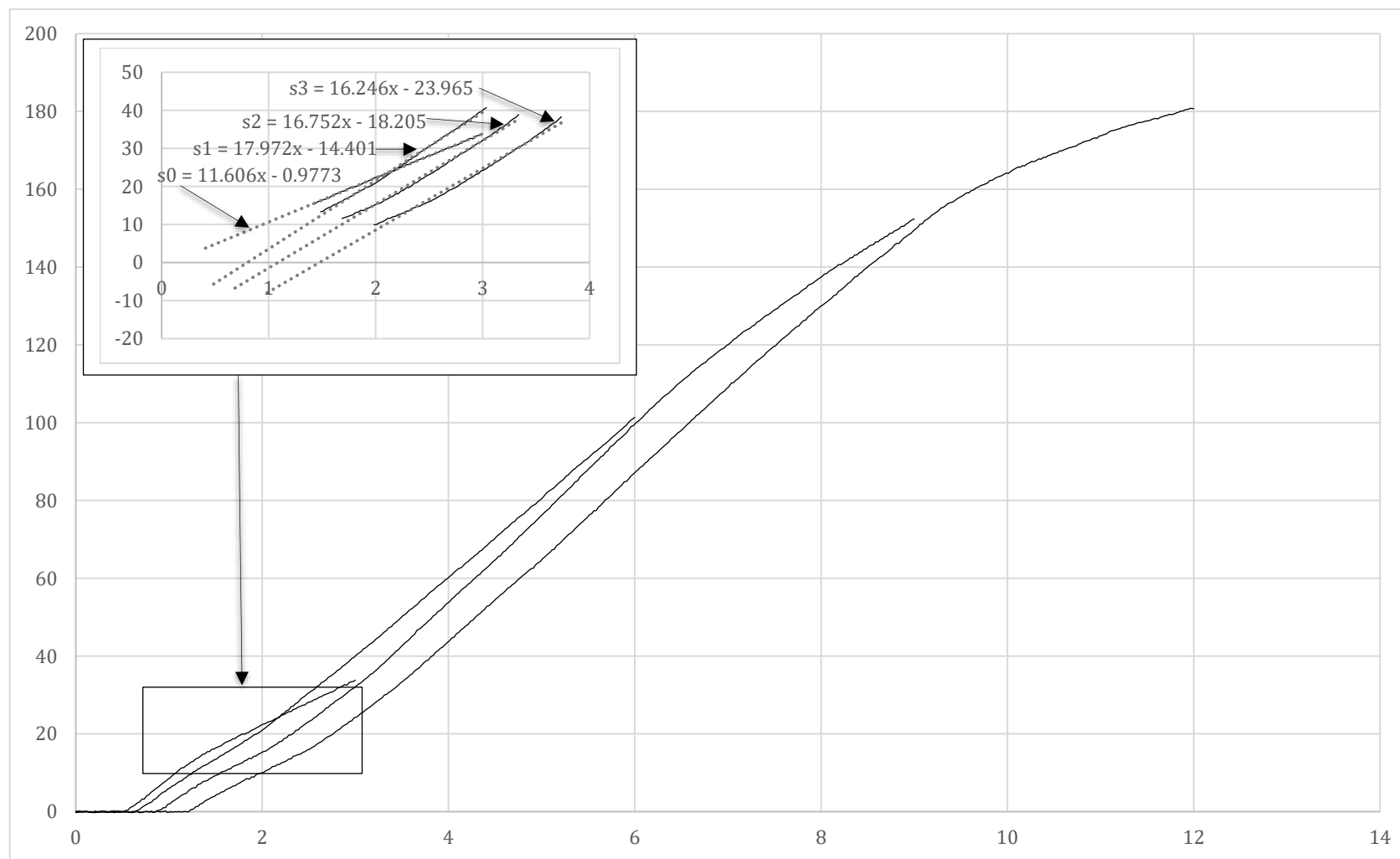


Рисунок 6.2 Диаграмма сила F (кгс) в траверсе от перемещений толкателя Δy (мм). Образец А2-2

