ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ НИЖЕГОРОДСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Н.И. ЛОБАЧЕВСКОГО»
(ННИМ НИЖЕГОРОДСКОГО УНИВЕРСИТЕТА)

На правах рукописи

КОЖАНОВ ДМИТРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ГИБКИХ ТКАНЫХ КОМПОЗИТОВ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук,
профессор
Любимов Александр Константинович

Нижний Новгород - 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение 3

Глава 1. Современное состояние применения и исследования тканых композитов .. 9

1.1. Области применения и основные преимущества композиционных материалов 9

1.2. Состояние современных моделей и методов прогнозирования поведения тканых композитов. Применимость к гибким композитам 13

1.3. Разработка моделей, необходимых для полного описания поведения гибких тканых композитов 19

Глава 2. Особенности исследуемого материала 22

2.1. Особенности внутренней геометрической структуры материала 23

2.2. Особенности материалов, используемых при создании гибких тканых композитов 26

2.3 Повреждения, возникающие в внутренней структуре материала при деформировании 29

Глава 3. Модели, основанные на применении метода конечных элементов 33

3.1 Модифицированная ламинатная модель гибких тканых композитов 33

3.2 Структурная модель периодического элемента гибких тканых композитов 40

Глава 4. Аналитическая модель гибких тканых композитов 45

Глава 5. Экспериментальные исследования и апробация предложенных моделей . 55

5.1. Результаты экспериментальных исследований 57

5.2. Апробация ламинатной модели 73

5.3. Апробация модели элементарной периодической ячейки 75

5.4. Апробация аналитической модели 77

Глава 6. Интеграция предложенной аналитической модели в систему ANSYS..... 89

Заключение 97

Список литературы 99

Введение

Диссертация направлена на развитие аналитических и численных моделей, описывающих поведение гибких тканых композитов при статическом растяжении с учетом особенностей их деформирования, и применение предложенных моделей для описания механического поведения исследуемых материалов.

Актуальность темы

Гибкие тканые (тканевые) композиционные материалы являются композицией армирующей ткани, имеющей внутреннюю структуру в виде переплетения армирующих нитей, и связующего материала. Нити ткани являются композиционным материалом, состоящим из армирующих волокон и гибкого связующего. Свойства гибких тканых композитов, как и любых композиционных материалов, существенно зависят от входящих в его состав компонент композита. Анализируя результаты исследований тканых композитов, проведенные отечественными и зарубежными учеными, такими как В.П. Багмунтов, В.Э. Вильдеман, Р.А. Каюмов, А.Р. Мангушева, Gaurav Nilakantat, J. W. Gillespie, I. Verpoest, S.V. Lomov и др., можно сделать вывод, что существенное влияние на механическое поведение рассматриваемых композитов оказывают вид армирующей ткани, ее укладка и размер нитей. Этот факт влечет за собой необходимость учета внутренней структуры материала при моделировании его механического поведения. Особенностью гибких тканых композитов является возможность формоизменения их внутренней структуры. Эта особенность связана с типом связующего материала, не ограничивающим формоизменение нитей, которые в процессе растяжения распрямляются в направлении действия внешней нагрузки. В процессе эксплуатации, изделия, выполненные из гибких тканых композитов, могут получить локальные повреждения. Этот факт влечет за собой

необходимость учета влияния локальных повреждений на дальнейшее механическое поведение материала изделия.

Большинство известных моделей поведения тканых композиционных материалов предложены для «жестких» композитов, ограниченных в возможности формоизменения внутренней структуры и содержащих в качестве связующего материала твердые полимеры или другие «жесткие» материалы, такие как эпоксидная смола, керамика, цемент, бетон и др. В литературе широко представлены особенности механического поведения «жестких» композитов с учетом локальных повреждений, накопления повреждений в процессе деформирования и усталости материала при циклических нагрузках. Применение этих моделей к гибким композитам влечет за собой существенное нарастание погрешности в описании их механического поведения. Поэтому, разработка моделей и методик построения моделей поведения гибких тканых композитов, учитывающих особенности исследуемых материалов, является актуальной и в настоящее время.

Степень разработанности темы

Предлагаемые в работе аналитические и численные модели, описывающие поведение гибких тканых композитов, основываются на подходах, применяемых в моделях «жестких» композитов, и дают возможность учета особенностей гибких тканых композитов. Численные модели адаптированы для учета особенностей гибких тканых композитов. Аналитическая модель является новой, оригинальной, рассматривается впервые и имеет возможность применения в системе ANSYS Mechanical APDL.

Цель и задачи диссертационной работы

Развитие методов исследования механического поведения гибких тканых композитов с учетом возможных локальных повреждений материала.

В процессе достижения поставленной цели были рассмотрены и решены следующие задачи:

- разработка новой аналитической модели и модификация численных моделей, описывающих поведение гибких тканых композитов при одноосном растяжении, учитывающие локальные повреждения материала;
- разработка методики проведения и проведение экспериментальных исследований предварительного повреждения материала для изучения влияния локального повреждения на механическое поведение исследуемых композитов;
- проведение экспериментальных исследований на статическое растяжение и разгрузку исследуемых материалов для апробации предложенных моделей и определения области их применимости;
- интеграция разработанной аналитической модели в систему ANSYS Mechanical APDL.

Научная новизна

- разработана новая аналитическая модель и модифицированы численные модели, описывающие поведение гибких тканых композитов при одноосном растяжении;
- разработана методика проведения экспериментальных исследований для изучения влияния локального повреждения материала на его механическое поведение;
- проведены и обработаны экспериментальные исследования на статическое растяжение и разгрузку поврежденных и неповрежденных образцов гибких тканых композитов, на основании которых установлено, что локальное повреждение исследуемых материалов, не приводящее к их

сквозному пробитию, незначительно влияет на механическое поведение материала;

- разработан модуль для интеграции разработанной аналитической модели в систему ANSYS Mechanical APDL и решена прикладная задача для верификации интегрированной модели.

Теоретическая значимость работы

Разработанные аналитическая и численные модели, их результаты, возможности и обоснования имеют существенное теоретическое значение для развития механики тканых композиционных материалов. Результаты проведенных исследований могут быть использованы при решении задач деформирования твердых тел, связанных с учётом изменения внутренней геометрической структуры материала и наличием необратимых деформаций.

Практическая ценность работы

Проведенные в диссертационной работе исследования, предложенные методики, модели и модуль интеграции аналитической модели в систему ANSYS Mechanical APDL находят практическое применение при описании механического поведения гибких тканых композитов.

Методология и методы диссертационного исследования

Аналитическое и численное моделирование процессов поведения гибких тканых композитов при статическом растяжении с учетом упругих и необратимых деформаций, использование метода конечных элементов и проведение натурных экспериментов.

Положения, выносимые на защиту:

1) аналитическая модель, описывающая поведение гибких тканых композитов при одноосном растяжении, учитывающая влияние предварительного локального повреждения материала;

2) модифицированные численные модели, описывающие поведение гибких тканых композитов при одноосном растяжении;

3) результаты экспериментальных исследований одноосного растяжения и разгрузки образцов гибких тканых композитов;

4) методики проведения и обработки результатов экспериментальных исследований;

5) результаты апробации предложенных моделей, описывающих поведение гибких тканных композитов;

6) модуль для интеграции разработанной аналитической модели в систему ANSYS Mechanical APDL.

Достоверность результатов обеспечивается использованием верифицированных аналитических и численных методов исследования, сравнением результатов расчетов с экспериментальными данными, использованием лицензионного программного обеспечения (лицензия ANSYS Academic Research «costomer #623640»).

Апробация работы

Основные результаты исследования были представлены на:

– XVIII, XIX и XX Нижегородской сессии молодых ученых. Технические науки. (Арзамас, 2013-2015 гг.);

– III, IV и V Всероссийском фестивале науки (Нижний Новгород, 2013-2015 гг.);

– II Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы прочности, динамики и ресурса» (Нижний Новгород, 2015 г.);

– Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы прочности, динамики, ресурса и оптимизации» (Нижний Новгород, 2016 г.).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 14 работ, в том числе 5 из них в изданиях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России [3,27,28,38,39].

Личный вклад автора заключается в модификации подходов, используемых в численных моделях «жестких» тканых композитов для гибких материалов [3, 27, 32, 34-36, 38] базирующейся на учете возможного формоизменения внутренней структуры материала, необратимых деформаций и учете предварительных повреждений материала. В разработке новой аналитической модели [28, 29-31, 33, 37, 39], описывающей поведение гибких тканых композитов с учетом предварительного повреждения и взаимодействия перекрестно-лежащих нитей, в проведении натурных экспериментов для апробации и оценки достоверности предложенных моделей [3, 27-39], в разработке модуля для интеграции аналитической модели в систему ANSYS Mechanical APDL и решении прикладной практической задачи для верификации интегрированной в ANSYS модели.

В совместных работах Берендееву Н.Н. принадлежит постановка задач и обсуждение результатов на начальных этапах исследования, Любимову А.К. принадлежит общее руководство исследованиями, анализ и обсуждение результатов.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы; содержит 70 рисунков, 18 таблиц, библиографический список из 154 наименований – всего 117 страниц.

Благодарности

Автор выражает благодарность Берендееву Н.Н. и Абросимову Н.А. за консультирование на различных этапах исследования при обработке, анализе и обсуждении результатов.

ГЛАВА 1. Современное состояние применения и исследований тканых композитов

1.1. Области применения и основные преимущества композиционных материалов

Комбинирование различных веществ остается сегодня одним из основных способов создания новых материалов. Композит — неоднородный сплошной материал, состоящий из двух или более компонентов с четкой границей раздела фаз, среди которых можно выделить армирующие элементы, обеспечивающие необходимые механические характеристики материала, и связующий материал, обеспечивающий совместную работу армирующих элементов [40]. В результате совмещения армирующих элементов и связующего материала образуется комплекс свойств композиции, не только отражающий исходные характеристики его компонентов, но и включающий в себя свойства, которыми изолированные компоненты не обладают. В частности, наличие границ раздела между армирующими элементами и матрицей существенно повышает трещиностойкость материала. В композитах, в отличие от однородных материалов, повышение статической прочности приводит не к снижению, а, как правило, к повышению характеристик вязкости разрушения [40].

В современном мире без композиционных материалов не обходится ни одна отрасль промышленности. Развитие энергетической, космической, химической, биотехнологической, строительной или любой другой отрасли промышленности затруднительно без современных материалов, к которым, в частности, относятся композиты. Например, для автомобилестроения одной из основных задач всегда будет являться уменьшение массы транспортного средства. Чем меньше масса автомобиля, тем меньше необходимо топливной

смеси для его передвижения. Как следствие, ниже выброс вредных веществ в атмосферу, а это путь к обеспечению экологической безопасности. Так, взамен металлическим элементам кузова, пришли элементы из стекловолокна. Стеклопластики уступают стали по пределу прочности, но имеют более высокий показатель удельной прочности, а связующий для стекловолокна материал может обладать низкой теплопроводностью, высокой химической и атмосферостойкостью [59].

Для удовлетворения потребностей развивающейся экономики и производства, композиционные материалы развиваются и модернизируются с каждым годом. Если стекловолокно уступало стали по показателям предела прочности, то показатели углепластика зачастую превышают по удельным показателям высокопрочные стали [86, 111, 117, 133, 136, 151]. Более того, композиционные материалы на основе углепластиков более устойчивы к явлениям усталости материала [50, 51]. Фирма «Форд Моторс» в 1980-е года опубликовала результаты своих исследований стекло- и углепластиков. Результаты этих исследований представлены в табл. 1.

В настоящее время практически невозможно найти автомобиль, который производится без деталей, изготовленных из композитных материалов. Элементы кузова, интерьера и экстерьера зачастую изготавливаются из углепластика, стекловолокна или комбинаций других материалов.

При выборе конструкционных материалов для авиационной промышленности важным фактором является влияние внешних нагрузок и явление усталости материала. В данном случае композиты вновь показывают свои благоприятные стороны [136, 137, 146]. Большинство композитов устойчиво к внешним воздействиям, а по величине нормализированных по плотности напряжений в 3 раза превосходят показатели прочности металлов при прочих равных условиях [50, 51].

Таблица 1. Исследования армированных пластиков [50, 51].

Материал	Сохранение статической прочности после 10^5 циклов нагружения, %	Жесткость, ГПа	Предел прочности, МПа
Листовой формовочный материал (ЛФМ)	нет данных*	12,4	69
ЛФМ с большим количеством не-ориентированных рубленых стекловолокон	нет данных*	13,8	207
ЛФМ с непрерывными ориентированными волокнами	30	37,2	552
Алюминий	30	68,9	414
Сталь	45	207	1380
Эпоксиуглепластнк	80	207	1242
*Исследования, проведенные Хаймбухом и Сандерсом из фирмы «Дженерал моторс» позднее показали, что образцы из этих материалов после 10^5 циклов сохраняют 40 и 25 % статической прочности соответственно [50, 51].			

Существует множество критериев разделения композитов на группы: по материалу и виду связующего, по материалу и виду армирующих элементов, по гибкости, жесткости, удельной плотности и др. [40, 50, 51, 88, 121]. Одной из таких групп являются гибкие тканые (тканевые) композиты. В качестве связующего материала в них используют мягкие гибкие полимерные

материалы [26, 45, 59], а в качестве армирующих элементов выступают ткани [40, 71, 76, 122] из органических или неорганических нитей. В итоге получается материал, который легко поддается формоизменению, но при этом имеет высокую прочность на растяжение [6, 95, 122].

Немаловажным свойством тканых композитов является способ армирования, к которому относят различные виды тканей (переплетения нитей) [61, 62, 65, 95]. Наиболее распространенной является ткань с полотняным переплетением [2, 4-8, 10- 13, 21, 24, 25, 52, 54, 82, 128, 142], однако, встречаются армирующие ткани с более сложным алгоритмом укладки нитей в переплетении или ткани из многоуровневого переплетения [45, 92], обеспечивающие, например, высокую пробивную вязкость.

Так композиционные материалы нашли свое применение и в оборонной промышленности. Полимерная броня из непропитанных полимерными связующими тканей с определенным переплетением волокон применяется в качестве защиты от высокоскоростных (до 1000 м/с) ударных нагрузок [14, 64, 73, 115, 120, 148, 150], поглощающая энергию индентора при ударе. Малый диаметр волокон нитей позволяет им выдерживать значительные изгибные напряжения без разрушения. К преимуществам текстильной брони, следует отнести меньший вес и больший комфорт при эксплуатации изделия. Однако полимерные текстильные композиционные материалы не эффективны для защиты от высокоскоростных (более 1100 м/с) пуль и осколков, и низкоскоростных пуль особой конструкции, раздвигающих нити в тканях, пролетающих между нитями, не разрушая их. В этих случаях защита от высокоскоростных ударных воздействий осуществляется использованием многослойных комбинированных защитных конструкций [45, 92], например, полимер-металлическая или полимер-керамическая броня.

В процессе эксплуатации изделий, выполненных из тканых композиционных материалов, его материал может получить локальные

технологические или эксплуатационные повреждения. К таким повреждениям можно отнести, например, обрыв нитей армирующей ткани [10-13], удар, изменяющий форму переплетения или же сквозное пробитие. Своевременно устранить дефект ткани не всегда представляется возможным, а в некоторых случаях устранение дефекта приводит к выводу изделия из эксплуатации на длительный период. В связи с этими факторами имеется необходимость определения влияния локальных повреждений материала [148, 149], на его прочностные свойства и дальнейшее его поведение при нагрузке [21, 28, 37, 109, 126, 127, 149].

1.2. Состояние современных моделей и методов прогнозирования поведения тканых композитов. Применимость к гибким композитам

Обширное использование тканых композитов в промышленности в условиях изменяющихся внешних нагрузок и необходимостью идентификации параметров напряженно-деформированного состояния конструкций, предопределяет необходимость прогнозирования поведения материалов с учетом внешних локальных нагрузок и повреждений. Исследованиям тканых композитов и материалов посвящены работы многих авторов: В.П. Багмунтова, В.Э. Вильдемана, А.П. Гречухина, Ю.И. Димитриенко, Д.В. Дедкова, А.В. Зайцева, В.В. Васильева, С.Г. Степанова, Р.А. Каюмова, Н.Н. Берендеева, Gaurav Nilakantat, R.A Naik, R.L. Foye, R. Haas, M.J. Hintona, A.S. Kaddourb, P.D. Soden, C.M. Pastore, Zvi Hasbin, A.R. Ingraffea и др. Большой вклад в развитии описания деформационных свойств и изучению структуры армирующей ткани внесла группа ученых Composite Materials Group из Лёвенского Католического университета [72, 93, 98- 102, 136, 139, 146]. Под руководством S.V. Lomov и I. Verpoest были проведены обширные исследования механического поведения тканых композитов. В

результате исследований создано программное обеспечение WiseTex [93, 140, 143], позволяющее описывать напряженно деформированное состояние в структуре тканых композитов на основе полного моделирования формы армирующей ткани при упругих деформациях.

Авторами аналитических моделей деформирования гибких тканных композитов являются: Р.А. Каюмов, С.Г. Степанов, О.Д. Кравченко, В.Э. Вильдеман, В.П. Багмунтов, А.Р Мангушева, Н.Н. Берендеев, Q. Zhu, Man X., C.C. Swan, F. Edgren, L.E. Asp и др. Однако единой модели деформирования применительно к гибким тканым композитам, учитывающей все конструктивные, геометрические и механические особенности структуры композита и материалов, входящих в состав компонентов материала [68, 110], учитывающей особенности внешних воздействий, в литературе в настоящее время не предоставлено. Это связано с особенностью деформирования нитей армирующей ткани, которые уже при малых значениях внешних нагрузок начинают процесс формоизменения своей исходной начальной геометрии [96, 125]. Недостаточное внимание при моделировании гибких тканых композитов, в отличии от «жестких» композитов, уделено изучению влияния локальных дефектов [10, 11-13] и повреждений материалов [127], особенностям формоизменения внутренней геометрической структуры материала [1, 24], а также влияния накопления повреждений [3, 15, 16, 18, 32, 78, 103, 123, 146] на механические характеристики материала в процессе эксплуатации. Прежде всего это связано со сложностью построения дискретных моделей для трехмерных неоднородных структур с учетом искривления и переплетения нитей ткани, вычислительными трудностями получения результатов расчета параметров внутреннего состояния неоднородных материалов при сложном напряженном состоянии на макро- и мезо - уровне [67]. И если каждый отдельный фактор частично описан в литературе, то модель совокупного взаимодействия всех вышеизложенных

факторов, применительно к гибким тканым композитам, в литературе не представлена. Что, в свою очередь, делает актуальной разработку новых моделей поведения гибких тканых композитов, учитывающих все вышеприведенные особенности исследуемых материалов.

Проведение экспериментальных исследований для каждого композита с различными армирующими тканями и материалами, из которых изготовлен композит, не выгодно, так как для каждого типа микроструктуры тканого композита результаты существенно отличаются [6, 62, 65, 68, 79, 95, 113, 114, 117, 135]. Микромеханические модели с выделением периодических элементов переплетения [15- 20, 24, 63, 67, 74, 78, 82, 92, 97, 131, 147], которые принято называть элементарно-периодическими ячейками (ЭПЯ), позволяют сохранить капиталовложения, затрачиваемые на проведение трудоемких экспериментальных исследований и описать поведение материала для различных микроструктур используемого переплетения ткани и материалов, из которых изготовлен композит.

Основные применяемые модели, основывающиеся на описании структуры тканых композитов, применимы лишь к «жестким» композитам, в которых в качестве связующего выступают твердые полимеры [12, 42, 99, 103, 107, 108, 110, 111, 125, 130, 133, 151, 154], такие как, например, эпоксидная смола, керамическое связующее или бетон [106]. Для таких материалов можно пренебречь формоизменением внутренней структуры и выпрямлением нитей [15, 16, 18], так как деформации, возникающие при нагружении, малы [12, 110], и форма переплетения армирующей ткани сохраняется в процессе деформирования [20, 42, 69, 119]. Для гибких тканых композиционных материалов изменение внутренней геометрии в процессе деформации оказывает существенное влияние на их механическое поведение [1, 24, 44]. Эта особенность связанна с типом связующего материала и алгоритмом деформирования нитей армирующей ткани, которые распрямляются в

процессе деформирования [81], изменяют жесткость [5] и переходят из состояния изгиба в центральное растяжение уже при малых значениях внешних нагрузок [27, 31, 33, 37, 39]. Еще одним критерием выступает учет накопления повреждений в материале [15, 16, 18, 78, 103, 123] и оценка влияния накопленных повреждений на прочностные и эксплуатационные характеристики материала. Описание разрушения волокон нитей требует детализации структуры нитей армирования и тщательном анализе напряженно-деформированного состояния структурных элементов переплетения ткани на мезо-уровне [67]. Кроме накопления повреждений, материал может иметь некоторые дефекты до начала эксплуатации или получить локальные повреждения в процессе эксплуатации. Вопросам технологических дефектов посвящен достаточно большой объем исследований. Одним из последних исследований являются работы Д.В. Дедкова, выполненных в Пермском национальном исследовательском политехническим университете [10 - 13]. Однако, кроме локальных технологических дефектов, таких как обрыв или пропуск нити армирующей ткани, описанных в указанных работах, материал может иметь некоторые локальные повреждения после технологического создания материала или получить дефекты в процессе эксплуатации. Моделированию локальных повреждений материала, полученных в процессе эксплуатации, посвящено малое количество работ. Прежде всего это связано с проблемой универсальности описания повреждения. Что, в очередной раз, подтверждает актуальность разработки новых моделей гибких тканых композитов, учитывающих локальные повреждения материала.

Существующие модели гибких тканых композитов не учитывают множество дополнительных факторов, что не позволяет их применять для полного описания материала вплоть до разрушения. Значительная часть исследований основывается на ламинатных теориях [3, 32, 40, 42, 58, 70, 84,

90, 123, 138], которые по большей части применимы к жестким тканым композитам и удовлетворительно описывают поведение гибких композитов лишь малых деформациях [3, 32], не учитывают необратимые деформации [4, 20, 61, 80, 136] и определяют лишь некоторые механические характеристики композитов без полного описания поведения материала [10, 12, 13, 108].

В связи с построением модели структурного элемента переплетения армирующей ткани возникает необходимость точного описания внутренних усилий [56], возникающих в поперечных сечениях нитей. Исходя из геометрических характеристик рассматриваемого полотняного переплетения в структурном периодическом элементе ткани, длина нитей основы и утка по отношению к толщине нити отличается не более чем на один порядок, что ведет за собой вывод о необходимости учета изгибающих моментов в нитях ткани [9, 42, 52-54, 81, 125, 145].

Основываясь на проведенных и представленных в литературе экспериментах для гибких тканых композитов [1, 6, 24, 28, 37, 57, 65, 66, 84, 95, 109, 126, 135], сделан вывод о наличии необратимых деформаций. Анализируя результаты экспериментов для исследуемых материалов в форме диаграмм деформирования нагрузки и разгрузки, после упругого участка деформирования возникает резкое уменьшение приращения напряжений с дальнейшим вторичным упрочнением. После указанного перехода в исследуемых материалах после разгрузки появлялись необратимые остаточные деформации.

Основные применяемые модели деформирования конструкций, созданных на основе тканых композиционных материалов, реализуются при помощи вычислительных систем и программных комплексов. К таким комплексам необходимо отнести универсальные системы ANSYS, ABAQUS и др., и специальные программы и модули, созданные для моделирования деформирования тканых материалов, такие как WiseTex [93, 140],

расширенный модуль SALOME-MECA [11] или PROTKATEX [132]. Основной проблемой моделирования тканых композитов при численной реализации является сложность описания структуры переплетения нитей ткани. Полное описание переплетения армирующей ткани приводит к большим вычислительным требованиям к ресурсам системы [46, 80], а также к большому объему времени, затрачиваемому на решение поставленных задач деформирования тканых композитов. Описание конструкции из тканого композита требует описания вида переплетения армирующей ткани, что приводит к высоким трудозатратам при создании расчетной модели. Наиболее оптимальным, с точки зрения оптимизации требований расчетных ресурсов, является применение аналитических моделей деформирования тканых композитов, основанных на описании геометрических параметров переплетения армирующей ткани, используемых материалов и учете всех указанных выше особенностей деформирования гибких тканых композитов [69, 85, 87, 104, 141, 144].

Основываясь на проведенном обзоре литературе, исследованиях в области тканых композитов, материалах конференций по исследуемым композитам и современным вычислительным возможностям, задача построения аналитических моделей деформирования, с применением к гибким тканым композитам, является актуальной, а практическое применение в реализации модели деформирования указанных материалов в ведущих вычислительных комплексах (ANSYS, ABAQUS), реализующих метод конечных элементов, является перспективным научным исследованием.

1.3. Разработка моделей, необходимых для полного описания поведения гибких тканых композитов

В связи с сложностью построения дискретных моделей для трехмерных неоднородных структур с учетом искривления и переплетения нитей в армирующей ткани, в данном исследовании представлены аналитическая и численные модели, описывающие поведение гибких тканых композитов, основанные на аналитическом и численном описании внутренней структуры рассматриваемых материалов.

В случае моделирования поведения тканого композита, наиболее актуальным остается метод построения ламинатной слоистой модели, позволяющий без значительных вычислительных затрат описать поведение исследуемого материала. В данном методе не возникает необходимости полного описания геометрии армирующей ткани, которое приводит к большим вычислительным затратам. В методе построения ламинатной модели нет прямой зависимости от схемы переплетения армирующей ткани, которые могут быть различной геометрии и иметь различные виды переплетения нитей. Более того, в методе построения ламинатной модели нет ограничений на количество слоев в армирующей ткани. Указанная методика и соответствующая модель были впервые разработаны для описания «жестких» композитов [42, 58, 123]. Применительно к гибким композитам, такой метод и соответствующая модель, даже после модификации и учета особенностей гибких тканых композитов, применимы только при малых деформациях. Связано это прежде всего с грубой дискретизацией внутренней структуры композита. Однако, эта модель достаточно проста в реализации и позволяет корректно описать поведение материала при малых значениях деформациях.

Другие модели и методы их построения основываются на полном описании геометрии армирующей ткани. Такие модели позволяют описать

поведение материала до полного разрушения. К ним относится модель элементарной периодической ячейки (ЭПЯ) мезо-уровня. Полное описание геометрии приводит к высоким вычислительным затратам даже при расчете одной ЭПЯ. В связи с этим фактом невыгодно использовать данную модель при моделировании сложных объектов из тканых композитов. Однако, в настоящее время, это единственный способ полного описания напряженно-деформированного состояния в нитях армирующей ткани и определения областей максимальных напряжений и деформаций. Поэтому, при определении критических областей армирующей ткани, и напряженно-деформированного состояния в нитях, наиболее актуальной остается модель ЭПЯ на основе использования метода конечных элементов.

Описанные выше модели требуют наличия эффективного инструмента, реализующего трехмерный метод конечных элементов. Для определения механических характеристик композиционного материала в целом, возможно применение аналитических моделей, не требующей больших вычислительных затрат и наличия комплекса, реализующего МКЭ. Аналитических моделей поведения гибких тканых композитов, позволяющих описать поведение материалов вплоть до разрушения, с учетом наличия локальных повреждений, необратимых деформаций и формоизменения нитей армирующей ткани, в литературе не представлено. Аналитическая модель была разработана в текущем исследовании и полностью описывает поведение материала вплоть до полного разрушения. В качестве результата модель, как и в [133], выводит полную диаграмму деформирования, позволяющую определить механическое поведение материала вплоть до разрушения, определить механические характеристики материала и учесть наличие необратимых деформаций. Одним из достоинств данной модели является ее независимость от применения МКЭ. В тоже время, в настоящей работе описано прикладное применение разработанной аналитической модели в системе ANSYS Mechanical APDL. К

недостаткам данной модели можно отнести ее жесткую зависимость от вида переплетения армирующих нитей ткани и невозможность определения напряженно-деформированного состояния внутри структуры материала.

Каждая модель имеет свои преимущества и недостатки. Поэтому для полного описания поведения гибких тканых композитов на мезо- и макро - уровне, для описания объектов, созданных на основе гибких тканых композитов, в зависимости от поставленной задачи и имеющихся вычислительных ресурсов, необходимо использовать одну или несколько моделей.

ГЛАВА 2. Особенности исследуемого материала

Композиционные материалы на основе армирующей ткани имеют в своем составе армирующую ткань и связующий материал. Возможно наличие граничных слоев, защищающих композит от внешних атмосферных или химических воздействий. Основные механические характеристики и возможности композита определяются видами материалов, входящих в состав композита. Участвующие в исследовании композиты состояли из нитей ткани на основе рубленых лавсановых волокон и гибкого связующего на основе поливинилхлорида с полиуретаном. Волокна нити в ткани склеены между собой полиуретаном. Граничными слоями материалов, участвующих в исследовании являются виниловые пленки (рис.1).

Рис.1. Структура гибких тканых композитов, участвующих в исследовании: а), с) – виниловая пленка; б) – армирующий слой.

Армирующий слой состоит из армирующей ткани, находящейся и полностью пропитанной в связующем материале композита. Армирующая ткань материалов, участвующих в исследовании, имела форму полотняного переплетения армирующих нитей (рис.2).

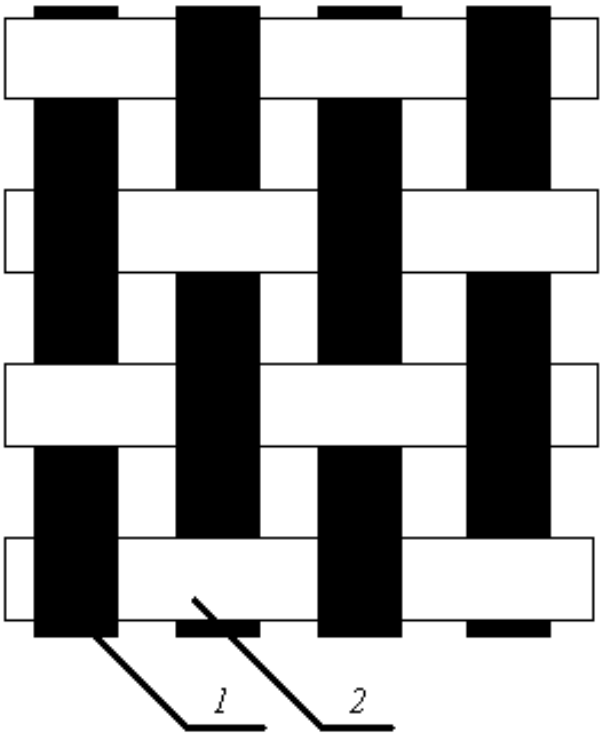

Рис.2. Схема полотняного переплетения нитей ткани:
1 – нить основы; 2 – нить утка.

