

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(национальный исследовательский университет)

На правах рукописи



Чжо Аунг Лин

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ
ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ОСТАТОЧНОГО
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПАНЕЛЕЙ
ИЗ СЛОИСТЫХ НАНОМОДИФИЦИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Специальность 01.02.06 - Динамика, прочность машин, приборов и
аппаратуры

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор физико-математических наук
профессор Рабинский Лев Наумович

Москва - 2019

Оглавление

Список сокращений	4
Введение.....	5
Глава 1. Обзор и анализ методов исследования эффективных характеристик и остаточных деформаций в наномодифицированных композитах.	15
1.1. Особенности изготовления образцов наномодифицированного углепластика.....	15
1.2. Механические испытания образцов из наномодифицированного углепластика.....	20
1.3. Определение коэффициентов температурного расширения.	45
Глава 2. Определение эффективных термомеханических характеристик наномодифицированного углепластика численными и аналитическими методами	48
2.1. Экспериментальные данные	48
2.2. Макромеханический подход.....	50
2.3. Микромеханический подход.....	52
2.4. Сопоставление результатов в рамках макро- и микромеханического моделирования и экспериментальных данных	55
Глава 3. Теоретическое и экспериментальное исследование остаточных температурных напряжений в панелях из наномодифицированного углепластика.	58
3.1. Экспериментальное определение остаточных деформации в панелях из наномодифицированного углепластика	58
3.2. Численное и аналитическое моделирование остаточных деформаций в панелях с несимметричной укладкой	60
3.3. Расчетные и экспериментальные результаты для пластин с укладкой $[0_{10} / 45_{10}]$	70

3.4. Расчетные и экспериментальные результаты для пластин с укладкой $[0_{10} / 90_{10}]$	76
3.5. Анализ полученных результатов.....	81
Заключение.	86
Список литературы	87
Приложение 1. Идентификация свойств монослоя.	94
Приложение 2. Процесс изготовления КМ.....	114

Список сокращений

КЛТР – коэффициент линейного температурного расширения;

НДС – напряженно-деформированное состояние;

ПКМ – полимерный композиционный материал;

CFRP - carbon fibre reinforced plastic, КМ состоящие из углеродных волокон и полимерной матрицы.

Введение

Актуальность работы. В настоящее время композитные материалы широко используют в различных современных отраслях промышленности: конструкциях в авиационной космической технике, машиностроении и. д р. Использование композитов во всем мире быстро увеличивается, потому что они имеют значительные преимущества перед традиционными материалами, например, металлы[48]. ПКМ обладают повышенной удельной прочностью и жесткостью, стойкость к воздействию температур и к вибрационным нагрузкам, а также малый удельный вес, что особенно важно в авиакосмической технике [36]. Поэтому развитие современной техники требует создания новых конструкционных материалов с высокими упруго-прочностными характеристиками, а на их основе конструкции с более эффективными весовыми данными. Создание полимерных композитов на основе наномодифицированных связующих уже более 15 лет является одним из приоритетных направлений исследований в области технологий изготовления КМ. В этой области достигнуты значительные успехи [1- 56]. Разработка КМ, улучшающих их эксплуатационные пределы, основана на армировании двух и более волокон в единую полимерную матрицу, что приводит к усовершенствованной системе материалов под названием гибридные композиты с большим разнообразием свойств материала [36]. При создании нанокомпозитов ключевыми задачами является разработка эффективных, надежных и доступных в массовом производстве технологий производства, позволяющих получать материалы со стабильными характеристиками.

Так большой интерес представляется собой изучение гибридации, т.е., положительный или отрицательный гибридный эффект выбранного механического свойства по правилу поведения смеси углерод/углерод/эпоксидная смола и стекло/углеродные композиты [44]. Или изучение гибридного эффекта и усиление напряжения отказа до 50% для

стекла волокна/углерода волокна/ эпоксидной смолы композиты [43]. Авторами рассмотрены различные стекла, углерода соотношения и состояния дисперсии двух фаз. В работе получали напряжения разрушения углеродной фазы увеличивалась по мере того, как относительная доля углеродного волокна уменьшалась, т.к. углеродные волокна были более тонко диспергированы. В некоторых работах рассматривался гибридный композит углерод/стекло с общей объемной долей волокна 30%. С различными соотношениями углерод/стекловолокно, поддерживающий одинаковую объемную долю волокна, от чистого стекла до чистого углерода [5]. Гибридные ламинаты были испытаны для компрессионной нагрузки для изучения механизмов разрушения. В работе [54], представлены экспериментальные результаты по стеклу/углероду гибридные композиты, которые показали, что смешивание стекла и углеродные волокна в одном композите приводят к ухудшению в измеренной прочности композита. Сравнение гибридных и негибридных композитов показало, что оба гибридных композита изготовленные из ткани и намотки волокна работают аналогично при растягивающей нагрузке, а при сжатии, намотанные КМ показывают более высокую производительность по сравнению с гибридными тканями [50].

Исследование механических характеристик гибридных композитов с волокнами из стекла $\pm 45^\circ$ и нержавеющей стали $0^\circ/90^\circ$ не менее важно при использовании подобных структур [28]. В этом исследовании, гибридных и негибридных композитов различных препятствий, содержание волокна и переплетения типа были изготовлены и подвергнуты гистерезисных растягивающих нагрузок. Современное состояния гибридных композитных материалов, их технология, с точки зрения свойств материалов имеет очевидное преимущество с акцентом на различные применение [32].

Методика расчета эффективных характеристик жесткости гибридного композиционного материала с двумя видами армирующих волокон, представительного элемента гибридного композиционного материала

базируется на конечно-элементном анализе напряженно-деформированного состояния в пакете ANSYS [16]. В данной работе рассматриваются гибридные композиционные материалы на основе магниевой матрицы, армированной углеродными и борными армирующими волокнами. При заданной структуре гибридного композиционного материала вычислялись эффективные характеристики жесткости данного КМ. Так же проводилось исследование и статистический анализ для прочности на растяжение однонаправленных гибридных композиционных материалов, состоящих из двумерных массивов переменного низкого удлинения и волокон высокого удлинения в общей матрице [29]. Помимо исследования на растяжение проводилось отдельное исследование изгибных свойств гибридных КМ армированных стеклом и углеродным волокном эпоксидных композитов. Исследовались гибридные композитные материалы для трех комбинаций углеродных и стеклянных волокон [30]. Общий обзор механических характеристик (на растяжение, изгиб и удар) армированных волокном гибридных полимерных композитов исследовались в работе [51, 53], а усталостные свойства гибридных КМ изучалось в работе [53]. Путем совмещения двух или более типов волокна, эти гибридные композиты предлагают более лучший баланс механических свойств чем негибридные композиты.

В работе [46] охарактеризованы механические свойства фуллеренов эпоксидных нано композитов при различных весовых долях фуллеренов добавок в эпоксидной матрице. В работе измеряются механические свойства, такие как модуль Юнга, предел прочности при растяжении, вязкость разрушения, энергия разрушения и устойчивость материала к распространению усталостной трещины. Все вышеперечисленные свойства эпоксидного полимера были значительно усилены добавками фуллерена при относительно низкой нагрузке фуллеренов фракций (0,1 - 1% от массы эпоксидной матрицы). Эпоксидные смолы широко используются в высокопроизводительных структурных КМ [27, 47]. Изученные нано наполнители могут включают себя как мягкие наполнители, такие как резины,

эластомеры [40], так и твердые наполнители, такие как нано углероды (углеродные нанотрубки) [55, 56, 42, 31].

Углепластики (CFRP) - это композиты, основанные на полимерной матрице (терморезистивные и термопластичные связующие), содержащие углеродные волокна в качестве армирующего наполнителя. Прочность и жесткость углепластика определены свойствами волокна углерода и температурой обслуживания термостабильность матрицы. CFRP обладают уникальным комплексом свойств и превышают удельную жесткость, усталостную прочность, химическую и радиационную стойкость традиционных конструкционных материалов (металлов, стеклопластиков). Они имеют высокую теплопроводность, низкий коэффициент линейного термического расширения и позволяют контролировать механические и электрические характеристики в широком диапазоне. Основные типы CFRP можно использовать вместо металлов при производстве аэрокосмических конструкций, приводов, элементов каркаса мостов и др.

Новые разработки в области полимерных композиционных материалов нового поколения на основе полимерных связующих с углеродными и стеклянными армирующими наполнителями не до конца изучены и продолжают изучаться [17]. Так в работе [14] представлены результаты экспериментальных исследований модулей упругости, предела прочности, коэффициентов Пуассона и коэффициентов теплового расширения углепластика, а в работе [5] представлен метод оценки прочности и жесткости углепластика анизотропных слоистых пластин при растяжении и сжатии в плоскости укладки волокон. Экспериментально изучены закономерности деформирования и разрушения пластины из углепластика. С помощью известных механических характеристик однонаправленного монослоя оценивается прочность многослойных пластин с различными схемами укладки волокон. Не меньший интерес представляют собой структурные свойства конструкционных углепластиков, изготовленных пропиткой под вакуумом, [7]. Так исследуется нелинейное напряженно-деформированное

поведение ламината углепластика и влияние на них термических деформаций, [38].

Не маловажную роль в ПКМ играют тепловые характеристики. К примеру, много работ уделено исследованию направленного на изучение поведения коэффициента линейного температурного расширения при различных температурных режимах, где наиболее интересные эффекты наблюдаются вблизи температуры стеклования, [24]. А в работах [20, 18, 13] представлено влияние остаточных температурных напряжений на прочностные свойства композита, а также приведен подробный анализ влияния расположения, ориентации волокон слоев и их соотношение в пакете на форму деформации панелей из ПКМ. Краевые напряжения в ламинате при равномерной тепловой нагрузке и влияние краевых эффектов на остаточные напряжения рассмотрены в работе [33], а исследование влияния угла укладки армирующих волокон на термоупругие эффекты в работе [1]. Исследование остаточного напряженно-деформированного состояния панели, а также моделирование остаточного НДС панелей из композиционных материалов малой кривизны исследуется в работе [19].

В работе [6], предложены методики определения предела прочности элементов конструкция с наполнителем из композиционных материалов при статических испытаниях на одноосное растяжение, сжатие и сдвиг. Проведена апробация методик на полунатурных образцах панелях с ячеистым наполнителем на основе композиционных материалов. В работе [4] было проведено испытание образцов многослойного композита на определение предела прочности при межслойном сдвиге методом трехточечного изгиба короткой балки, а также исследовано влияние расстояния между опорами на значение предела прочности межслойного сдвига. В работе [21] приведены результаты экспериментальных исследований композиционных материалов на растяжение, изгиб, сдвиг и кручение. Определены зависимости механических свойств от содержания связующего материала, скорости нагрева и охлаждения. Методами статистической обработки результатов

исследований определены интенсивности отказов и вероятности безотказной работы композиционных материалов.

Исследование влияния тканых слоев в структуре полимерного композиционного материала на остаточное напряженно-деформированное состояние после процесса формования и охлаждения изделия до комнатной температуры показаны рассматривается в работе [3]. Получены распределения величин остаточных напряжений по слоям пакета, а также значения компонент кривизн при различных соотношениях тканых и однонаправленных слоев.

В диссертационной работе исследована возможность улучшения механических свойств образцов углепластика с наномодифицированным связующим, а также исследовано влияние наномодификации углепластика на остаточное напряженно-деформированное состояние (НДС) после формования. Поэтому тема диссертации, посвященная разработке теоретических и экспериментальных методов исследования эффективных термомеханических характеристик и остаточного напряженно-деформированного состояния слоистых наномодифицированных материалов, является актуальной и имеет прикладное значение.

Цель работы. Целью диссертационной работы является разработка методов оценки влияния эффективных термомеханических характеристик панелей из слоистых композитов с наномодифицированной матрицей на остаточное НДС. Поставленная цель достигается на основании решения следующих задач:

1. Разработать математическую модель для исследования влияния физико-механических свойств на остаточное НДС из углепластика.
2. Исследовать возможность улучшения механических свойств углепластика.
3. Исследовать влияния наномодификации углепластика на остаточное НДС.
4. На основе разработанных методов провести теоретическое и экспериментальное исследование остаточного НДС слоистых углепластиков.

Методы исследования. Экспериментальные исследования механических свойств углепластика на растяжение проводили на основе ГОСТ 25.601-80 «Методы механических испытаний композиционных материалов в полимерной матрице (композитов) ГОСТ 32656-2014. Метод испытания плоских образцов на растяжение при нормальной, повышенной и пониженной температурах». Испытания для определения прочности при межслойном сдвиге проводились на образцах в соответствии с ГОСТ 32659-2014. Испытание проводилось на универсальной испытательной машине Instron серии 5960 с программным обеспечением Bluehill 3. Для измерения деформации образцов использовался бесконтактный оптический видеоэкстензометр. Для идентификации свойств монослоя композита привлекалась система компьютерного моделирования свойств композиционных материалов DIGIMAT. Для проведения конечно-элементных расчетов был использован программный комплекс ANSYS. Для аналитических расчетов привлекалась система Matlab.

Научная новизна диссертации заключается в следующем:

1. Разработаны теоретические и экспериментальные методы исследования эффективных термомеханических характеристик остаточного НДС панелей из слоистых наномодифицированных материалов.
2. Разработаны методы изготовления образцов для механических испытаний наномодифицированного углепластика.
3. На основе разработанных и развитых экспериментальных методов исследованы механические свойства монослоя в образцах углепластика, изготовленного с применением эпоксидной матрицы, содержащей 0,2 масс % фуллереновой сажи.
4. Исследовано влияние наномодификации углепластика на остаточное напряженно-деформированное состояние после формования и разработана методика оценки влияния различных физико-механических факторов на остаточные напряжения и деформации.

5. Разработаны методы создания углепластики с высокими упруго-прочностными характеристиками, а на их основе конструкции с более эффективной весовой отдачей.

Достоверность полученных результатов. Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечивается использованием соотношений макромеханической модели слоистых композитов и классической теории упругости, апробированных математических моделей и пакетов прикладных программ, а также хорошей корреляцией аналитических и численных результатов с полученными в работе экспериментальными данными.

Практическая ценность и применение результатов. Проведенные в диссертационной работе исследования позволили:

1. На основе полученного аналитического решения, а также численного моделирования исследовать остаточные деформации в панелях с несимметричной схемой армирования.

2. По результатам проведенных механических испытаний композитов с различными схемами армирования исследовать физико-механические характеристики монослоев композитов и получить решение соответствующей обратной задачи.

3. В результате проведенных исследований определены три различных набора значений характеристик монослоев углепластика, изготовленного на основе обычной и наномодифицированной матрицы.

4. Сопоставление результатов аналитических и численных решений с полученными экспериментальными данными подтверждают достоверность и обоснованность разработанных математических моделей и методов исследования эффективных термомеханических характеристик и остаточного напряженно-деформированного состояния панелей из слоистых наномодифицированных материалов.