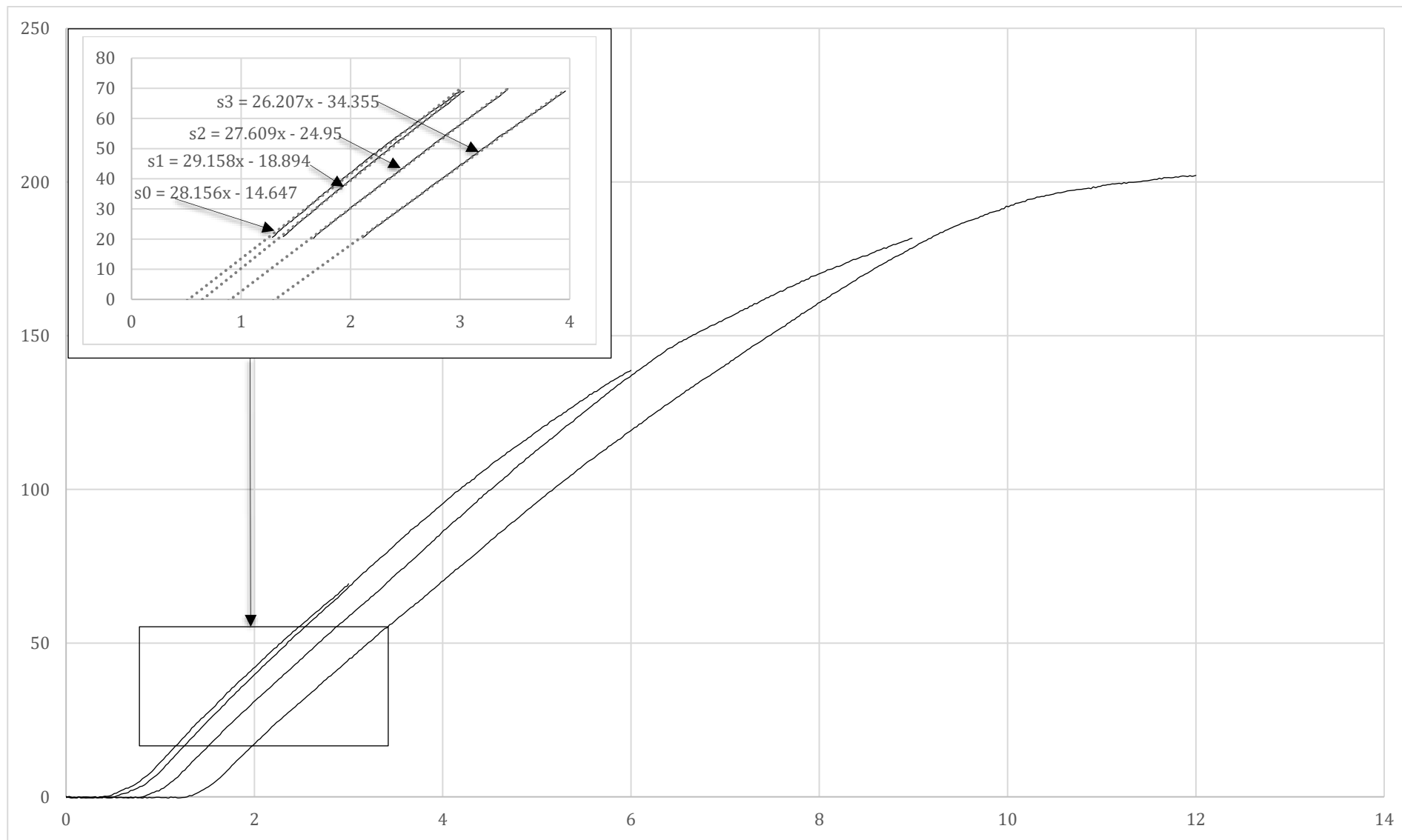


Рисунок 6.3 Диаграмма сила F (кгс) в траверсе от перемещений толкателя Δy (мм). Образец А2-3