В такой форме переплетения существует два направления армирования: направление нитей основы и направление нитей утка [88, 121]. Нити основы и нити утка поочередно проходят друг над другом, создавая тем самым их полотняное переплетение.

2.1. Особенности внутренней геометрической структуры материала

В связи с простотой создания таких тканей и высоким показателем удельной прочности [6, 57, 62, 64, 65, 84, 89, 95, 114, 117, 135, 152, 153] они получили широкое распространение при создании «жестких» и гибких тканых композитов. Результаты исследований [117] показали, что механические характеристики композитов, созданных на основе ткани полотняного переплетения, существенно зависят от внутренней геометрической структуры

ткани (толщина нитей, интервал укладки нитей, от которых зависит внутренняя геометрическая структура).

Тканые композиты относятся к классу периодически-регулярных материалов, в которых можно выделить периодический элемент (рис.3), регулярно повторяющийся в структуре материала. Описывая механическое поведение периодического элемента, можно описать поведение материала, состоящего из множества таких элементов, в целом.

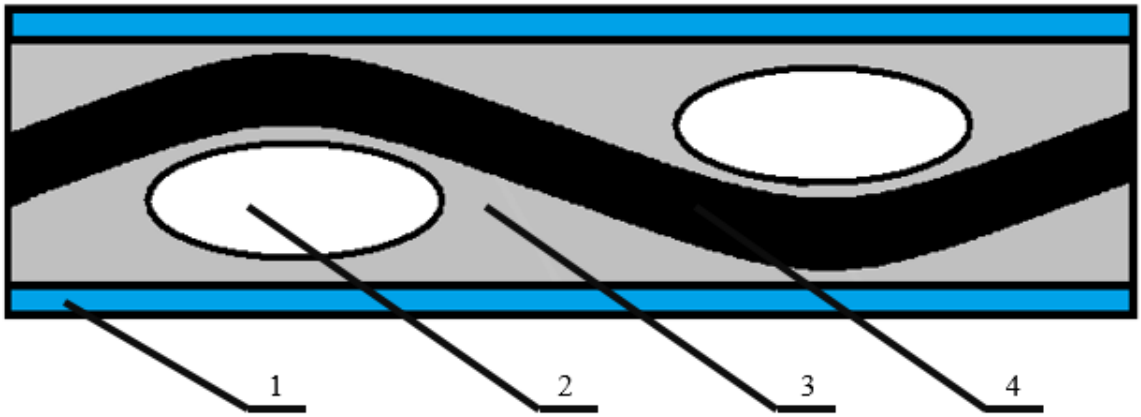

Рис.3. Периодический элемент тканого композита в продольном разрезе: 1 – виниловая пленка; 2 – нить утка, 3 – связующий материал композита, 4 – нить основы.

Такой подход наиболее развит при построении моделей поведения регулярных структур [23, 43] в том числе и для описания поведения тканых композитов [74]. Основным преимуществом такого подхода является учет внутренней структуры материала без полного геометрического описания образца материала, который состоит из множества периодических элементов. Вместо описания множества периодически-повторяющихся элементов в данном случае достаточно описать один представительный объем материала.

Однако такой подход требует корректного описания периодического элемента и наделения его свойствами, которыми обладает материал в целом.

При детальном рассмотрении различных видов полотняного переплетения определяется ряд геометрических параметров, которые могут меняться в зависимости от используемых толщин нитей и расстояний между ними. К основным параметрам полотняного переплетения (рис.4) можно отнести ширину b и высоту h поперечного сечения нитей основы и утка соответственно, расстояние между нитями одного направления l_1, соответственно для нитей основы и нитей утка, угол подъема θ и φ наклонных участков соответствующих нитей.

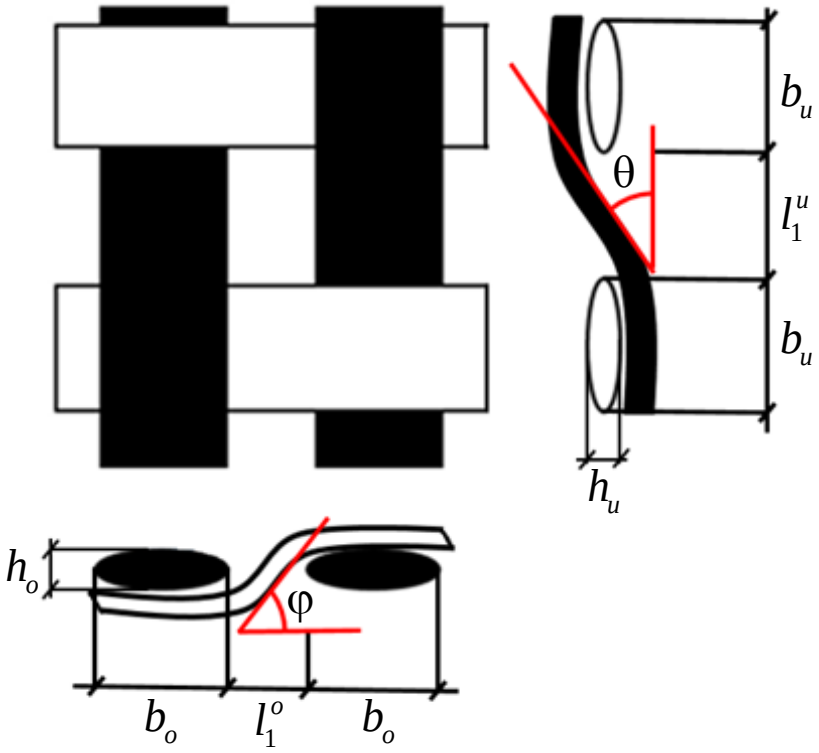

Рис.4. Геометрические характеристики полотняного переплетения.

Комплекс указанных параметров позволяет однозначно определить геометрическую форму и параметры соответствующего полотняного переплетения.

2.2. Особенности материалов, используемых при создании гибких тканых композитов

Кроме внутренней геометрический структуры, большой вклад в механическое поведение исследуемых композиционных материалов вносят характеристики материалов, из которых состоит композит. Отличительной особенностью гибких тканых композитов является их возможность формоизменения. Такие свойства достигаются использованием гибких полимерных связующих материалов и упругих гибких полиэфирных нитей на основе полиэтилентерафлата, лавсана, нейлоновых нитей и т.д.

Исходя из природы нитей переплетения армирующей ткани, волокна, на основе которых создаются нити, являются упругим материалом, созданным из рубленных или непрерывных волокон. В исследовании участвовали нити, имеющие схему сложения волокон в форме трощеного жгута, т.е. нити не скручиваются и укладываются параллельно друг другу в связующий материал - второй компонент нитей. Таким образом при растяжении нитей вдоль их направления вводится предположение об упругом поведении волокон нитей, подчиняющееся закону Гука для линейно-упругого изотропного тела.

Для описания поведения связующего нитей и композита в целом при деформировании вдоль одного из направлений армирования, упругого поведения недостаточно. Этот факт подтверждается проведенными исследованиями [1, 24, 44, 57, 65, 105, 119, 125, 126] и экспериментами [95, 109], результаты которых подтверждают наличие необратимых деформаций. Анализируя результаты экспериментов в форме диаграмм деформирования нагрузки и разгрузки, после упругого участка деформирования гибких тканых композитов возникает резкое уменьшение приращения напряжений, характеризующееся для исследуемых материалов характерным «горбом» перехода из одной стадии деформирования в другую с дальнейшим

вторичным упрочнением. После указанного перехода при разгрузке в исследуемых материалах появлялись необратимые остаточные деформации (рис.5).

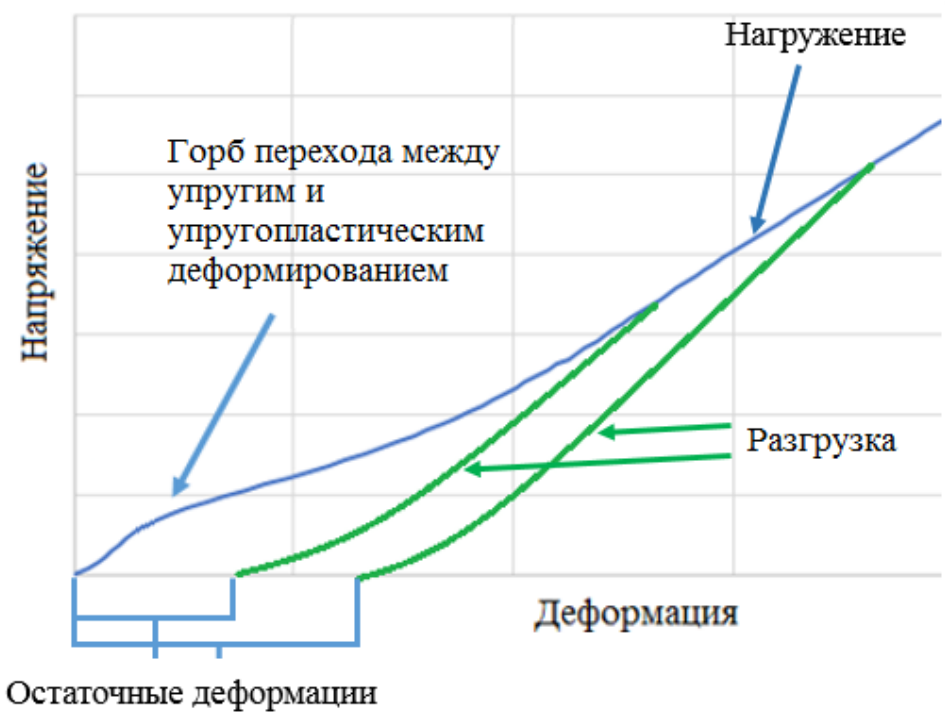

Рис.5. Схематичный вид диаграммы деформирования гибких тканых композитов.

Для описания процессов необратимых деформаций необходимо определить, какой из моделей корректно воспользоваться применительно к гибких тканым композитам, имеющим внутреннюю геометрическую структуру. В процессе деформирования нити формоизменяются [31, 33, 37, 39, 96, 125] и переходят из состояния изгиба [9, 42, 52-54, 81, 96, 125, 145] в центральное растяжение. Необратимые деформации возникают из-за спрямления нитей в переплетении и взаимодействия между ними за счёт полиуретанового связующего.

В этих необратимых деформациях присутствует вклад вязкоупругого [48, 49] поведения материала, развитие повреждений в материале, связанных с нарушением адгезии между волокнами нитей и их связующим, так и

пластическая составляющие. Введено ограничение на область применения разрабатываемых моделей по продолжительности действия нагрузки: рассматривается класс задач о кратковременных нагрузках и деформациях, происходящих за конечный недлительный период времени. С учётом предположения о непродолжительности воздействия статических нагрузок на материал, влиянием на процесс деформирования эффектов, связанных со временем, пренебрегали. Подтверждением возможности подобной трактовки являются результаты ряда авторов, таких как Р.А. Каюмов и А.Р. Мангушева в исследовании кратковременной прочности исследуемых материалов, а также В.П. Багмунтов, B. Stier, J.-W. Simon, S. Reese, O. Cousigne, D. Moncayo, D. Coutellier, P. Camanho, H. Naceur, S. Hampel и др. [1, 44, 105, 119, 125, 126, 133].

Для описания необратимых, непродолжительных по времени деформаций, с учетом введенных предположений, использовалась пластические деформации, моделируемые теорией течения с линейным кинематическим упрочнением (рис.6) [22].

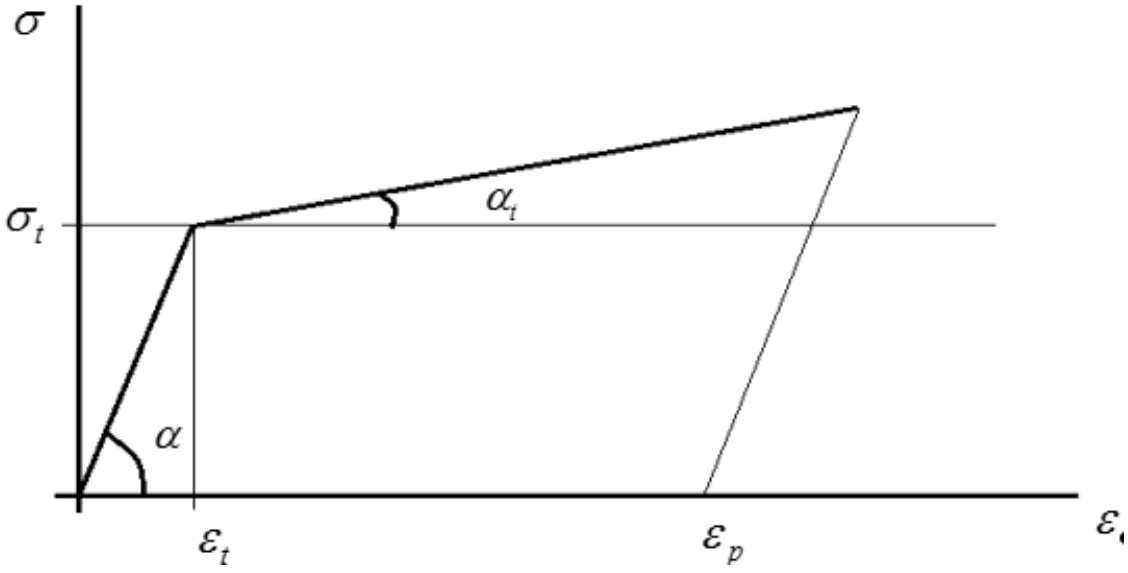

Рис. 6. Схематизация диаграммы деформирования при упругопластическом деформировании.

В случае использования теории течения с линейным кинематическим упрочнением справедливы зависимости напряжений и деформаций:

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon, \ \varepsilon \le \varepsilon_t \\ \sigma_t + E_t\left(\varepsilon - \varepsilon_t\right), \ \varepsilon > \varepsilon_t \end{cases}, \tag{2.1}$$

где σ, ε – текущие напряжение и деформация; E – модуль упругости; E_t – модуль упрочнения при упругопластическом деформировании; σ_t – предел текучести; $\varepsilon_t = \sigma_t / E$ – величина деформаций, соответствующих пределу текучести.

2.3 Повреждения, возникающие в внутренней структуре материала при деформировании

При создании модели гибких тканых композитов с применением метода конечных элементов, недостаточно учитывать внутреннюю геометрию материала и модели поведения материалов, составляющих композит. Для адаптации основных моделей «жестких» композитов для гибких тканых композитов необходимо дополнительно учесть нарушение адгезии между волокнами армирования и связующим, при котором возможно вычленение волокон в нитях армирования и возникновение повреждений в связующем материале нитей [15, 16, 18, 63, 75, 91, 94, 118, 119, 129]. Для учёта возникающих в процессе деформирования внутренних повреждений, вызванных нарушением адгезии внутри материала, возможно использовать концепцию «размазанной» трещины [94, 119]. Основные предположения в этой концепции заключаются в изменении матрицы жесткости при появлении разрыва. Трещина в этом случае не вводится явным образом.

В связи с более высокой прочностью волокон армирования в нитях, вводится предположение, что возникновение «размазанных» трещин (разрывов) возможно только в связующем нитей.

Для описания возникновения и влияния «размазанных трещин» матрицу жесткости нитей армирования в целом будем представлять, как сумму матриц жесткостей связующего и волокон армирования [60,94]:

$$\mathbf{C} = \left(1 - \sum_{i=1}^{N_R} V_i^R\right)\mathbf{C}^c + \sum_{i=1}^{N_R} V_i^R \mathbf{C}_i^R \qquad (2.2)$$

Здесь N_R - число армирующих материалов, V_i^R - объемная доля армирующих элементов (волокон), $\mathbf{C}^c$ - матрица жесткости связующего, $\mathbf{C}_i^R$ - матрица жесткости i - го армирующего материала волокон.

Матрица жесткости связующего $\mathbf{C}^c$ имеет вид:

$$\mathbf{C}^c = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}\begin{bmatrix} (1-\nu) & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & (1-\nu) & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & (1-\nu) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} \end{bmatrix} \qquad (2.3)$$

Вводится обозначение $\left(x_i^R, y_i^R, z_i^R\right)$ - координаты i-го армирующего элемента в системе координат нити (x, y, z), где ось x направлена вдоль продольного направления нити, ось y направлена вертикально и ось z горизонтально в плоскости поперечного сечения нити. Учитывая ориентацию армирующих элементов в системе координат нити (рис. 4) и упругое линейное поведение материала армирования со значением модуля упругости E_i^R получим соотношения:

$$\begin{pmatrix}\sigma_x^R\\ \sigma_y^R\\ \sigma_z^R\\ \sigma_{xy}^R\\ \sigma_{yz}^R\\ \sigma_{xz}^R\end{pmatrix}=\begin{bmatrix}E_i^R & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix}\cdot\begin{pmatrix}\varepsilon_x^R\\ \varepsilon_y^R\\ \varepsilon_z^R\\ \varepsilon_{xy}^R\\ \varepsilon_{yz}^R\\ \varepsilon_{xz}^R\end{pmatrix}=\mathbf{C}_i^R\cdot\begin{pmatrix}\varepsilon_x^R\\ \varepsilon_y^R\\ \varepsilon_z^R\\ \varepsilon_{xy}^R\\ \varepsilon_{yz}^R\\ \varepsilon_{xz}^R\end{pmatrix} \tag{2.4}$$

$$\begin{Bmatrix}X\\ Y\\ Z\end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix}\cos\theta_i\cos\varphi_i\\ \sin\theta_i\cos\varphi_i\\ \sin\theta_i\end{Bmatrix}\cdot x_i^R \tag{2.5}$$

При разрушении материала в плоскости перпендикулярной оси x из соотношений (2.2) - (2.5) следует, что матрица жесткости всего материала примет вид:

$$\mathbf{C}_c^{ck}=\frac{E}{(1+\nu)}\begin{bmatrix}\frac{R_t(1+\nu)}{E} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & \frac{1}{(1-\nu)} & \frac{1}{(1-\nu)} & 0 & 0 & 0\\ 0 & \frac{1}{(1-\nu)} & \frac{1}{(1-\nu)} & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2}\end{bmatrix} \tag{2.6}$$

где R_t - модуль упругости с учетом влияния «разрыва» в материале, $0<\beta_t<1$ - коэффициент пересчета прочности.

Величины R_t и β_t определяются в соответствии со схемой, показанной на рис. 7, и оценкой влияния появления «разрыва» материала, где ε_{ck} - деформации всего композитного материала, f_t - предел прочности при одноосном растяжении, T_c– множитель учета влияния «разрыва» в материале на его жесткость [60, 94].

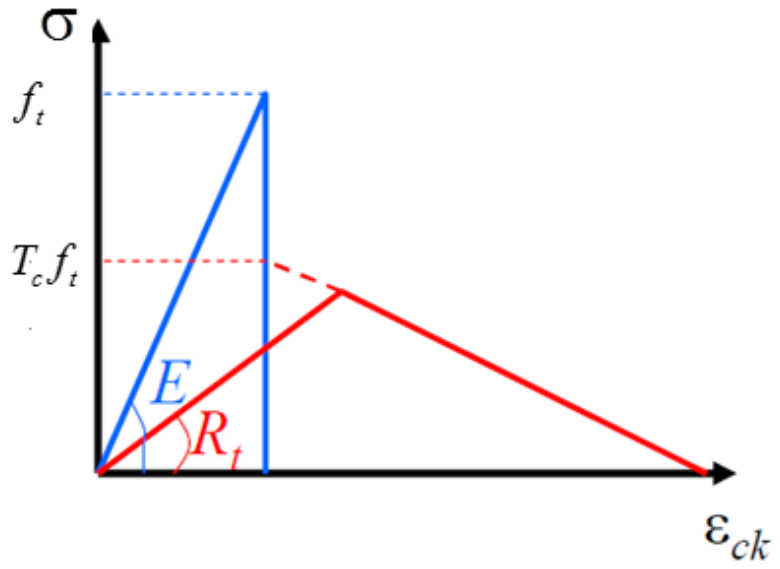

Рис. 7. Изменение модуля упругости при появлении разрыва.

Вводится следующий критерий разрушения связующего материала композита [60, 94]:

$$\frac{F}{f_c} - S \geq 0, \tag{2.7}$$

где $F = F(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ - функция главных напряжений, S - поверхность прочности.

Указанная методика позволяет дополнительно учесть нелинейное поведение гибких тканых материалов, связанное с нарушением адгезии в материале и развитием внутренних повреждений при деформировании.

ГЛАВА 3. Модели, основанные на применении метода конечных элементов

Модели, основывающиеся на применении метода конечных элементов (МКЭ), нашли свое применение во многих направлениях исследований, в том числе в механике материалов. Метод конечных элементов применяют для описания процессов, протекающих в сплошных и дисперсных средах благодаря своей универсальности. Однако, для корректного описания механических процессов при помощи МКЭ необходимо подробно описать геометрию исследуемого объекта и особенности его механического поведения.

3.1 Модифицированная ламинатная модель гибких тканых композитов

Первыми моделями поведения «жестких» тканых композитов при деформировании являлись ламинатные модели, описанные в работах [40, 42, 55, 90, 123, 138]. Они позволяли корректно описывать поведение указанных материалов при упругом деформировании, однако применительно к гибким композитам, для корректного описания поведения, данные модели требуют адаптации и переработки.

Основная идея ламинатных (слоистых) моделей заключается в дискретизации исходного композита и деструктуризации внутренней геометрии [3, 32]. Идентичные по ориентации армирования элементы в нитях имеют одинаковые механические характеристики. Периодически расположенные фрагменты композита с одинаковыми свойствами ортотропии заменяют сплошными слоями материала с теми же свойствами ортотропии, что и у исходных фрагментов. В пределах каждого слоя материал представляется как однонаправленный волокнистый композит [83], состоящий из связующего материала и армирующих волокон с заданным

направлением. Таким образом, вводятся несколько слоев, в которых армирующие волокна направлены вдоль заданной ориентации.

В случае армирующей ткани, имеющей полотняное переплетение нитей, используя подход, развитый в работах [5, 9, 58, 77, 81, 87], нити переплетения, имеющие форму, близкую к синусоидальной кривой, с высокой долей точности можно аппроксимировать набором прямолинейных элементов. Каждый из введённых прямолинейных элементов периодически повторяется в структуре материала, что позволяет их объединить в соответствующий слой материала, имеющий те же свойства ортотропии, что и у исходных повторяющихся фрагментов (рис.8).

Таким образом, вводятся четыре слоя, в которых армирующие волокна направлены вдоль нити основы $\theta = 0$, под углом θ к нити основы, вдоль нити утка $\varphi = 0$ и под углом φ к нити утка (рис.8). Ориентация армирующих элементов в слоях определяется в соответствии с ориентацией нити, где ось *ox* направлена вдоль нити основы полотняного переплетения, а плоскость, образуемая осями *oz и oy* - плоскость поперечного сечения материала вдоль нитей утка.

С учётом введенных предпосылок армирующая ткань полотняного переплетения гибкого тканого композита представляется в виде слоистого материала, состоящего из четырех слоев.

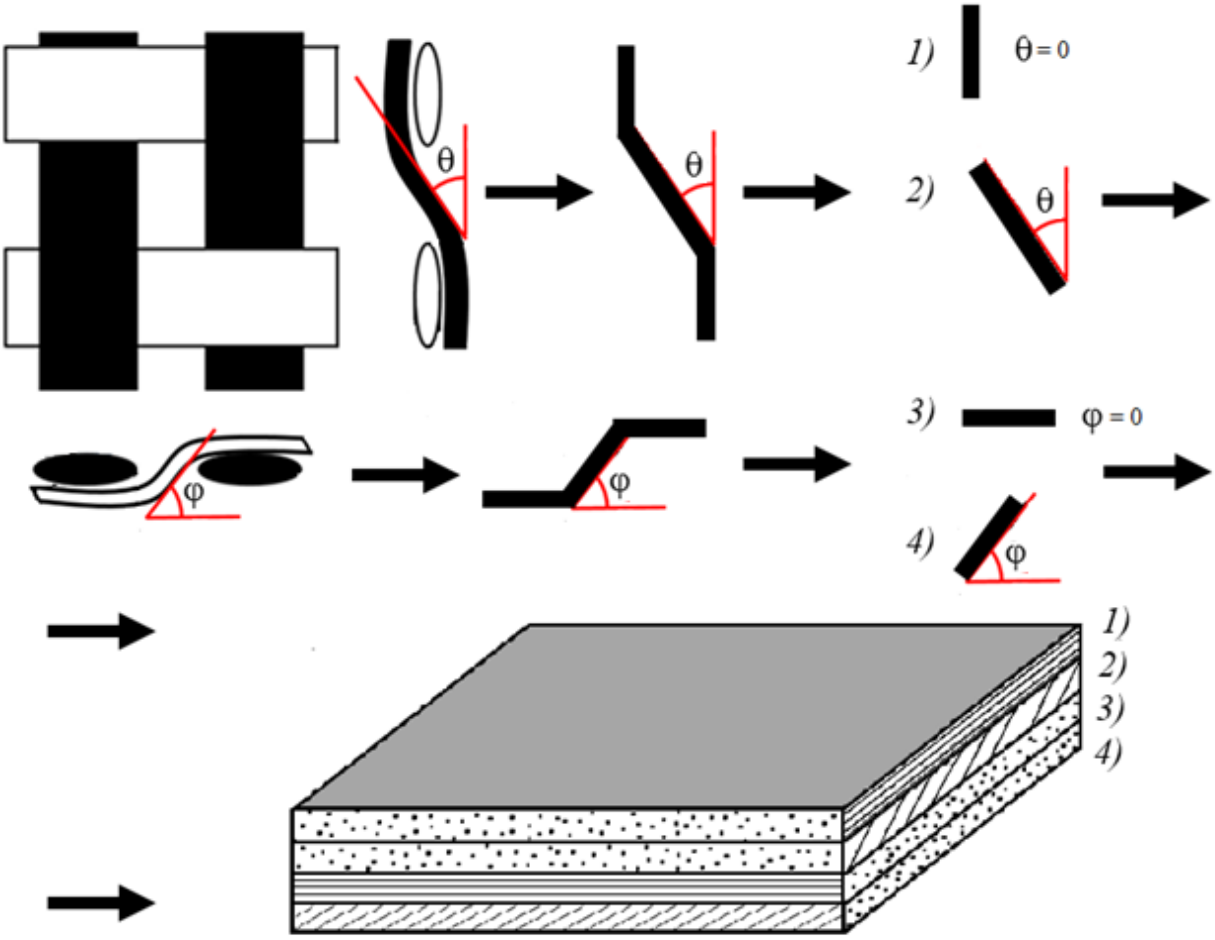

Рис.8. Дискретизация исходной структуры и построение ламинатной модели.

Таким образом, мы получаем слоистый материал, где каждый слой имеет свои характеристики. Система построенных слоев должна работать вместе. Разрешающая система уравнений имеет следующий вид:

1) Закон Гука для ортотропного материала:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix}$$

2) Уравнения равновесия:

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + f_i = 0$$

3) Соотношения Коши:

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \dfrac{\partial u}{\partial x}, \varepsilon_{xy} = \dfrac{1}{2}\gamma_{xy} = \dfrac{1}{2}\left(\dfrac{\partial u}{\partial y} + \dfrac{\partial v}{\partial x}\right), \\ \varepsilon_y = \dfrac{\partial v}{\partial y}, \varepsilon_{yz} = \dfrac{1}{2}\gamma_{yz} = \dfrac{1}{2}\left(\dfrac{\partial w}{\partial y} + \dfrac{\partial v}{\partial z}\right), \\ \varepsilon_z = \dfrac{\partial w}{\partial z}, \varepsilon_{xz} = \dfrac{1}{2}\gamma_{xz} = \dfrac{1}{2}\left(\dfrac{\partial w}{\partial x} + \dfrac{\partial u}{\partial z}\right). \end{cases}$$

4) Граничные условия:

$$u_i\big|_{S_u} = u_i^s$$

К четырем слоям, описывающих армирующую ткань со связующим необходимо добавить два граничных слоя - виниловые пленки (ПВХ) (рис.1). В итоге получим эквивалент исходного образца гибкого тканого композита в виде слоистого образца материала (рис.9).

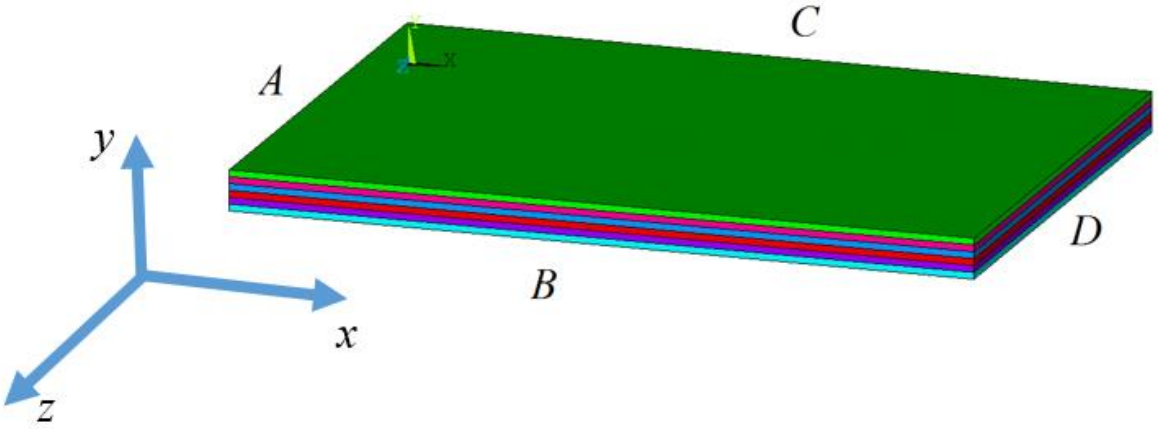

Рис. 9. Эквивалент гибкого тканого композита в виде слоистого материала.