Апробация основных результатов работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на международных конференциях и симпозиумах, в том числе:

- XXIV международный симпозиум «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А. Г. Горшкова (Московская обл., 2018г.);

- XXV Международный симпозиум «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова (Московская обл., 2019 г.).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 7 научных работ, в том числе 1 статья в периодическом издании [23], включенном в перечень ВАК РФ, 2 статьи в журналах, входящих в Scopus [26, 41], 4 публикации в тезисах докладов международных конференций и симпозиумов [9, 10, 11, 22].

На защиту выносятся следующие положения:

1. Теоретическая и экспериментальная методика исследования остаточного НДС слоистых углепластиков с наномодифицированной матрицей.

2. Расчет остаточных температурных напряжений в панелях из наномодифицированного углепластика и анализ полученных результатов эксперимента.

3. Результаты экспериментального исследования эффективных характеристик и остаточных деформаций в наномодифицированном углепластике.

4. Результаты аналитического и численного моделирования остаточных деформаций в панелях с несимметричной схемой армирования в наномодифицированном углепластике.

Структура и объем работы. Диссертационная работа включает список сокращений, введение, три главы, заключение, список литературы, включающий 56 наименований, приложение 1 и приложение 2. Текст диссертации изложен на 117 страницах, включает 52 рисунка и 23 таблицы.

В первом разделе диссертационной работы приведен обзор и анализ методов исследования эффективных характеристик и остаточных деформаций в наномодифицированных композитах. Исследованы особенности изготовления образцов наномодифицированного углепластика. Даны результаты проведенных механических испытаний образцов наномодифицированного углепластика. Проведена оценка коэффициентов температурного расширения.

Во второй главе проведено моделирование эффективных термомеханических характеристик наномодифицированного углепластика. Рассмотрен макромеханический подход, микромеханический подход.

В третьей главе представлены результаты теоретического и экспериментального определения остаточных деформации в панелях из наномодифицированного углепластика.

В заключении приведены основные выводы, сделанные по результатам проведенного в диссертационной работе исследования.

В приложении 1 представлен процесс идентификация свойств монослоя в «DIGIMAT».

В приложении 2 представлен процесс изготовления КМ.

Глава 1. Обзор и анализ методов исследования эффективных характеристик и остаточных деформаций в наномодифицированных композитах.

1.1. Особенности изготовления образцов наномодифицированного углепластика.

Для определения остаточных деформаций изготавливаются 4 плиты – отличающиеся укладкой слоев и связующим. Две плиты выполнены из обычного связующего с укладкой 0-90 и 0-45 и две плиты из модифицированного связующего с укладкой 0-90 и 0-45, рисунок 1.1.

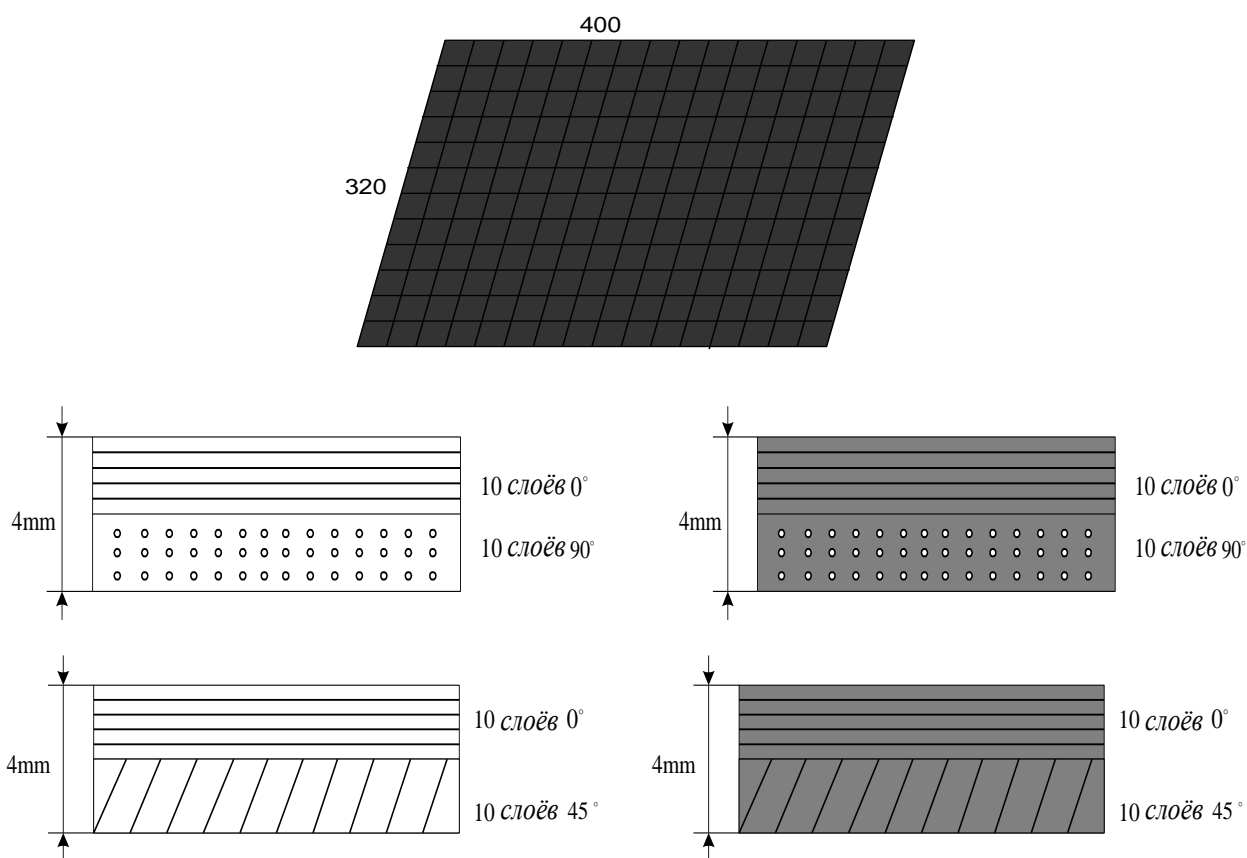


Рисунок 1.1. Плиты с различными вариантами укладки слоев и габаритами

Для определения термомеханических свойств композита из плит вырезаются образцы. Образцы вырезаются из двух плит с укладкой 0-90 и одной плиты с укладкой 0. Требуются образцы с укладками 0-90, +-45, 0, 90,

рисунок 1.2. Все образцы выполняются с использованием обычного связующего и модифицированного.

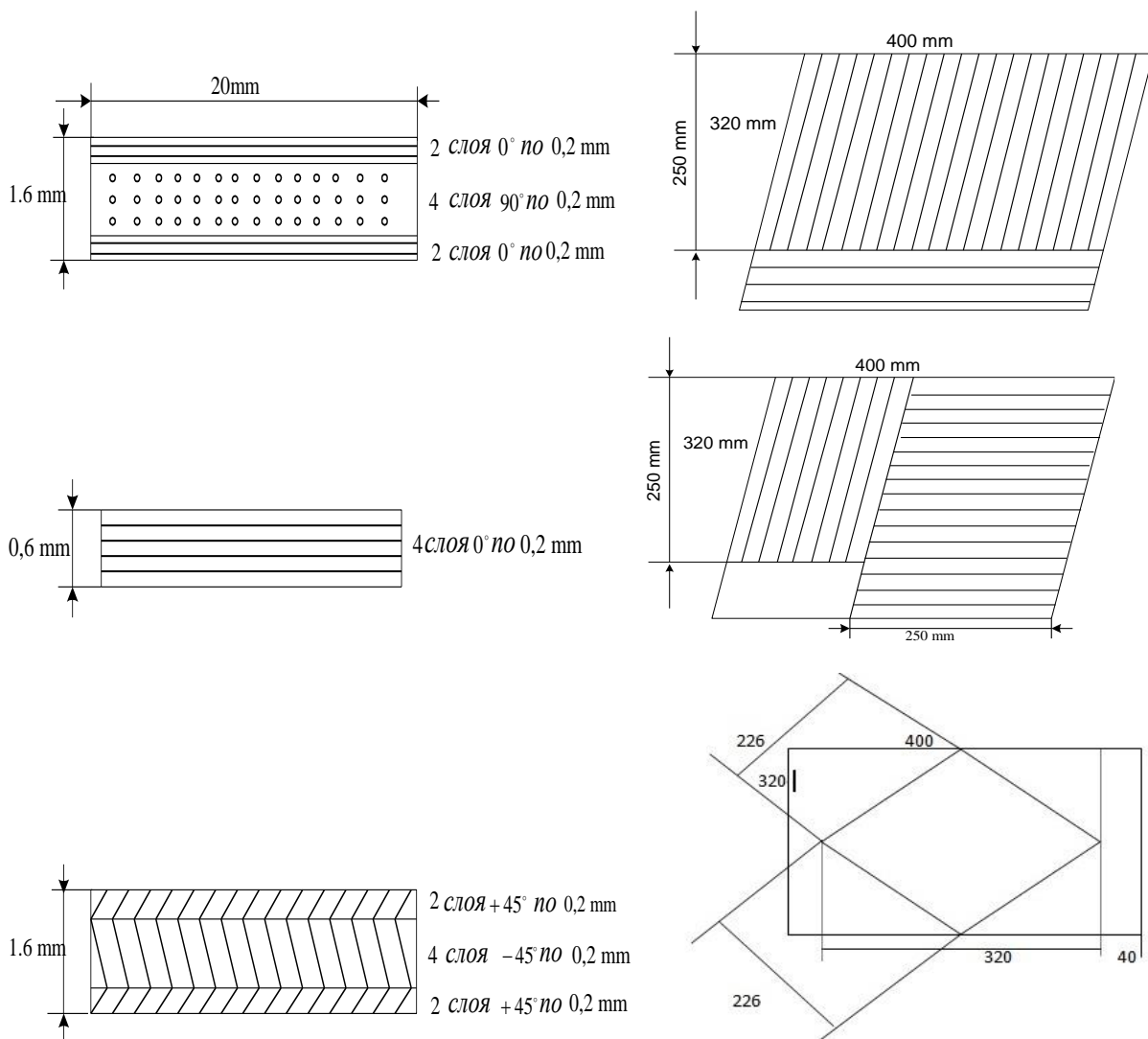


Рисунок 1.2. Плиты с различными вариантами укладки слоев для определения термомеханических свойств

Образцы отвержденного связующего без волокон, выполнены из обычного связующего и модифицированного без использования волокон, рисунок 1.3.

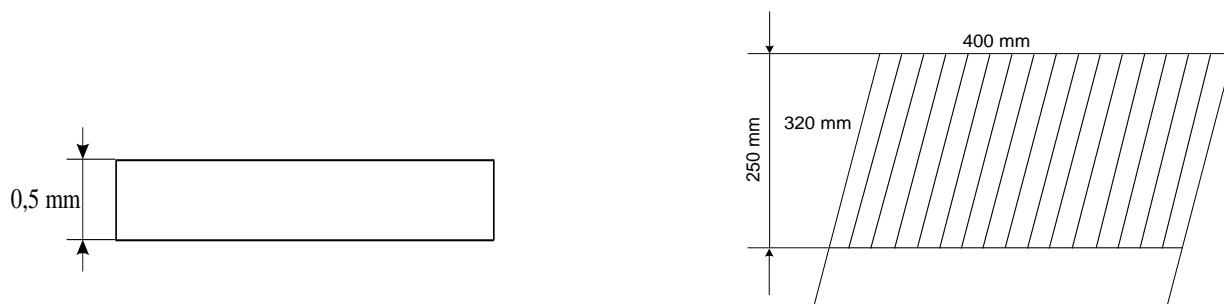


Рисунок 1.3. Образцы отвержденного связующего без волокон.

Таблица 1.1. Общее количество плит, образцов и материала.

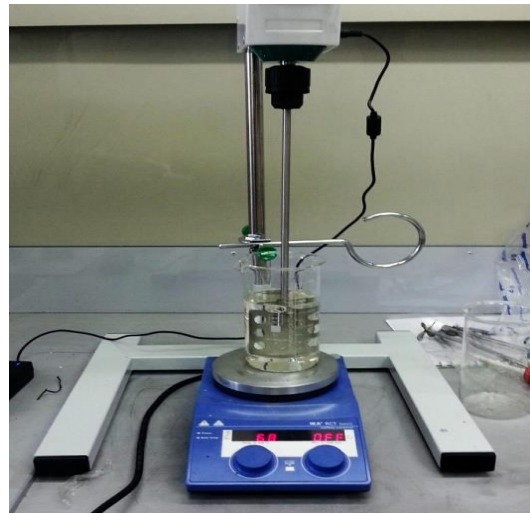
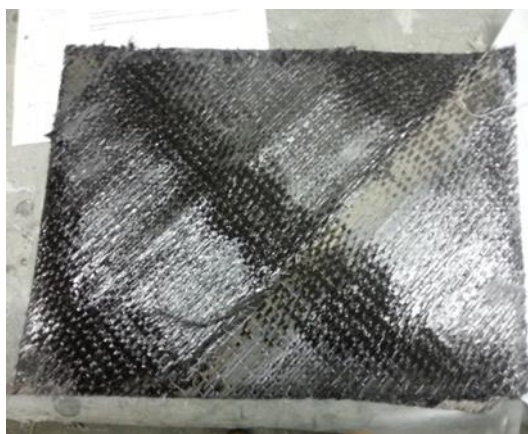
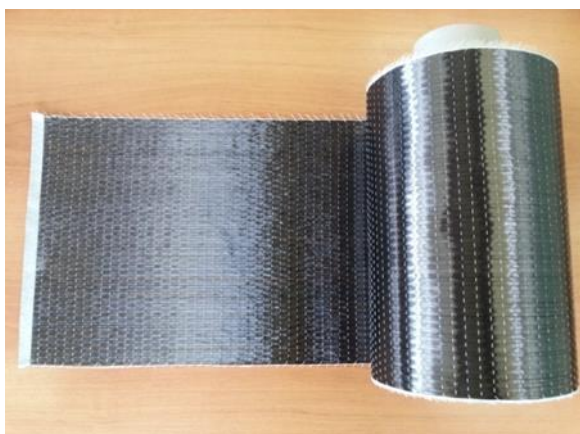
Материал	Структура	Толщина, мм	Количество плит	Количество образцов
Углепластик	0 ₂ /90 ₄ /0 ₂	1,6	2	20 с укладкой 0/90 10 с укладкой +-45
Углепластик	0 ₄	0,8	1	5 с укладкой 90 15 с укладкой 0
Связующее без волокон	-	0,5	1	20 образцов
Углепластик на основе модифицированного связующего	0 ₂ /90 ₄ /0 ₂	1,6	2	20 с укладкой 0/90 10 с укладкой +-45
Углепластик на основе модифицированного связующего	0 ₄	0,8	1	5 с укладкой 90 15 с укладкой 0
Модифицированное связующее	-	0,5	1	20 образцов
ИТОГО:		21,8	12	140 образцов

При изготовлении плит были использованы:

Лента общей площадью 15,36 м² (с учетом количества монослоев равном 120 и площадью плиты 0,128 м²), и длиной порядка 50 м (с учетом ширины ленты равной 0,32 м.).

Объем связующего необходимый на одну плиту равен 3 литра.

Итого обычного связующего и модифицированного необходимо по 1,5-2 литра (всего 3-4 литра) на 50 м ленты.