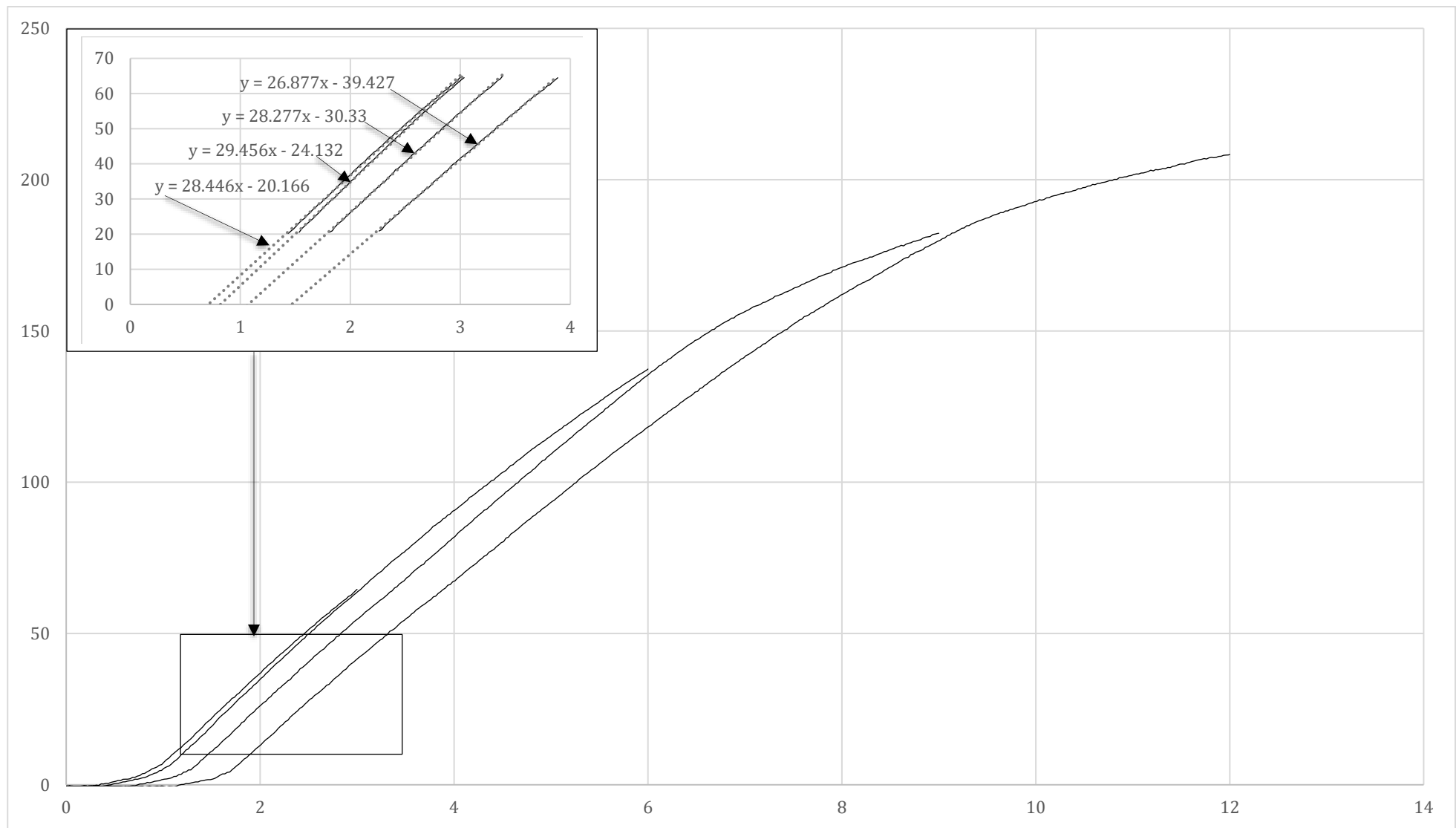


Рисунок 6.4 Диаграмма сила F (кгс) в траверсе от перемещений толкателя Δy (мм). Образец А2-4