На ряду с возникновением внутренних повреждений, в процессе эксплуатации изделия, выполненного из гибкого тканого композита, оно может получить локальные повреждения [21, 28, 37, 64, 105, 116, 124, 126, 127, 148]. В связи с особенностями эксплуатации изделий из гибких тканых композитов, изделия могут получить локальные дефекты, такие как низкоскоростной (до 10 м/с) непроникающий удар, не приводящий к сквозному пробитию. Последствия такого воздействия приводят к изменению механических характеристик композита [21, 64, 126]. В связи с современной интенсификацией повреждений и оценкой работоспособности поврежденных изделий, продления его ресурса, возникает задача оценки изменения механических характеристик материала изделия после внешнего на него воздействия. Так как оценка работоспособности изделия проводится уже после получения повреждения, анализ последствий локального воздействия будем проводить исследованием влияния остаточных напряжений и деформаций, полученных от локального повреждения.

Для численного моделирования единичного повреждения решается задача о внедрении стального индентора в форме шара [81] в полоску слоистого материала [116]. Причём диаметр шара много меньше размеров полоски материала (рис.10). На границе области занимаемой материалом (границы *A, B, C, D*) задается жесткое закрепление. Для индентора задается перемещение по вертикальной оси (рис.11) как абсолютно жесткого тела $u_y\big|_{cr} = -u_1$.

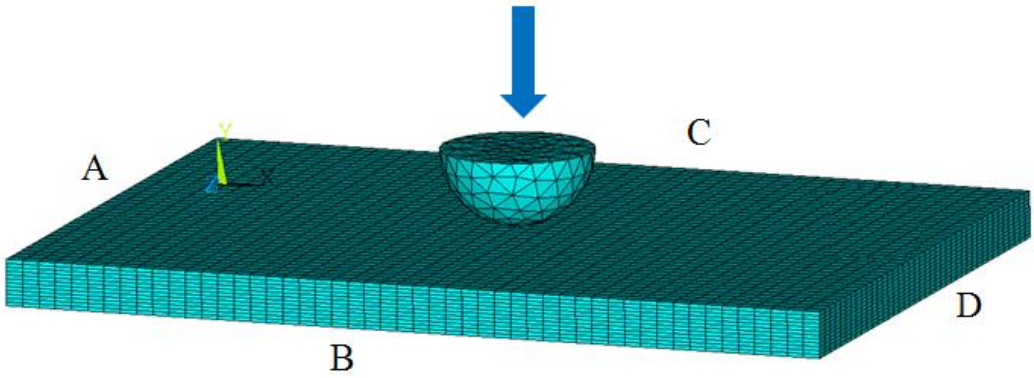

Рис.10. Моделирование локального повреждения.

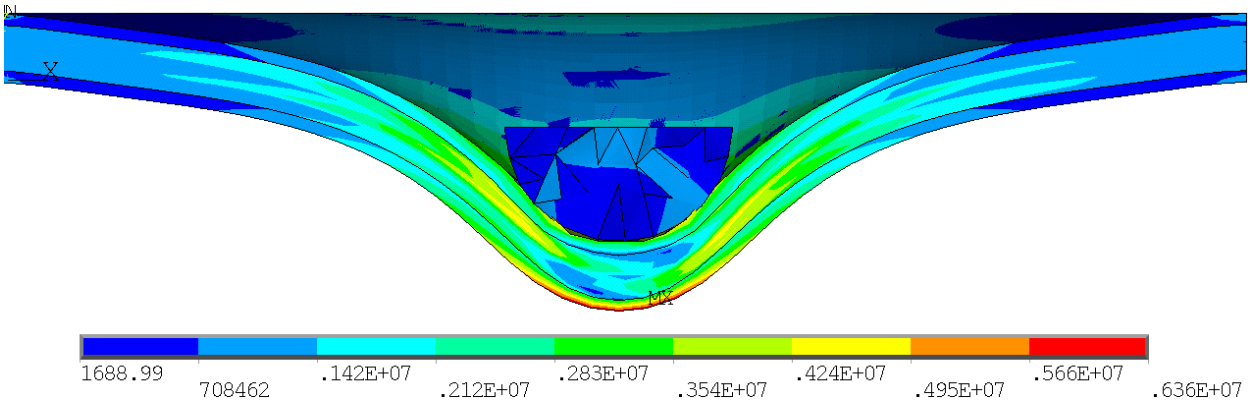

Рис.11. Напряжения при максимальном внедрении индентора (Па).

Затем проводится удаление индентора при сохранение граничных условий. В результате в слоистой полоске возникают остаточные напряжения и деформации, которые определяют предварительное локальное повреждение. На рис.12-13 показан пример остаточных эквивалентных напряжений по четвертой теории прочности в продольном сечении образца (вдоль оси x) и остаточные перемещение после удаления индентора.

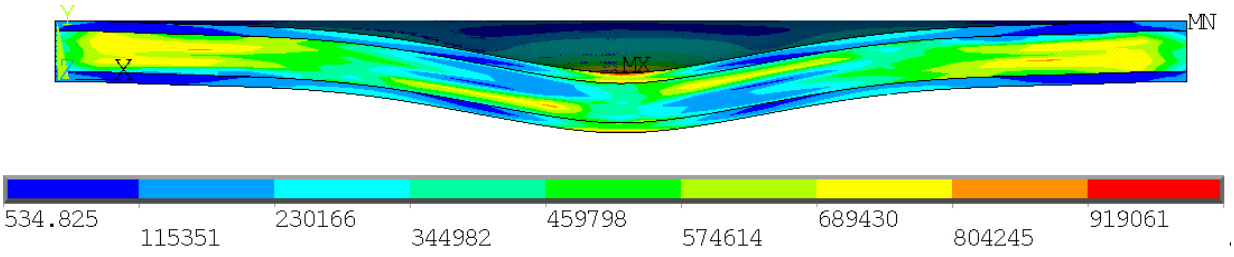

Рис.12. Остаточные напряжения после локального повреждения (Па).

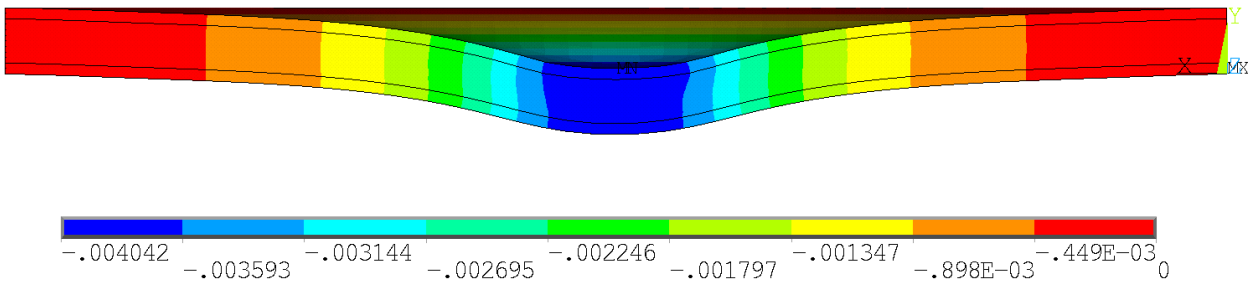

Рис.13. Остаточные перемещения после локального повреждения (Па).

Основным преимуществом «слоистого» моделирования является возможность моделирования изделий, выполненных из гибких тканых композитов, без значительных вычислительных затрат. В данной модели нет ограничений на количество слоев и схему переплетения нитей ткани. Преимущества использования данной модели также заключаются в отсутствии необходимости полного описания внутренней геометрии армирующей ткани, и отсутствии прямой зависимости от вида переплетения нитей.

Слои материала моделируются 8-ми узловыми конечными элементами solid 65, которые позволяют учесть наличие элементов армирования с заданной ориентацией внутри моделируемого тела и объемной долей содержания армирующих волокон с возможностью учета зарождения и влияния «размазанных трещин» внутри связующего материала армирующих нитей.

3.2 Структурная модель периодического элемента гибких тканых композитов

Второй наиболее часто применяемой моделью для прогнозирования поведения тканых композитов, является модель элементарной периодической ячейки [63, 67, 74, 78, 81, 82, 112, 118, 134] с полным описанием внутренней геометрии исходного материала. Под элементарной периодической ячейкой понимается элемент, периодически повторяющийся в структуре материала. Без ограничения общности, с учетом особенности вида переплетения армирующей ткани будем считать, что закон изменения формы переплетения нитей сохраняется по всей области материала [27, 34, 35, 36, 38]. В случае использования в качестве армирующей ткани полотняного переплетения армирующих нитей, в качестве элементарной периодической ячейки возможно использовать набор четырех накрест-лежащих ортогональных нитей (рис.14).

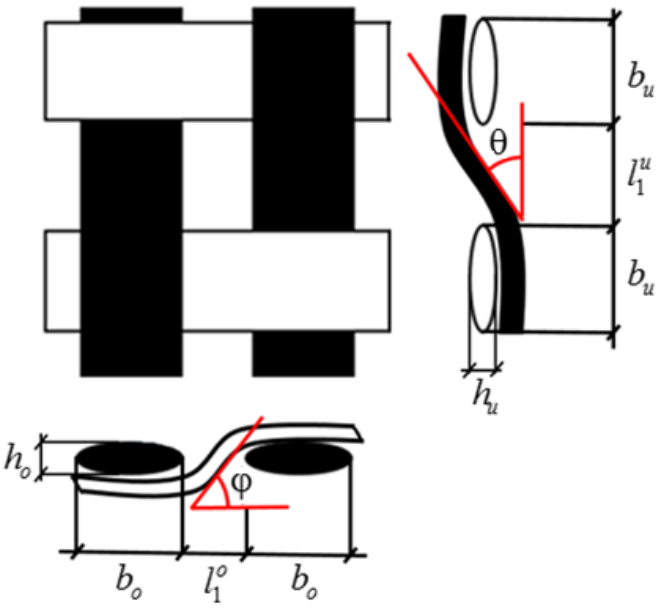

Рис.14. Элементарная периодическая ячейка армирующей ткани полотняного переплетения.

Применяя метод аппроксимации из пункта 3.1, синусоидальная форма нитей аппроксимируется прямолинейными элементами [9, 77, 81, 87], эллипсоидное поперечное сечение аппроксимируется прямоугольником.

В результате получаем ЭПЯ более низкого уровня (рис.15), которая позволяет с достаточным уровнем точности описать поведение исследуемых материалов, созданных на основе армирующей ткани полотняного переплетения.

К модели ЭПЯ армирующей ткани необходимо добавить второй компонент гибких тканых композитов – связующее, и граничные виниловые (ПВХ) пленки (рис.1). В результате получаем модель элементарной периодической ячейки гибкого тканого композита (рис.16), описывающей поведение всего исследуемого материала.

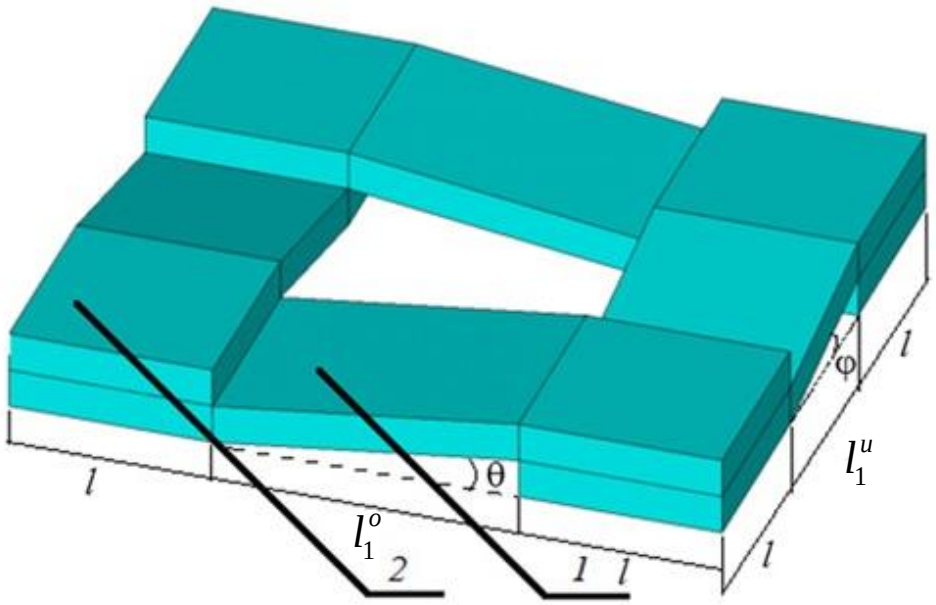

Рис.15. Модель элементарной периодической ячейки армирующей ткани полотняного переплетения: 1 – нить основы, 2 – нить утка.

Нити армирования (основы и утка) являются однонаправленным композитом [83], состоящими из связующего нитей и армирующих волокон (жгутов). Для корректного моделирования армирующей ткани, армирование

нитей вводится индивидуально для каждого линейного участка и совпадает с ориентацией направления нити [106]. Исходя из природы армирующих нитей (трощенные жгуты из лавсановых волокон), предполагается, что материал элементов армирования (волокон нити) упругий с постоянным содержанием объемной доли волокон армирования, связующий материал нитей, как и в предыдущей модели, моделируется с помощью теории течения с линейным кинематическим упрочнением для описания процессов возникновения и влияния необратимых деформаций.

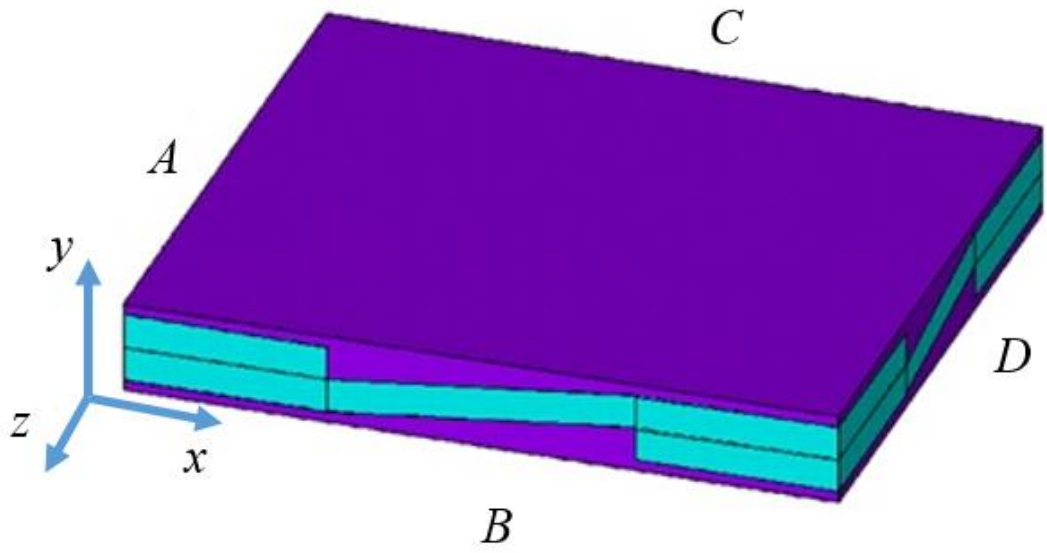

Рис.16. Модель элементарной периодической ячейки гибкого тканого композита.

Связующий материал ЭПЯ гибкого тканого композита моделируется solid 185 [60], нити армирования моделируются конечными элементами solid 65 [60] для учета зарождения и влияния «размазанных трещин» внутри связующего армирующих нитей.

Данная модель позволяет определить наиболее опасные области армирующей ткани с максимальными значениями напряжений (Рис.17) и деформаций (Рис.18) после приложения внешних нагрузок, что в дальнейшем позволяет вывести более корректную аналитическую модель поведения гибких тканых композитов.

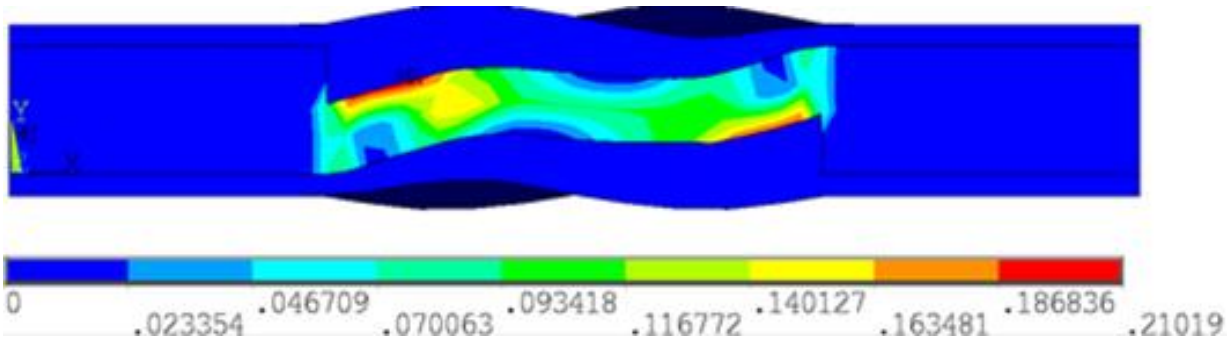

Рис.17. Распределение упругих деформаций в продольном сечении нити основы.

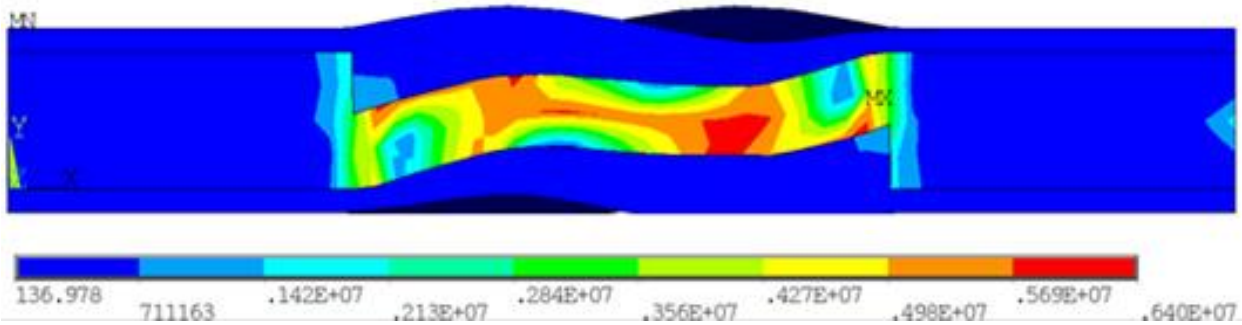

Рис.18. Распределение напряжений по Мизесу в продольном сечении нити основы (Па).

В связи с высокими вычислительными затратами при реализации данной модели даже без учета предварительных повреждений, такой подход приводит к значительным временным затратам. Учет влияния предварительного повреждения путем вдавливания индентора приводит к необходимости полного описания образца тканого композита, состоящего из множества ЭПЯ. К примеру, проведенные расчеты показали, что одна ЭПЯ при ее моделировании МКЭ должна состоять как минимум из 50 000 конечных элементов. Образец материала 16х22 мм^2 содержит порядка 100 ЭПЯ, что влечет за собой необходимость использования нескольких миллионов конечных элементов. Поэтому, для учета предварительных повреждений при малых деформациях целесообразнее воспользоваться «слоистой» моделью,

описанной в пункте 3.2 или, если армирующая ткань имеет форму полотняного переплетения - аналитической моделью, описанной в четвертой главе.

ГЛАВА 4. Аналитическая модель гибких тканых композитов

Основываясь на методиках и способах описания напряженно-деформированного состояния в материале, возможно описать механическое поведение исходного композита без применения метода конечных элементов. Разработка аналитической модели основывается на основных принципах механики деформируемого твердого тела с применением методов из теории упругости и пластичности с основами сопротивления материалов и технической механики.

В дальнейшем, для прогнозирования прочностных характеристик и поведения гибких тканых композитов при деформировании, будем рассматривать растяжение материала вдоль одного из направлений нитей армирующей ткани (основы или утка). Для описания процесса растяжения ЭПЯ (рис.14) из пункта 3.2 с учётом введенной аппроксимации нить основы при растяжении в ее продольном направлении представляется в виде плоской рамы (рис. 19), состоящей из трех взаимосвязанных стержней, находящихся под действием растягивающей силы F. Длины стержней l, l_1 и угол наклона θ - определяются геометрией внутренней структуры материала.

Влиянием виниловой пленки (ПВХ) пренебрегаем. Влияние нити утка на нить основы заменяется действием равномерно распределенной нагрузки q, которая будет определять упругое основание горизонтальных участков нити основы, придаваемое нитью утка [69]. Для определения распределенной нагрузки q, необходимо определить вид структурного элемента нитей утка (рис.20), которые соприкасается с нитью основы на первом и третьем участке структурного элемента.

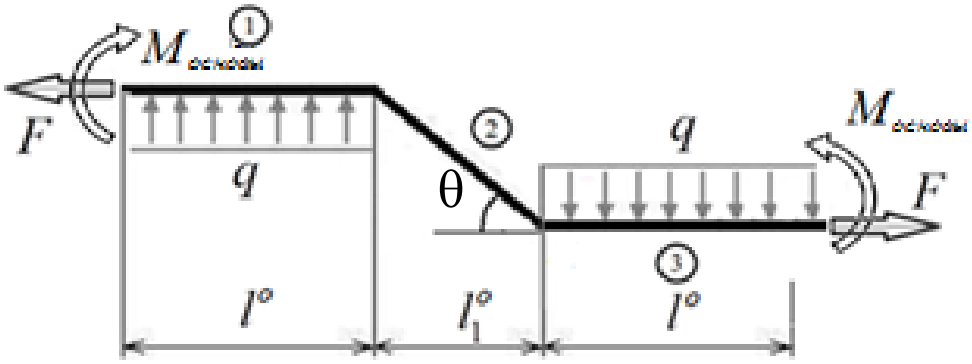

Рис.19. Структурный элемент армирующих нитей основы ЭПЯ гибкого тканого композита.

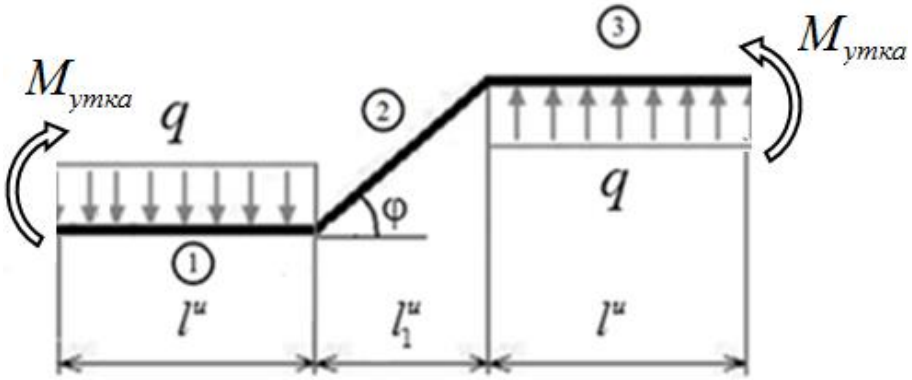

Рис.20. Структурный элемент армирующих нитей утка ЭПЯ гибкого тканого композита.

При растяжении материала за счёт выпрямления нитей переплетения в армирующей ткани происходит формоизменение внутренней структуры материала [96]. Процесс формоизменения представляется в виде последовательности приращений внешней нагрузки, сопровождающийся изменениями упругой и необратимой деформации, и геометрических характеристик рамы. В этом случае модель структуры материала формулируется в приращениях, что позволяет описать поведение материала вплоть до полного распрямления нитей армирования ориентированных вдоль приложенной растягивающей силы [81].

Из равенства вертикальных перемещений структурных элементов нитей основы и утка на первом участке и значений жесткости стержней на участках соприкосновения, определяется значение приращения распределенной нагрузки Δq_i на каждом *i*-ом шаге приращения нагрузки:

$$\Delta q_i = \frac{2\Delta F l_1^o B tg\theta_i}{l^u D + 2 l^o C}, \qquad (4.1)$$

где B, C, D – геометрические параметры, определяемые по формулам:

$$B = 3\left(l^o\right)^2 + 3 l^o l_1^o + \frac{4\left(l_1^o\right)^2}{\cos\theta_i},$$

$$C = 2.5\left(l^o\right)^3 + 5\left(l^o\right)^2 l_1^o + 3 l^o \left(l_1^o\right)^2 + \frac{4\left(l_1^o\right)^3}{\cos\theta_i}, \qquad (4.2)$$

$$D = 6\left(l_1^u\right)^2 l^u + 10 l_1^u \left(l^u\right)^2 + 5\left(l^u\right)^3 + 8\frac{\left(l_1^u\right)^3}{\cos\varphi_i}.$$

В процессе деформирования структурного элемента его участки, в основном, работают на растяжение и изгиб. Перемещения на участках рамы от изгибающих моментов вычисляются методом Мора-Верещагина [56]. Работой внутренних поперечных сил пренебрегаем. Обозначим через $E = E_r \nu_r + (1-\nu_r) E_m$ - модуль упругости гибкого тканого композита в области упругих деформаций, где E_r - модуль упругости материала волокон нитей армирования, E_m - модуль упругости связующего материала нитей армирования, ν_r - объемная доля содержания волокон армирования в нити. Обозначим через $J_н = \frac{b h_0^3}{12}$ - момент инерции нитей основы или утка соответственно, где b – ширина поперечного сечения нити, h_0 - высота поперечного сечения нити. Тогда, вертикальное смещение первого участка

$\Delta_{y,i}^{left}(M)$ относительно третьего под действием внутренних изгибающих моментов M на каждом приращении внешней нагрузки определяется:

$$\Delta_{y,i}^{left}(M)=\frac{1}{48EJ_{н}}\left(\Delta F l_1^o B\tan\theta_i-\Delta q l^o C\right). \qquad (4.3)$$

Введем параметр:

$$\Delta K_i=\Delta F l_1^o\tan\theta_i-\Delta q_i\left(\left(l^o\right)^2+l^o l_1^o\right), \qquad (4.4)$$

характеризующий отношение внешней нагрузки с надавливанием накрест-лежащих нитей друг на друга. Тогда, горизонтальное удлинение структурного элемента от изгибающих моментов $\Delta_{x,i}^{right}(M)$ на каждом приращении внешней нагрузки от внутренних изгибающих моментов M:

$$\Delta_{x,i}^{right}(M)=\frac{l_1^o\tan\theta_i}{48EJ_{н}}\left(\Delta K_i\left(3l^o+4l_1^o\right)+\Delta q\left(l^o\right)^2\left(l^o+l_1^o\right)\right). \qquad (4.5)$$

Для расчета изменения угла наклона второго участка θ необходимо определить перемещения на этом участке. Горизонтальное и вертикальное перемещение второго участка на каждом i-ом приращении внешней нагрузки относительно первого и третьего участка от внутренних изгибающих моментов M:

$$\Delta^2{}_{x,i}(M)=\frac{l_1^o\tan\theta_i}{12EJ_{н}}\left(\Delta K_i l_1^o+\Delta q_i\left(l^o\right)^2 l_1^o\right), \qquad (4.6)$$

$$\Delta^2{}_{y,i}(M)=\frac{1}{12EJ_{н}}\left(\Delta K_i\left(l_1^o\right)^2+\Delta q_i\left(l^o\right)^2 l_1^o\right). \qquad (4.7)$$

Обозначим через $A_{н}=bh_0$ - площадь поперечного сечения нити основы, аппроксимированной прямоугольником. Вычисляем приращение перемещения от внутренней продольной силы N на первом и третьем участках:

$$\Delta_x^1(N)=\frac{\Delta F l^o}{2EA_{н}}=\Delta_x^3(N). \qquad (4.8)$$

Вычисляем приращения перемещения от внутренней продольной силы N на втором участке:

$$\Delta_x^2\left(N\right)=\frac{\Delta F\cos\theta+\Delta q_i l^o\sin\theta}{EA_н}. \qquad (4.9)$$

В процессе деформирования гибкого тканого композита происходит формоизменение и выпрямление 2-го участка структурного элемента, что влечет за собой изменение угла наклона θ для 2-го участка структурного элемента.

Угол наклона 2-го участка θ на каждой итерации, с учетом перемещений, достигнутых на участках структурного элемента на предыдущей итерации, определяется по следующей формуле:

$$\theta_{i+1}=\arctan\left(\frac{l_1^o\tan\theta_i-\Delta^2{}_{y,i}\left(M,\theta_i\right)}{l_1^o+\Delta_{x,i}^{right}\left(M,\theta_i\right)-\Delta_{x,i}^2\left(M,\theta_i\right)+\Delta_x^2\left(N,\theta_i\right)}\right). \qquad (4.10)$$

В связи с изменением угла наклона второго участка и изменением длин на участках рассматриваемой рамы, происходит изменение распределенной нагрузки q в соответствии с формулами (4.1) – (4.9).

Так как второй участок структурного элемента стремится выпрямиться, величина приращения распределенной нагрузки q уменьшается на каждом последующем шаге. При полном распрямлении структурного элемента приращение нагрузки q будет равно нулю. В этом случае завершается учет процесса формоизменения, и рама превращается в прямолинейный стержень.

Помимо описанного выше процесса формоизменения структуры гибких тканых композитов, необходимо моделирование поведения материалов – компонентов, из которых состоит композиционный материал.

Нити переплетения армирующей ткани композита являются также композиционным материалом, состоящим из двух компонентов: трощеный жгут и связующий материал. Исходя из свойств используемых компонент материала, представленных в пункте 2.2, будем считать, что трощеный жгут

деформируется упруго, а в связующем возможно наличие необратимых деформаций, которые, с учетом введенных ограничений будем описывать моделью пластических деформаций, моделируемых теорией течения с линейным кинематическим упрочнением. Введем предположение, что необратимые деформации возникают только в наклонном участке рамы, так как именно в этой области структурного элемента наименьшая жесткость нити и максимальные деформации и напряжения (рис.17 – 18).

Величина необратимых деформаций ε_p в случае использования теории течения с линейным кинематическим упрочнением:

$$\varepsilon_p = \frac{E - E_t}{EE_t}\left(\sigma_i - \sigma_t\right), \qquad (4.11)$$

где E – модуль упругости нити армирования, E_t – модуль упрочнения нити армирования при пластическом деформировании, σ_i – осредненные текущие нормальные напряжения в нити, σ_t – осредненный предел текучести нити.