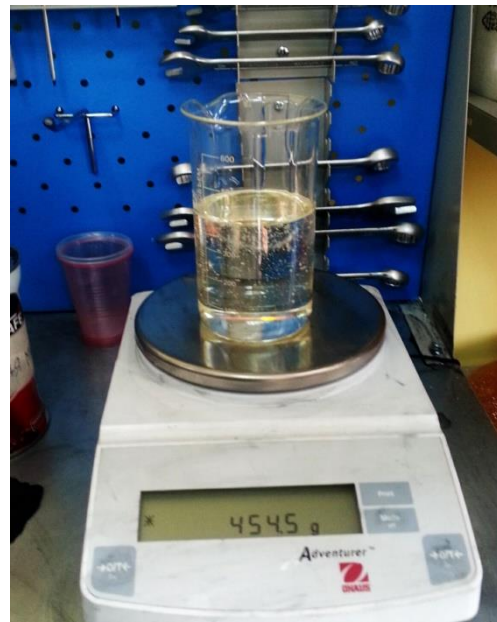


Рисунок 1.4

В экспериментах [26] были исследованы образцы углепластика, содержащие 0,2 масс. % фуллереновой сажи, произведенной компанией "Nanopolymer" (Россия). Применяемая фуллереновая сажа содержит 10% фуллеренов C₆₀ и C₇₀ и состоит на 100% из углерода, то есть не содержит иных примесей. Плотность сажи составляет 0,3 г/см³. Для изготовления образцов углепластика было использовано эпоксидное связующее марки ЭДТ-10 (Россия) и углеродные волокна марки НТА-40 (Toho Tenax Co. Ltd.). Объемное содержание волокон составляло 50%.

В исследованиях использовалась фуллереновая сажа производства «Нанополимер» (Россия). Эта фуллереновая сажа содержит 10% фуллеренов C₆₀ и C₇₀ и 100% углерода, т.е. без других добавок. Плотность сажи составляет 0,3 г / см³. Образец из углепластика был изготовлен с использованием ЭДТ-10. эпоксидное связующее (Россия) и углеродные волокна НТА-40 (Toho Tenax Co. Ltd.). Свойства волокон, согласно их техническим характеристикам, представлены в Таблице 1.1. Типичные свойства матрицы, следующие: модуль Юнга 2–3 ГПа, постоянная Пуассона 0,35, а предел прочности 20–25 МПа. Для получения наномодифицированных образцов в фуллереновую сажу (0,2 мас. %) Добавляли связующее, нагретое до 90°C без отвердителей. Образцы были смешаны лопастной смеситель в

течение 30 минут с последующим ультразвуковым диспергированием в течение 5 минут для уменьшения агломерация. Предварительно пропитанная однонаправленная лента была использована для производства образцы композиционных материалов на основе чистых и наномодифицированных связующих, пять образцов каждого типа. Образцы со схемой армирования $0_2/90_4/0_2$, $+45_2 / -45_4 / +45_2$, 0_4 , 90_4 были изготовлены вакуумным формованием. Также образцы из неармированных связующее с и без нанонаполнителей были изготовлены. Размер образцов был 250×20 мм, если смотреть сверху. Толщина образцов варьировалась в зависимости на количество монослоев, толщина которых составляла 0,2 мм. Толщина образцы из неармированного связующего составляли 8 мм. Крышки для образцов были сделано из стеклопластика. Для определения механических свойств образцов были проведены испытания на растяжение. проводился при комнатной температуре с помощью устройства Instron 5980. Тестирование скорость была 1 мм / мин. Деформация образца измерялась бесконтактным оптическим видеоэкстензометр. Интервал (расстояние между двумя метками на образце поверхность) была 50 мм. Тесты на определение прочности с помощью межслойных сдвиг проводился на композитных образцах в соответствии с ISO 14130: 1997. 5 образцы на основе обычного и пять образцов на наномодифицированных связующих были испытаны. Микроструктура образца была проверена с помощью двухлучевого луча Versa 3D LoVac сканирующий электронный микроскоп; тестируемые образцы были покрыты тонким слой золота.

1.2. Механические испытания образцов из наномодифицированного углепластика.

В работе исследуется механические свойства образцов путем испытания их на растяжение и изгиб. Испытания углепластика на растяжение проводились на образцах с и без нано частицами. Для каждого варианта рассматривались четыре партии образцов с укладками: 0_4 , $0_2/90_4/0_2$, 90_4 и $+45_2/-45_4/+45_2$. Для

каждой партии каждого типа испытаний испытывались пять образцов. Образцы для испытаний изготавливались из углеродных волокон HTA-40 и эпоксидной матрицы ЭДТ-10.

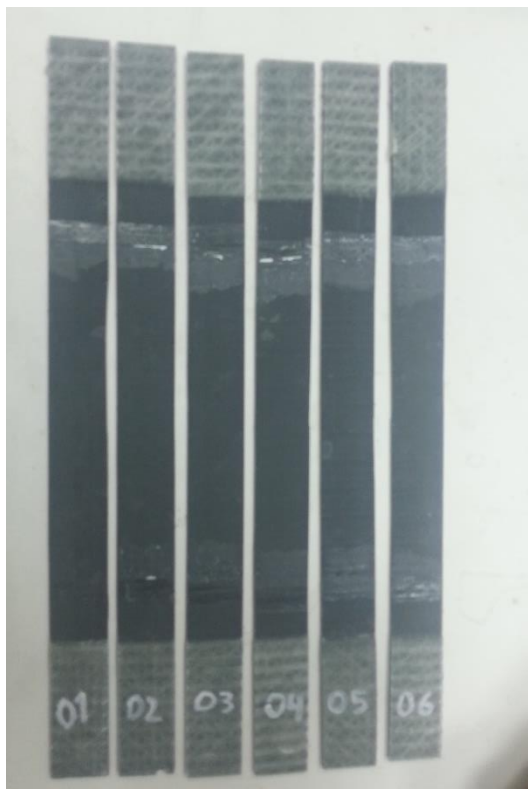
Методы испытания для экспериментального исследования механических свойств углепластика на растяжение использовался ГОСТ 25.601-80 «Методы механических испытаний композиционных материалов в полимерной матрице (композитов). Метод испытания плоских образцов на растяжение при нормальной, повышенной и пониженной температурах». Испытания для определения прочности при межслойном сдвиге проводились на образцах в соответствии с ГОСТ 32659-2014. Испытание проводилось на универсальной испытательной машине Instron серии 5960 с программным обеспечением Bluehill 3. Для измерения деформации образцов использовался бесконтактный оптический видеоэкстензометр. База измерения (расстояние между двумя отметками на поверхности образца) составляла 50 мм.

Для каждого образца при каждом типе испытания строилась кривая напряжение-деформации. При испытании на растяжение определялся модуль упругости при растяжении, предел прочности. При испытании на изгиб определялся модуль упругости при изгибе и предел прочности.

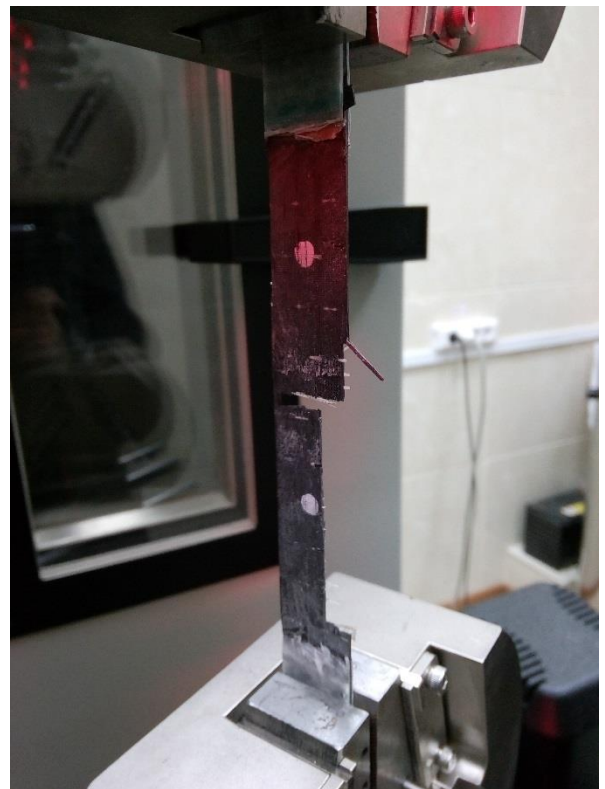
Испытания чистого углепластика

1.2.1 Испытание на растяжение образцов с укладкой 0_4 .

Фото образцов с укладкой 0_4 до и вовремя испытаний на растяжение представлено на рисунке 1.5. Графики напряжения-деформации и результаты испытаний на растяжение образцов с укладкой 0_4 даны на рисунке 1.6 и в таблице 1.2. Фото образцов с укладкой 0_4 после испытаний на растяжение представлено на рисунке 1.7.



а.



б.

Рисунок 1.5. Фото образцов до (а) и во время (б) испытаний на растяжение с укладкой 0₄.

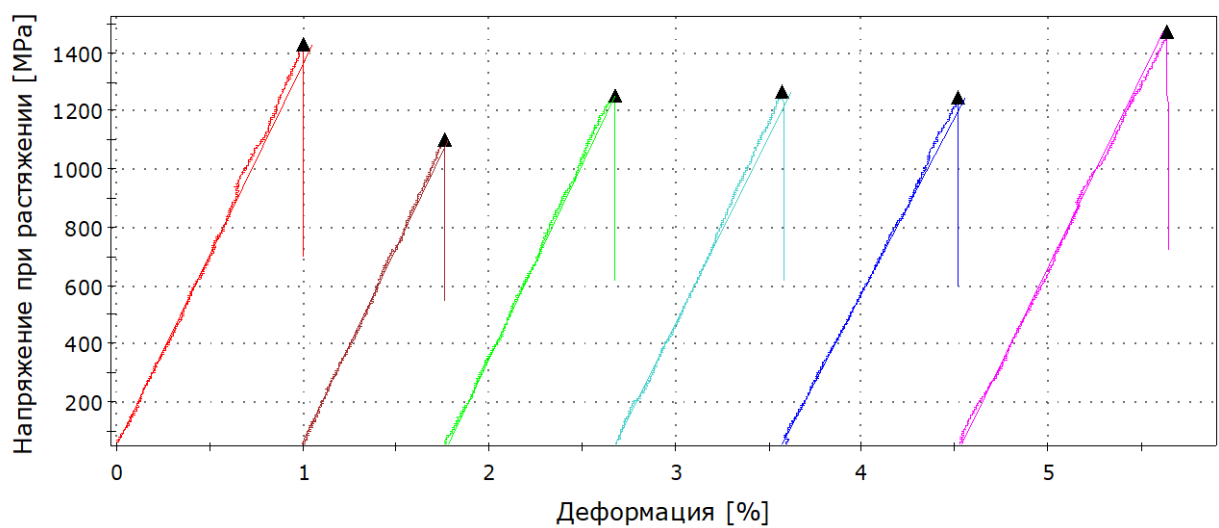


Рисунок 1.6. Диаграмма напряжение – деформация при испытании на растяжение партии с укладкой 0₄.

Таблица 1.2. Результаты эксперимента испытания на растяжение партии с укладкой 0₄.

	Метка образца	Ширина [мм]	Толщина [мм]	Площадь [мм ²]	Модуль [ГПа]	Предельные Деформации [мм/мм]	Максимум Нагрузки [kggf]	Предел Прочности [МПа]
1	01	18,69	0,88	16,45	131,47	0,0100	2,39	1427,86
2	02	19,34	0,92	17,79	132,22	0,0075	1,99	1099,11
3	03	18,85	0,91	17,15	133,93	0,0091	2,19	1254,74
4	04	19,407	0,91	17,66	128,32	0,0089	2,28	1266,68
5	05	19,39	0,91	17,64	121,07	0,0092	2,24	1246,98
6	06	19,303	0,91	17,57	130,66	0,0111	2,64	1472,99
	Максимум	19,793	1,0230	20,13	143,38	0,0111	2,64	1472,99
	Минимум	18,69	0,85	16,45	113,11	0,0075	1,99	1099,11
	Среднее	19,359	0,9017	17,46	129,81	0,0092	2,32	1307,69
	Козф. вариации	1,6991	4,6487	5,2354	5,6498	10,264	7,6621	8,01

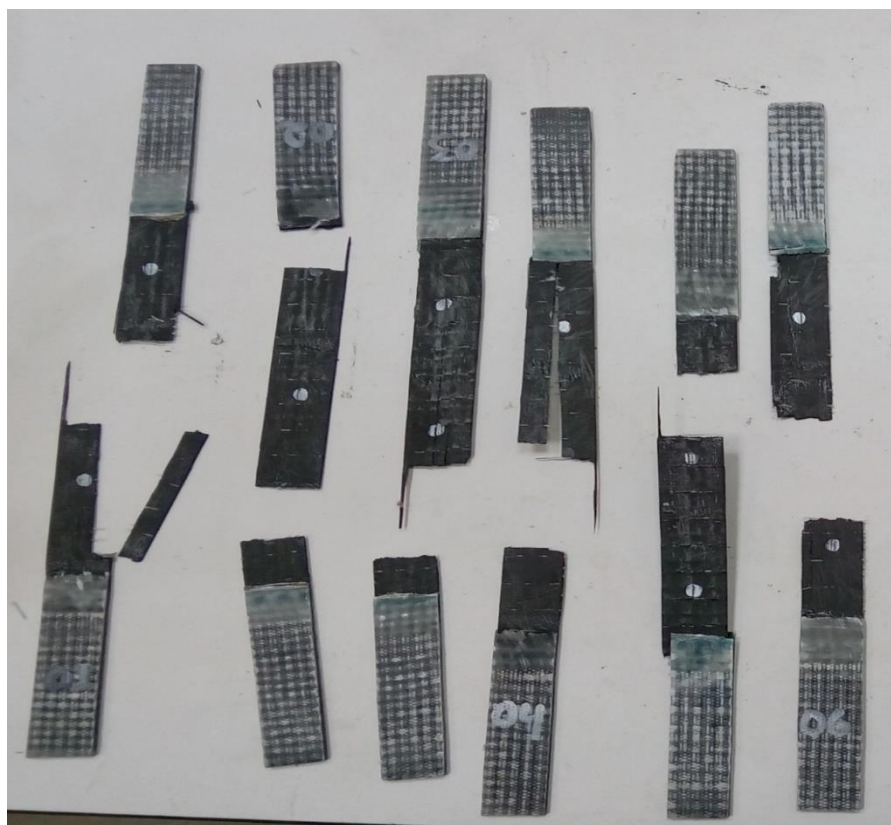


Рисунок 1.7. Фото образцов после испытаний на растяжение с укладкой 0₄.

1.2.2 Испытание на растяжение образцов с укладкой $0_2/90_4/0_2$.

Фото образцов с укладкой $0_2/90_4/0_2$ до и во время испытаний на растяжение представлено на рисунке 1.8. Графики напряжения-деформации и результаты испытаний на растяжение образцов с укладкой $0_2/90_4/0_2$ даны на рисунке 1.9 и в таблице 1.3. Фото образцов с укладкой $0_2/90_4/0_2$ после испытаний на растяжение представлено на рисунке 1.10.