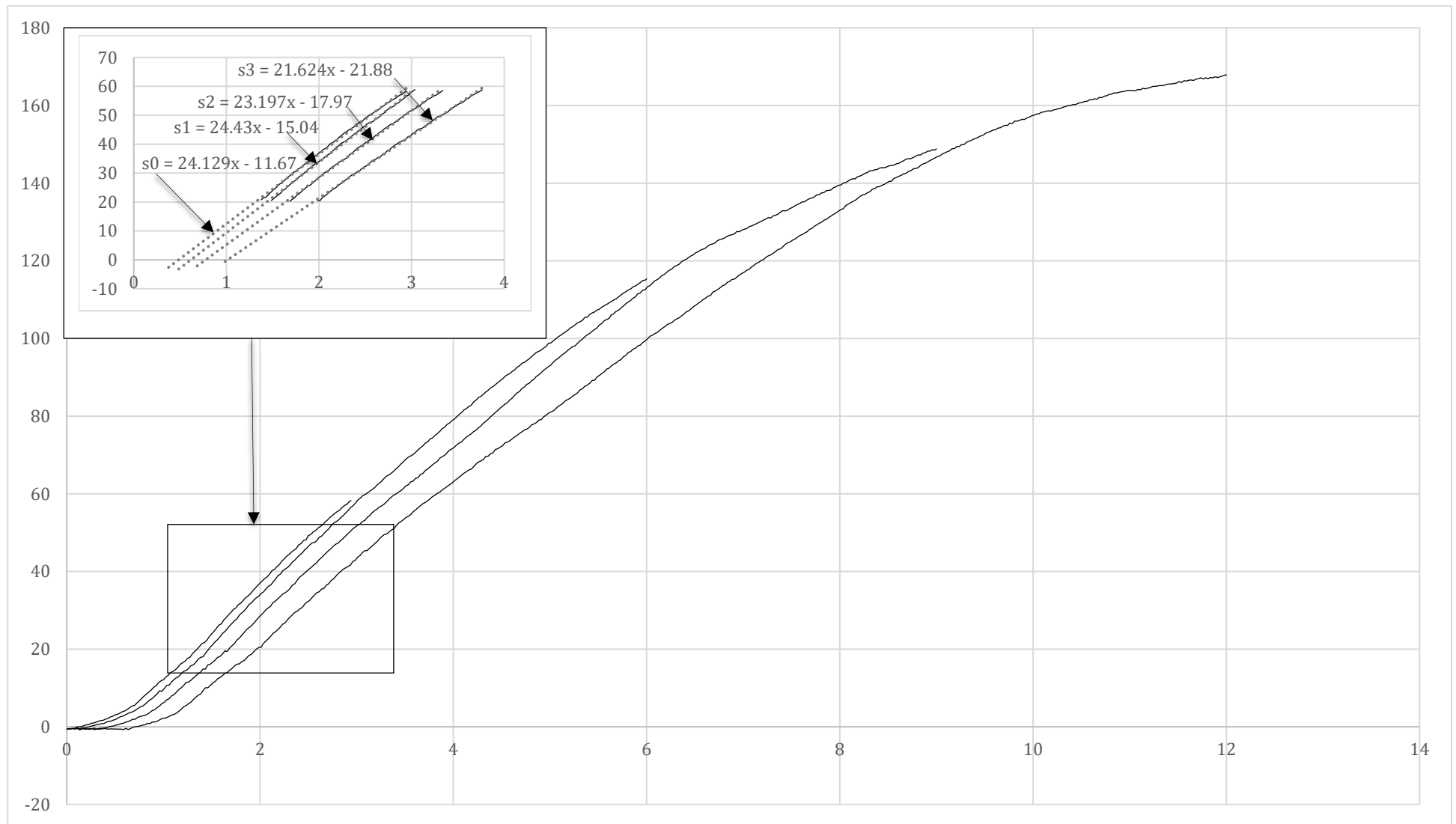


Рисунок 6.5 Диаграмма сила F (кгс) в траверсе от перемещений толкателя Δy (мм). Образец А1-1