Далее определяется энергия U_i [27,29-31,33], затраченная на пластическое (необратимое) деформирование, и дополнительная работа деформаций $H_i = \sigma_i \varepsilon_i - U_i$ для дальнейшей возможности применения принципа о минимуме дополнительной работы деформаций и нахождения приращения удлинения наклонного участка рамы от приращения растягивающей силы *F* в направлении ее действия на *i*-ом шаге.

Удельная внутренняя энергия деформаций, накопленная до разрушения материала [56]:

$$W_i = \int_0^{\varepsilon_p} \sigma_i d\varepsilon_p \,. \qquad (4.12)$$

$$W_i = \left(\sigma_i^2 - \sigma_t^2\right)\frac{E - E_t}{2EE_t}\,. \qquad (4.13)$$

Оценим распределение напряжений по сечению структурного элемента на втором участке. На рис.21 изображена граница η_0 между зонами упругого и пластического деформирования при изгибе.

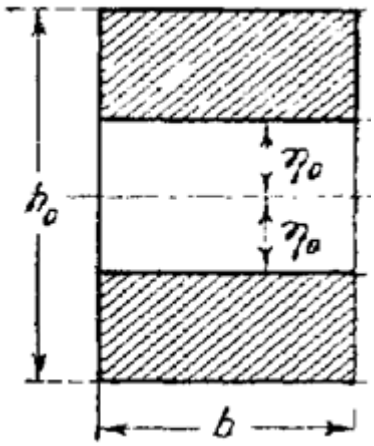

Рис.21. Граница между зонами упругого и пластического деформирования

Для определения положения границ η_0 воспользуемся формулой [56]:

$$\frac{1}{\rho_i} = \frac{2\varepsilon_i}{h_0} = \frac{\varepsilon_t}{\eta_{0,i}}, \tag{4.14}$$

где ρ_i - текущий радиус кривизны на втором участке структурного элемента, ε_i - текущая деформация, h_0 - высота поперечного сечения нити.

Выразим текущие деформации ε_i при $\sigma_i > \sigma_t$:

$$\varepsilon_i = \frac{\sigma_i - \sigma_t}{E_t} + \frac{\sigma_t}{E} = \frac{\sigma_t E_t + E\left(\sigma_i - \sigma_t\right)}{EE_t}. \tag{4.15}$$

Тогда, определяя величину радиуса кривизны на текущей итерации ρ_i, возможно определить положение границ упругого и пластического деформирования:

$$\rho_i = \frac{h_0}{2\varepsilon_i} = \frac{h_0 EE_t}{2\left(\sigma_t E_t + E\left(\sigma_i - \sigma_t\right)\right)}, \tag{4.16}$$

$$\eta_{0,i} = \varepsilon_t \rho_i = \frac{\sigma_t E_t h_0}{2\left(\sigma_t E_t + E\left(\sigma_i - \sigma_t\right)\right)}. \tag{4.17}$$

Далее, определяя энергию $U_i = \int_0^{l_1/2} \int_0^{b} \int_{\eta_0,i}^{h/2} W_i dV$, затраченную на пластическое деформирование на наклонном участке структурного элемента и дополнительную работу деформаций $H_i = \sigma_i \varepsilon_i - U_i$, учитывая, что деформирование происходит за счет продольного растяжения и изгиба, а также взаимосвязь напряжений и внешней силы *F*, определяется величина приращения горизонтального удлинения структурного элемента:

(4.19)

$$\Delta_{x,i}^{plastic} = \frac{\partial H_i}{\partial F} = \frac{\left(E - E_t\right) l_1^o}{2EE_t} \left\{ 2\sigma_i \left(1 - \frac{\sigma_t E_t}{\sigma_t E_t + E\left(\sigma_i - \sigma_t\right)} \right) - \left(\sigma_i{}^2 - \sigma_t^2\right) \left[\frac{\sigma_t E_t E}{\left(\sigma_t E_t + E\left(\sigma_i - \sigma_t\right)\right)^2} \right] \right\}.$$

Приращение горизонтального удлинения структурного элемента (рис.19) на каждом приращении внешней нагрузки складывается из приращений упругих и необратимых деформаций. Таким образом на *i*-ом шаге приращения растягивающей силы *F*, приращение удлинения структурного элемента (рамы):

$$\Delta_i = \begin{cases} \sum_{i=1}^{3} \Delta_{x,i}^{elastic}, \sigma_i \le \sigma_t \\ \sum_{i=1}^{3} \Delta_{x,i}^{elastic} + \Delta_{x,\mathrm{i}}^{plastic}, \sigma_i > \sigma_t \end{cases} \qquad (4.20)$$

где $\Delta_{x,i}^{elastic}$ - приращение перемещений от упругих деформаций, $\Delta_{x,\mathrm{i}}^{plastic}$ - приращение перемещений от необратимых (пластических) деформаций, σ_i – осредненные текущие нормальные напряжения в нити, σ_t – осредненный предел текучести нити.

Полученные соотношения (4.20) определяют зависимость величины приращения удлинения структурного элемента (с учетом формоизменения геометрической структуры) вызванных изгибом и растяжением нити от приращения внешней растягивающей силы *F*.

Для учета предварительных повреждений материала вводится предположения об остаточной геометрической форме образца, подвергшегося ударному повреждению. На рис. 22 изображено его продольное сечение.

Рис. 22. Сечение образца после ударного нагружения.

В центре сечения имеется криволинейный участок. Вводится предположение, что остаточные деформации, которые возникают после предварительного ударного нагружения, связаны с изменением радиусов кривизны ρ_{ex} на наклонном участке (рис. 19).

При упругом деформировании на втором участке структурного элемента, деформации, вносимые повреждением, учитываются слагаемым $\varepsilon_t = h_0/\rho_{ex}$, где h_0 - высота поперечного сечения нити, ρ_{ex} - радиус кривизны, вносимый предварительным повреждением и определяемый радиусом отпечатка остаточных деформаций на образце поврежденного материала. В пластической области деформирования (области необратимых деформаций) формулу 4.19 необходимо дополнить слагаемым $\sigma_t\rho_0 / Eh_o$, где σ_t - осредненный предел текучести нити, E – модуль упругости нити армирования:

$$\Delta_{x,i}^{plastic} = \frac{\left(E - E_t\right) l_1^o}{2EE_t} \left\{ 2\sigma_i \left(1 + {\sigma_t \rho_0} \Big/ {Eh_o} - \frac{\sigma_t E_t}{\sigma_t E_t + E\left(\sigma_i - \sigma_t\right)} \right) - \right.$$

$$\left. - \left(\sigma_i^{\,2} - \sigma_t^2\right) \left[\frac{\sigma_t E_t E}{\left(\sigma_t E_t + E\left(\sigma_i - \sigma_t\right)\right)^2} \right] \right\}. \qquad (4.21)$$

Подобным образом возможно описание поведения материала при статическом растяжении вдоль одного из направлений армирования без использования метода конечных элементов. Однако, такой вариант моделирования применим к описанию поведения тканых композитов только с полотняным переплетением армирующей ткани. Для моделирования гибких тканых композитов с переплетением армирующей ткани, отличным от полотняного, возможно использовать модели, предложенные в главе 3.

ГЛАВА 5. Экспериментальные исследования и апробация предложенных моделей

Для апробации разработанных и модифицированных моделей, описывающих поведение гибких тканых композитов при статическом растяжении, были проведены экспериментальные исследования на статическое растяжение образцов гибких тканых композитов с различной внутренней геометрии полотняного переплетения. В качестве варьируемых параметров выступали толщина образца композита, толщина нитей переплетения армирующей ткани и углы подъема наклонных участков структурных элементов переплетения нитей основы и утка.

Исследовались образцы материала, имеющие следующие геометрические характеристики (рис. 23): длина рабочей части l_0=2,2 см, ширина образца b_0 = 1,6 см, l^* = 1,6 см.

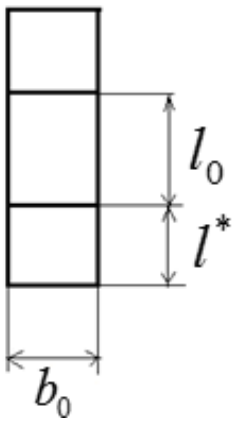

Рис. 23. Образцы материала.

Образцы вырезались из материала таким образом, чтобы направление нитей основы совпадало с продольной осью образца. Эксперимент на статическое одноосное растяжение выполнялся с использованием установки Amsler HC10 (рис.24).

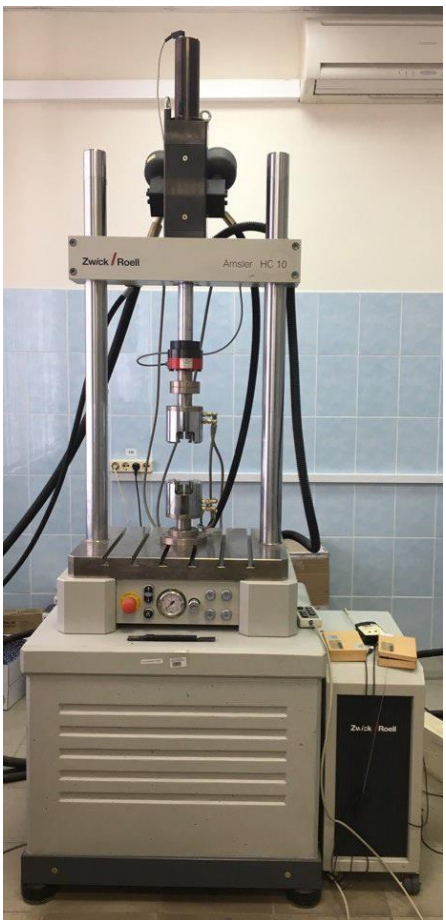

Рис.24. Экспериментальная установка AMSLER HC10.

В качестве основной характеристики механического поведения образцов гибких тканых композитов использовалась диаграмма деформирования материала, определяющая связь между напряжениями и деформациями. Полученная в эксперименте диаграмма растяжения в осях сила – перемещение, пересчитывалась в диаграмму деформирования с учётом соотношения между внутренними силами и геометрическими характеристиками образцов. Скорость деформирования составляла 0,3 мм/сек, что позволяет исключить инерционные процессы в структуре материала.

5.1. Результаты экспериментальных исследований

Для определения механических характеристик компонентов, используемых в предложенных моделях, из которых состоит композит, были проведены экспериментальные исследования на статическое растяжение лавсановых нитей армирования и используемого в качестве связующего гибкого полиуретана (клея, соединяющего армирующую ткань и виниловые пленки ПВХ) (рис.25 - 26).

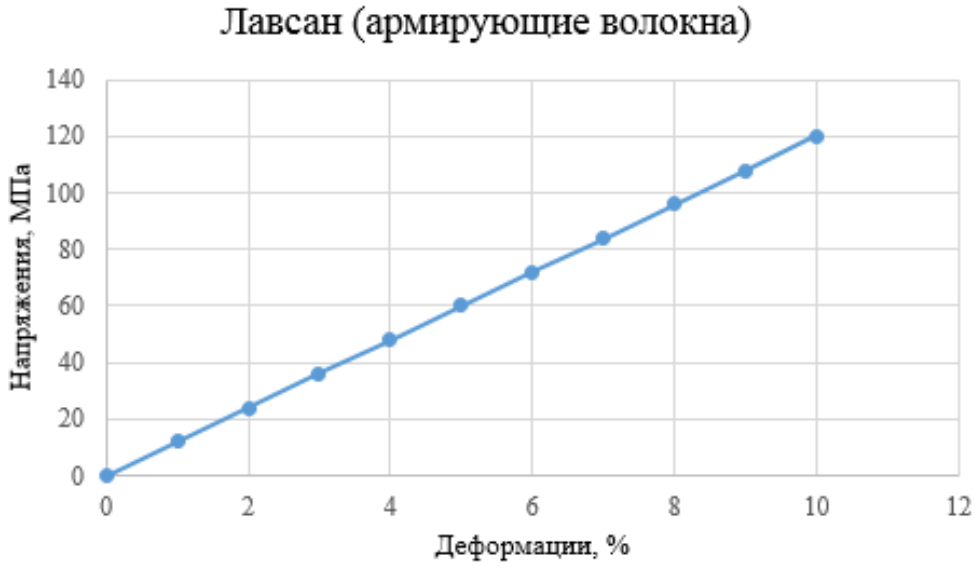

Рис. 25. Осредненная диаграмма деформирования лавсановых волокон.

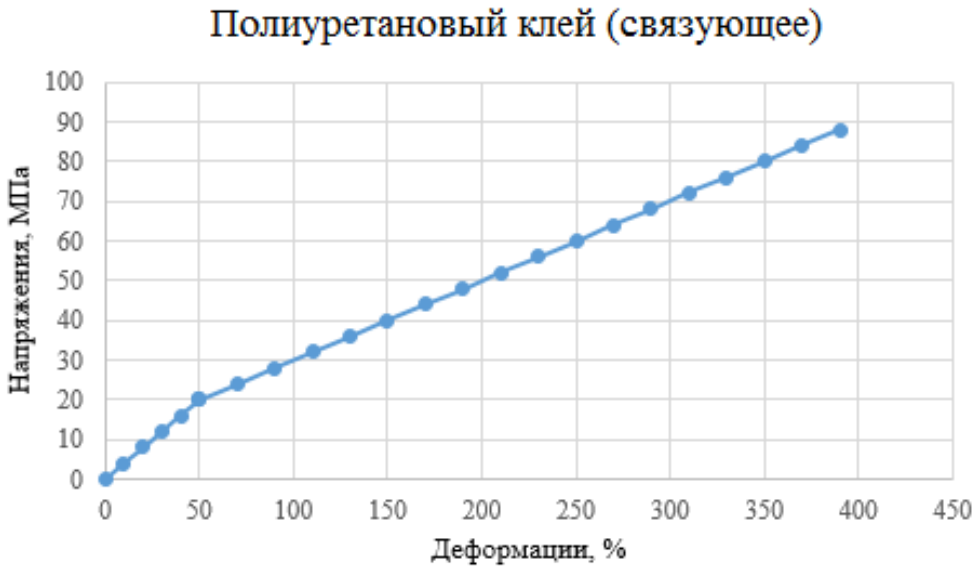

Рис. 26. Осредненная диаграмма деформирования гибкого полиуретана.

На основе проведенных экспериментальных исследований и представленных в литературе справочников [40, 47, 50, 51, 56, 59] был сделан вывод о следующих механических характеристиках компонент материала, составляющих композит, представленных в таблице 2 в соответствии с схематизацией вида диаграммы деформирования (рис.6).

Таблица 2

Тип материала	Материал	E МПа	ν	σ_t МПа	E_t МПа
Армирующие волокна нитей	полиэфирные рубленые волокна (лавсан)	$1,2*10^3$	0,2	-	-
Связующий материал	поливинилхлорид и полиуретан	35	0,35	20	20

В таблице 2 введены обозначения: E - модуль Юнга, ν - коэффициент Пуассона, σ_t - значение напряжений, при котором происходит значительное снижение начального модуля упрочнения, E_t - модуль упрочнения при напряжениях $\sigma \geq \sigma_t$.

Для апробации предложенных моделей поведения гибких тканых композитов, были проведены экспериментальные исследования для образцов композитов с различной структурой внутренней геометрии. Геометрические характеристики каждого вида композита в соответствии с рис. 19 – 20, представлены в таблице 3.

Таблица 3. Геометрические характеристики внутренней структуры.

Параметр / Марка композита	VP6545	VP6131	VP4126
Угол наклона θ_0, °	12	15	7
Угол наклона φ_0, °	15	17	8
Длина l^o, мм	0.3	0.25	0.3
Длина l^u, мм	0.3	0.25	0.3
Длина l_1^o, мм	0.5	0.45	0.5
Длина l_1^u, мм	0.4	0.4	0.4
Ширина нити основы b^o, мм	0,7	0,7	0,7
Ширина нити утка b^u, мм	0,7	0,7	0,7
Толщина нити основы h^o, мм	0.5	0.4	0.25
Толщина нити утка h^u, мм	0.5	0.4	0.25
Объемная доля содержания армирующих волокон в нитях r	0.85	0.9	0.98

На рис. 27 - 29 приведены осредненные диаграммы деформирования образцов гибких тканных композитов без предварительных повреждений, полученные из диаграмм одноосного растяжения вдоль нитей основы.

Рис.27. Диаграмма деформирования неповрежденных образцов VP6545.

Рис.28. Диаграмма деформирования неповрежденных образцов VP6131.

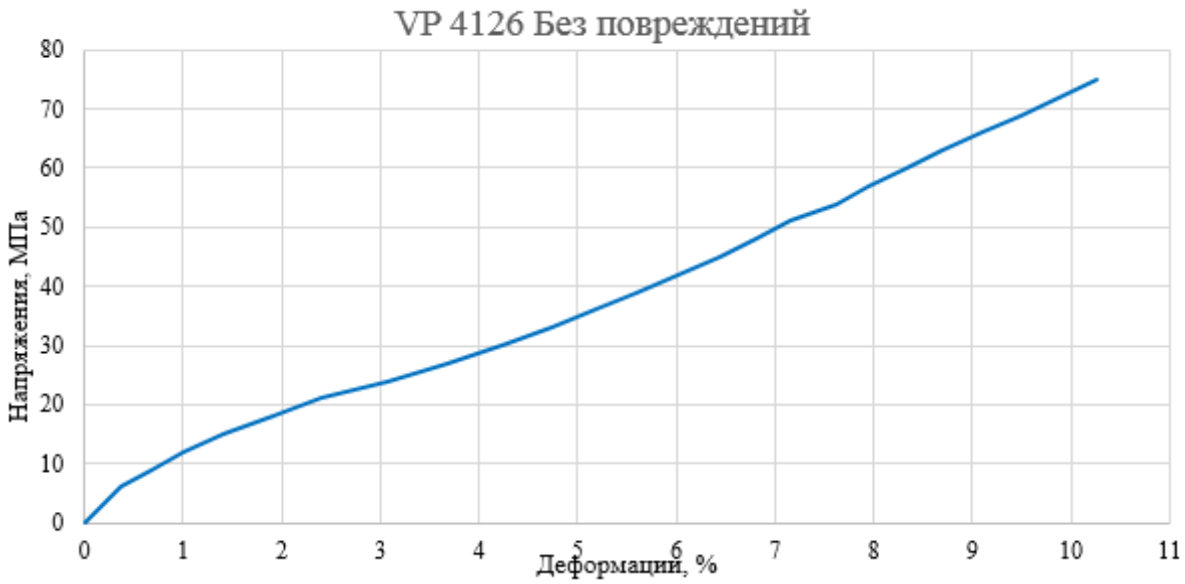

Рис.29. Диаграмма деформирования неповрежденных образцов VP4126.

Экспериментальные исследования включали в себя изучение влияния предварительного локального повреждения композита на диаграмму деформирования. Нанесение предварительного повреждения выполнялось с использованием установки Devenport FDB/230 (рис.30).

С помощью падающего ударника с сферическим наконечником (рис.31) и заданной массы на ударнике наносилось единичное повреждение. Масса на ударнике в эксперименте, подбиралась таким образом, чтобы возможно было получить образцы с различными уровнями повреждений, соответствующие 30% (1 уровень повреждения), 70% (2 уровень повреждения) и 100% (3 уровень повреждения), где 100% повреждений соответствуют сквозному пробитию образца. [64]. В результате падения ударника с высоты равной одному метру в листе материала возникали остаточные напряжения и деформации.

Рис. 30 Экспериментальная установка Devenport FDB/230.

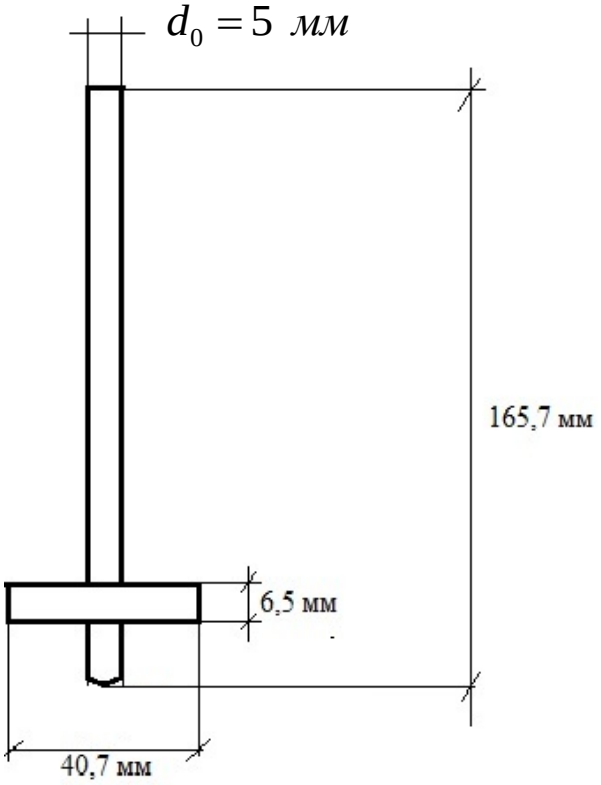

Рис.31. Геометрические размеры ударника.

Из повреждённого материала изготавливались образцы (рис.32), аналогичные образцам неповрежденного материала (рис. 23).

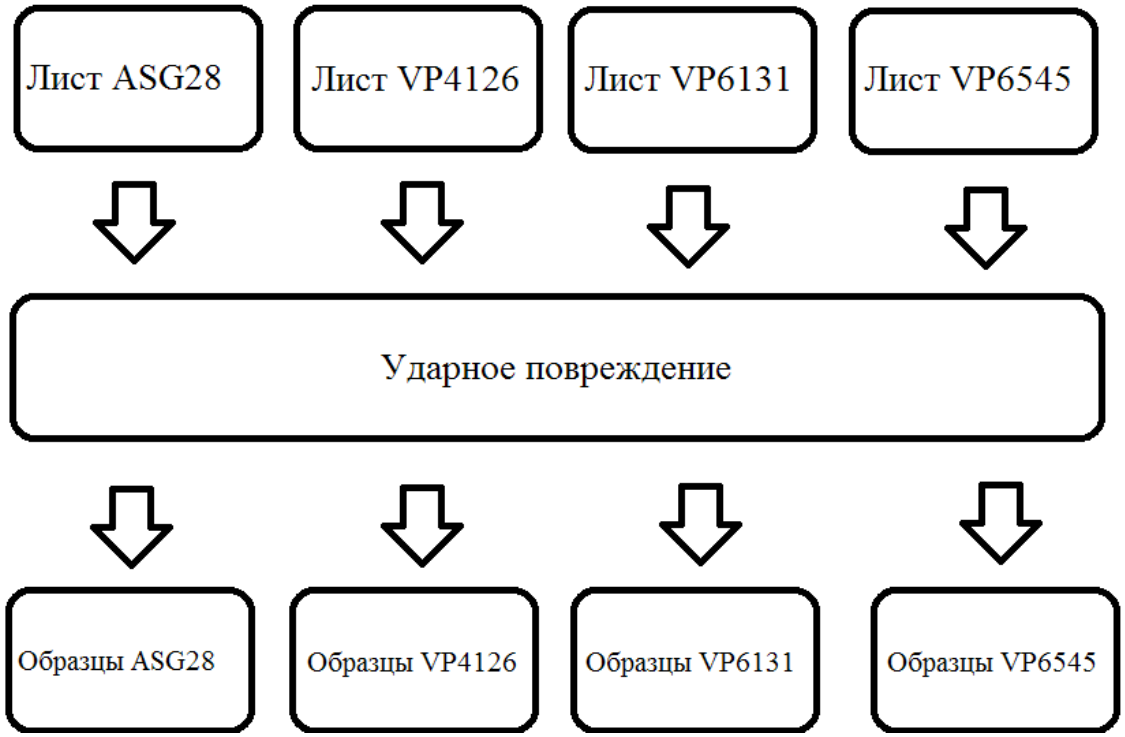

Рис. 32. Схема получения образцов предварительно-поврежденного материала.

Образцы вырезались таким образом, чтобы единичное повреждение от ударного воздействия находилось в центре образца.

На рис. 33 – 41 приведены обработанные и осредненные диаграммы деформирования образцов с предварительным повреждением.

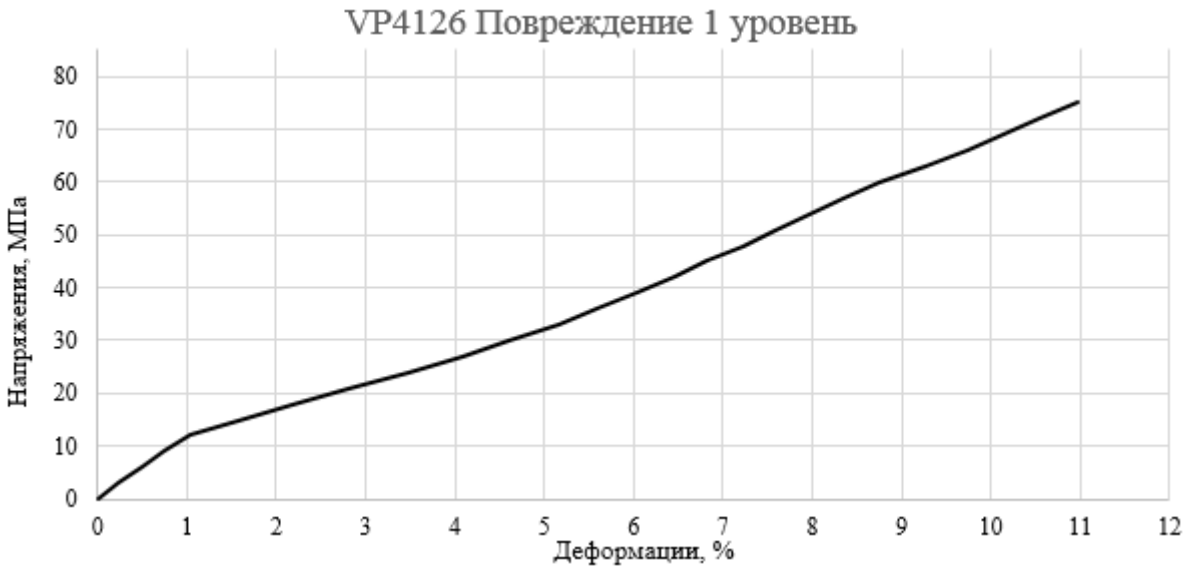

Рис.33. Диаграмма деформирования образцов VP4126 с повреждением 1 – го уровня.

Рис.34. Диаграмма деформирования образцов VP4126 с повреждением 2 – го уровня.

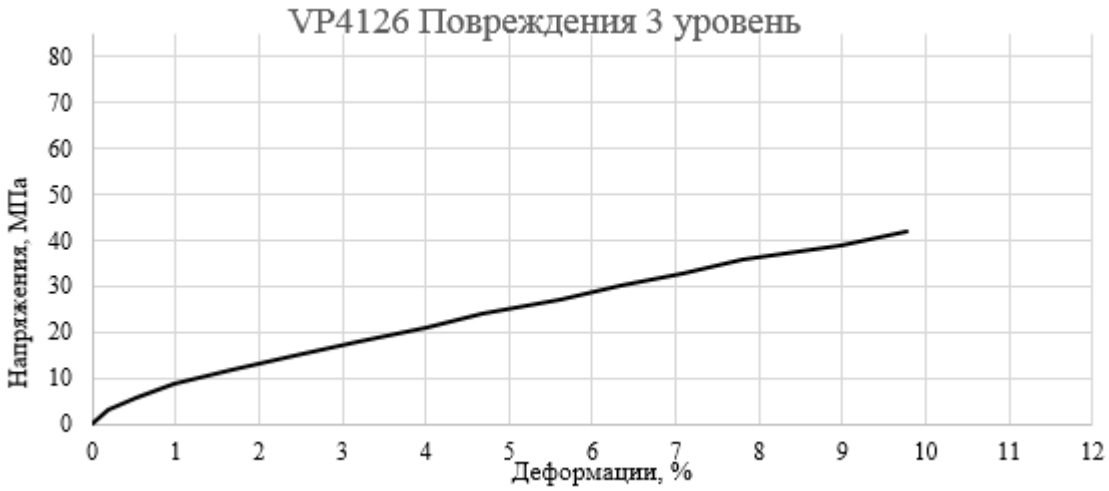

Рис.35. Диаграмма деформирования образцов VP4126 с повреждением 3 – го уровня.

Рис.36. Диаграмма деформирования образцов VP6131 с повреждением 1 – го уровня.

Рис.37. Диаграмма деформирования образцов VP6131 с повреждением 2 – го уровня.

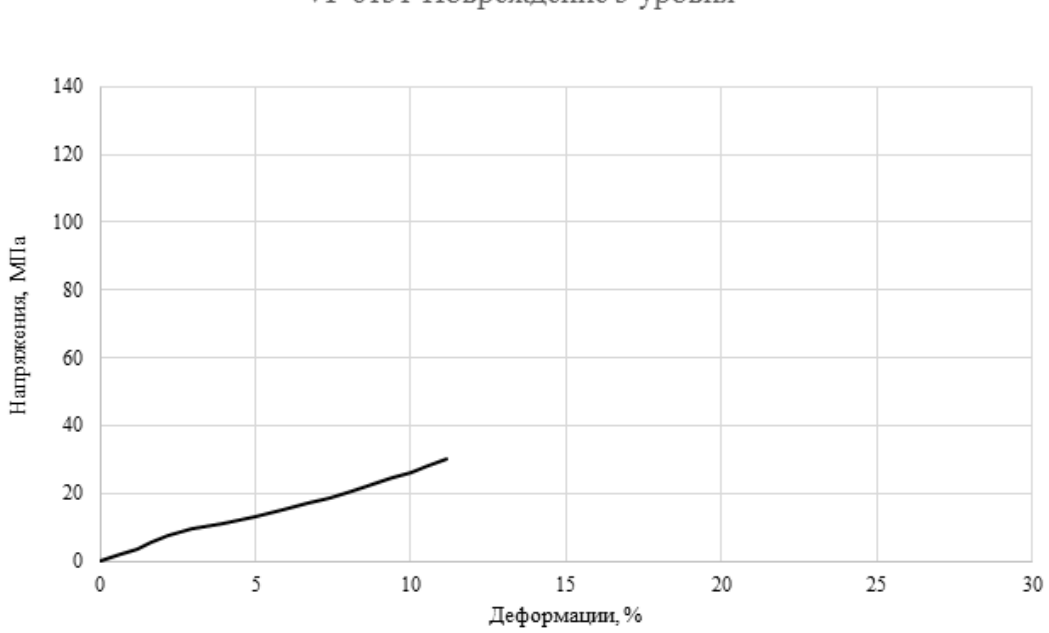

Рис.38. Диаграмма деформирования образцов VP6131 с повреждением 3 – го уровня.