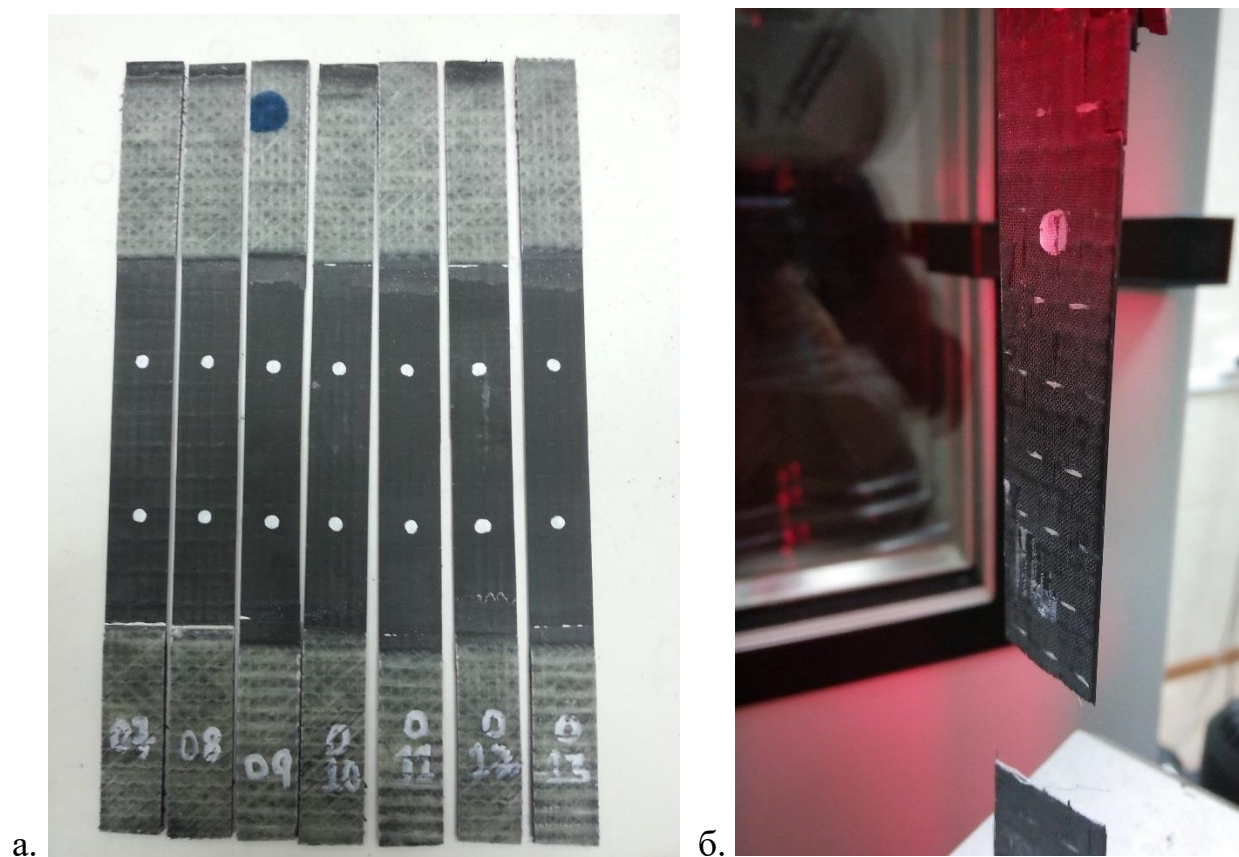


Рисунок 1.8. Фото образцов до (а) и во время (б) испытаний на растяжение с укладкой $0_2/90_4/0_2$.

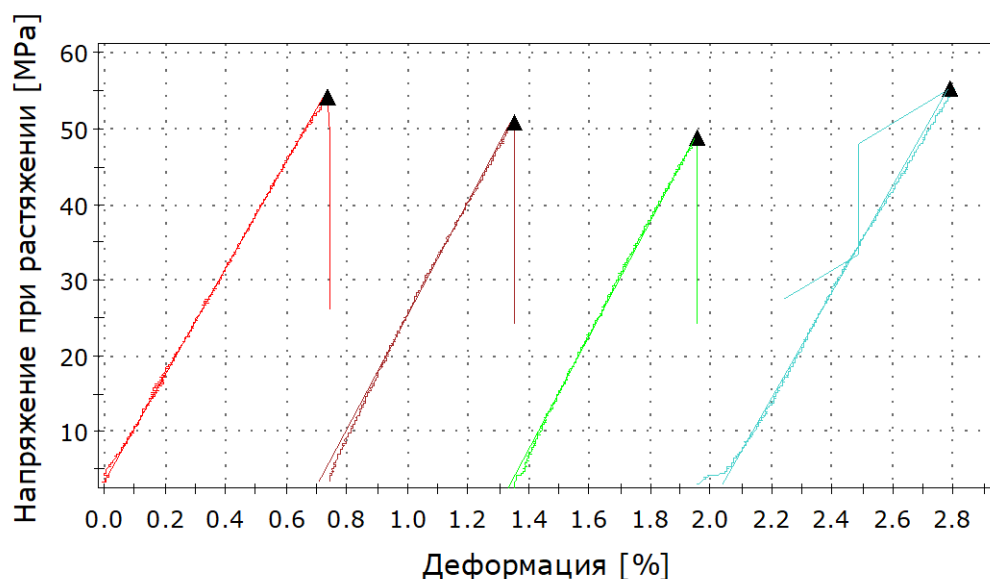


Рисунок 1.9. Диаграмма напряжение – деформация при испытании на растяжение партии $O_2/90_4/O_2$.

Таблица 1.3. Результаты эксперимента для партии $O_2/90_4/O_2$.

	Метка образца	Ширина [мм]	Толщина [мм]	Площадь [мм ²]	Модуль [ГПа]	Предельные деформации [мм/мм]	Максимум нагрузки [kggf]	Предел прочности [МПа]
1	+1	19,99	1,63	32,58	61,78	0,0099	2,29	689,33
2	+2	19,94	1,66	33,10	75,10	0,0091	2,48	734,49
3	+3	20,09	1,63	32,81	75,87	0,0098	2,48	742,69
4	+4	20,07	1,64	32,91	66,65	0,0095	2,34	696,16
5	+5	20,02	1,66	33,23	66,36	0,0091	2,28	672,87
6	+6	20,1	1,66	33,37	72,14	0,0104	2,72	800,13
7	+7	19,64	1,67	32,80	70,71	0,0097	2,36	705,99
	Максимум	20,1	1,68	33,52	75,87	0,0104	2,72	800,13
	Минимум	19,640	1,63	32,58	61,78	0,0091	2,28	672,87
	Среднее	19,975	1,65	33,04	70,08	0,0097	2,44	724,06
	Коэф. вариации	0,7430	1,08	0,964	6,860	4,70444	6,2727	5,6927



Рисунок 1.10. Фото образцов после испытаний на растяжение с укладкой $O_2/90_4/O_2$.

1.2.3 Испытание на растяжение образцов с укладкой 90_4 .

Фото образцов с укладкой 90_4 до и во время испытаний на растяжение представлено на рисунке 1.11. Графики напряжения-деформации и результаты испытаний на растяжение образцов с укладкой 90_4 даны на рисунке 1.12 и в таблице 1.4. Фото образцов с укладкой 90_4 после испытаний на растяжение представлено на рисунке 1.13.

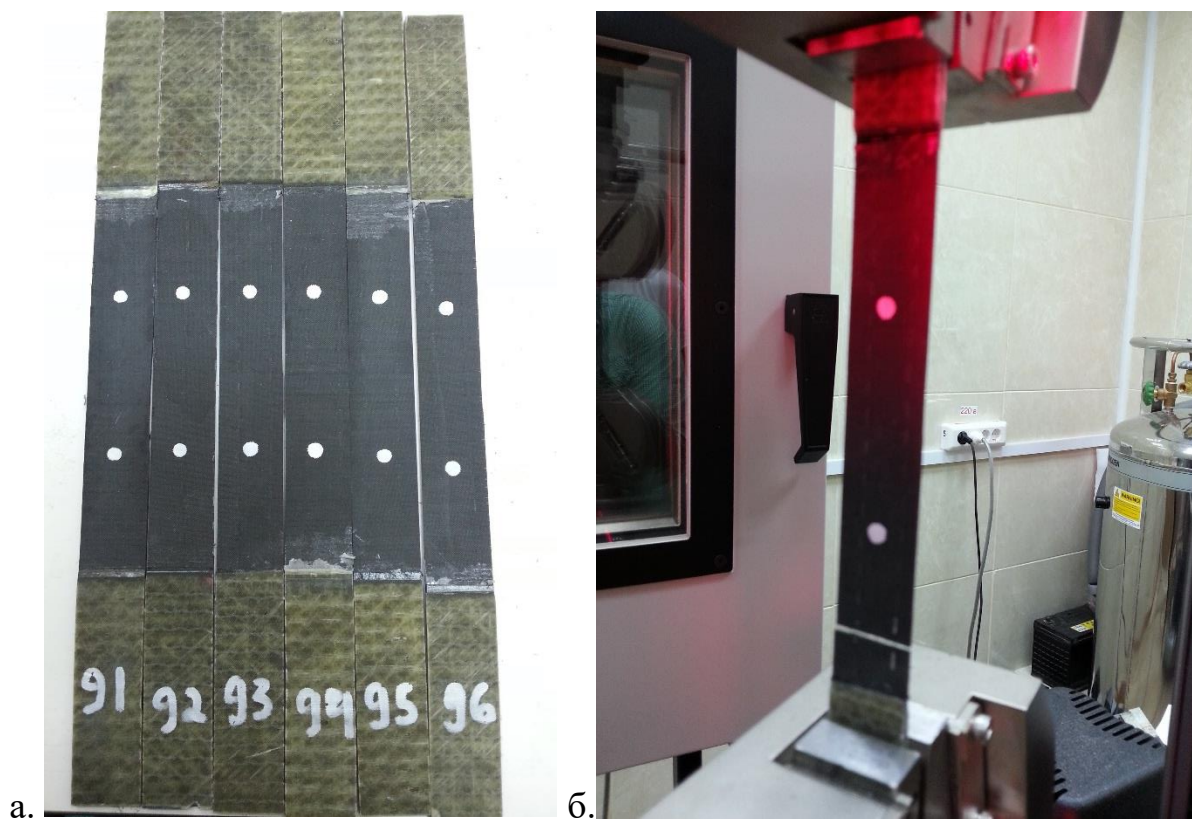


Рисунок 1.11. Фото образцов до (а) и во время (б) испытаний на растяжение укладкой 90₄.

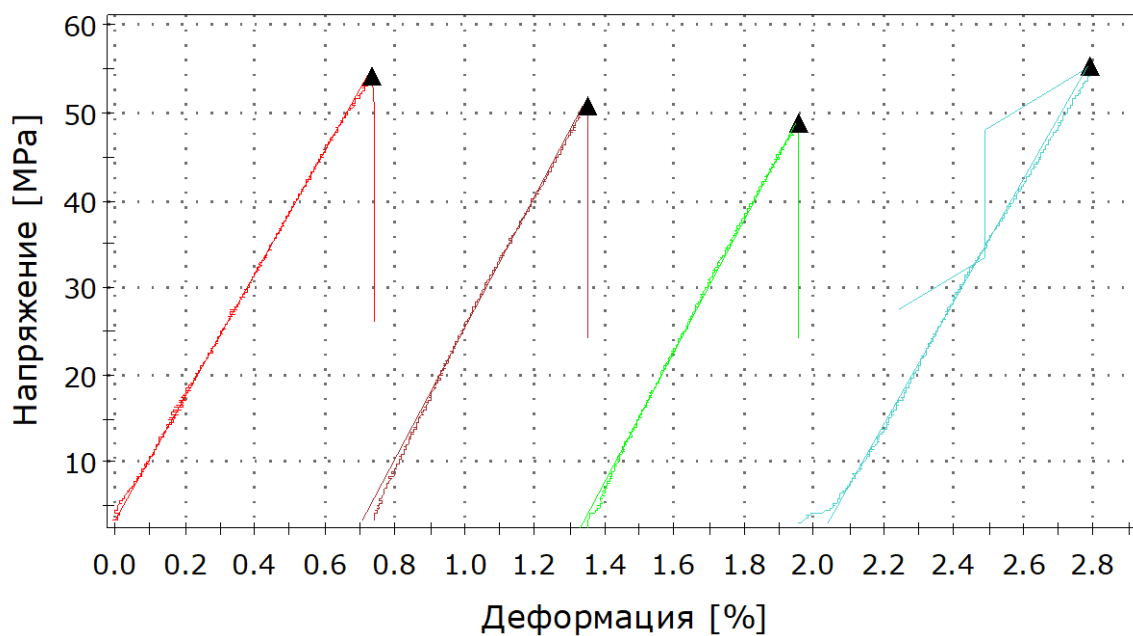


Рисунок 1.12. Диаграмма напряжение – деформация при испытании на растяжение партии, 90₄.

Таблица 1.4. Основные результаты эксперимента для партии 90₄.

	Метка	Ширина [мм]	Толщина [мм]	Площадь [мм ²]	Модуль [ГПа]	Предельные деформации [мм/мм]	Максимум Нагрузки [kggf]	Предел Прочности [МПа]
1	93	19,77	0,94	18,58	7,03	0,0074	0,10	54,25
2	94	19,70	0,94	18,52	7,50	0,0061	0,10	50,86
3	95	19,74	0,93	18,36	7,52	0,0060	0,09	48,92
4	96	19,17	0,95	18,21	7,06	0,0083	0,10	55,28
	Максимум	19,77	0,95	18,58	7,52	0,0083	0,10	55,28
	Минимум	19,17	0,93	18,21	7,03	0,0060	0,09	48,92
	Среднее	19,59	0,94	18,42	7,28	0,0070	0,10	52,33
	Коэф. вариации	1,45	0,87	0,9069	3,703	16,0044	5,5647	5,65

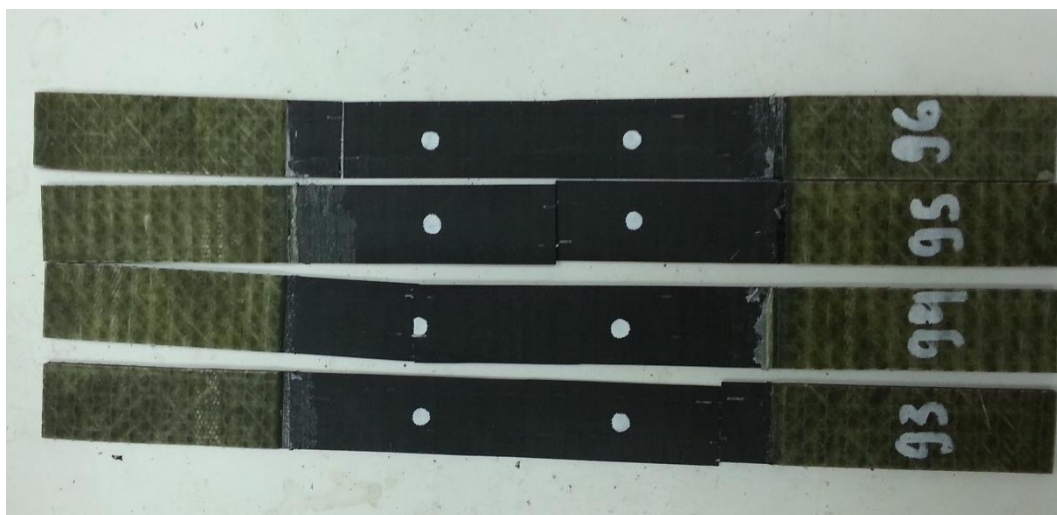


Рисунок 1.13. Фото некоторых образцов после испытаний на растяжение с укладкой 90₄.