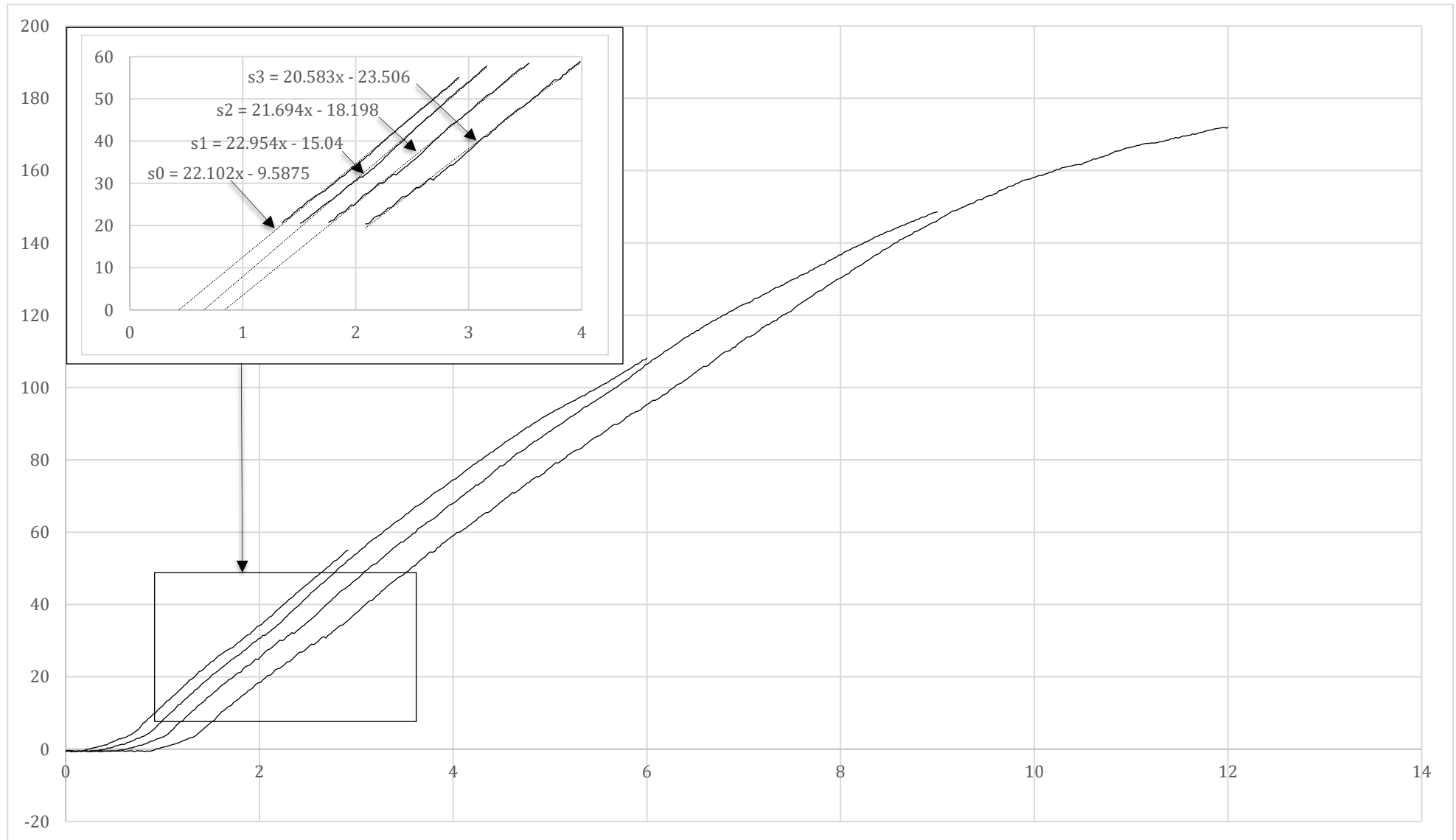


Рисунок 6.6 Диаграмма сила F (кгс) в траверсе от перемещений толкателя Δy (мм). Образец А1-2