Рис.39. Диаграмма деформирования образцов VP6545 с повреждением 1 – го уровня.

Рис.40. Диаграмма деформирования образцов VP6545 с повреждением 2 – го уровня.

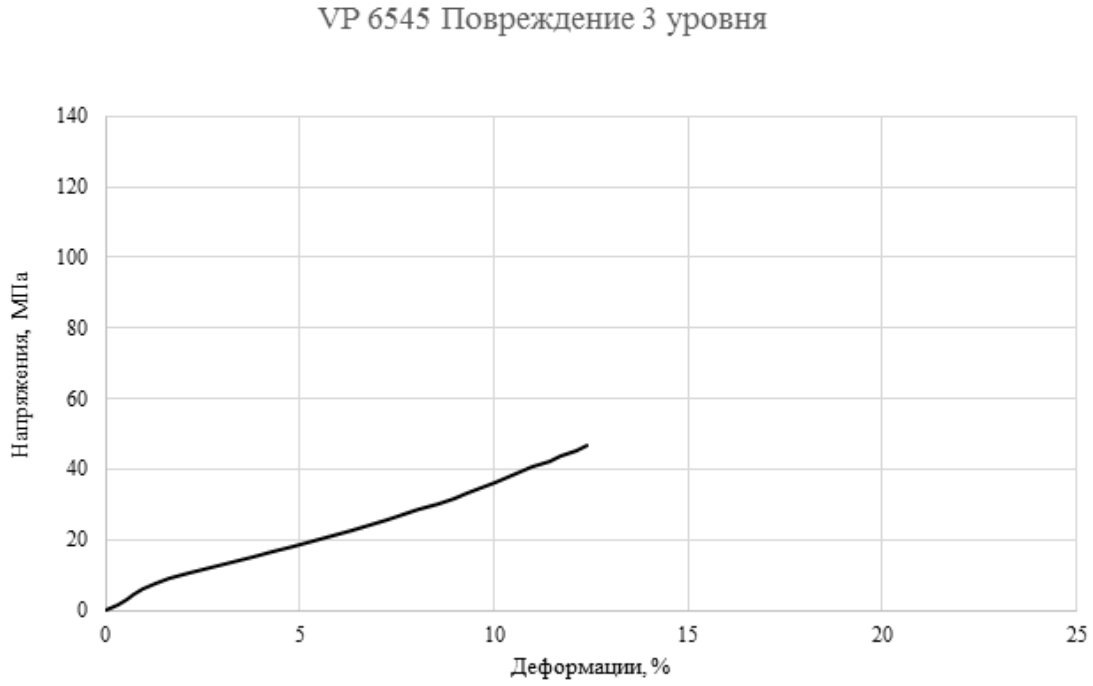

Рис.41. Диаграмма деформирования образцов VP6545 с повреждением 3 – го уровня.

Для анализа влияния предварительного ударного повреждения на механическое поведение гибких тканых композитов в таблице 4 проводится анализ максимальных отклонений δ_{max} значений диаграммы деформирования поврежденных материалов от величин напряжений для диаграмм деформирования неповрежденных образцов.

Таблица 4. Влияние предварительного ударного повреждения

Уровень повреждения / Параметр	δ_{max}, %		
Тип материала	VP6545	VP6131	VP4126
1 уровень повреждения	+ 5,1	- 4,9	- 8,6
2 уровень повреждения	- 9	- 8,1	- 8,7
3 уровень повреждения	- 23,3	- 36,3	- 42,1

Дополнительно, для анализа влияния предварительного ударного повреждения на изменение жесткости гибких тканых композитов систематизируем вид диаграммы деформирования. Введем предположение о трехсегментном виде диаграммы деформирования (рис. 42). На каждом сегменте диаграммы деформирования в качестве параметров анализа будут использоваться значения модулей упрочнения.

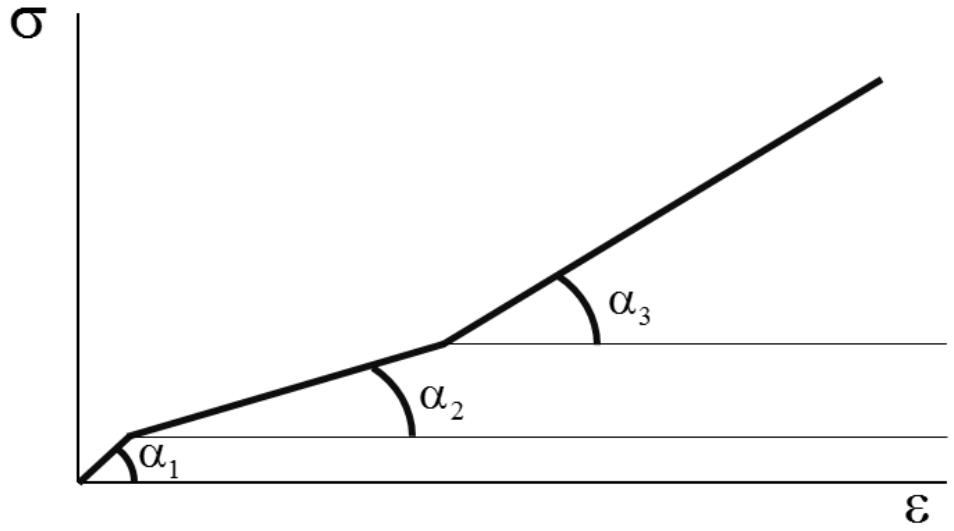

Рис. 42. Схематизация диаграммы деформирования гибких тканых композитов.

В таблицах 5 - 7 представлены результаты анализа диаграмм деформирования поврежденных (не приводящие к сквозному пробитию) и неповрежденных образцов гибких тканых композитов.

Таблица 5. VP4126

Уровень повреждения / Параметр	$E_1 = tg\alpha_1$, МПа	$E_2 = tg\alpha_2$, МПа	$E_3 = tg\alpha_3$, МПа
Неповрежденные образцы	990 (+0,0%)	604 (+0,0%)	756 (+0,0%)
1 уровень повреждения	973 (-1,7%)	552 (-8,6%)	733 (-3%)
2 уровень повреждения	952 (-2,2 %)	498 (-9,8%)	720 (-1,8%)

Таблица 6. VP6131

Уровень повреждения / Параметр	$E_1 = tg\alpha_1$, МПа	$E_2 = tg\alpha_2$, МПа	$E_3 = tg\alpha_3$, МПа
Неповрежденные образцы	550 (+0,0%)	312,5 (+0,0%)	560 (+0,0%)
1 уровень повреждения	524 (-4,7%)	291 (-6,9%)	538 (-3,9%)
2 уровень повреждения	485 (-7,4%)	267 (-8,2%)	524 (-2,6%)

Таблица 7. VP6545

Уровень повреждения / Параметр	$E_1 = tg\alpha_1$, МПа	$E_2 = tg\alpha_2$, МПа	$E_3 = tg\alpha_3$, МПа
Неповрежденные образцы	917 (+0,0%)	328 (+0,0%)	671 (+0,0%)
1 уровень повреждения	860 (-6,2%)	317 (-3,4%)	710 (+5,8%)
2 уровень повреждения	790 (-8,1%)	313 (-1,3%)	670 (-5,6%)

На основе рассчитанных данных, представленных в таблицах 4-7 можно сделать вывод о размягчении материала при воздействии локального ударного повреждения на общее механическое поведение образцов исследуемых гибких тканых композиционных материалов. Однако, относительное изменение жесткости незначительно и находится на уровне погрешности при испытании как поврежденных, так и неповрежденных образцов.

Для определения величин остаточных деформаций были проведены экспериментальные исследования на разгрузку исследуемых материалов (рис.43-46).

На рис. 43 представлены результаты экспериментальных исследований на разгрузку с значений напряжений 13 МПа.

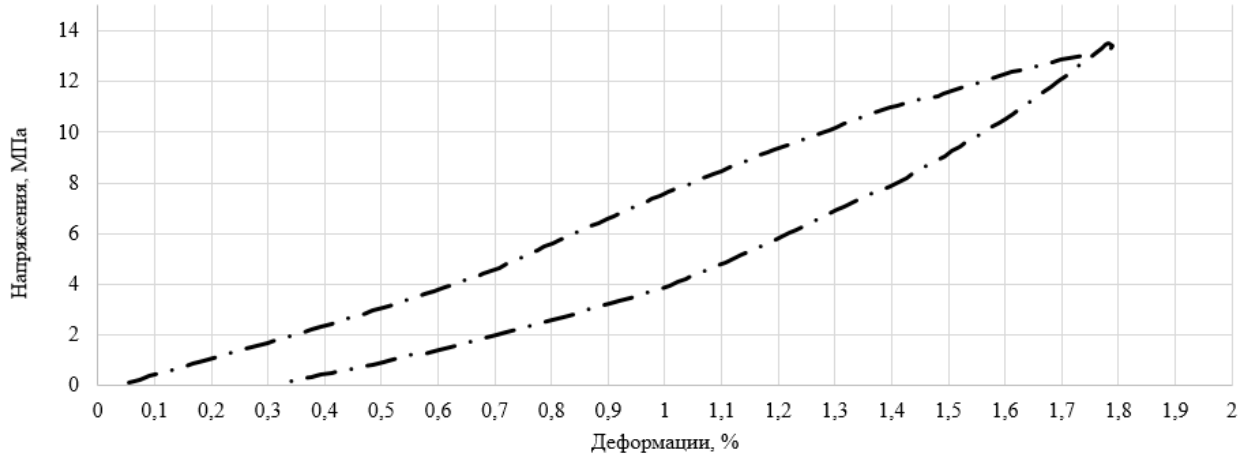

Рис. 43. Разгрузка с 13 МПа.

На рис. 44 представлены результаты экспериментальных исследований на разгрузку с значений напряжений 15 МПа.

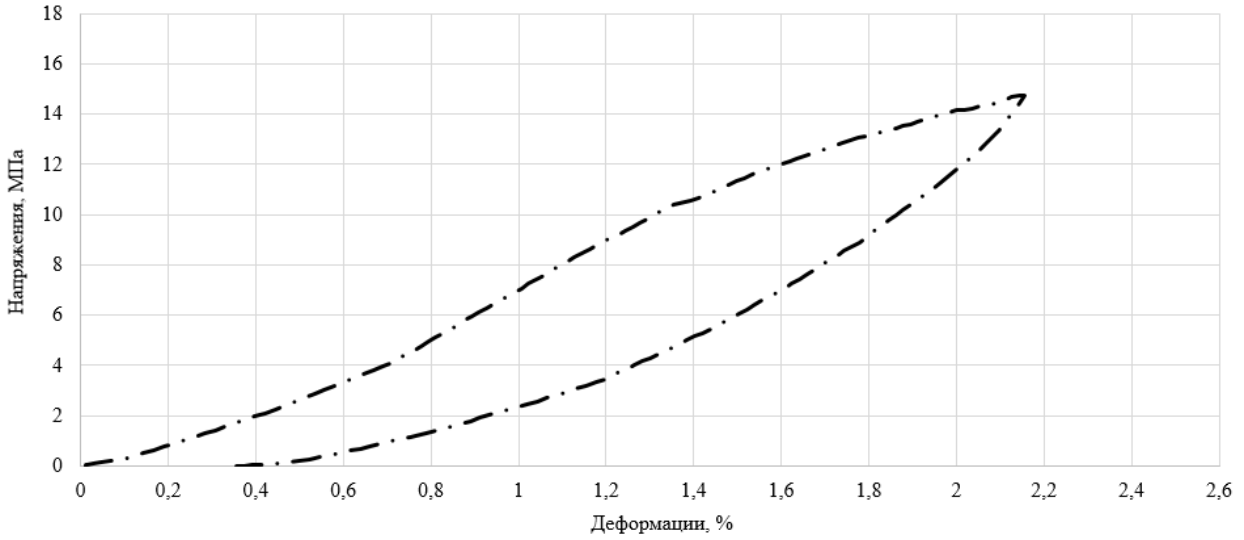

Рис. 44. Разгрузка с 15 МПа.

На рис. 45 представлены результаты экспериментальных исследований на разгрузку с значений напряжений 33 МПа.

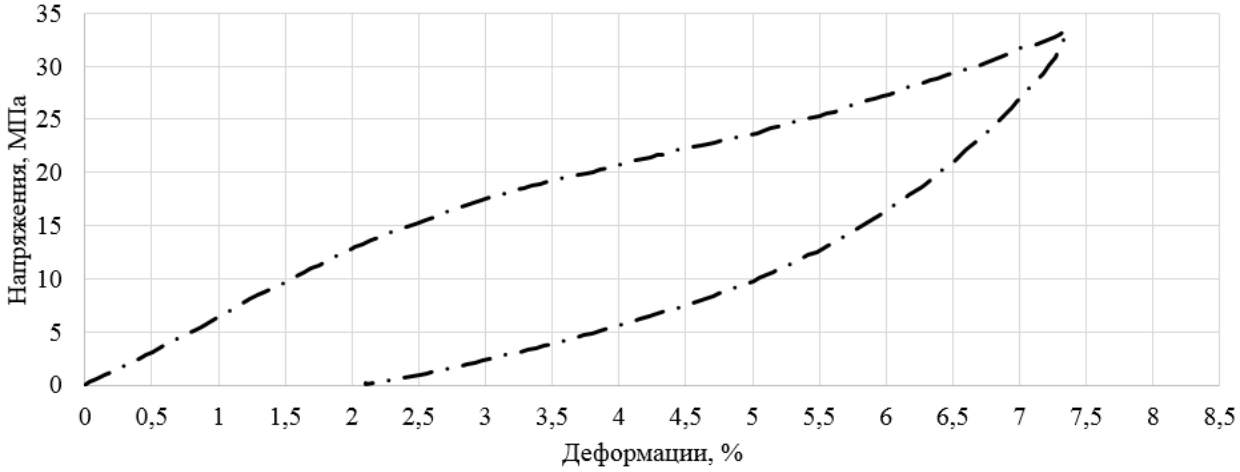

Рис. 45. Разгрузка с 33 МПа.

На рис. 46 представлены результаты экспериментальных исследований на разгрузку с значений напряжений 70 МПа.

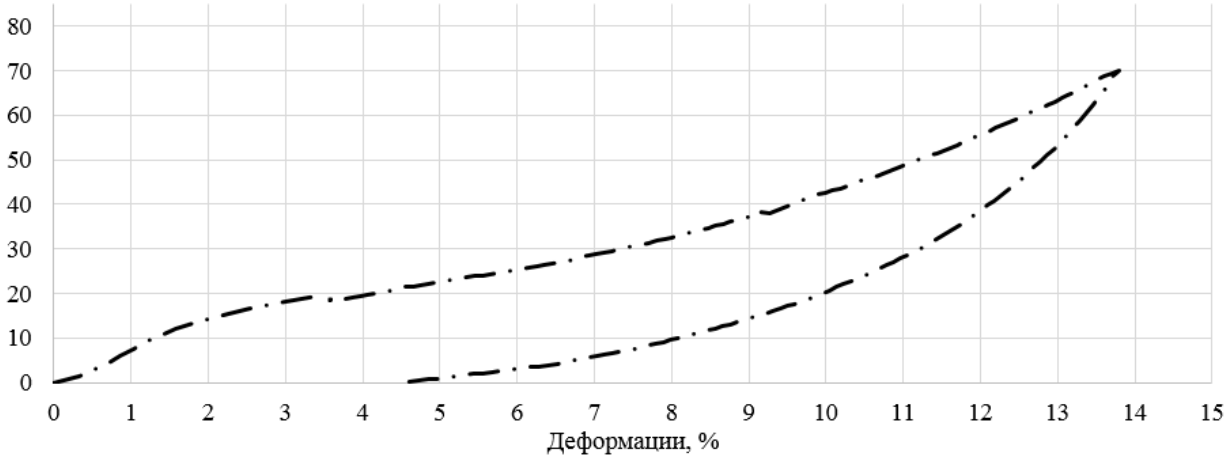

Рис. 46. Разгрузка с 70 МПа.

Разгрузка производилась без выдержки по времени со скоростью 0.3 мм/с. Полученные результаты подтверждают наличие остаточных деформаций. Анализируя геометрические параметры использованных в эксперименте образцов через достаточно большое количество времени после проведенных экспериментов, был сделан вывод о необратимости присвоенных деформаций. Образцы материала не вернулись к своим первоначальным размерам и сохранили приобретенные остаточные деформации.

5.2. Апробация ламинатной модели

Для апробации «слоистой» (ламинатной) модели вводились граничные условия (рис. 10), соответствующие одноосному растяжению образцов материалов в эксперименте: на одной границе *A* вводится жесткая заделка, на противоположной границе *D* запрещаются перемещения нижней грани вдоль вертикальной оси *oy*, горизонтальной оси *oz*. Задаются перемещения вдоль нитей основы (продольной оси *ox*): $u_x\big|_D = u^*$. Границы *B* и *C* свободны. Проводится сравнение результатов моделирования поведения при помощи ламинатной модели с результатами экспериментов. В качестве критерия оценки выступает согласование значений диаграммы деформирования из экспериментальных исследований и из ламинатной модели (рис.47).

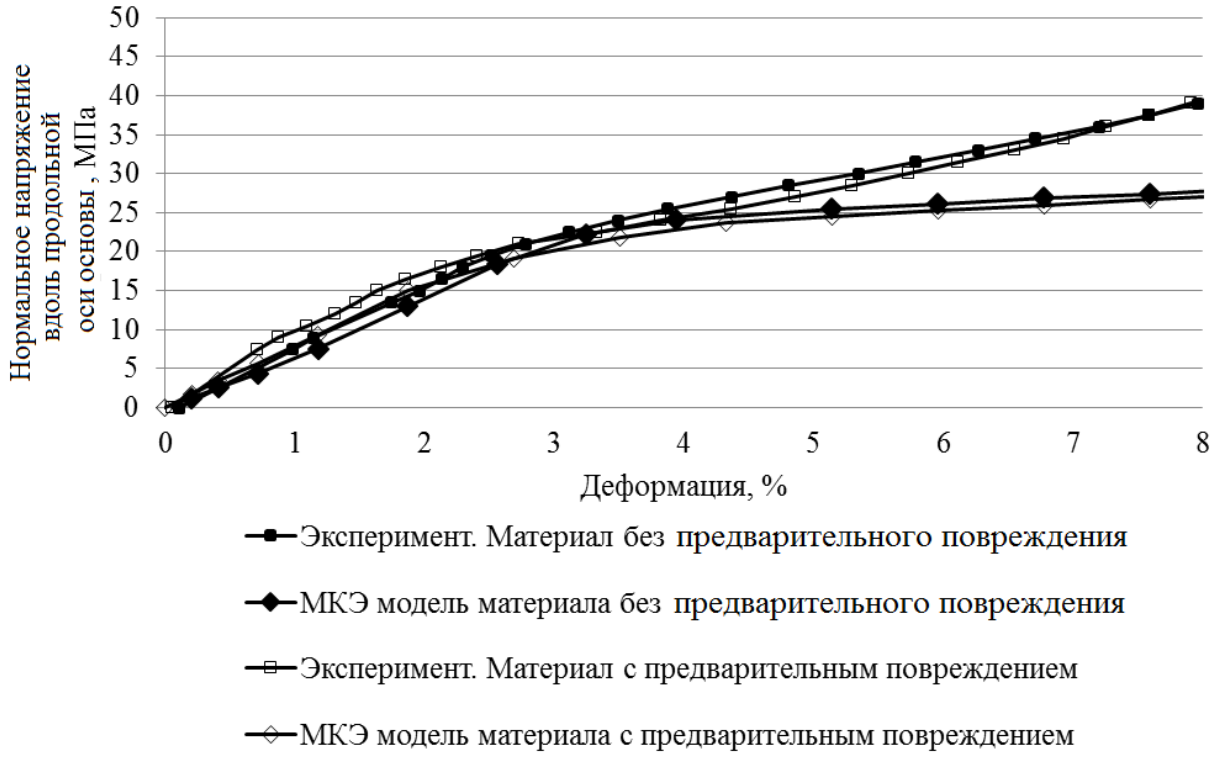

Рис. 47. Апробация «слоистой» модели.

Из рис. 47 следует сделать вывод, что согласование результатов численного моделирования с результатами экспериментальных исследований наблюдается только на 1 сегменте диаграммы деформирования. В таблице 8 представлены результаты анализа диаграмм деформирования композита VP6545 поврежденных и неповрежденных образцов для модуля упрочнения первого сегмента диаграммы деформирования $E_1 = tg\alpha_1$.

Таблица 8. Анализ ламинатной модели

Уровень повреждения / Результат	Результаты экспериментальных расчетов E_1, МПа	Результаты численного моделирования E_1, МПа	Погрешность численного моделирования Δ, %
Неповрежденные образцы	917	868	5,3
Поврежденные образцы (2 уровень повреждения)	645	621	3,7

Анализ результатов показал хорошее качественное и количественное согласование результатов с погрешностью не более 6% до величин деформаций 4.5%, что соответствует 40% от деформаций, соответствующих разрушению образца. Максимальное отклонение результатов по абсолютной величине диаграмм деформирования составило не более 10%. Таким образом «ламинатная» слоистая модель, применяемая для моделирования поведения «жестких» тканых композитов, после ее адаптации к «гибким» композитам, применима при небольших значениях деформаций (до 4.5%). Это объясняется грубой дискретизацией структурного элемента и изменением условий

совместной работы этих элементов. Однако, при определении поведения материала при малых деформациях эта модель имеет ряд преимуществ, таких как: невысокие затраты на вычисления, независимость от вида переплетения ткани армирования и от количества слоев ткани.

5.3. Апробация модели элементарной периодической ячейки

Для апробации модели ЭПЯ применялись граничные условия аналогичные используемым в «слоистой» модели. На одной границе (рис.14) A вводится жесткая заделка, на противоположной границе D запрещаются перемещения нижней грани вдоль вертикальной оси *oy*, горизонтальной оси *oz*. Задаются перемещения вдоль нитей основы (продольной оси *ox*): $u_x\big|_D = u^*$. Границы B и C свободны.

На рис. 48 представлены результаты экспериментальных исследований для неповрежденных образцов материала VP6545 и результаты численного моделирования.

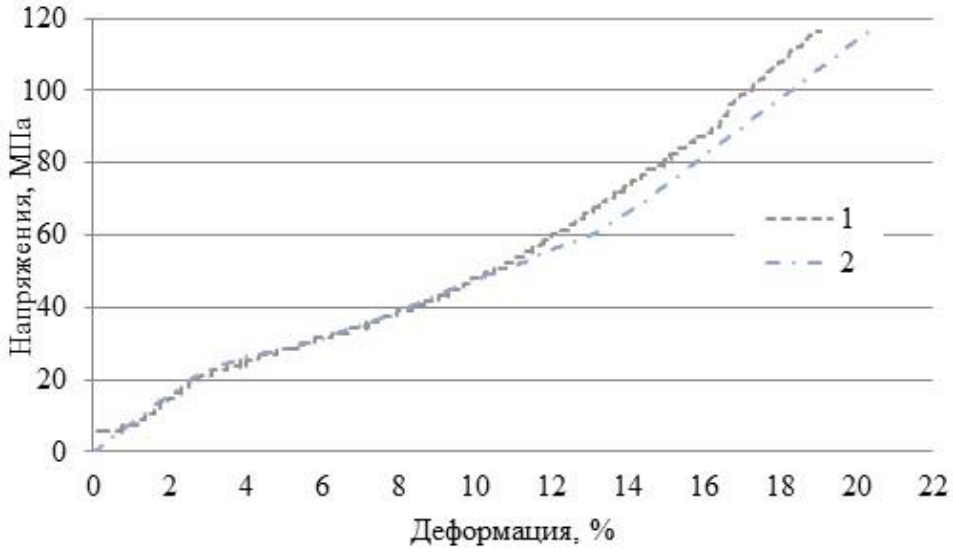

Рис. 48. Апробация модели ЭПЯ VP6545:

1 – эксперимент, 2 – модель ЭПЯ.

В таблице 9 представлен анализ согласования результатов численного моделирования и результатов эксперимента.

Таблица 9. Анализ модели ЭПЯ для неповрежденных образцов

Параметр	Результаты экспериментальных расчетов	Результаты численного моделирования	Погрешность численного моделирования Δ, %
$E_1 = tg\alpha_1$, МПа	917	906	1,2
$E_2 = tg\alpha_2$, МПа	328	334	1,8
$E_3 = tg\alpha_3$, МПа	671	624	7

Анализ результатов показал хорошее качественное и количественное согласование значений диаграммы деформирования (рис.48) до величин предельных деформаций, соответствующих разрушению образца. Погрешность модели ЭПЯ составила не более 7%. Максимальное отклонение результатов по абсолютной величине диаграмм деформирования составило не более 10%.

В связи с высокими вычислительными затратами при реализации данной модели даже без учета предварительных повреждений, такой подход приводит к значительным временным затратам. Поэтому, для учета предварительных повреждений целесообразнее воспользоваться «слоистой» моделью, описанной в пункте выше или, если армирующая ткань имеет форму полотняного переплетения, воспользоваться аналитической моделью, представленной в пятой главе.

5.4. Апробация аналитической модели

Апробация аналитической модели проводилась для всех трех видов гибких тканых композитов с полотняным переплетением нитей армирующей ткани. На рис. 49-51 представлены диаграммы деформирования неповрежденных образцов гибких тканых композитов из эксперимента и из модели.

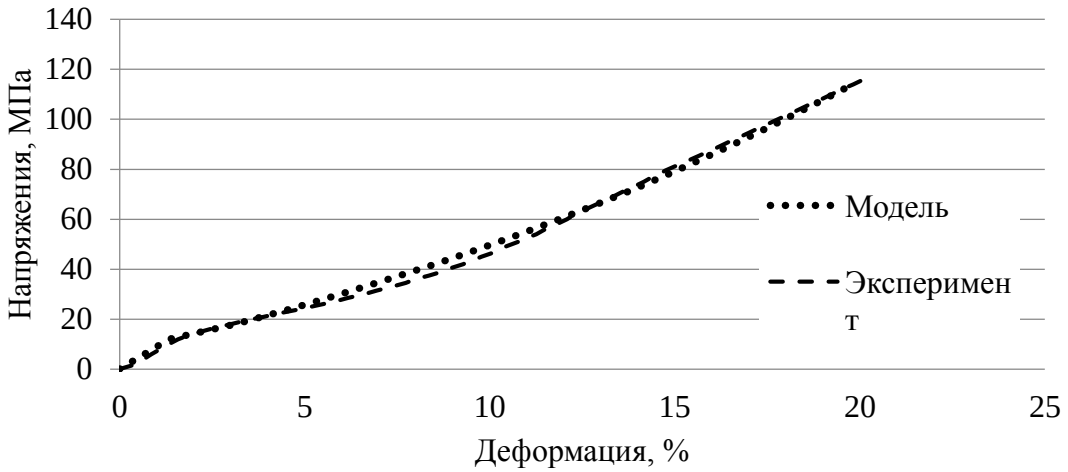

Рис. 49. Апробация аналитической модели для неповрежденных образцов VP6545.

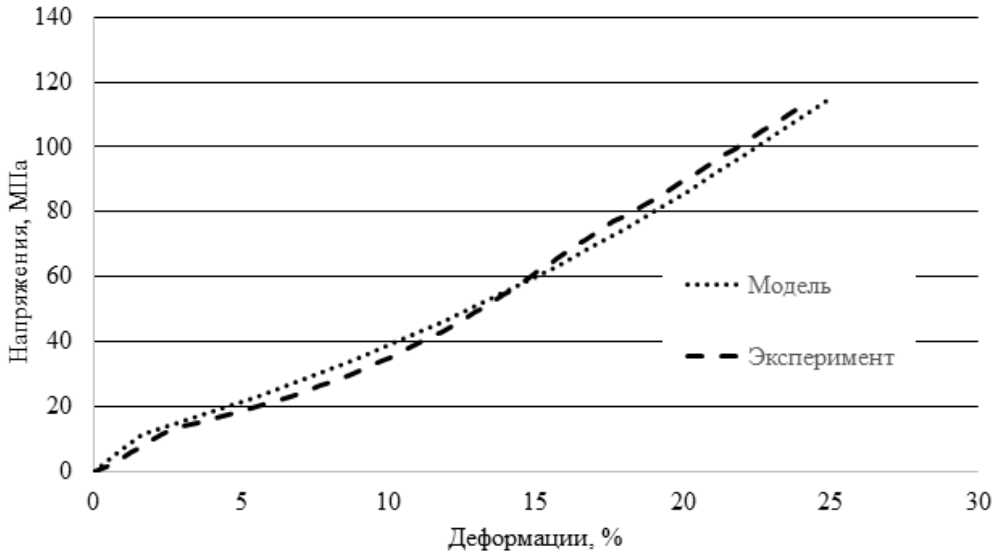

Рис. 50. Апробация аналитической модели для неповрежденных образцов VP6131.