1.2.4 Испытание на растяжение образцов с укладкой +45₂/-45₄/+45₂.

Фото образцов с укладкой +45₂/-45₄/+45₂ до и во время испытаний на растяжение представлено на рисунке 1.14. Графики напряжения-деформации и результаты испытаний на растяжение образцов с укладкой +45₂/-45₄/+45₂ даны на рисунке 1.15 и в таблице 1.5. Фото образцов с укладкой +45₂/-45₄/+45₂ после испытаний на растяжение представлено на рисунке 1.16.

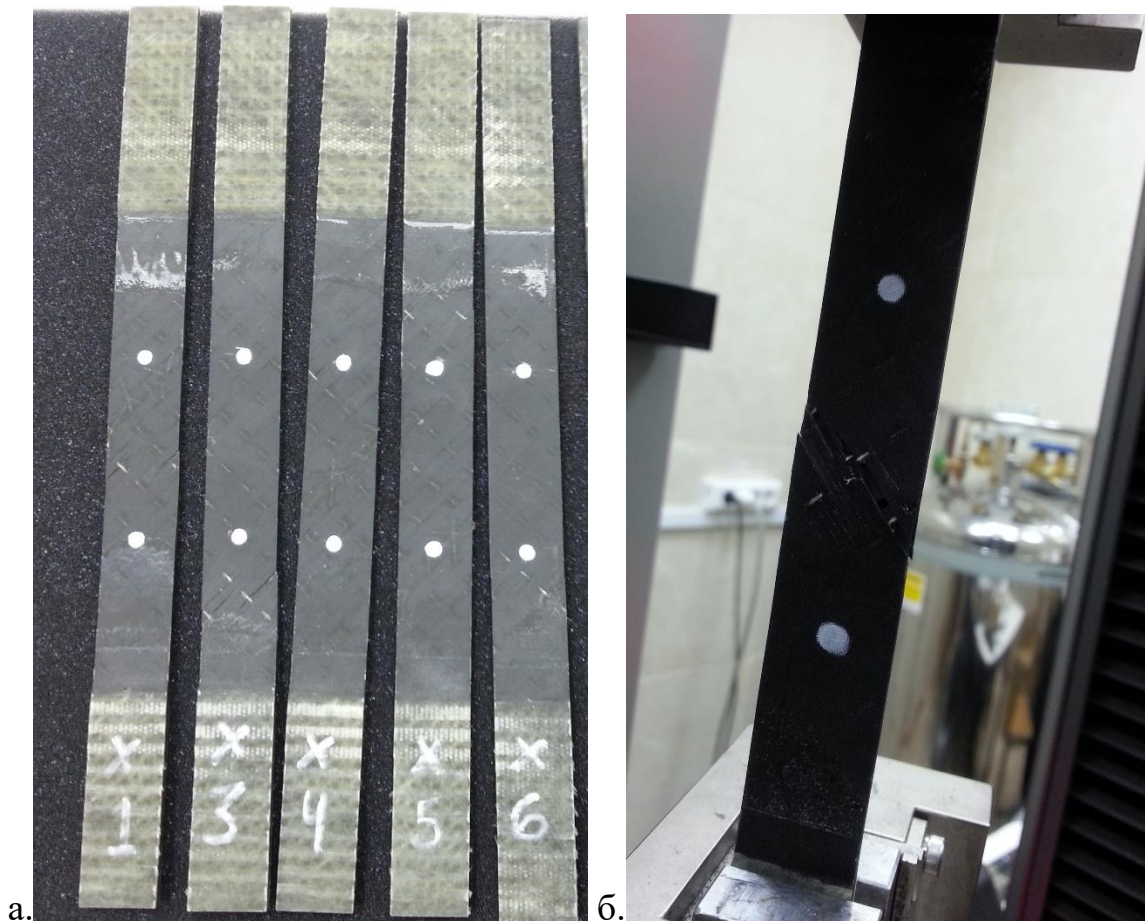


Рисунок 1.14. Фото образцов до (а) и во время (б) испытаний на растяжение с укладкой $+45_2/-45_4/+45_2$.

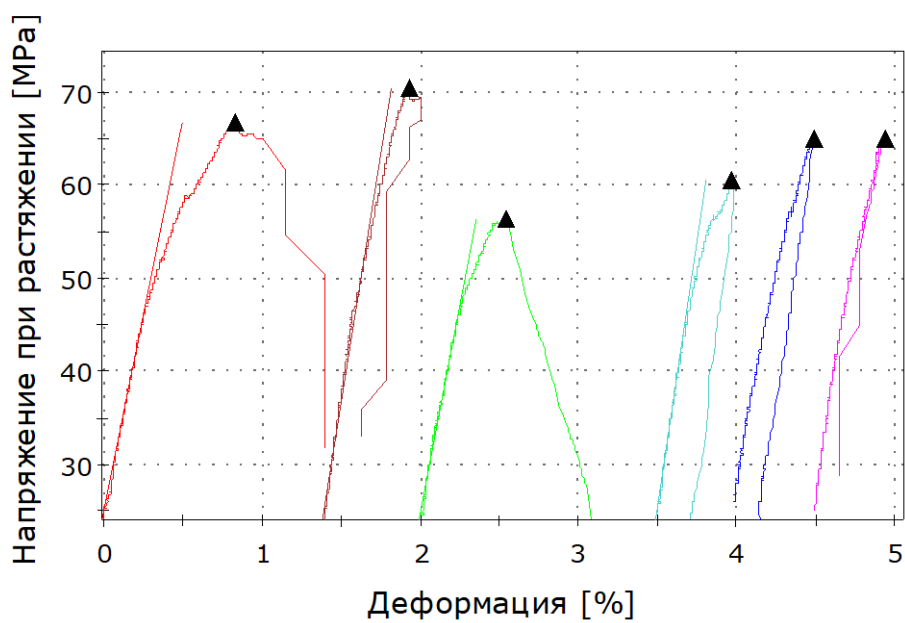


Рисунок 1.15. Диаграмма напряжение – деформация при испытании на растяжение с укладкой $+45_2/-45_4/+45_2$.

Таблица 1.5. Результаты эксперимента для партии +45₂/-45₄/+45₂.

	Метка	Ширина [мм]	Толщина [мм]	Модуль [ГПа]	Предельные деформации [мм/мм]	Максимум Нагрузки [kggf]	Предел Прочности МПа]
1	X1	19,67	2,120	8,45	0,0083	0,28	66,75
3	X3	19,81	2,076	10,46	0,0053	0,30	70,53
4	X4	19,78	1,996	9,06	0,0053	0,23	56,29
5	X5	19,78	1,996	11,41	0,0047	0,24	60,45
6	X6	19,84	2,096	9,43	0,0085	0,35	82,05
Максимум		19,84	2,120	11,41	0,0108	0,39	95,06
Минимум		19,67	1,890	8,45	0,0044	0,23	56,29
Среднее		19,7728 8	2,027	9,88	0,0065	0,29	70,13
Коэф. Вариации		0,25333	3,706	11,037	35,901	20,081	17,99



Рисунок 1.16. Фото образцов после испытаний на растяжение с укладкой +45₂/-45₄/+45₂.

1.2.5 Испытание на растяжение образцов наномодифицированного углепластика с укладкой 0_4 .

Фото образцов наномодифицированного углепластика с укладкой 0_4 до и во время испытаний на растяжение представлено на рисунке 1.17. Графики напряжения-деформации и результаты испытаний на растяжение образцов наномодифицированного углепластика с укладкой 0_4 даны на рисунке 1.18 и в таблице 1.6. Фото образцов наномодифицированного углепластика с укладкой 0_4 после испытаний на растяжение представлено на рисунках 1.17б и 1.19.

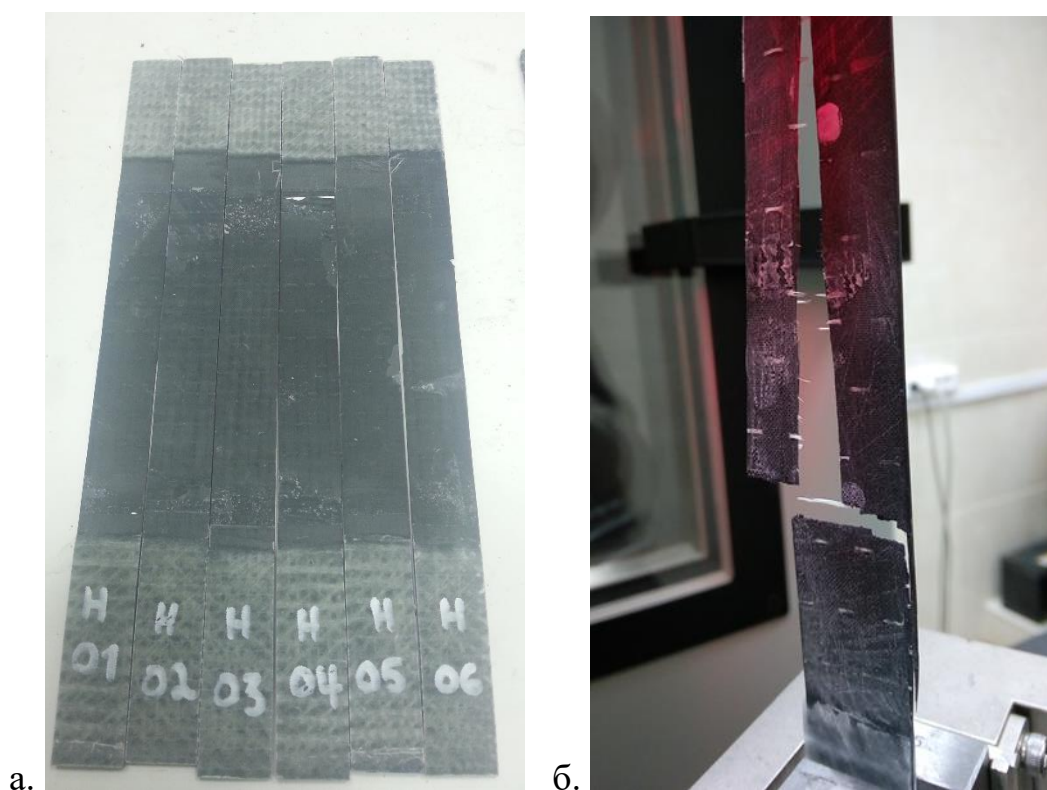


Рисунок 1.17. Фото образцов наномодифицированного углепластика до (а) и во время (б) испытаний на растяжение с укладкой 0_4 .

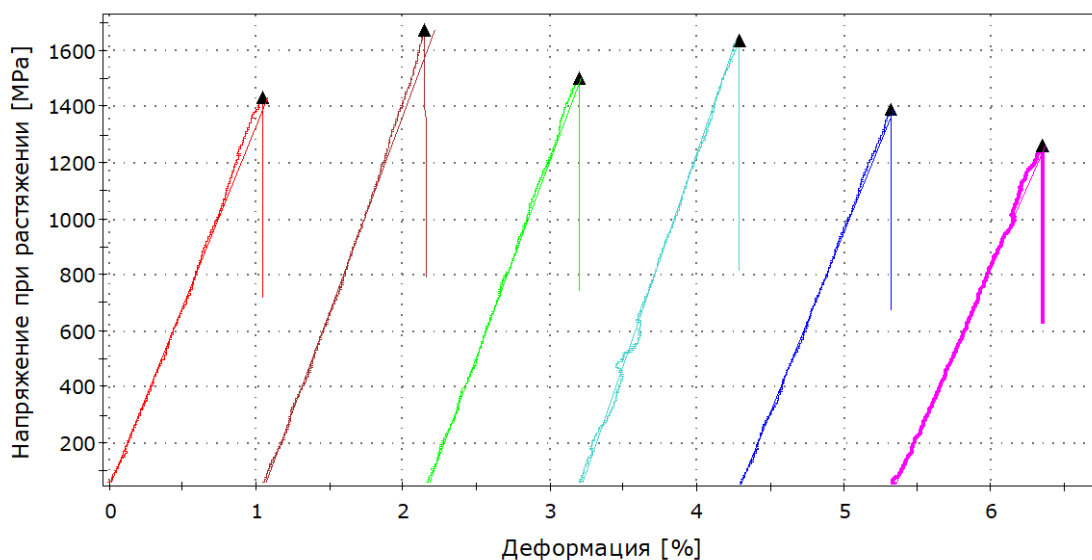


Рисунок 1.18. Диаграмма напряжение – деформация при испытании на растяжение партии образцов наномодифицированного углепластика с укладкой O_4 .

Таблица 1.6. Результаты эксперимента образцов наномодифицированного углепластика для партии с укладкой O_4 .

	Метка образца	Ширина [мм]	Толщина [мм]	Площадь [мм ²]	Модуль [ГПа]	Предельные Деформации [мм/мм]	Максимум Нагрузки [kggf]	Предел Прочности [МПа]
1	H01	19,71	0,94	18,53	115,52	0,0092	2,23	1 179,87
2	H02	19,75	0,99	19,55	121,52	0,0106	2,77	1 388,46
3	H03	19,69	0,90	17,72	123,27	0,0090	2,21	1 223,10
4	H04	19,71	0,91	17,94	117,30	0,0101	2,37	1 295,92
5	H05	19,86	0,94	18,67	114,02	0,0086	2,20	1 155,15
6	H06	19,72	0,92	18,14	123,31	0,0097	2,35	1 269,83
	Максимум	19,86	0,99	19,55	123,31	0,0106	2,77	1 388,46
	Минимум	19,69	0,90	17,72	114,02	0,0086	2,20	1 155,15
	Среднее	19,74	0,933333	18,42	119,16	0,0095	2,35	1 252,06
	Коеф. вариации	0,314	3,43303	3,56360	3,4159	7,84929	9,15434	6,80396



Рисунок 1.19. Фото образцов наномодифицированного углепластика после испытаний на растяжение с укладкой 0_4 .

1.2.6 Испытание на растяжение образцов наномодифицированного углепластика с укладкой $0_2/90_4/0_2$.

Фото образцов наномодифицированного углепластика с укладкой $0_2/90_4/0_2$ до и во время испытаний на растяжение представлено на рисунке 1.20. Графики напряжения-деформации и результаты испытаний на растяжение образцов наномодифицированного углепластика с укладкой $0_2/90_4/0_2$ даны на рисунке 1.21 и в таблице 1.7. Фото образцов наномодифицированного углепластика с укладкой $0_2/90_4/0_2$ после испытаний на растяжение представлено на рисунке 1.22.