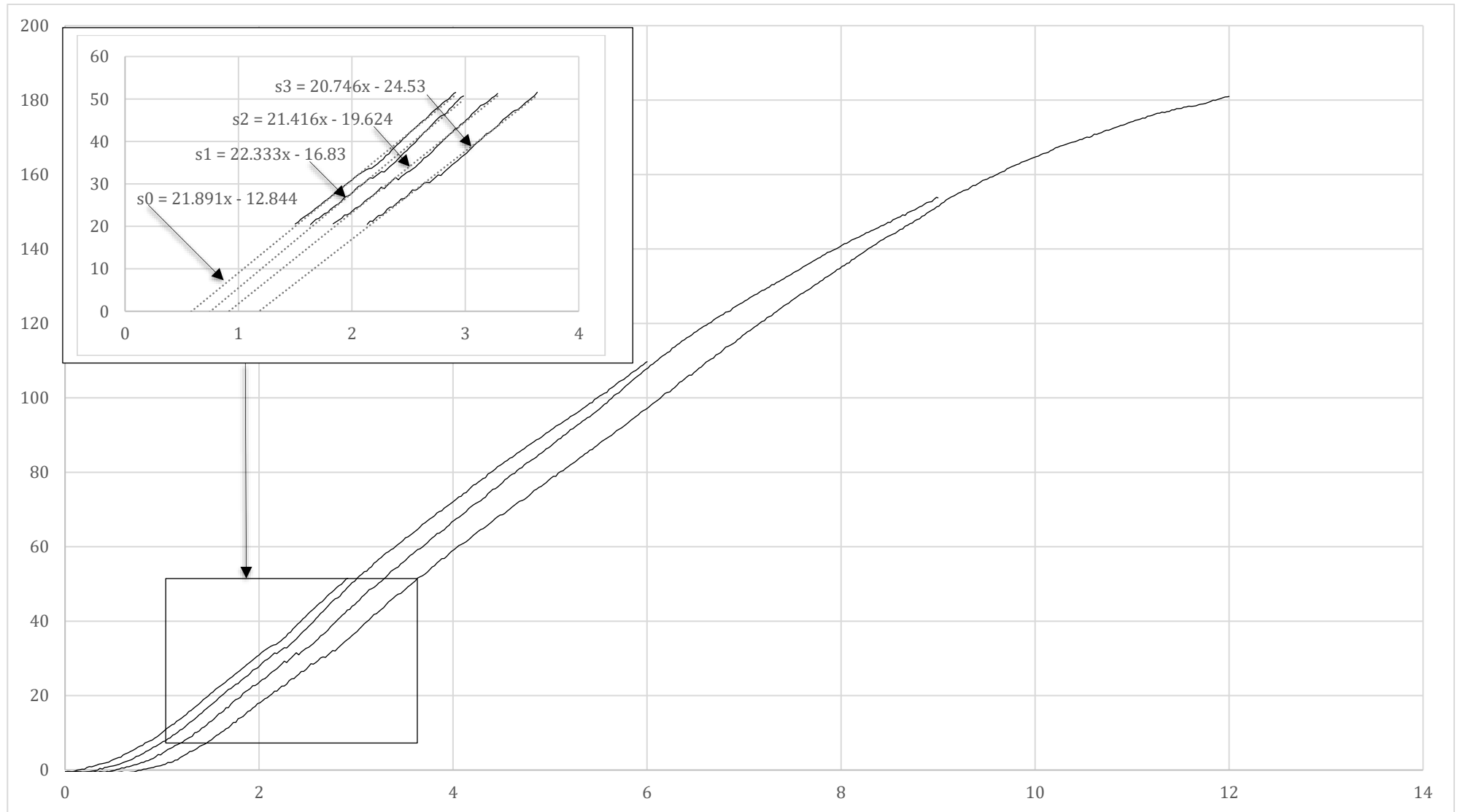


Рисунок 6.7 Диаграмма сила F (кгс) в траверсе от перемещений толкателя Δy (мм). Образец А1-3