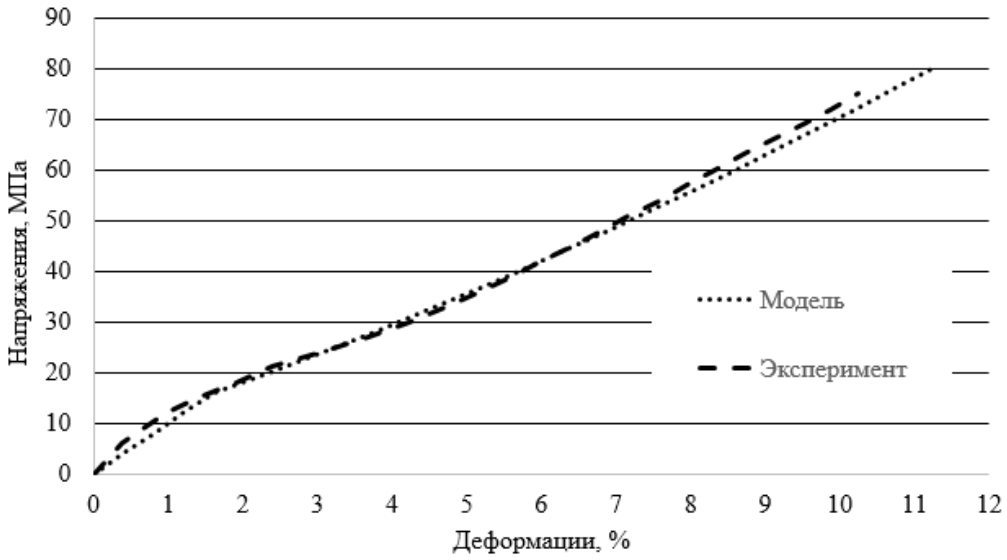

Рис. 51. Апробация аналитической модели для неповрежденных образцов VP4126.

В таблице 10 приведена апробация предложенной аналитической модели с результатами экспериментов для неповрежденных образцов гибких тканых композитов.

Анализ результатов для всех неповрежденных образцов материалов показал хорошее качественное и количественное согласование до величин предельных деформаций, соответствующих разрушению образца. Погрешность аналитической модели по абсолютному отклонению и модулям упрочнения составила не более 10 %.

Таблица 10. Анализ аналитической модели для неповрежденных образцов.

Марка композита	Параметр, МПа	Результаты экспериментальных расчетов	Результаты моделирования	Погрешность моделирования Δ, %
VP6545	$E_1 = tg\alpha_1$	917	930	1,42
	$E_2 = tg\alpha_2$	328	358	9,15
	$E_3 = tg\alpha_3$	671	660	1,64
VP6131	$E_1 = tg\alpha_1$	550	578	5,09
	$E_2 = tg\alpha_2$	312,5	341	9,12
	$E_3 = tg\alpha_3$	560	542	3,21
VP4126	$E_1 = tg\alpha_1$	990	940	5,05
	$E_2 = tg\alpha_2$	604	622	2,98
	$E_3 = tg\alpha_3$	756	731	3,31

На рис. 52 - 57 представлены диаграммы деформирования поврежденных образцов гибких тканых композитов, полученных из эксперимента и из модели.

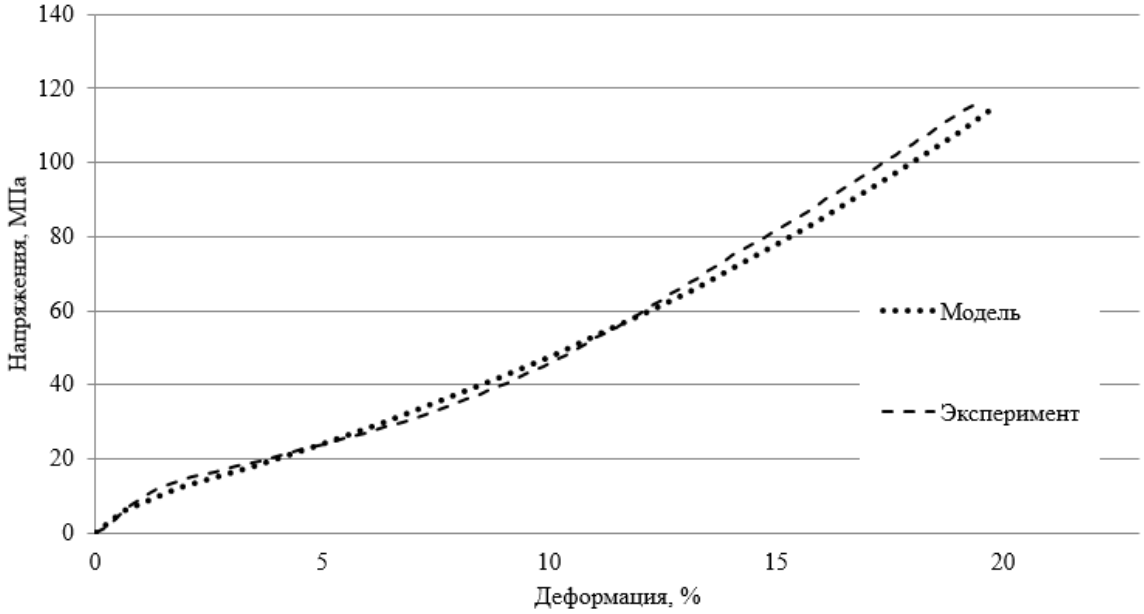

Рис. 52. Апробация аналитической модели для образцов VP6545 с повреждением 1 уровня.

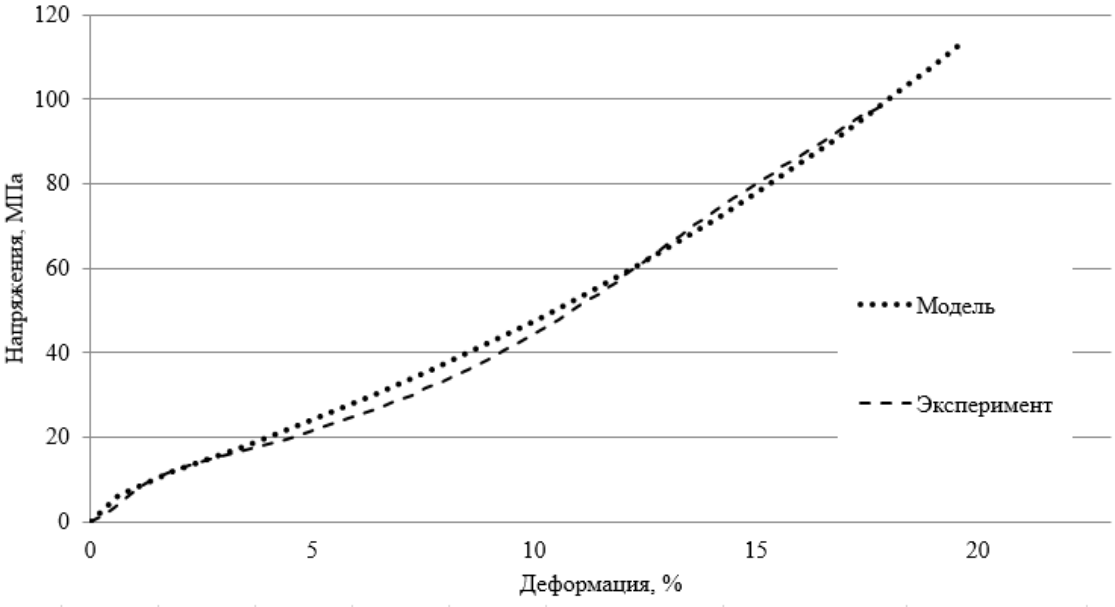

Рис. 53. Апробация аналитической модели для образцов VP6545 с повреждением 2 уровня.

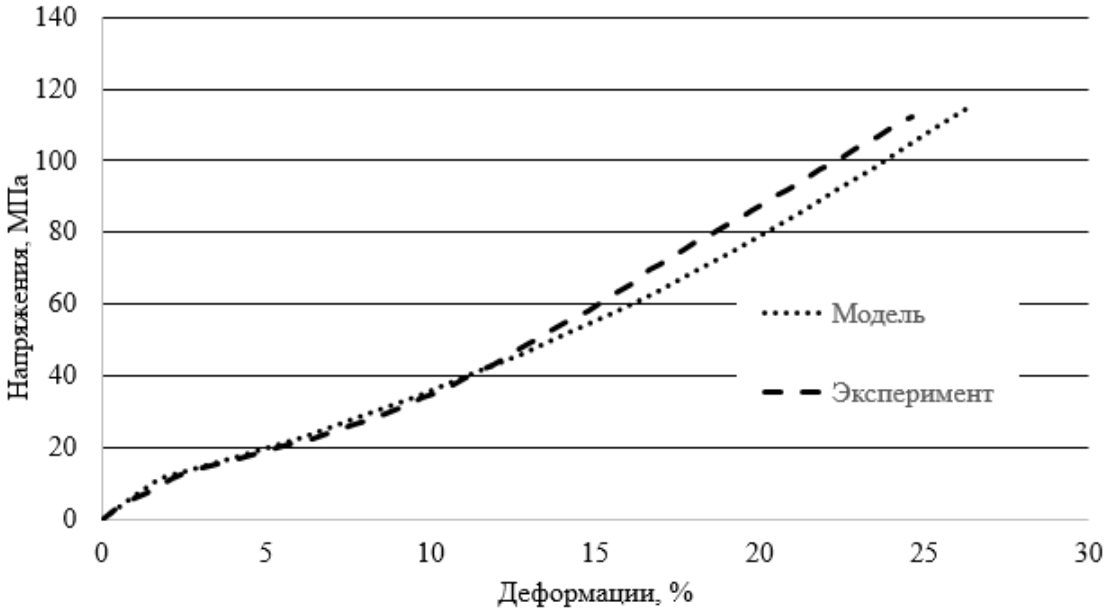

Рис. 54. Апробация аналитической модели для образцов VP6131 с повреждением 1 уровня.

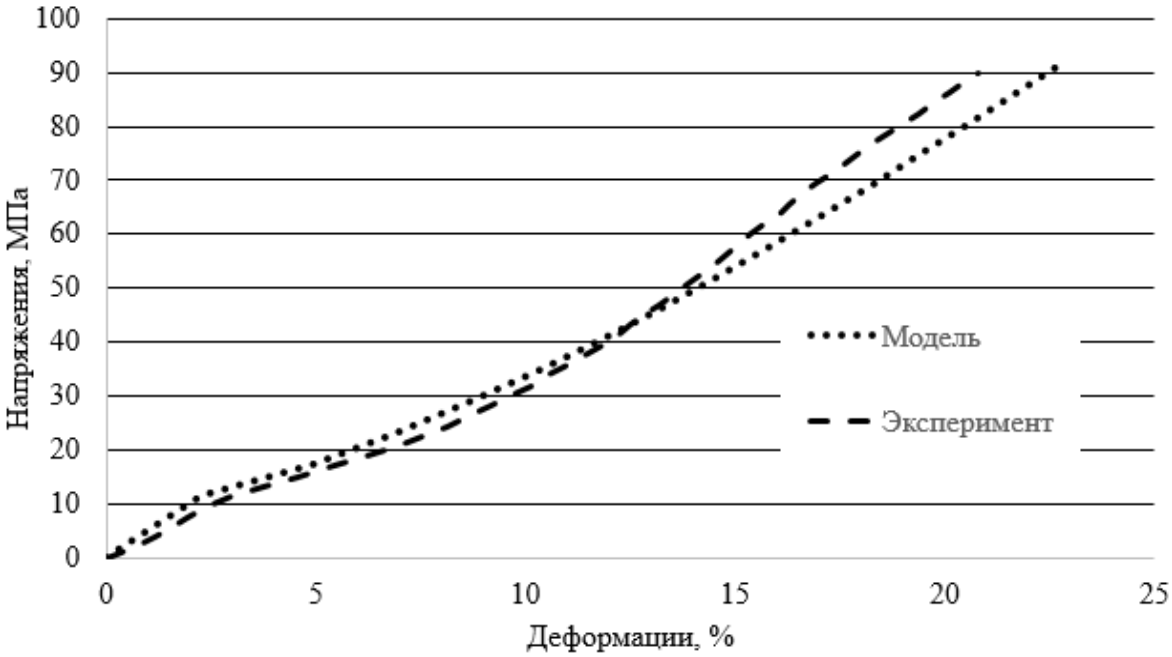

Рис. 55. Апробация аналитической модели для образцов VP6131 с повреждением 2 уровня.

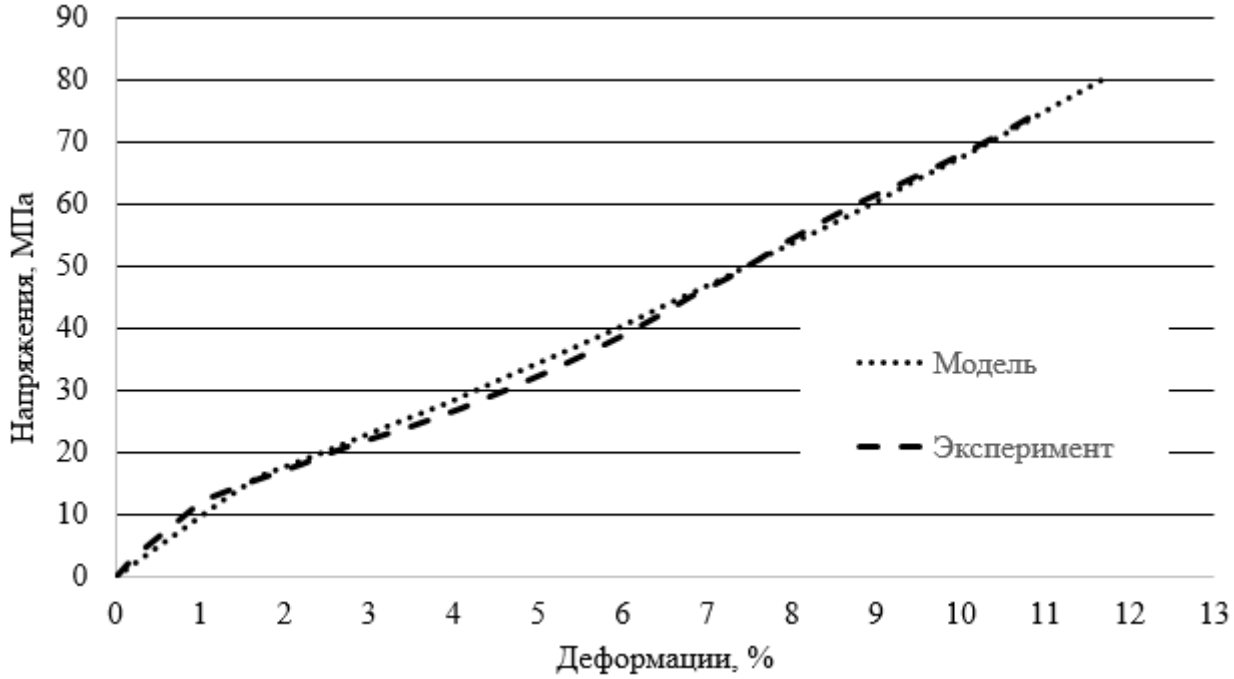

Рис. 56. Апробация аналитической модели для образцов VP4126 с повреждением 1 уровня.

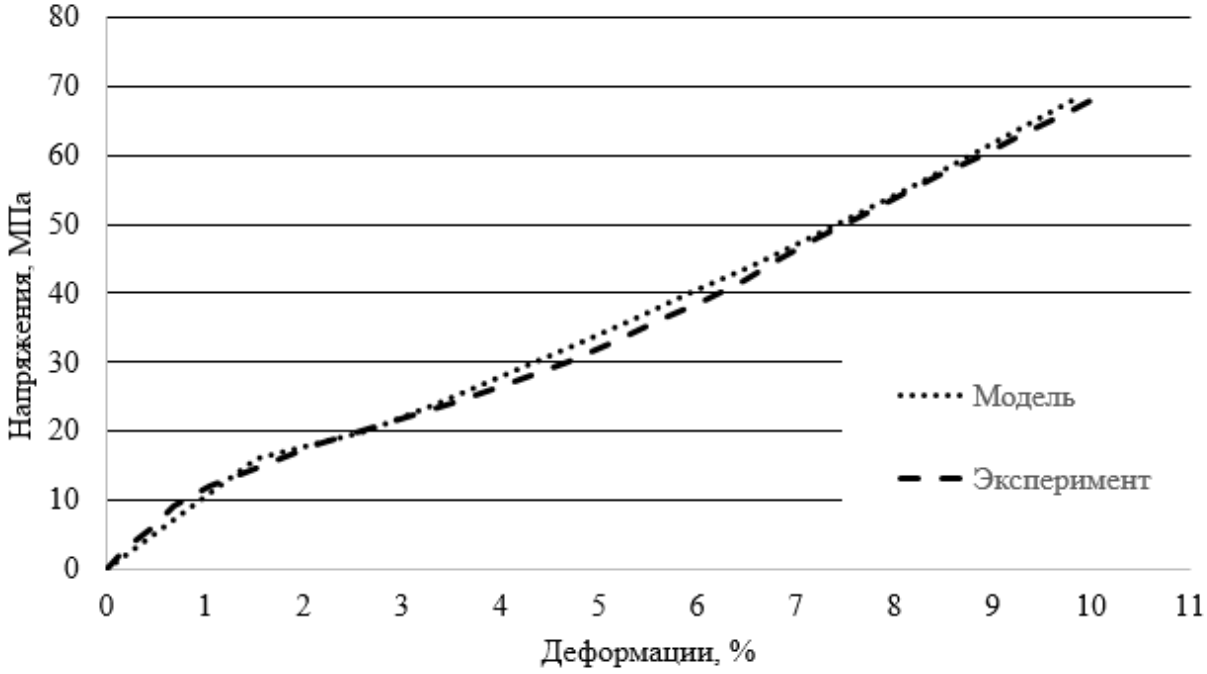

Рис. 57. Апробация аналитической модели для образцов VP4126 с повреждением 2 уровня.

В таблицах 11-12 приведена апробация предложенной аналитической модели с результатами экспериментов для поврежденных образцов гибких тканых композитов.

Таблица 11. Анализ аналитической модели для поврежденных образцов (1 уровень повреждений)

Марка композита	Параметр, МПа	Результаты экспериментальных расчетов	Результаты моделирования	Погрешность моделирования Δ, %
VP6545	$E_1 = tg\alpha_1$	860	810	5,81
	$E_2 = tg\alpha_2$	317	340	7,26
	$E_3 = tg\alpha_3$	710	650	8,45
VP6131	$E_1 = tg\alpha_1$	524	554	5,73
	$E_2 = tg\alpha_2$	291	296	1,72
	$E_3 = tg\alpha_3$	538	521	3,16
VP4126	$E_1 = tg\alpha_1$	973	920	5,45
	$E_2 = tg\alpha_2$	552	578	4,71
	$E_3 = tg\alpha_3$	733	710	5,82

Таблица 12. Анализ аналитической модели для поврежденных образцов (2 уровень повреждений)

Марка композита	Параметр, МПа	Результаты экспериментальных расчетов	Результаты моделирования	Погрешность моделирования Δ, %
VP6545	$E_1 = tg\alpha_1$	790	750	5,06
	$E_2 = tg\alpha_2$	313	330	5,43
	$E_3 = tg\alpha_3$	670	640	4,48
VP6131	$E_1 = tg\alpha_1$	485	502	3,51
	$E_2 = tg\alpha_2$	267	276	3,37
	$E_3 = tg\alpha_3$	524	501	4,39

VP4126	$E_1 = tg\alpha_1$	952	903	5,15
	$E_2 = tg\alpha_2$	498	527	5,82
	$E_3 = tg\alpha_3$	720	695	3,47

Максимальное отклонение результатов по абсолютной величине диаграмм деформирования составило не более 8%.

Разработанная аналитическая модель позволяет определить изменение приращения распределенной нагрузки, от взаимного надавливания нитей основы на нити утка, а также определить изменение угла наклона второго участка структурных элементов (рис. 58-59)

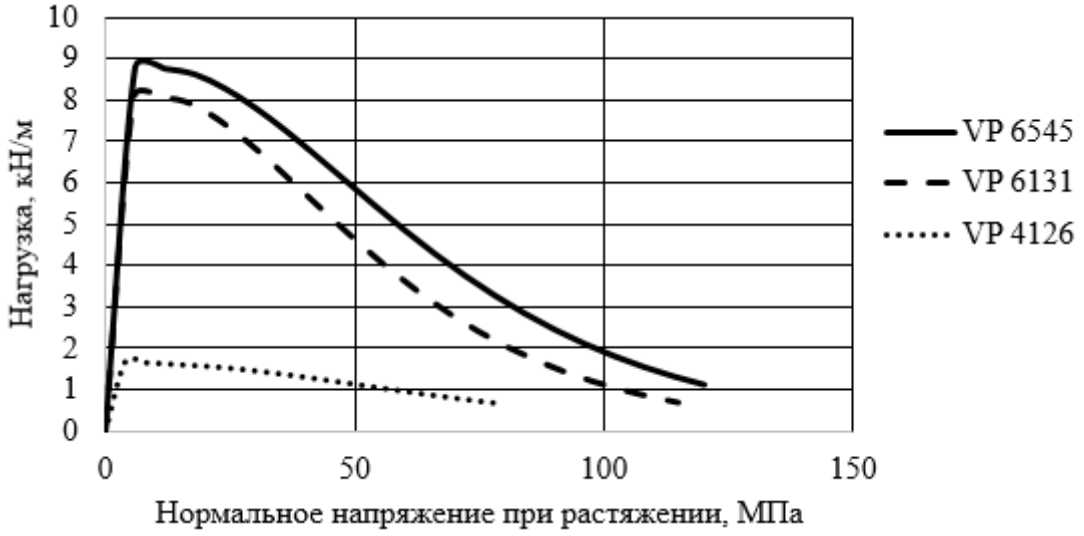

Рис. 58. Приращение распределенной нагрузки на структурном элементе.

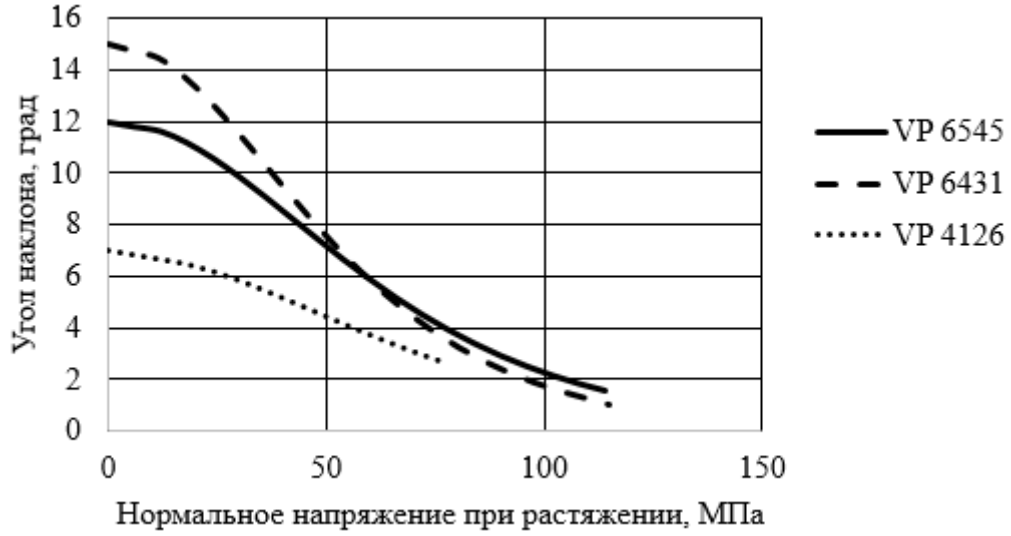

Рис. 59. Изменение угла наклона второго участка структурного элемента.

Анализируя полученные зависимости приращений распределенной нагрузки и изменения угла наклона второго участка структурного элемента, можно сделать вывод об распрямлении нитей армирования в процессе растяжения вдоль направления их ориентации, а также об уменьшении приращения взаимного надавливания нитей основы и утка. Распрямление нитей в армирующей ткани переводит работу нитей из состояния изгиба в центральное растяжение, что объясняет увеличение модулей упрочнения на третьем участке диаграммы деформирования по сравнению с вторым участком. При этом приращение необратимых деформаций уменьшается, что также подтверждается результатами экспериментов (рис.60).

Рис.60. Приращение необратимых деформаций.

Дополнительно к апробации аналитической модели через диаграмму деформирования, проведено сравнение по значению необратимых деформаций для марки композита VP6545 при различных уровнях нагружения (рис.43-46).

В таблице 13 приведен анализ сравнения результатов значений необратимых деформаций из рис.43.

Таблица 13. Анализ необратимых деформаций.

Параметр	Значение
Необратимые деформации в аналитической модели, %	0,35
Необратимые деформации в эксперименте, %	0,34
Погрешность, %	2,94

В таблице 14 приведен анализ сравнения результатов значений необратимых деформаций из рис.44.

Таблица 14. Анализ необратимых деформаций.

Параметр	Значение
Необратимые деформации в аналитической модели, %	0,39
Необратимые деформации в эксперименте, %	0,37
Погрешность, %	5,41

В таблице 15 приведен анализ сравнения результатов значений необратимых деформаций из рис.45.

Таблица 15. Анализ необратимых деформаций.

Параметр	Значение
Необратимые деформации в аналитической модели, %	2,2
Необратимые деформации в эксперименте, %	2,07
Погрешность, %	6,3

В таблице 16 приведен анализ сравнения результатов значений необратимых деформаций из рис.46.

Таблица 16. Анализ необратимых деформаций.

Параметр	Значение
Необратимые деформации в аналитической модели, %	4,73
Необратимые деформации в эксперименте, %	4,4
Погрешность, %	7,45

В соответствии с приведенным анализом результатов апробации аналитической модели для поврежденных и неповрежденных образцов материалов показал хорошее качественное и количественное согласование результатов моделирования до величин предельных деформаций,

соответствующих разрушению образца. Погрешность аналитической модели составила не более 9 %.

Сводная таблица результатов апробации моделей для неповрежденных образцов представлена в таблице 17, где в скобках указана погрешность модели относительно результатов экспериментальных исследований.

Таблица 17. Сводная таблица апробации неповрежденных образцов.

Марка композита	Параметр, МПа	Результаты экспериментальных расчетов	Результаты ламинатной модели	Результаты модели ЭПЯ	Результаты аналитической модели
VP6545	$E_1 = tg\alpha_1$	917	868 (5,3%)	906 (1,2%)	930 (1,42%)
	$E_2 = tg\alpha_2$	328	-	334 (1,8%)	358 (9,15%)
	$E_3 = tg\alpha_3$	671	-	624 (7%)	660 (1,64%)
VP6131	$E_1 = tg\alpha_1$	550	512 (6,9%)	530 (3,6%)	578 (5,09%)
	$E_2 = tg\alpha_2$	312,5	-	326 (4,3%)	341 (9,12%)
	$E_3 = tg\alpha_3$	560	-	530 (5,4%)	542 (3,21%)
VP4126	$E_1 = tg\alpha_1$	990	930 (6,1%)	970 (2%)	940 (5,05%)
	$E_2 = tg\alpha_2$	604	-	630 (4,3%)	622 (2,98%)
	$E_3 = tg\alpha_3$	756	-	743 (1,2%)	731 (3,31%)

ГЛАВА 6. Интеграция предложенной аналитической модели в систему ANSYS

В системе ANSYS Mechanical APDL реализована возможность создания пользовательских моделей материалов, на основе имеющихся в библиотеке ANSYS. Аналитическая модель из четвертой главы была запрограммирована на внутреннем языке APDL. Для использования аналитической модели из четвертой главы в ANSYS достаточно ввести входные параметры в программу импорта (рис.61). При нажатии на кнопку «Создать txt файл» программа создаст командный файл на языке ANSYS Mechanical APDL, который будет содержать аналитическую модель.

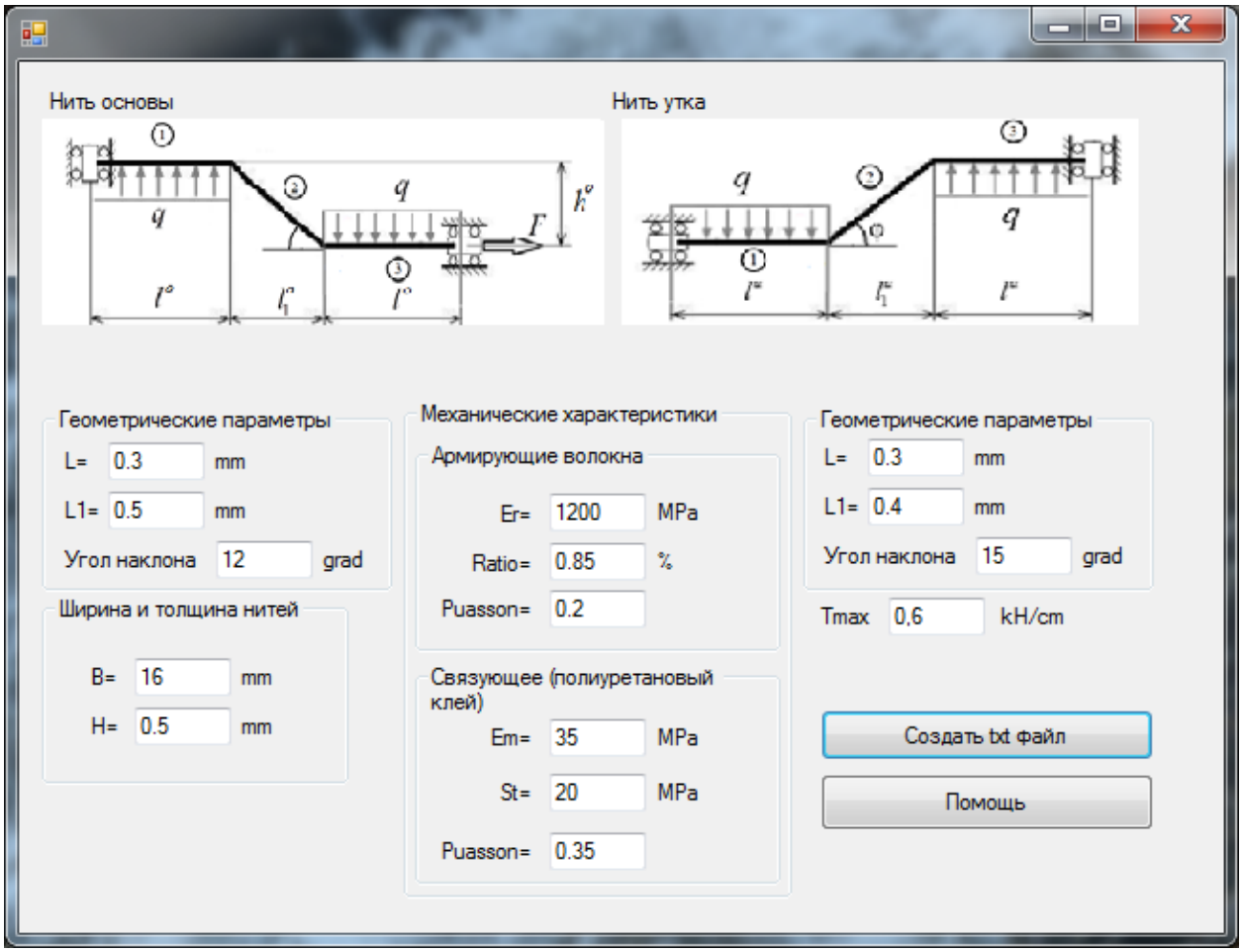

Рис.61. Программа для создания командного файла ANSYS.