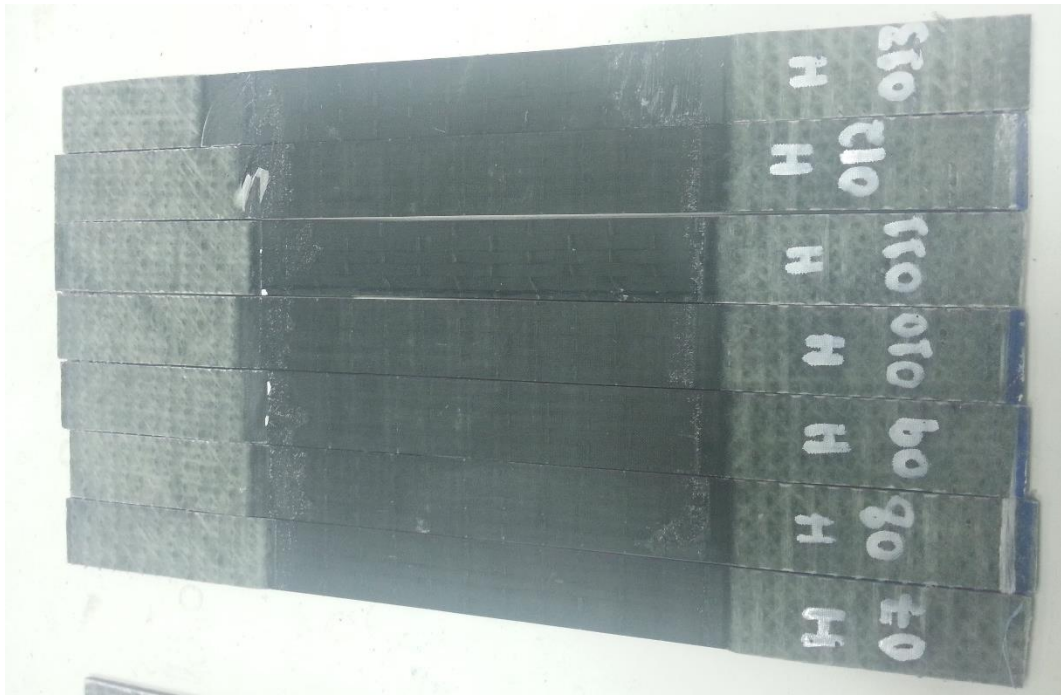


Рисунок 1.20. Фото образцов наномодифицированного углепластика до испытаний на растяжение с укладкой $0_2/90_4/0_2$.

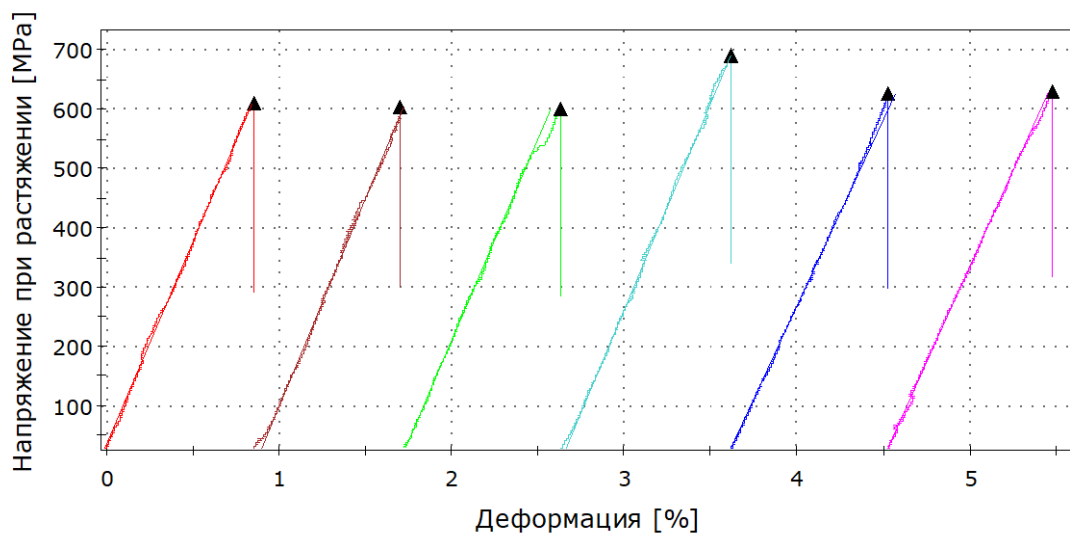


Рисунок 1.21. Диаграмма напряжение – деформация при испытании на растяжение образцов наномодифицированного углепластика для партии с укладкой $0_2/90_4/0_2$.

Таблица 1.7. Результаты эксперимента для партии образцов наномодифицированного углепластика для партии с укладкой 0₂/90₄/0₂.

	Метка образца	Ширина [мм]	Толщина [мм]	Площадь [мм ²]	Модуль [ГПа]	Предельные Деформации и [мм/мм]	Максимум Нагрузки [kgf]	Предел Прочности [МПа]
1	H+1	19,41	1,81	35,13	65,77	0,0077	1,97	550,69
2	H+2	19,90	1,81	36,02	68,53	0,0085	2,24	609,56
3	H+3	19,92	1,783	35,52	70,44	0,0084	2,19	604,99
4	H+4	19,92	1,783	35,52	68,15	0,0091	2,17	600,15
5	H+5	19,68	1,736	34,16	68,96	0,0098	2,40	690,31
6	H+6	19,84	1,786	35,43	63,44	0,0090	2,27	626,88
7	H+7	19,88	1,81	35,98	65,05	0,0095	2,31	630,46
8	H+8	19,84	1,803	35,77	63,42	0,0079	1,91	522,39
	Максимум	19,92	1,81	36,02	70,44	0,0098	2,40	690,31
	Минимум	19,41	1,736	34,16	63,42	0,0077	1,91	522,39
	Среднее	19,799	1,79012	35,44	66,72	0,0088	2,18	604,43
	Коэф. вариации	0,8862	1,40036	1,67929	3,9864	8,49300	7,69273	8,44086



Рисунок 1.22. Фото образцов наномодифицированного углепластика после испытаний на растяжение с укладкой $0_2/90_4/0_2$.

1.2.7 Испытание на растяжение образцов наномодифицированного углепластика с укладкой 90_4 .

Фото образцов наномодифицированного углепластика с укладкой 90_4 до и во время испытаний на растяжение представлено на рисунке 1.23. Графики напряжения-деформации и результаты испытаний на растяжение образцов наномодифицированного углепластика с укладкой 90_4 даны на рисунке 1.24 и в таблице 1.8. Фото образцов наномодифицированного углепластика с укладкой 90_4 после испытаний на растяжение представлено на рисунке 1.25.



Рисунок 1.23. Фото образцов наномодифицированного углепластика до испытаний на растяжение наномодифицированного углепластика для партии с укладкой 90₄.

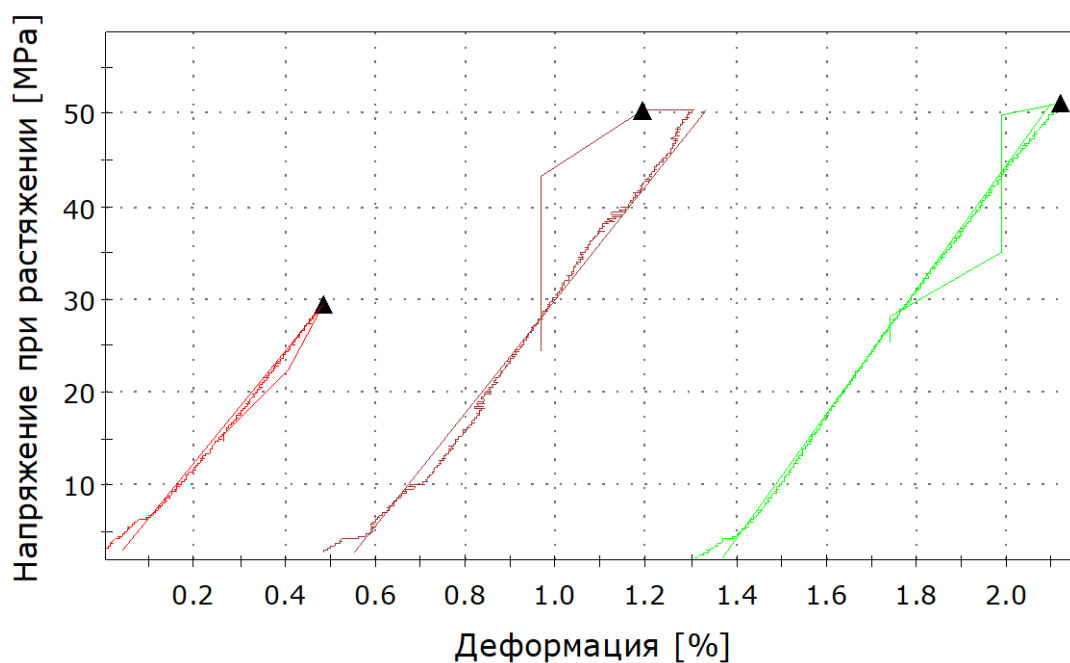


Рисунок 1.24. Диаграмма напряжение – деформация при испытании на растяжение характерных образцов наномодифицированного углепластика с укладкой 90₄.

Таблица 1.8. Характерные результаты эксперимента образцов наномодифицированного углепластика для партии с укладкой 90₄.

	Метка образца	Ширина [мм]	Толщина [мм]	Площадь [мм ²]	Модуль [ГПа]	Предельные деформации [мм/мм]	Максимум Нагрузки [kggf]	Предел Прочности [МПа]
1	H99	19,70	0,95	18,72	6,00	0,0048	0,06	29,47
2	H910	19,54	0,93	18,17	6,08	0,0071	0,09	50,32
3	H911	19,74	0,94	18,56	6,68	0,0081	0,10	50,98
	Максимум	19,74	0,95	18,72	6,68	0,0081	0,10	50,98
	Минимум	19,54	0,93	18,17	6,00	0,0048	0,06	29,47
	Среднее	19,66	0,94	18,48	6,26	0,0067	0,08	43,59
	Коэф. вариации	0,5383	1,06383	1,50965	5,9686	24,8750	27,261	28,061



Рисунок 1.25. Фото характерных образцов наномодифицированного углепластика для партии с укладкой 90₄.

1.2.8 Испытание на растяжение образцов наномодифицированного углепластика с укладкой +45₂/-45₄/+45₂.

Фото образцов наномодифицированного углепластика с укладкой +45₂/-45₄/+45₂ до и вовремя испытаний на растяжение представлено на рисунке 1.26. Графики напряжения-деформации и результаты испытаний на растяжение образцов наномодифицированного углепластика с укладкой +45₂/-45₄/+45₂

даны на рисунке 1.27 и в таблице 1.9. Фото образцов наномодифицированного углепластика с укладкой $+45_2/-45_4/+45_2$ после испытаний на растяжение представлено на рисунке 1.28.

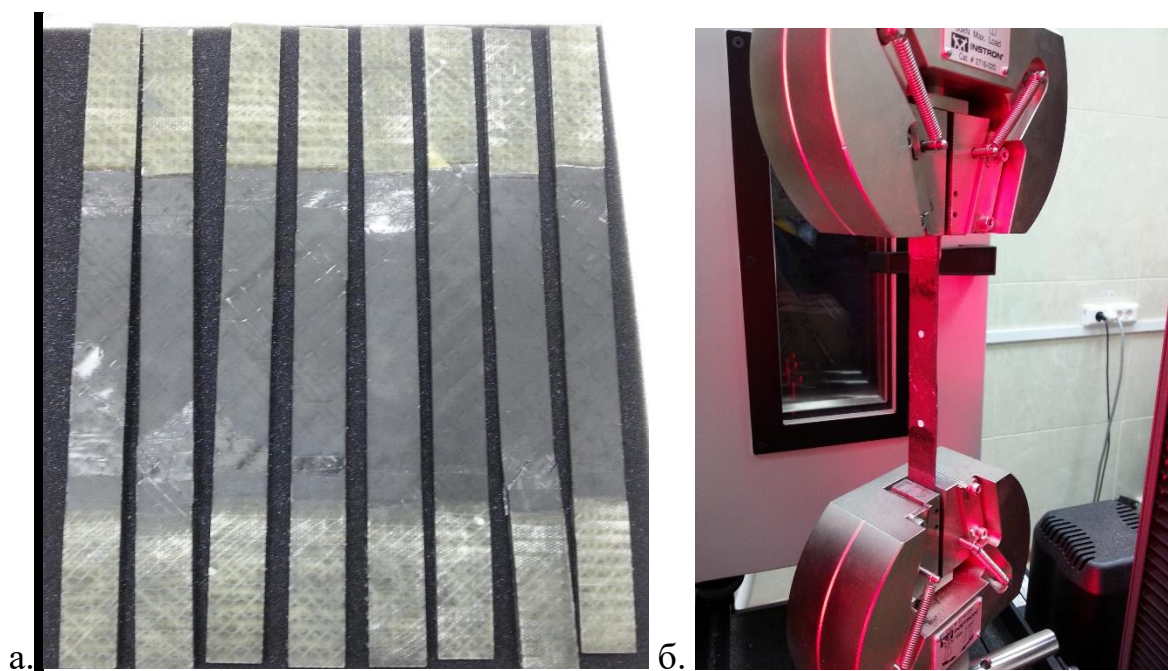


Рисунок 1.26. Фото образцов наномодифицированного углепластика до (а) и во время (б) испытаний на растяжение образцов наномодифицированного углепластика для партии с укладкой $+45_2/-45_4/+45_2$.

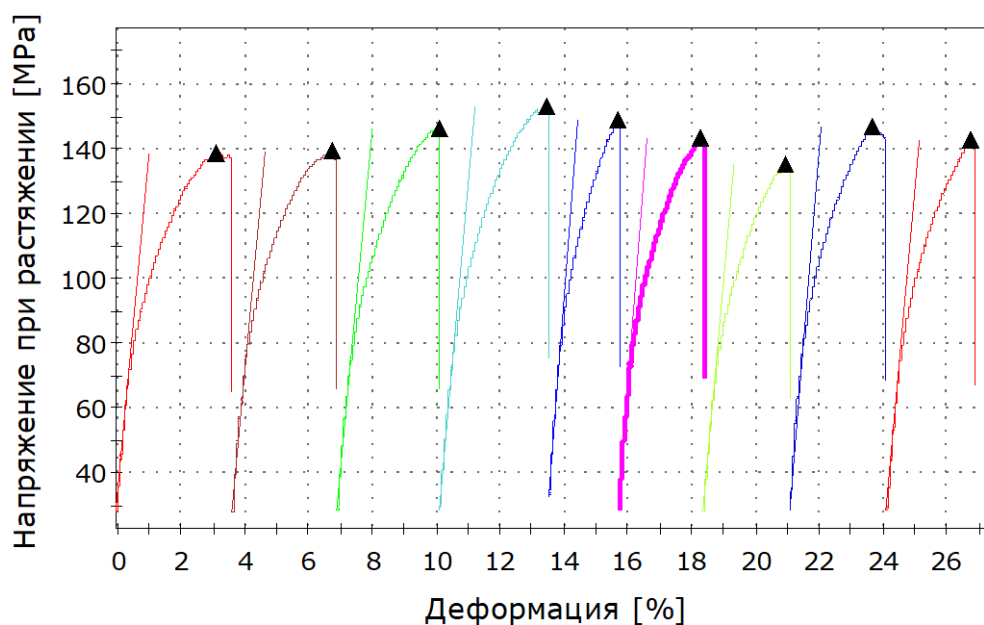


Рисунок 1.27. Диаграмма напряжение – деформация при испытании на растяжение образцов наномодифицированного углепластика для партии с укладкой $+45_2/-45_4/+45_2$.