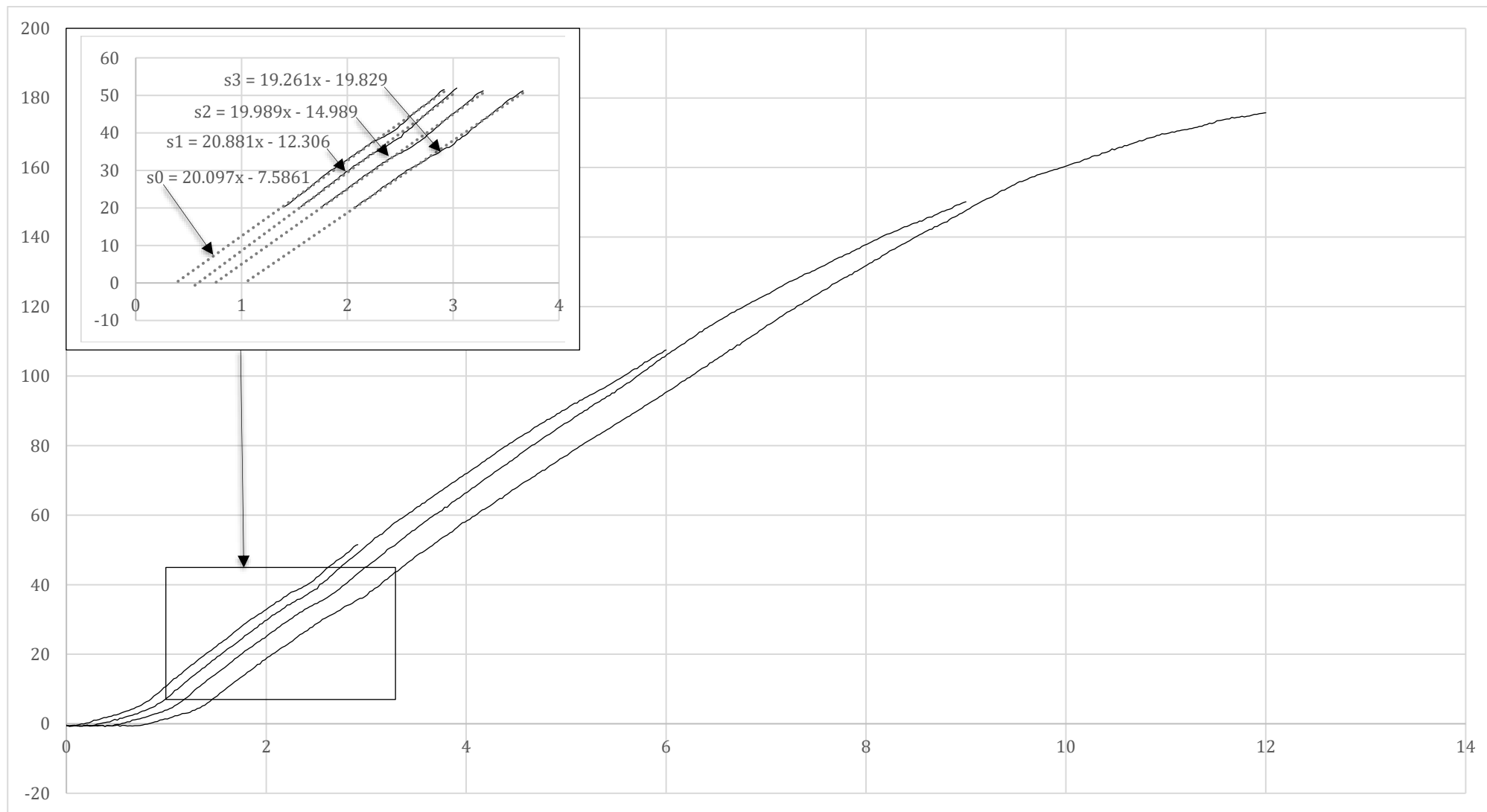


Рисунок 6.8 Диаграмма сила F (кгс) в трассе от перемещений толкателя Δu (мм). Образец А1-4

ПРИЛОЖЕНИЕ Б АЛГОРИТМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ

```

subroutine umat(stress, statev, ddsdde, sse, spd, scd, rpl,
1 ddsddt, drplde, drpldt, stran, dstran, time, dtime, temp,
2 dtemp, predef, dpred, cmname, ndi, nshr, ntens, nstatv, props,
3 nprops, coords, drot, pnnewdt, celent, dfgrd0, dfgrd1, noel,
4 npt, layer, kspt, kstep, kinc)
include 'aba_param.inc'
character*8 cmname
dimension stress(ntens), statev(nstatv), ddsdde(ntens, ntens),
1 ddsddt(ntens), drplde(ntens), stran(ntens), dstran(ntens),
2 predef(1), dpred(1), props(nprops), coords(3), drot(3, 3),
3 dfgrd0(3, 3), dfgrd1(3, 3)
dimension eelas(6),eplas(6),flow(6)
parameter(zero=0.d0, one=1.d0, two=2.d0, three=3.d0, six=6.d0,
1 enumax=.4999d0, newton=100.d0, toler=1.0d-6)

```

```

flag=statev(14)
WW=statev(15)
smises=statev(16)
syield=statev(17)
smises10=statev(18)
flag2=statev(20)
emod=props(1)

```

! Блок начальных данных:

emod2=props(1)	(Модуль упругости)
enu=props(2)	(Коэф. Пуассона)
syield1=props(3)	(Предел текучести при растяжении)
syield2=props(4)	(Предел текучести при сжатии)
hard=props(5)	(Линейный коэф. упрочнения)
ST=props(6)	(Предельные напряжения при растяжении)
SC=props(7)	(Предельные напряжения при сжатии)
c1=props(8)	(Параметр определяемый из эксперимента формула 2.12)
c2=props(9)	(Параметр определяемый из эксперимента формула 2.12)
F66=props(10)	(Параметр определяемый из эксперимента формула 2.33)
F1=props(11)	(Параметр определяемый из эксперимента формула 2.33)

```

SS2=sqrt(ST*SC)
syielmax=sqrt(syield2*syield1)
syield=(max(syield,syielmax))

```

```

emod2=props(1)
emod2=statev(21)

```

```

if(flag.ge.one)then
emod=props(1)*(1-c1*((smises10/(syielmax))**c2))
emod=min(emod,emod2)
end if