Пример сгенерированного txt файла показан на рис. 62

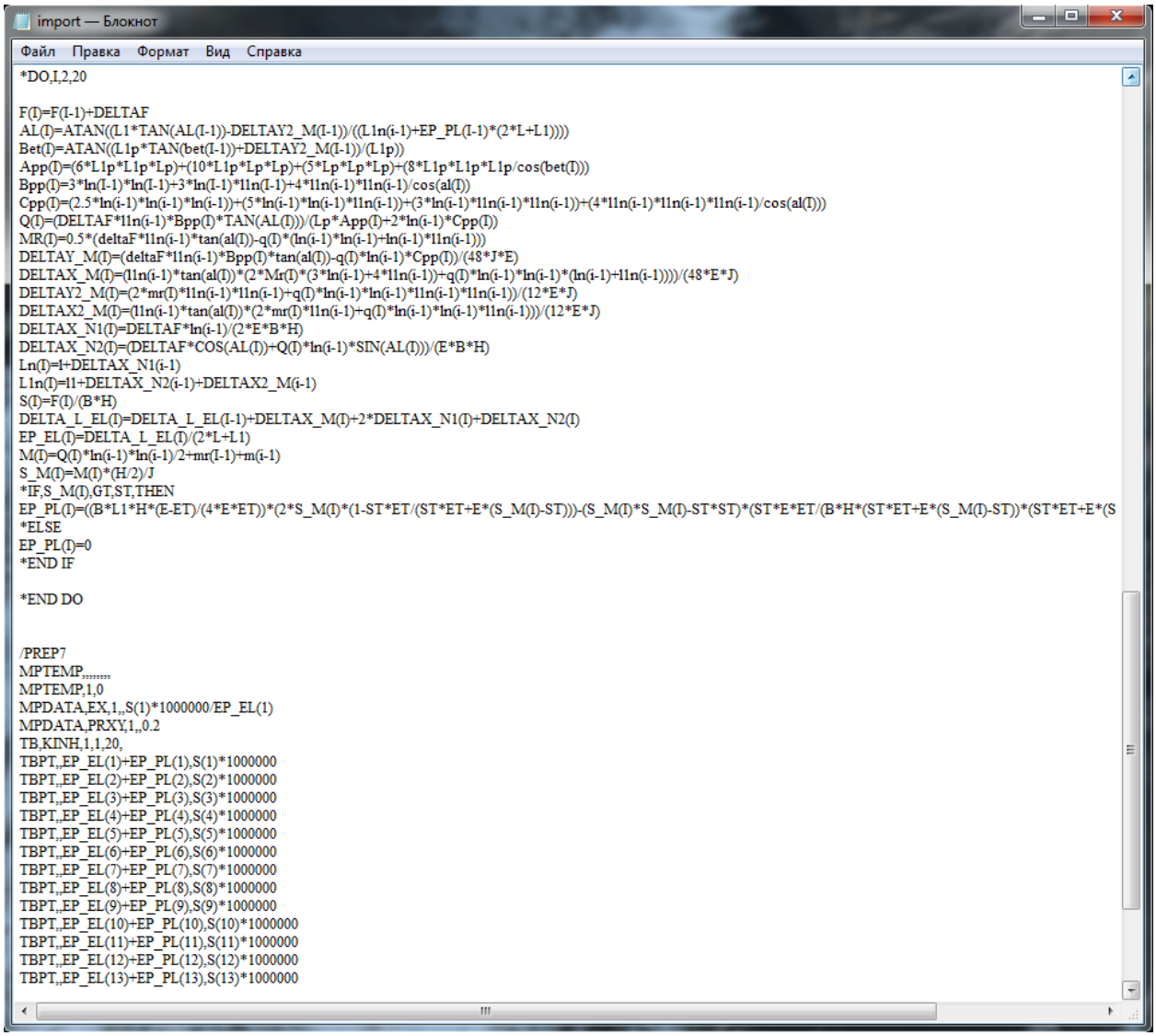

Рис. 62. Пример сгенерированного txt файла импорта.

Сгенерированный файл содержит в себе, входные параметры, определенные пользователем в форме ввода данных, функции и команды на встроенном в ANSYS языке программирования, необходимые для определения новой модели материала. Полученный txt файл необходимо ввести в ANSYS. В результате модель будет импортирована в ANSYS с дальнейшей возможностью ее использования (рис.63).

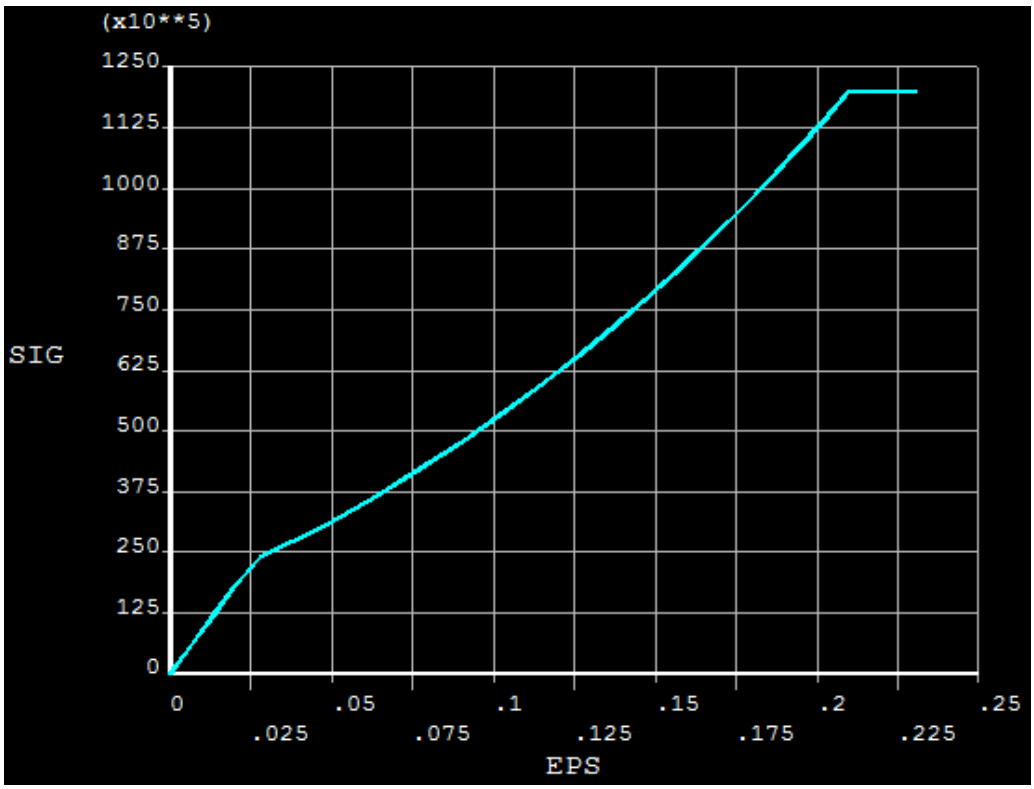

Рис.63. Импортированная модель поведения гибких тканых композитов в ANSYS.

При создании аналитической модели в четвертой главе была использована теория течения с линейным кинематическим упрочнением. Для определения пользовательской модели материала в ANSYS Mechanical APDL, в качестве основы для построения, была использована модель Multilinear Kinematic Hardening. Эта модель аналогична теории течения с кинематическим упрочнением, но может быть построена по ключевым точкам.

В качестве верификации интегрированной в систему ANSYS аналитической модели, была решена прикладная задача о статическом растяжении образцов гибких тканых композитов VP6545, VP6131, VP4126 с локальным повреждением в форме отверстия (рис.64), имеющего диаметр, соответствующий диаметру битка d=5 мм в ходе проведенных экспериментов на предварительное повреждение. Размеры моделируемого образца материала и схема нагружения соответствовали образцам материалов, участвующих в экспериментах на статическое растяжение. На границе (рис.64) А вводится

ограничение на вертикальное перемещение по оси *oy*, на противоположной границе B вводится перемещение нижней грани вдоль вертикальной оси *oy*.

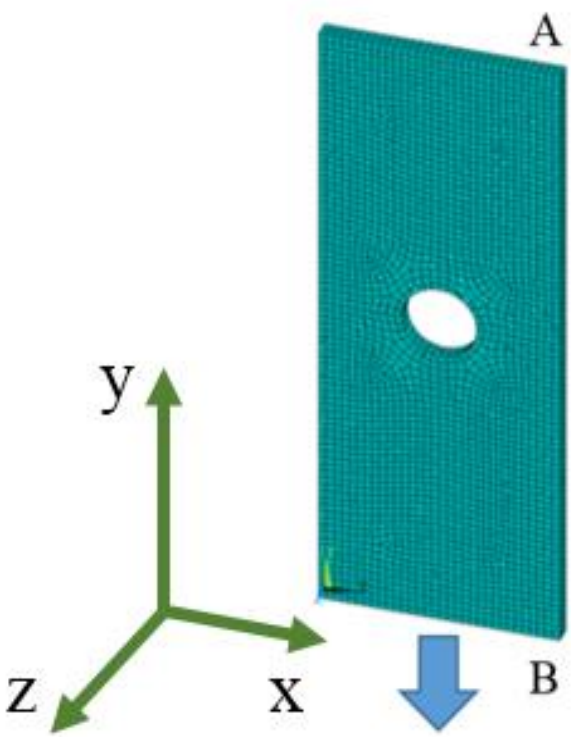

Рис.64. Образец гибкого тканого композита с локальным повреждением в форме отверстия.

В результате решения поставленной задачи были получены поля распределения напряжений и деформаций (рис.65-67).

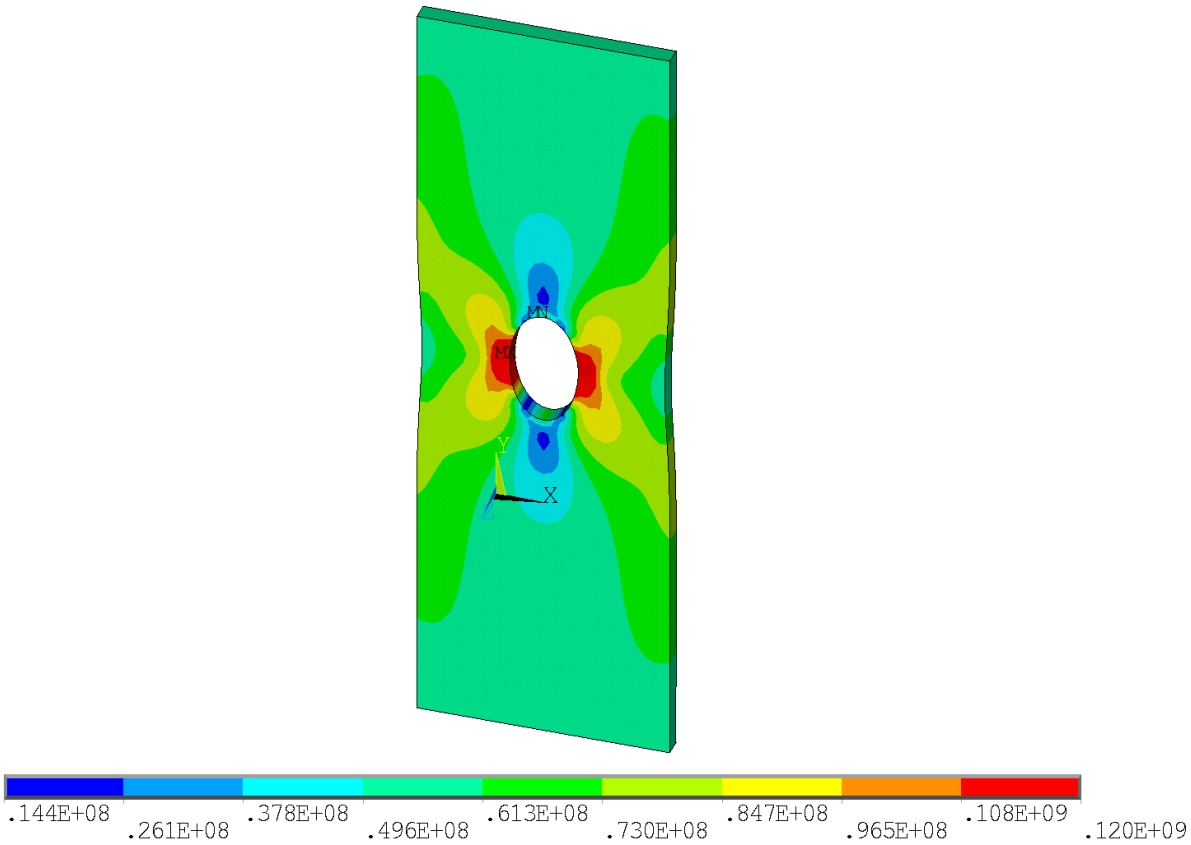

Рис.65. Эквивалентные напряжения по Мизесу (Па).

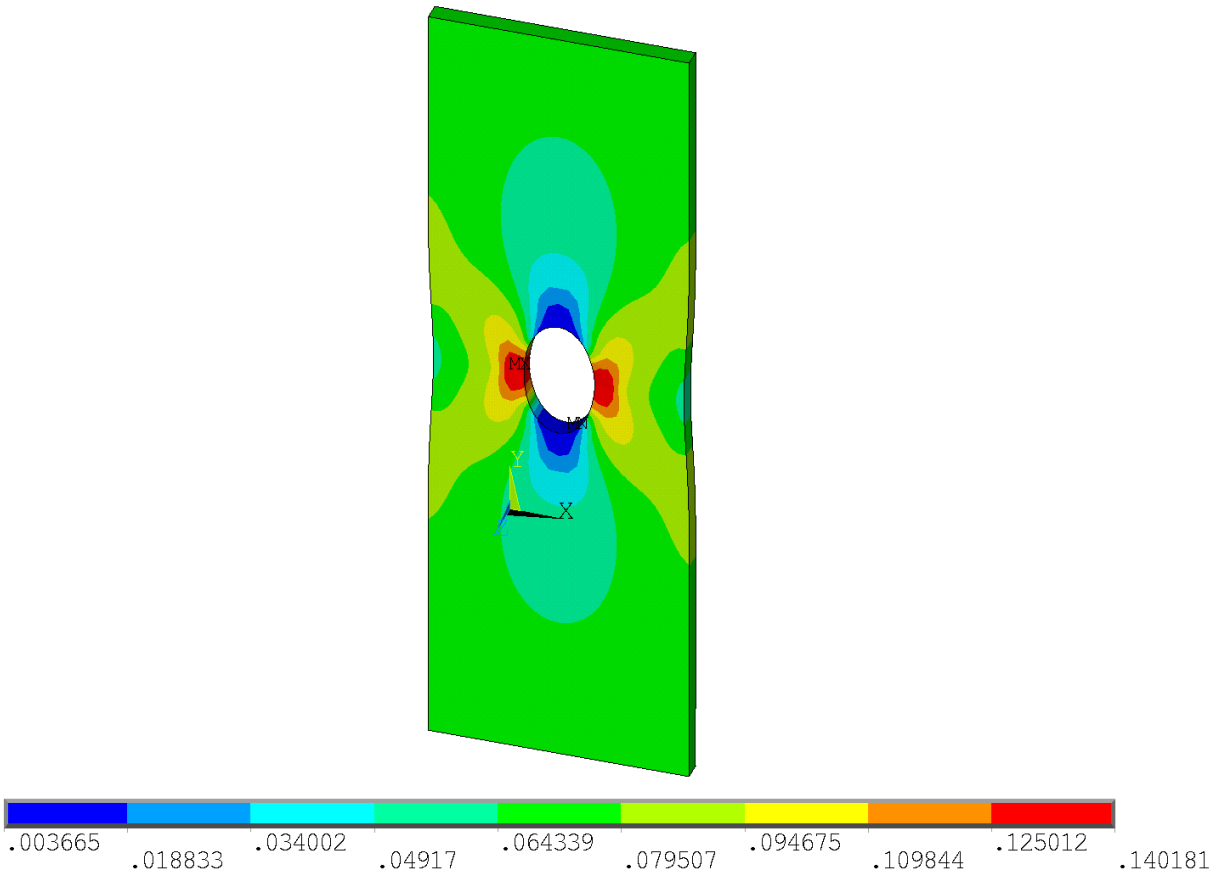

Рис.66. Упругие деформации.

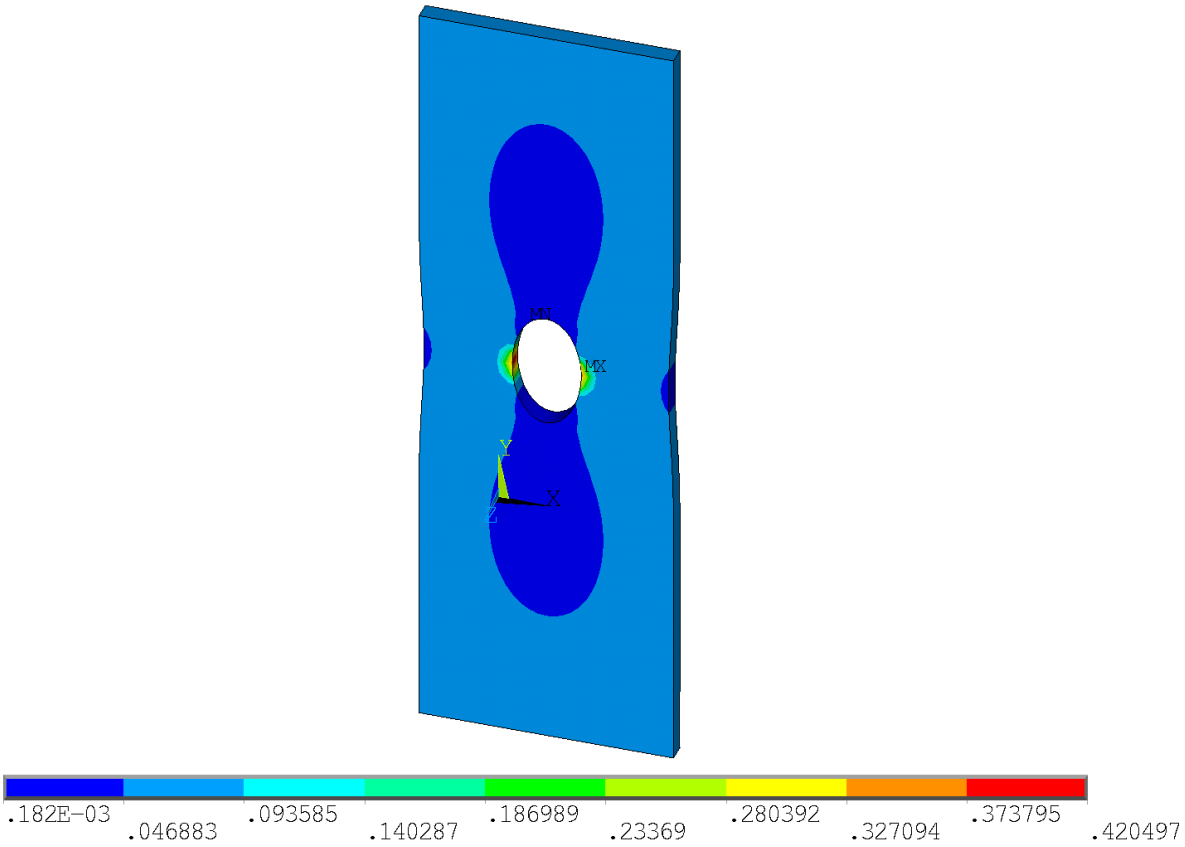

Рис.67. Необратимые деформации.

Для верификации аналитической модели, интегрированной в ANSYS, проведено сравнение диаграмм деформирования (рис. 68-70), полученных в экспериментальных исследованиях и при решении поставленной задачи.

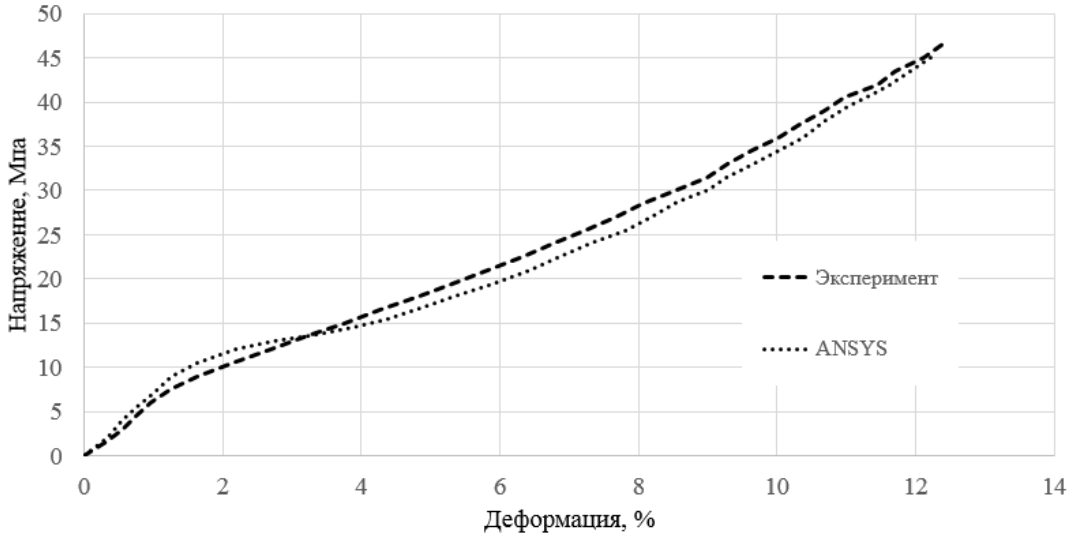

Рис. 68. Диаграмма деформирования для образцов VP6545 с повреждением 3 уровня

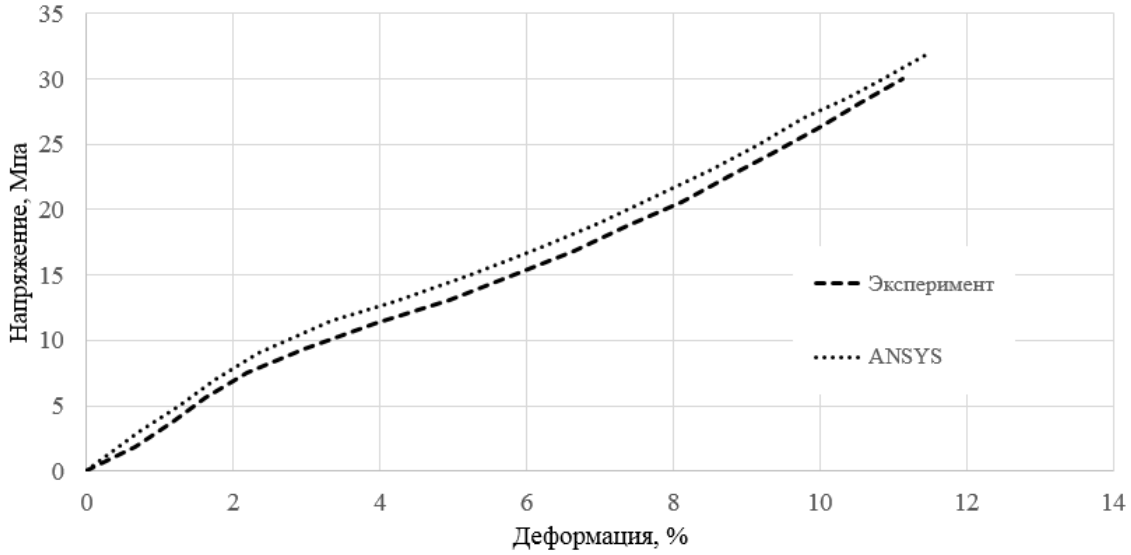

Рис. 69. Диаграмма деформирования для образцов VP6131 с повреждением 3 уровня

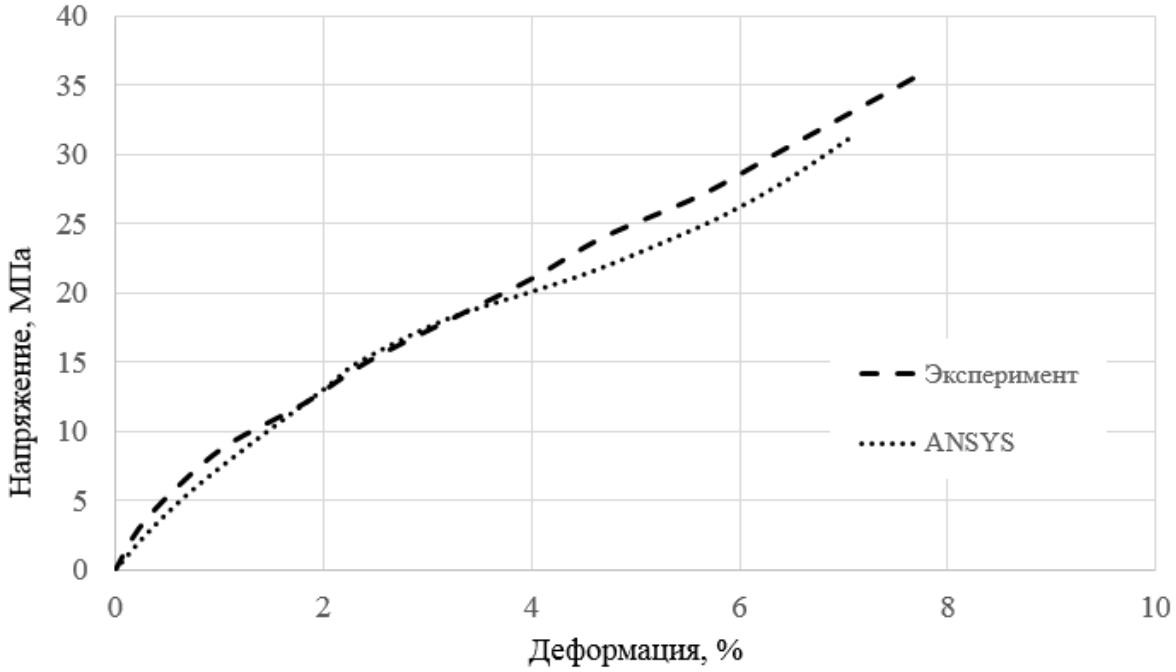

Рис. 70. Диаграмма деформирования для образцов VP4126 с повреждением 3 уровня

Максимальное отклонение результатов составило не более 13%. В таблице 18 приведен анализ результатов верификации тестовой задачи по значениям модулей упрочнения.

Таблица 18. Верификация тестовой задачи

Марка композита	Параметр, МПа	Результаты экспериментальных расчетов	Результаты решения тестовой задачи	Погрешность решения Δ, %
VP6545	$E_1 = tg\alpha_1$	593	602	1,5
	$E_2 = tg\alpha_2$	278	242	13
	$E_3 = tg\alpha_3$	513	536	4,5
VP6131	$E_1 = tg\alpha_1$	310	322	3,8
	$E_2 = tg\alpha_2$	209	221	5,7
	$E_3 = tg\alpha_3$	312	298	4,5
VP4126	$E_1 = tg\alpha_1$	845	886	4,9
	$E_2 = tg\alpha_2$	324	302	6,8

В соответствии с приведенным анализом результатов верификации аналитической модели (табл.18) показано хорошее качественное и количественное согласование результатов моделирования до величин предельных деформаций, соответствующих разрушению образца. Погрешность аналитической модели, интегрированной в ANSYS при решении тестовой задачи составила не более 13 % относительно результатов проведенных экспериментов по значениям модулей упрочнения и не более 10% по абсолютному отклонению.

Заключение

Основные результаты:

1. разработана и представлена новая аналитическая модель, описывающая поведение гибких тканых композитов при одноосном растяжении, позволяющая получить полную диаграмму деформирования и учитывающая влияние предварительного повреждения материала;

2. модифицированы и представлены численные модели для описания поведения гибких тканых композитов при одноосном растяжении с учетом предварительных повреждений материала и наличием необратимых деформаций;

3. разработана методика, проведены и обработаны экспериментальные исследования для различных видов гибких тканых композитов для поврежденных и неповрежденных образцов. Получены диаграммы деформирования и разгрузки. Установлено, что локальное повреждение, не приводящее к сквозному пробитию материала, незначительно влияет на его механическое поведение;

4. проведена апробация моделей путем сравнения результатов расчетов с экспериментальными данными, где в качестве основного параметра апробации использовалась диаграмма деформирования. Определены области применимости предложенных моделей. Установлено, что предложенные модели качественно и количественно соотносятся с результатами экспериментов в пределах своих областей применимости;

5. реализован модуль для интеграции полученной аналитической модели поведения в систему ANSYS Mechanical APDL. Решена практическая задача для верификации импортированной в ANSYS аналитической модели.

Полученные в диссертации модели и методы позволяют описать поведение гибких тканых композитов в условиях статического растяжения. Проведенные исследования являются основой для дальнейших разработок моделей и методов описания поведения исследуемых материалов при различных внешних нагрузках.

Список литературы

1. Багмунтов В.П. Особенности построения единой структурной модели упруго-пластического деформирования слоистых волокновых композитов при статическом и циклическом нагружении. Известия Волгоградского государственного технического университета. 2005. № 3 (12). С. 90-96.

2. Бардушкин В.В., Сычев А.П., Сычев А.А., Даньков В.В. Эффективные упругие характеристики тканых композитов на полимерной основе с антифрикционными дисперсными добавками. Вестник южного научного центра. 2013. Т. 9. № 4.С. 26-31.

3. Берендеев Н.Н, Кожанов Д.А., Любимов А.К. Структурная модель гибкого тканого композита. Проблемы прочности и пластичности. 2015. Том. 77. №2. С. 162-171.