Таблица 1.9. Результаты эксперимента образцов наномодифицированного углепластика для партии с укладкой +45₂/-45₄/+45₂.

	Метка образца	Ширина [мм]	Толщина [мм]	Площадь [мм ²]	Модуль [ГПа]	Предельные деформации [мм/мм]	Максимум Нагрузки [kkgf]	Предел Прочности [МПа]
1	НХ1	19,883	1,786	35,51	11,23	0,0312	0,50	138,94
2	НХ2	19,62	1,76	34,53	10,90	0,0309	0,49	139,00
3	НХ3	19,646	1,75	34,38	10,87	0,0315	0,51	146,35
4	НХ4	19,873	1,706	33,90	11,35	0,0334	0,53	153,23
5	НХ5	18,33	1,64	30,06	12,57	0,0217	0,46	149,12
6	НХ6	19,88	1,72	34,19	12,57	0,0254	0,50	143,79
7	НХ7	19,79	1,77	35,03	10,79	0,0255	0,48	135,19
8	НХ8	19,826	1,746	34,62	12,10	0,0259	0,52	146,88
9	НХ9	19,713	1,73	34,10	10,99	0,0263	0,50	142,63
	Максимум	19,883	1,786	35,51	12,57	0,0334	0,53	153,23
	Минимум	18,33	1,64	30,06	10,79	0,0217	0,46	135,19
	Среднее	19,61789	1,73422	34,04	11,49	0,0280	0,50	143,90
	Коэф. вариации	2,51373	2,48916	4,61126	6,36050	13,91622	4,28539	3,92441

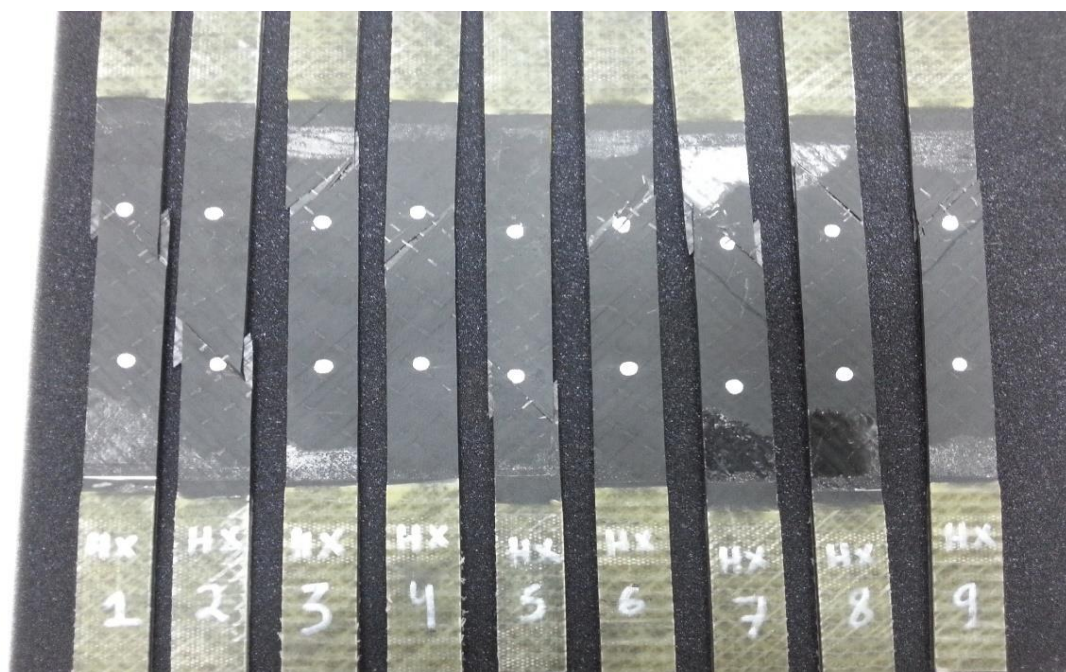


Рисунок 1.28. Фото образцов наномодифицированного углепластика после испытаний на растяжение с укладкой +45₂/-45₄/+45₂.

Испытание на изгиб, методом короткой балки.

1.2.9 Испытание на изгиб образцов углепластика с укладкой 90₄.

Фото образцов из углепластика с укладкой 90₄ до и во время испытаний на изгиб представлено на рисунке 1.29. Графики напряжения-деформации и результаты испытаний на изгиб углепластика с укладкой 90₄ даны на рисунке 1.30 и в таблице 1.10. Фото углепластика с укладкой 90₄ после испытаний на изгиб представлено на рисунке 1.31.

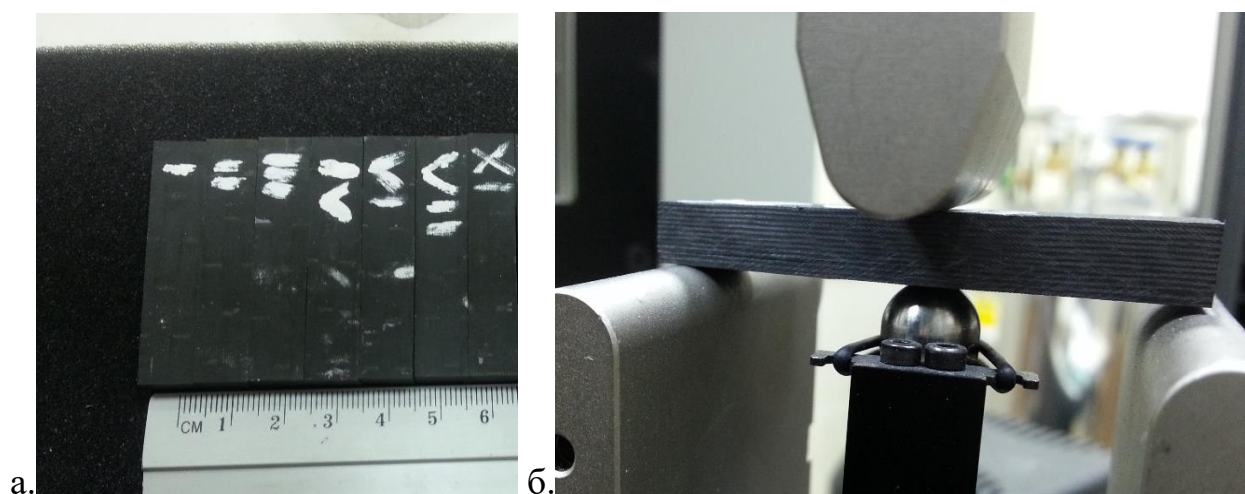


Рисунок 1.29. Фото образцов до (а) и во время (б) испытаний на изгиб углепластика с укладкой 90₄.

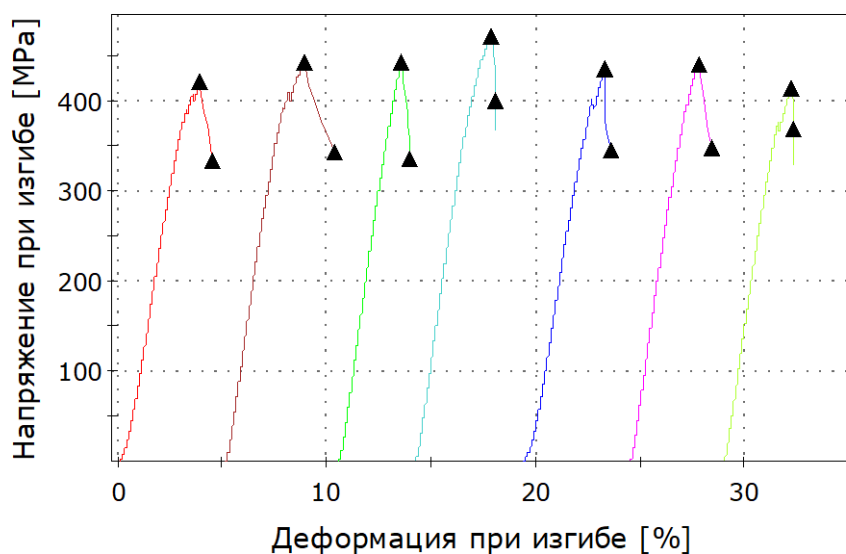


Рисунок 1.30. Диаграмма напряжение – деформация при испытании на изгиб углепластика с укладкой 90₄.

Таблица 1.10. Результаты испытаний на изгиб образцов углепластика с укладкой 90₄.

	Толщина [мм]	Ширина [мм]	Максимум деформации [мм/мм]	Максимум Нагрузка [N]	Максимум Напряжение при изгибе [МПа]
1	10,350	6,7	0,03692	4034,70996	420,36215
2	10,290	7,0	0,04679	4381,71484	442,11731
3	10,250	7,0	0,02941	4337,31494	441,68890
4	10,130	7,0	0,03372	4511,57568	471,05603
5	10,350	6,5	0,04441	4057,93774	435,08362
6	10,310	6,7	0,03872	4194,31445	439,73380
7	10,300	6,7	0,03193	3935,50684	412,78851
Максимум	10,350	7,0	0,04679	4511,57568	471,05603
Минимум	10,130	6,5	0,02941	3935,50684	412,78851
Среднее	10,283	6,8	0,03742	4207,58207	437,54719
Коэффициент вариации	0,73789	2,78840	17,13578	5,00459	4,25536



Рисунок 1.31 Фото образцов после испытаний на изгиб углепластика с укладкой 90₄.

1.2.10 Испытание на изгиб образцов наномодифицированного углепластика с укладкой 90_4 .

Фото образцов из наномодифицированного углепластика с укладкой 90_4 до и во время испытаний на изгиб представлено на рисунке 1.32. Графики напряжения-деформации и результаты испытаний на изгиб наномодифицированного углепластика с укладкой 90_4 даны на рисунке 1.33 и в таблице 1.11. Фото наномодифицированного углепластика с укладкой 90_4 после испытаний на изгиб представлено на рисунке 1.34.

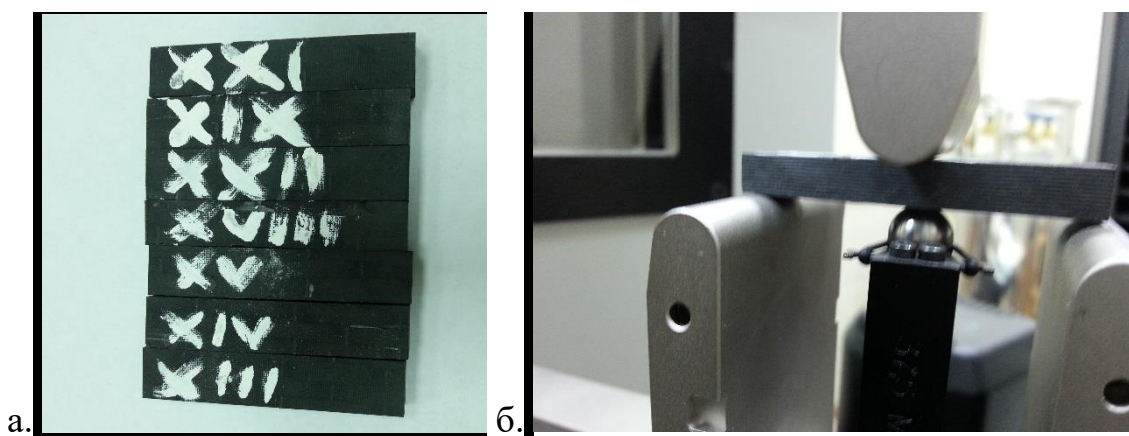


Рисунок 1.32. Фото образцов до (а) и во время (б) испытаний на изгиб наномодифицированного углепластика с укладкой 90_4 .

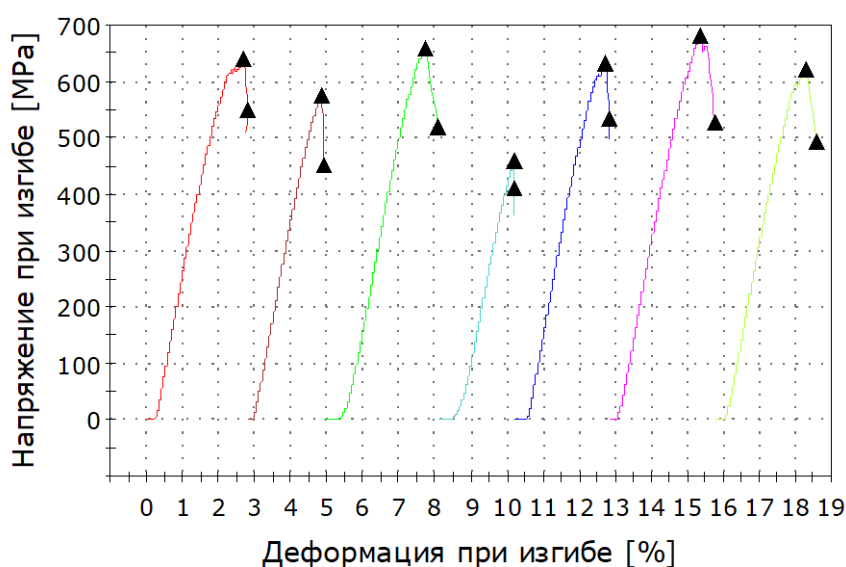


Рисунок 1.33. Диаграмма напряжение – деформация при испытании на изгиб наномодифицированного углепластика с укладкой 90_4 .

Таблица 1.11. Результаты испытаний на изгиб образцов наномодифицированного углепластика с укладкой 90₄.

	Толщина [мм]	Ширина [мм]	Максимум Деформации [мм/мм]	Максимум Нагрузка [N]	Максимум Напряжение при изгибе [МПа]
1	6,900	10,4	0,03373	4211,21680	640,34045
2	6,890	10,2	0,02595	3704,38916	574,89911
3	6,730	9,9	0,03894	3954,42944	659,42548
4	6,830	9,2	0,02603	2626,62256	460,01801
5	6,870	10,2	0,03164	4064,23169	631,32153
6	7,030	10,1	0,03473	4555,15527	683,08270
7	7,030	10,1	0,03385	4151,38135	621,30566
Максимум	7,030	10,4	0,03894	4555,15527	683,08270
Минимум	6,730	9,2	0,02603	2626,62256	460,01801
Среднее	6,897	10	0,03212	3895,34661	610,05613
Коэффициент вариации	1,54966	3,91518	14,72587	15,82095	12,15908



Рисунок 1.34. Фото образцов после испытаний на изгиб наномодифицированного углепластика с укладкой 90₄.