```



```

        if(WW.gt.SS2)then
            flag2=1.570796325
        end if

        statev(20)=flag2

        if(flag2.GT.zero)then
            emod=one
            hard=0
            syield=zero
            deqpl=zero
        end if

        statev(21)=emod

        ebulk3=emod/(one-two*enu)
        eg2=emod/(one+enu)
        eg=eg2/two
        eg3=three*eg
        elam=(ebulk3-eg2)/three

        do k1=1, ndi
            do k2=1, ndi
                ddsdde(k2, k1)=elam
            end do
            ddsdde(k1, k1)=eg2+elam
        end do
        do k1=ndi+1, ntens
            ddsdde(k1, k1)=eg
        end do

        call rotsig(statev(    1), drot, eelas, 2, ndi, nshr)
        call rotsig(statev(ntens+1), drot, eplas, 2, ndi, nshr)
        eqplas=statev(1+2*ntens)

        do k1=1, ntens
            do k2=1, ntens
                stress(k2)=stress(k2)+ddsdde(k2, k1)*dstran(k1)
            end do
            eelas(k1)=eelas(k1)+dstran(k1)
        end do

        statev(1)=eelas(1)
        statev(2)=eelas(2)
        statev(3)=eelas(3)
        statev(4)=eelas(4)
        statev(5)=eelas(5)
        statev(6)=eelas(6)

        smises1=stress(1)**2+stress(2)**2+stress(3)**2-stress(1)*stress(2)-stress(1)*stress(3)-
        stress(2)*stress(3)

```

```

smises2=3*(stress(4)**2+stress(5)**2+stress(6)**2)
smises3=(syield1-syield2)*(stress(1)+stress(2)+stress(3))
smises=sqrt(smises1+smises2-smises3)
statev(16)=smises

smises10=sqrt(smises1+smises2-smises3)
statev(18)=smises10

smises22=3*(F66*(stress(4)**2)+F66*(stress(5)**2)+F66*(stress(6)**2))
WW=sqrt(smises1+smises22-F1*smises3)
statev(15)=WW

if (smises.gt.(one+toler)*syield) then
    flag=10
    statev(14)=flag
shydro=((stress(1)+stress(2)+stress(3))/three)

do k1=1,ndi
    flow(k1)=((stress(k1)-shydro)/smises)
end do
do k1=ndi+1, ntens
    flow(k1)=(stress(k1)/smises)
end do

    deqpl=zero
    kewton=1
    rhs=(smises-eg3*deqpl-syield)
    do while (kewton.lt.newton.and.abs(rhs).gt.toler*syield)
        syield=(syield+hard*deqpl)
        rhs=smises-eg3*deqpl-syield
        deqpl=deqpl+rhs/(eg3+hard)
        kewton=kewton+1
    end do
    statev(19)=deqpl
    statev(22)=rhs
    statev(17)=syield

do k1=1,ndi
    stress(k1)=(flow(k1)*syield+shydro)
    eplas(k1)=eplas(k1)+three/two*flow(k1)*deqpl
    eelas(k1)=eelas(k1)-three/two*flow(k1)*deqpl
end do
do k1=ndi+1,ntens
    stress(k1)=flow(k1)*syield
    eplas(k1)=eplas(k1)+three*flow(k1)*deqpl
    eelas(k1)=eelas(k1)-three*flow(k1)*deqpl
end do

    eqplas=eqplas+deqpl
    spd=deqpl*(sqrt(syield2*syield1)+syield)/two

effg=eg*syield/smises

```

```

effg2=two*effg
effg3=three/two*effg2
efflam=((ebulk3-effg2)/three)
effhrd=(eg3*hard/(eg3+hard)-effg3)

do k1=1, ndi
  do k2=1, ndi
    ddsdde(k2, k1)=efflam
  end do
  ddsdde(k1, k1)=(effg2+efflam)
end do
do k1=ndi+1, ntens
  ddsdde(k1, k1)=effg
end do
do k1=1, ntens
  do k2=1, ntens
    ddsdde(k2, k1)=ddsdde(k2, k1)+effhrd*flow(k2)*flow(k1)
  end do
end do

      statev(7)=eplas(1)
      statev(8)=eplas(2)
      statev(9)=eplas(3)
      statev(10)=eplas(4)
      statev(11)=eplas(5)
      statev(12)=eplas(6)

      statev(1+2*ntens)=eqplas

end if

return
end

```