4. Берендеев Н.Н. Идентификация параметров модели гибкого тканного композита. XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. 2015. С. 456–458.

5. Берендеев Н.Н. Описание поведения тканого композита при статическом нагружении с использованием структурной модели. Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2013. № 4 (4).С. 173-179.

6. Берендеев Н.Н., Любимов А.К., Шабаров В.В., Дербенев С.Г., Каратаев В.Н. Экспериментальное исследование деформационных свойств тканых композитов. Проблемы прочности и пластичности. 2006. Вып. 68. С. 213-220.

7. Брагов А.М., Константинов А.Ю., Кочетков А.В., Модин И.А. Экспериментальное исследование динамических и квазистатических

деформационных свойств пакетов плетеных сеток. Проблемы прочности и пластичности. 2016. Т. 78. №3. С. 245-251.

8. Горохов А.Н., Казаков Д.А., Кочетков А.В., Модин И.А., Романов В.И. Исследование деформационных свойств пакетов плетеных металлических сеток при квазистатическом сжатии и растяжении. Проблемы прочности и пластичности. 2016. Т. 76. №3. С. 251-256.

9. Гречухин А.П., Селиверстов В.Ю. Исследование формы нити в ткани полотняного переплетения. Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2013. № 5. С. 41-44.

10. Дедков Д.В., А.А. Ташкинов. Коэффициенты концентрации напряжений в слое тканого композита с локальными технологическими дефектами при чистом формоизменении. Вычислит. механика сплошных сред. 2013. Т. 6. № 1. С. 103-109.

11. Дедков Д.В. Математическая модель механического поведения тканых композитов с локальными технологическими дефектами // диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, 2015.

12. Дедков Д.В., Зайцев А.В. Концентрация напряжений в слое тканого композита с локальными дефектами при двухосном однородном равнокомпонентном макродеформировании // Вестник Самарского государственного техн. ун-та. Серия Физ.-мат. науки, 2013, № 4(33). С. 66-75.

13. Дедков Д.В., Зайцев А.В., Ташкинов А.А. Эффективные упругие модули тканого композита полотняного плетения с локальными технологическими дефектами. Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2014. Т.16. №4 (3). С. 526-530.

14. Димитриенко Ю.И., Димитриенко И.Д. Моделирование динамических процессов деформирования гибких тканевых композиционных материалов. Инженерный журнал: наука и инновации. 2014. № 5. С. 1-19.

15. Димитриенко Ю.И., Сборщиков С.В., Соколов А.П., Шпакова Ю.В. Численное моделирование процессов разрушения тканевых композитов. Вычислительная механика сплошных сред. 2013. Т.6. №4. С. 389-402.

16. Димитриенко Ю.И., Соколов А.П. Исследование процессов разрушения композиционных материалов на базе метода асимптотической гомогенизации. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Естественные науки». 2012. С. 101-112.

17. Димитриенко Ю.И., Соколов А.П. Разработка автоматизированной технологии вычисления эффективных упругих характеристик композитов методом асимптотического осреднения. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Естественные науки». 2008. №2. С. 56-66.

18. Димитриенко Ю.И., Соколов А.П., Сборщиков С.В. Моделирование микроразрушения тканевых композитов. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Естественные науки». 2012. С. 5-19.

19. Димитриенко Ю.И., Соколов А.П., Шпакова Ю.В., Юрин Ю.В. Моделирование поверхностей прочности композитов на основе микроструктурного конечно-элементного анализа. Наука и образование. 2012. №11. С. 487-496.

20. Дмитриенко Ю.И., Соколов А.П. Об упругих свойствах композиционных материалов. Математическое моделирование. 2009. Т. 21, № 4. С. 96-110.

21. Жауров И.С., Берендеев Н.Н. Влияние предварительного ударного повреждения на диаграмму деформирования тканных композитов. Вестник

Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 4 (4). С. 1478-1479.

22. Ишлинский А.Ю. Общая теория пластичности с линейным упрочнением. Украинский математический журнал. 1954. Т.6. №3. С. 314 – 324.

23. Капустин С.А., Лихачева С.Ю. Численный анализ поведения конструкций из кусочно-однородных материалов, имеющих блочно-периодическую структуру. Проблемы прочности и пластичности. 2000. Вып. 62. С.93-100.

24. Каюмов Р.А., Куприянов В.Н., Мухамедова И.З., Сулейманов А.М., Шакирова А.М. Методика анализа процесса деформирования пленочно-тканевого композита с учетом геометрической и физической нелинейности. Математическое моделирование и краевые задачи. 2007. Часть 1. С. 119-121.

25. Каюмов Р.А., Мангушева А.Р. Предельный анализ для пленочно-тканевого композиционного материала. Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 6. С. 95-97.

26. Каюмов Р.А., Страхов Д.Е. Модели поведения полимера с эффектом памяти формы. Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2011. № 2 (16). С. 195-199.

27. Кожанов Д.А. Особенности конечно-элементного моделирования вида структурного элемента гибких тканых композитов. Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико – математические науки. 2016. Выпуск 1 (237). С. 7-15.

28. Кожанов Д.А. Структурная модель гибких тканных, предварительно поврежденных композитов в условиях одноосного растяжения. Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского

государственного политехнического университета. Физико – математические науки. 2014. №4. С. 107-114.

29. Кожанов Д.А. Моделирование диаграммы деформирования образца гибкого тканного композита в условиях одноосного статического нагружения с учетом вязкоупругих деформаций и наличием повреждения. Сборник докладов 18-й Нижегородской сессии молодых ученых. Технические науки. 2013. С. 125-128

30. Кожанов Д.А. Способ моделирования диаграммы деформирования образцов гибких тканных композитов с учетом предварительного повреждения. Сборник докладов III Всероссийского фестиваля науки. 2013. С. 21-25.

31. Кожанов Д.А. Моделирование влияния предварительного повреждения на диаграмму деформирования гибких тканных композитов с учетом вязкоупругих деформаций. Материалы I-й Международной научно-практической конференции: "Актуальные вопросы науки, технологии и производства".2014. С. 51-55.

32. Кожанов Д.А. Моделирование одноосного растяжения для гибкого тканного композиционного материала. Сборник докладов IV Всероссийского фестиваля науки. 2014. С. 16-18.

33. Кожанов Д.А. Моделирование диаграммы деформирования образца гибкого тканного композита с учетом влияния предварительного повреждения. Материалы IX Международной научно-практической конференции: "Актуальные вопросы развития инновационной деятельности в новом тысячелетии". 2014. С. 14-17.

34. Кожанов Д.А. Моделирование процесса деформирования периодических элементов гибких тканных композитов при статическом одноосном растяжении. Сборник докладов 20-й Нижегородской сессии молодых ученых. Естественные и математические науки. 2015. С. 174-176.

35. Кожанов Д.А. Моделирование структуры гибких тканых композитов методом конечных элементов для получения диаграммы деформирования. Материалы 4-й Всероссийской интернет конференции "Грани науки - 2015". 2015. С. 188-189.

36. Кожанов Д.А. Моделирование процесса деформирования элементарных периодических ячеек гибких тканых композитов с учетом архитектуры плетения и особенностей используемых материалов. Сборник докладов V Всероссийского фестиваля науки. 2015. С. 82-86.

37. Кожанов Д.А, Любимов А.К. Итерационная модель деформирования гибкого тканого композита. Материалы Международной научно-практической конференции "Современные концепции научных исследований". 2015. С. 220-224.

38. Кожанов Д.А., Любимов А.К. Моделирование вида структурного элемента гибких тканых композитов при статическом растяжении с применением метода конечных элементов в ANSYS. Компьютерные исследования и моделирование. 2016. Т.8 (1). С. 113-120.

39. Кожанов Д.А., Любимов А.К. Модель гибкого тканого композита, учитывающая формоизменение внутренней структуры материала. Проблемы прочности и пластичности. 2016. Т. 78. №3. С. 311-321.

40. Композиционные материалы: Справочник /Под ред. В.В. Васильева и Ю.М. Тарнопольского. М.: Машиностроение, 1990. 512 с.

41. Кравченко О.Л., Вильдеман В.Э. Модели неупругого деформирования перекрестно армированных слоистых композитов. Математическое моделирование систем и процессов. 1997. № 5, С. 49-55.

42. Кучер Н.К., Земцов М.П., Заразовский М.Н. Деформирование слоистых эпоксидных композитов, армированных высокопрочными волокнами. Проблемы прочности. 2006. №1. С. 41-57.

43. Лихачева С.Ю. Численное моделирование процессов деформирования и разрушения сред с регулярной структурой. Вестник МГСУ. 2011. Т. 1.№ 2. С. 158-162.

44. Мангушева А.Р. Оценка кратковременной и длительной прочности пленочно-тканевого композиционного материала // диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, 2012.

45. Михайлин Ю.А. Специальные полимерные композиционные материалы. Научные основы и технологии. 2009. 700 с.

46. Моссаковский П.А., Антонов Ф.К., Белякова Т.А., Костырева Л.А., Брагов А.М., Баландин В.В. Экспериментальное исследование и конечно-элементный анализ тканых композитов в условиях ударного нагружения. Проблемы прочности и пластичности. 2014. Вып. 76 (1). С. 39-45.

47. Петухов Б.В. Полиэфирные волокна. М.: Химия. 1976. 272 с.

48. Соколов А.К., Свистков А.Л., Комар Л.А., Шадрин В.В. Влияние эффекта Маллинза на изменение напряженно-деформированного состояния автомобильной шины. Вестник молодых учёных ПГНИУ. Сборник научных трудов. 2014. С. 291-297.

49. Соколов А.К., Свистков А.Л., Шадрин В.В. Учет эффекта размягчения резины на примере моделирования автомобильной шины. Математическое моделирование в естественных науках. 2014. Т.1. С. 236-239.

50. Справочник по композиционным материалам: В двух кн. Пер. с англ. Под ред. Б. Геллера. – М.: Машиностроение, 1988 – Кн. 1. Под ред. Дж. Любина, 1988, 447 с.

51. Справочник по композиционным материалам: В двух кн. Пер. с англ. Под ред. Б. Геллера. – М.: Машиностроение, 1988 – Кн. 2. Под ред. Дж. Любина, 1988, 581 с.

52. Степанов С.Г. Математическая модель равновесия основной нити в зоне формирования однослойной ткани полотняного переплетения. Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2006. № 1. С. 47-51.

53. Степанов С.Г., Волков И.И. О решении упрощенной математической модели равновесия уточных нитей в зоне формирования однослойной ткани полотняного переплетения. Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2006. № 6 (294). С. 61-65.

54. Степанов С.Г., Волков И.И. Упрощенная математическая модель взаимодействия основных и уточных нитей в зоне формирования однослойной ткани полотняного переплетения. Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2007. № 1 (296). С. 47-52.

55. Тканые конструкционные композиты // Под ред. Т.-В. Чу и Ф. Ко. М.: Мир, 1991. 432 с.

56. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. М.: Наука, 1967. 552 с.

57. Шилова А.И., Лобанов Д.С., Вильдеман В.Э., Лямин Ю.Б. Экспериментальное исследование влияния высокотемпературной обработки тканого наполнителя на прочностные свойства углеродных композитов. Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2014. №4. 2014. С. 221-239.

58. Щербакова А.О. Тканевый композит. Оценка упругодиссипативных характеристик. Вестник ЮУрГУ. Серия «Математика. Механика. Физика». 2014. Т.6. №2. С. 40-48.

59. Энциклопедия полимеров // Под ред. В.А. Кабанова и др., Т.2, Советская Энциклопедия, 1974, 1032 с.

60. ANSYS release 14.0 Documentation for ANSYS [Электронный ресурс]: ANSYS Inc. — Электрон. дан. и прогр. — [Б. м.], 2012.

61. Bakar I.A., Kramer O., Bordas S., Rabczuk T.. Optimization of elastic properties and weaving patterns of woven composites // Composite Structures. 2013.V. 100. P. 575-591.

62. Balea L., Dusserre G., Bernhart G. Mechanical behavior of plain-knit reinforced injected composites: Effect of inlay yarns and fibre type/ Composites: Part B. 2014.V.56. P. 20-29.

63. Bednarcyk B.A., Stier B., Simon J.-W., Reese S., Pineda E.J. Meso- and micro-scale modeling of damage in plain weave composites // Composite Structures. 2015. V. 121. P. 258-270.

64. Behera B.K., Dash B.P. Mechanical behavior of 3D woven composities // Material and Design. 2015. V. 67. P. 261-271.

65. Bergmann T., Heimbs S., Maier M. Mechanical properties and energy absorption capability of woven fabric composites under $\pm 45^0$ off-axis tension // Composite Structures, 2015. V. 125. P. 362-373.

66. Boisse P., Borr M., Buet K., Cherouat A. Finite element simulations of textile composite forming including the biaxial fabric behavior. Composites: Part B. 1997. V. 28. P. 453-464.

67. Borkowski L., Chattopadhyay A. Multiscale model of woven ceramic matrix composites considering manufacturing induced damage. Composite Structures. V. 126, 2015, p. 62-71.

68. Boufaida Z., Farge L., Andre S., Meshaka Y. Influence of the fiber/matrix strength on the mechanical properties of a glass fiber/thermoplastic-matrix plain weave fabric composite. Composites: Part A. 2015. V. 75. P. 28-38.

69. Chaouachi F., Rahali Y., Ganghoffer J.F. A micromechanical model of woven structures accouting yarn-yarn contact based on Hertz theory and energy minimization. Composites: Part B. 2014. V. 66. P. 368-380.

70. Chen Z, Yang F., Meguid S.A. Multi-level modeling of woven glass/epoxy composite for multilayer printed circuit board application. International Journal of Solid and Structures. 2014. V. 51. P. 3679-3688.

71. Cox B., Flanagan G. Handbook of analytical methods for textile composites. NASA CR-4750. 1997. 176 p.

72. Daggumati S., Paepegem W.V., Degrieck J., Xu J., Lomov S.V., Verpoest I. Local damage in 5-harness satin weave composite under static tension: Part II – Meso-FE modelling. Composite Science and Technology. 2010. V. 70. P. 1934-1941.

73. Dash B.P., Behera B.K. A study on structure property relationship of 3D woven composites. Materials Today: Proceedings. 2015. V.2. P. 2991-3007.

74. Dixit A., Mali H.S., Misra. R.K. Unit cell model of woven fabric textile composite for multiscale analysis. Procedia Engineering. 2013. V. 68. P. 352-358.

75. Doitrand A., Fagiano C., Chiaruttini V., Leroy F.H., Mavel A., Hirsekorn M. Experimental characterization and numerical modeling of damage at the mesoscopic scale of woven polymer composites under quasi-static tensile loading. 2015. Composites Science and Technology. V. 119. P. 1-11.

76. Dow N.F., Ramnath V., Rosen B.W. Analysis of woven fabrics for reinforced composite materials. NASA CR-178275. 1987. 243 p.

77. Edgren F., Asp L.E. Approximate analytical constitutive model for non-crimp fabric composites. Composites: Part A. 2005. V. 36. P. 173−181.

78. Fagiano C., Genet M., Baranger E., Ladaveze P. Computational geometrical and mechanical modeling of woven ceramic composites at the mesoscale. Composite Structures. 2014. V. 112. P. 146-156.

79. Fourman V., Banks-Sills L., Simon I. Mode I delamination propagation and *R*-ratio effects in woven composite DCB specimens for a multi-directional layup. International Journal of Fatigue. 2017. V. 96. P. 237–251

80. Foye R.L. Finite element analysis of the stiffness of fabric reinforced composites. NASA CR 189597. 1992. 137 p.

81. Gatouillat S., Bareggi A., Vidal-Salle E., Boisse P. Meso modelling for composite preform shaping – Simulation of the loss of cohesion of the woven fibre network. Composites: Part A. 2013. V. 54. P. 135-144

82. Gou J.-J., Dai Y.-J., Li S., Tao W. Numerical study of effective thermal conductivities of plain woven composites by unit cell of different sizes. International Jornal of Heat and Mass Transfer. 2015. V. 91. P. 829-840.

83. Green S.D., Long A.C., Said B.S.F., Hallett S.R. Numerical modelling of 3D woven preform deformations. Composite Structures. 2014. V. 108. P. 747-756.

84. Guo H., Wang B., Jia P., Yang C. In-plane shear behaviours of a 2D-SiC/SiC composite under various loading conditions. Ceramic International. 2015. V. 41. P. 11562-11569.

85. Haas R. The stretching of the fabric and the shape of the envelope. NACA TR-16. 1917. 154 p.

86. Haldar S., Caputo D., Buesking K., Bruck H.A. Flexural behavior of singly curved X-Cor sandwich composite structures: Experiment and finite element modeling. Composite Structures. 2015. V. 129. P. 70-79.

87. Hallal A., Younes R., Fardoun F., Nehme S. Improved analytical model to predict the effective elastic properties of 2.5D interlock woven fabrics composite. Composite Structures. 2012. V. 94. P. 3009-3028.

88. Hasbin Z. Theory of fiber reinforced materials: NASA Contractor Report 1974. 1972. 702 p.

89. Heimbs S., Heller S., Middendorf P., Hahnel F., Weibe J. Low velocity impact on CFRP plates with compressive preload: Test and modelling. International Journal of Impact Engineering. 2009. V. 36. P. 1182-1193.

90. Hintona M.J., Kaddourb A.S., Soden P.D. A comparison of the predictive capabilities of current failure theories for composite laminates, judged against experimental evidence. Composite Science and Technology. 2002. № 62. P. 1725−1797.

91. Ingraffea A.R. Computational Fracture Mechanics. Encyclopedia of Computational Mechanics. Part 2: Solids and Structures. 2004. p. 375 - 402.

92. Isart N., El Said B., Ivanov D.S., Hallett S.R., Mayugo J.A., Blanco N. Internal geometric modelling of 3D woven composites: A comparison between different approaches. Composite Structures.2015. V. 132. P. 1219-1230.

93. Ivanov D., Vandenbosche K., Ivanov S., Baudry F., lomov S.V., Verpoest I. Strain mapping analysis of various textile composite and noise filtering of the data. Proceedings of the OPTIMESS2007 Workshop 28th-30th, 2017, 9 p.

94. Karayaka M., Kurath P. Deformation and failure behavior of woven composite laminates. J. Eng. Mater. and Technol. 1994. V. 116. P. 222−232.

95. Kiasat M.S., Sangtabi M.R. Effect of fiber bundle size and weave density on stiffness degradation and final failure of fabric laminates. Composites Science and Technology. 2015. V. 111. P. 23-31.

96. Lee M.G., Lee K.W., Hur H.K., Kang K.L. Mechanical behavior of a wire-woven metal under compression. Composite Structures. 2013. V. 95. P. 264-277.

97. Li H., Kandare E., Li S., Wang Y., Kandola B.K., Myler P., Horrocks A.R. Micromechanical finite element analyses of fire-retarted woven fabric composites at elevated temperatures using unit cell at multiple length scales. Computational Materials Science. 2012. V. 55. P. 23-33.

98. Lomov S.V. et al. Experimental and theoretical characterisation of the geometry of flat two- and three-axial braids. Textile Research J. 2002. V. 72(1). P. 706-712.

99. Lomov S.V. et al. Mathematical modelling of internal geometry and deformability of woven preforms. Int. J. of Forming Processes. 2003. V. 6(3-4). P.413-442.

100. Lomov S.V. et al. Meao-FE modelling of textile composites: Road map, data flow and algorithms. 16th International conference on composite materials. 2007, 11 p.

101. Lomov S.V. et al. Textile geometry preprocessor for meso-mechanical models of woven composites. Compos. Sc. and Tech. 2000. V. 60. P 2083-2095.

102. Lomov S.V., Mikolanda T., Kosek M., Verpoest I. Model of internal geometry of textile composite reinforcements: Data structure and virtual reality implementation. Journal of the Textile Institute. 2007. V. 98(1). P. 1-13.

103. Lu Z., Zhou Y., Yang Z., Liu Q. Multi-scale finite element analysis of 2.5D woven fabric composites under on-axis and off-axis tension. Computational Materials Science. 2013. V. 79. P. 485-494.

104. Man X., Swan C.C. A mathematical modeling framework for analysis of functional clothing. J. Eng. Fiber and Fabrics. 2007. V. 2. № 3. P. 10-27.

105. Martin-Santos E., Maimi P., Gonzalez E.V., Cruz P. A continuum constitutive model for the simulation of fabric-reinforced composites. Composite Structures. 2014. V. 111. P. 122-129.

106. Mishra R., Militky J., Gupta N., Pachauri R., Behera L.. Modelling and simulation of earthquake resistant 3D woven textile structural concrete composites. Composites: Part B. 2015. V. 81, P. 91-97.

107. Misra R.K., Dixit A., Singh H., Singh H. Finite Element (FE) Shear Modeling of Woven Fabric Textile Composite. Procedia Materials Science. 2014. V.6. P. 1344-1350.

108. Mital S.K. Simplified Micromechanics of Plain Weave Composites. NASA TM-107165. 1996. 12 p.

109. Moezzi M., Ghane M., Nicoletto G., Nedoushan R.J. Analysis of the mechanical response of a woven polymeric fabric with locally induced damage. Materials and Design. 2014. V. 54. P. 279-290.

110. Munoz R., Martinez V., Sket F., Gonzalez C., LLorca J. Mechanical behavior and failure micromechanisms of hybrid 3D woven composites in tension. Composites: Part A. 2014. V. 59. P. 93-104.

111. Murugan R., Ramesh R., Padmanabhan K. Investigation on Static and Dynamic Mechanical Properties of Epoxy Based Woven Fabric Glass/Carbon Hybrid Composite Laminates. Procedia Engineering. 2014. V. 97. P. 459-468.

112. Naik R. TEXCAD – Textile Composite Analysis for Design. NASA CR 4639. 1994. 41 p.

113. Naik R.A. Analysis of Woven and Braided Fabric Reinforced Composites. NASA CR-194930. 1994. 45 p.

114. Navarro P., Aubry J., Pascal F., Marguet S., Ferrero J.F., Dorival O. Influence of the stacking sequence and velocity on fracture toughness of woven composite laminates in mode I. Engineering Fracture Mechanics. 2014. V. 131. P. 340-348.

115. Nilakantan G., Keefe M., Wetzel E.D., Bogetti T.A., Gillespie J.W. Jr. Effect of statistical yarn tensile strength on the probalistic impact response of woven fabrics. Composites Science and Technology. 2012. V. 72. P. 320-329.

116. Nilakantan G., Wetze E.D., Bogetti T.A., Gillespie J.W.Jr. A deterministic finite element analysis of the effect of projectile characteristics on

the impact response of fully clamped flexible woven fabrics. Composite Structures. 2013. V. 95. P. 191-201.

117. Nilakantat G., Gillespie J.W. Jr. Yarn pull-out behavior of plain woven Kevlar fabrics: Effect of yarn sizing, pullout rate, and fabric pre-tension. Composite Structures. 2013. V. 101. P. 215-224.

118. Obert E., Daghia F., Ladeveze P., Ballere L. Micro and meso modelling of woven composites: Transverse cracking kinetics and homogenization. Composite Structures. 2014. V. 117. P. 212-221.

119. Olivier Cousigne, Moncayo D., Coutellier D., Camanho P., Naceur H., Hampel S. Development of a new nonlinear numerical material model for woven composite materials accounting for permanent deformation and damage. Composite Structures. 2013, V. 106. P. 601-614.

120. Parsons E.M., King M.J., Socrate S. Modeling yarn slip in woven fabric at the continuum level: Simulations of ballistic impact. Journal of the Mechanics and Physics of Solid. 2013, V. 61. P. 265-292.

121. Pastore C.M. Illustrated Glossary of Textile Terms for Composites: NASA Contractor Report 191539. 1993. 34 p.

122. Porras A., Maranon A. Development and characterization of a laminate composite material from polylactic acid (PLA) and woven bamboo fabric. Composites: Part B. 2012. V. 43. P. 2782-2788.

123. Reddy J.N., Robbins D.H.Jr. Computational Modelling of Damage and Failures in Composite Laminates. Encyclopedia of Computational Mechanics. Part 2: Solid and Structures. 2004. V. 13. P. 431-460.

124. Romelt P., Cunningham P.R. A multi-scale finite element approach for modelling damage progression in woven composite structure. Composite Structures. 2012. V. 94. P. 977-986.

125. Rossol M.N. , Rajan V.P., Zok F.W. Effect of weave architecture on mechanicak response of 2D ceramic composites. Composites: Part A. 2015. V. 74. P. 141-152.

126. Sarasini F., Tirillo J., Valente M., Ferrante L., Cioffi S., Iannace S., Sorrentino L. Hybrid composites based on aramid and basalt woven fabrics: Impact damage modes and residual flexural properties. Materials and Design. 2013. V. 49. P. 290-302.

127. Sarasini S., Tirillo J., Ferrante L., Valente M., Valente T., Lampani L., Gaudenzi P., Cioffi S., Lannace S., Sorrentino L. Drop-weight impact behavior of woven hybrid basalt-carbon/epoxy composites. Composites: Part B. 2014. V. 59. P. 204-220.

128. Shamsudin M.H., York C.B. Mechanically coupled laminates with balanced plain weave. Composite Structures. 2014. V. 107. P. 416-428.

129. Shao Y., Okobo K., Fujii T., Shibata O., Fujita Y. Effect of matrix properties on the fatigue damage initiation and its growth in plain woven carbon fabric vinylester composites. Composite Structures. 2014. V. 104. P. 125-135.

130. Shrotriya P., Sottos N.R. Viscoelastic response of woven composite substrates. Composites Science and Technology. 2005. V. 65. P. 621–634.

131. Siddiqui M.O., Sun D. Finite element analysis of thermal conductivity and thermal resistance behaviour of woven fabric. Computational Materials Science. 2013. V. 75. P. 45-51.

132. Sirkova B.K., Mertova I. Prediction of woven fabric properties using software PROTKATEX. AUTEX Research Journal. 2013. V. 13. №1. P. 11-16.

133. Stier B., Simon J.-W., Reese S. Comparing experimental to numerical meso-scale approach for woven fiber reinforced plastics. Composite Structures. 2015. V. 122. P. 553-560.

134. Stig F., Hallstrom S. Spatial modelling of 3D-woven textiles. Composite Structures. 2012. V. 94. P. 1495-1502.

135. Swolfs Y., Crauwels L., Gorbatikh L., Verpoest I. The influence of weave architecture on the mechanical properties of self-reinforced polypropylene. Composites: Part A. 2013. V. 53. P. 129-136.

136. Vallons K., Lomov S.V., Verpoest I. Fatigue and post-fatigue behavior of carbon fibre non crimp fabric composites. 16th International conference on composite materials. 2007. P. 1-8.

137. Vasconcellos D.S., Touchard F., Chocinski-Arnault L. Tension-tension fatigue behavior of woven hemp fibre reinforced epoxy composite: A multi-instrumented damage analysis. International Journal of Fatique. 2014. V. 59. P. 159-169.

138. Vasiliev V.V., Morozov E.V. Mechanics and analysis of composite materials. Oxford: Elsevier. 2001. 412 p.

139. Verleye B., Croce R., Griebel M., Klitz M., Lomov S.V., Morren G., Sol H., Verpoest I., Roose D. Permeability of textile reinforcements: Simulation, influence of shear and validation. Composite Science and Technology. 2008. V. 68. P. 2804-2810.

140. Verpoest I., Lomov S.V. Virtual textile composites software Wisetex: integration with micro-mechanical, permeability and structural analysis. Composites Science and Technology. 2005. V. 65 (15-16). P. 2563-2574.

141. Wang H., Wang Z. Quantification of effects of stochastic feature parameters of yarn on elastic properties of plain-weave composite. Part 1: Theoretical modeling. Composites: Part A. 2015. V. 78. P. 84-94.

142. Whitcomb J.D. Three-dimensional stress analysis of plain weave composites. NASA TM-101672. 1989. 32 p.

143. WiseTex software suit. Documentation for WixeTex [Электронный ресурс]: Composite Materials Group — Электрон. дан. и прогр. — [Б. м.], 2013.

144. Wu Z. Au C.K., Yuen M. Mechanical properties of fabric matherials for draping simulation. Int. J. Clothing Sc. Tech. 2003. V. 15. № 1. P. 56-68.

145. Xu C., Junjiang X., Jiangbo B. Analytical Solution for Predicting In-plane Elastic Shear Properties of 2D Orthogonal PWF Composites. Chinese Journal of Aeronautics. 2012. V. 25. P. 575-583.

146. Xu J.,Lomov S.V., Verpoest I., Daggumati S., Paepegem W.V., Degrieck J. A comparative study of twill weave reinforced composites under tension0tension fatigue loading: Experiments and meso-modelling. Composite Structures. 2016. V. 135. P. 306-315.

147. Y. Rahali, I. Goda, J.F. Ganghoffer. Numerical identification of classical and nonclassical moduli of 3D woven textiles and analysis of scale effects. Composite Structures. 2016. V. 135. P. 122-139.

148. Yang Y., Xu F., Gao X., Liu G. Impact resistance of 2D plain-woven C/SiC composites at high temperature. Materials and Design. 2016. V. 90. P. 635-641.

149. Yang Y., Xu F., Zhang Y., Liu G. Experimental study on the impact resistance of 2D plain-woven C/SiC composite. Ceramic International. 2014. V. 40. P. 15551-15559.

150. Yudhanto A., Watanabe N., Iwahori U., Hoshi H. The effects of stitch orientation on the tensile and open hole tension properties of carbon/epoxy plain weave laminates. Materials and Design. 2012. V. 35. P. 563-571.

151. Zeng X., Drown L.P., Endruweit A., Matveev M., Long A.C. Geometrical modelling of 3D woven reinforcements for polymer composites: Prediction of fabric permeability and composite mechanical properties. Composites: Part A. 2014. V. 56. P. 150-160.

152. Zhao Z., Chen X., Wang X. Deformation behavior of woven glass/epoxy composite substrate under thermo-mechanical loading. Materials and Design. 2015. V. 82. P. 130-135.

153. Zhu B., Yu T., Tao X. Deformation analysis and failure modelling of woven composite preform in general bias extension. Acta Mechanica Solida Sinica. 2012. V. 25. № 3. P. 278-284.

154. Zhu Q. et al. Three-dimensional viscoelastic simulation of woven composite substrates for multilayer circuit boards. Composites Science and Technology. 2003. P. 1971–1983.