1.3. Определение коэффициентов температурного расширения.

Для оценки коэффициентов температурного расширения (КТР) матрицы проводится исследование образцов путем нагрева его от 25 °С до 50 °С и от 50 °С до 60 °С в течение 500-1000 секунд до момента, при котором деформации образца перестают расти. Нагрев проводится с помощью высокотемпературной камеры Instron 3119-406A2, а деформации измеряются с помощью телескопического дефлетометра Instron 2810-403.

Без нано при 25-50С, в среднем, деформация составляет 0.00092. С нано при 25-50С, в среднем, деформация составляет 0.00115.

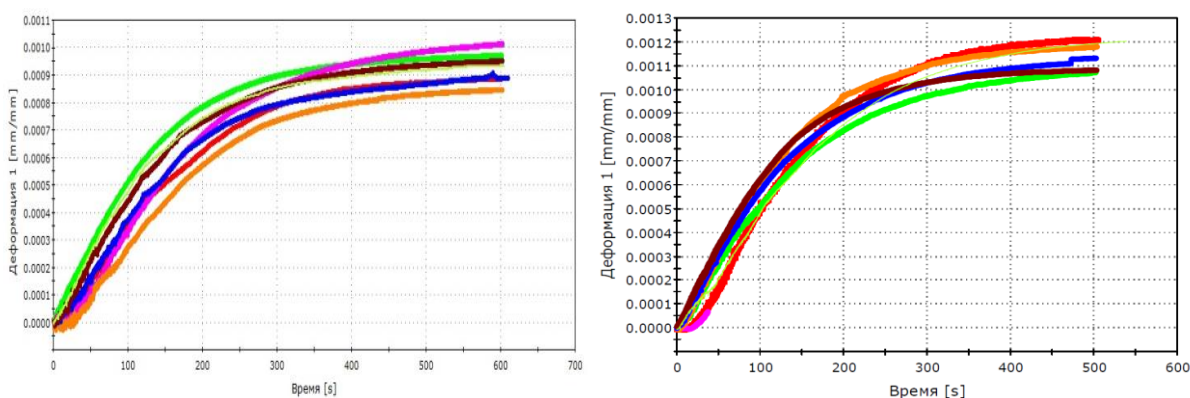


Рисунок 1.35. Без нано при 50-60С, в среднем, деформация составляет 0.0006472. С нано при 50-60С, в среднем, деформация составляет 0.0007.

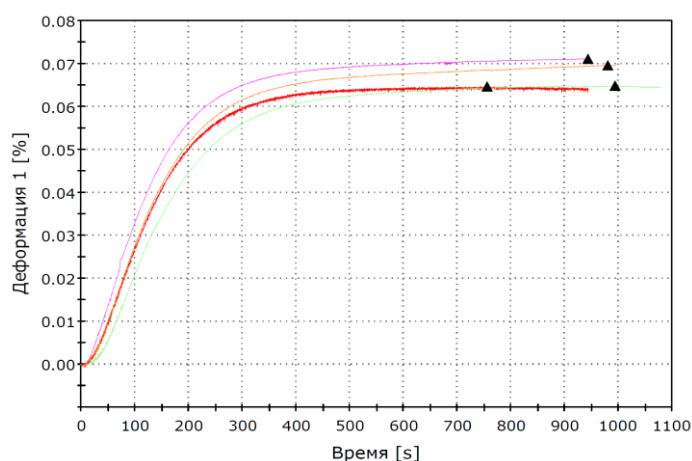


Рисунок 1.36.

Получаем:

При 25-50С:

Для исходной матрицы КТР составляет $0,00092/25 = 36.8 \cdot 10^{-6} \text{ C}^{-1}$.

Для наномодифицированной матрицы КТР равен $0,00115/25 = 46 \cdot 10^{-6} \text{ C}^{-1}$.

При 50-60С:

Для исходной матрицы КТР составляет $0,0006472/10 = 64.72 \cdot 10^{-6} \text{ C}^{-1}$.

Для наномодифицированной матрицы КТР равен $0,0007/10 = 70 \cdot 10^{-6} \text{ C}^{-1}$.

КТР однонаправленных образцов

Без нано, в среднем, для однонаправленных образцов максимальная деформация составляет -0.00026

С нано, в среднем для однонаправленных образцов максимальная деформация составляет -0.0003

Тогда КТР однонаправленных образцов без нано: $-0.00026/25 = -10.4 \cdot 10^{-6} \text{ C}^{-1}$.

Тогда КТР однонаправленных образцов с нано: $-0.0003/25 = -12 \cdot 10^{-6} \text{ C}^{-1}$.

$$T_1 = 50: \alpha = \frac{\varepsilon}{\Delta T}, \alpha_{50} = \frac{\varepsilon_{50}}{T_1} = \frac{-0.00025}{50} = -5 \cdot 10^{-6};$$

$$T_2 = 65: \alpha = \frac{\varepsilon}{\Delta T}, \alpha_{65} = \frac{\varepsilon_{50}}{T_2} = \frac{-0.00065}{65} = -10.10^{-6};$$

$$T_3 = 80: \alpha = \frac{\varepsilon}{\Delta T}, \alpha_{80} = \frac{\varepsilon_{50}}{T_3} = \frac{-0.0011}{80} = -1,375 \cdot 10^{-6};$$

$$\Delta T = (65 - 50): \alpha_{65-50} = -\frac{|\varepsilon_{65} - \varepsilon_{50}|}{\Delta T} = -2,7 \cdot 10^{-6};$$

$$\Delta T = (80 - 65): \alpha_{80-65} = -\frac{|\varepsilon_{80} - \varepsilon_{65}|}{\Delta T} = -30 \cdot 10^{-6};$$

Таблица 1.12. КТР образцов [$10^{-6} \cdot K^{-1}$]

Образец	α_{50}	α_{65}	α_{80}	α_{65-50}	α_{80-65}
без нано 01	-5	-10	-13,75	-27	-30
без нано 02	-4	-7,6923	-15	-20	-20
без нано 03	-5	-9,2308	-11,25	-23	-20
без нано 04	-5	-8,4615	-10,625	-20	-20
без нано 05	-6	-9,2308	-10,75	-20	-17,3
среднее	-5	-8,9231	-12,275	-22	-21,46
с нано н01	-9	-12,3076	-12,5	-20	-13
с нано н02	-7	-11,5384	-15	-26,7	-10
с нано н03	-5	-9,2308	-11,25	-23	-20
с нано н04	-6	-9,2308	-10,625	-20	-16,7
с нано н05	-6	-10,7692	-11,875	-26	-16,7
среднее	-6,6	-10.61536	-12,25	-23,14	-15,28

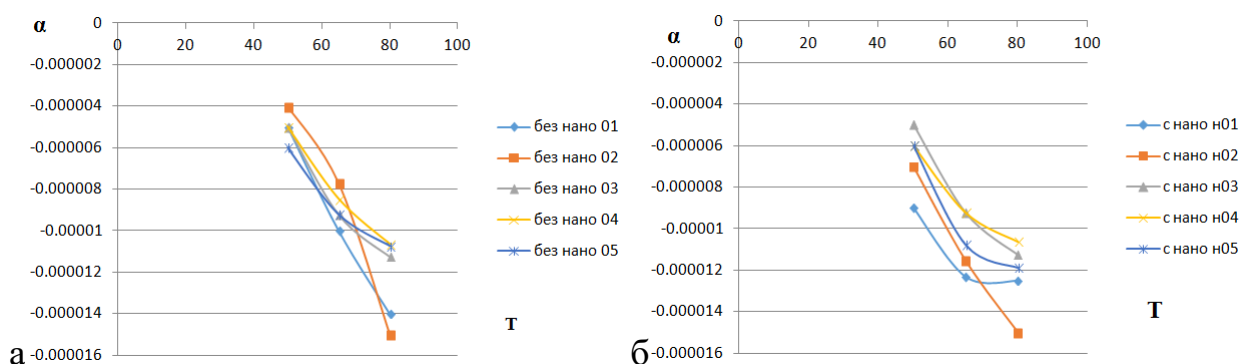


Рисунок 1.37. Результаты КТР для образцов с нано (б) и без нано частиц (а).

Глава 2. Определение эффективных термомеханических характеристик наномодифицированного углепластика численными и аналитическими методами

2.1. Экспериментальные данные

В экспериментах [26] были исследованы образцы углепластика, содержащие 0,2 масс. % фуллереновой сажи, произведенной компанией "Nanopolymer" (Россия). Применяемая фуллереновая сажа содержит 10% фуллеренов C₆₀ и C₇₀ и состоит на 100% из углерода, то есть не содержит иных примесей. Плотность сажи составляет 0,3 г/см³. Для изготовления образцов углепластика было использовано эпоксидное связующее марки ЭДТ-10 (Россия) и углеродные волокна марки НТА-40 (TohoTenaxCo. Ltd.). Объемное содержание волокон составляло 50%. Свойства волокна матрицы представлены в таблицах 2.1 и 2.2. Для наномодифицированной матрицы также известно, что модуль Юнга составил 2,5 ГПа.

Таблица 2.1. Свойства волокон НТА-40 [15]

Характеристики	Единица	Значение
Модуль упругости, E ₁	ГПа	257
Модуль упругости, E ₂	ГПа	24
Модуль сдвига, G ₁₂	ГПа	16
Коэффициент Пуассона, ν ₂₁	-	0,279
Коэффициент Пуассона, ν ₂₃	-	0,49
КТР	10 ⁻⁶ ·°C ⁻¹	-0,1
Плотность	г/см ³	1,7

Таблица 2.2. Свойства матрицы ЭДТ-10 [26, 15]

Характеристики	Единица	Значение
Модуль упругости, E	ГПа	2
Коэффициент Пуассона, ν	-	0,4
КТР	10 ⁻⁶ ·°C ⁻¹	65
Плотность	г/см ³	1,23

Результаты испытаний образцов композитов со схемой армирования $[0_2/90_4/0_2]$, $[+45_2/-45_4/+45_2]$, $[0_4]$, $[90_4]$, изготовленных с применением обычной и наномодифицированной матрицы представлены в таблице 2.3. Толщина монослоев в образцах составила 0,2 мкм. В экспериментах было установлено, что добавление фуллереновой сажи, привело, преимущественно, к повышению механических свойств образцов вдоль направления армирования, что, вообще говоря, не является основной задачей этого наполнителя, так как необходимо повышать свойства композитов в тех направлениях, где решающую роль играют свойства матрицы. При этом визуально наблюдалось улучшение качества контакта матрицы с волокнами в образцах с наномодификатором – на поверхности разрушения наномодифицированная матрица обволакивает волокна (рис 2.1а, б), в то время как обычная матрица полностью отслаивается (рис. 2.1 в, г). Полученные эффекты изменения прочности композитов могут быть связаны, в том числе, с изменением уровня остаточных напряжений, возникающих в композитах при наномодификации. Для объяснения этих эффектов могут привлекаться аналитические и численные методы моделирования. Задача настоящей работы заключается в идентификации характеристик упругости и термоупругости монослоев, которые реализуются в получаемых композитах.

Таблица 2.3. Результаты испытаний образцов углепластика.

Схема армирования образцов	Обычное связующее		С наполнителем	
	Модуль упругости, ГПа	Предел прочности, МПа	Модуль упругости, ГПа	Предел прочности, МПа
$[0_4]$	128	1260	138	1526
$[90_4]$	7	52	6	43

[0 ₂ /90 ₄ /0 ₂]	72	764	66	579
[+45 ₂ / -45 ₄ /+45 ₂]	9	123	12	146

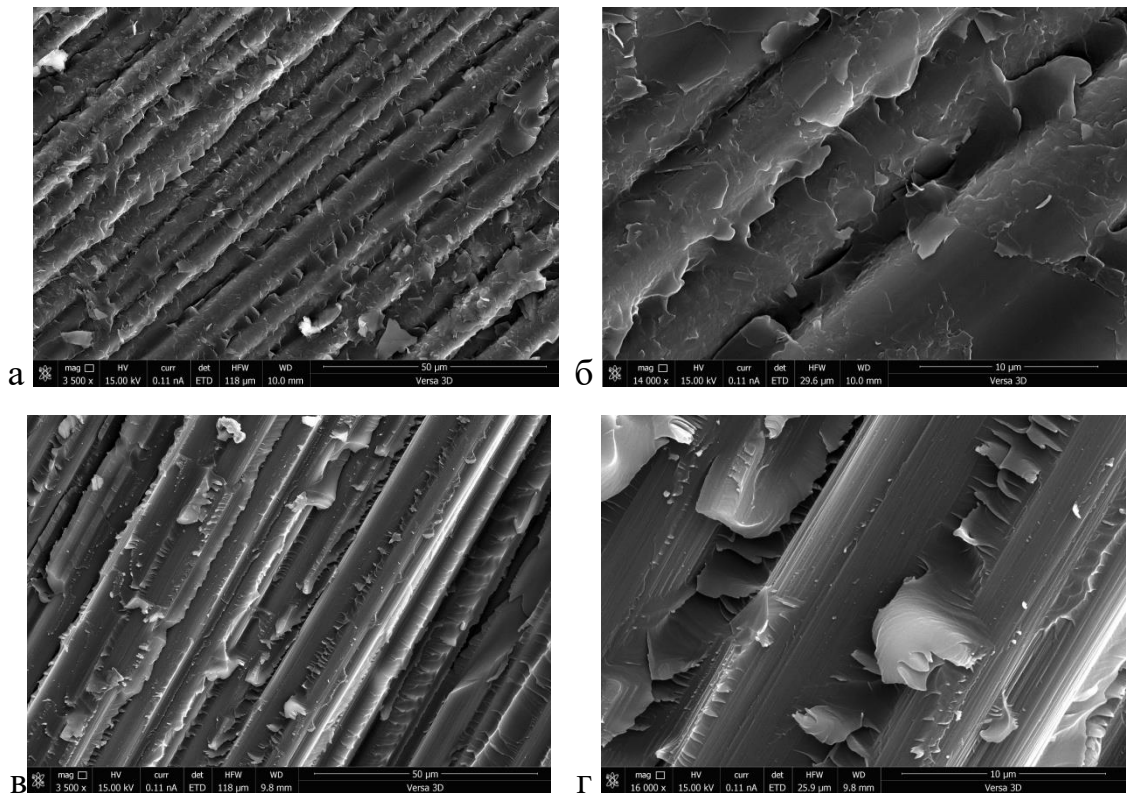


Рисунок. 2.1. Микроснимки поверхности разрушения композитов с наномодифицированной (а, б) и обычной (в, г) матрицей.

2.2. Макромеханический подход

Для идентификации упругих свойств монослоя по известным значениям модулей упругости образцов композитов с разными схемами армирования воспользуемся классической моделью слоистых композитов. Эффективный модуль упругости слоистого композита с симметричной схемой армирования может быть найден по формуле [12, 45]:

$$E = \frac{1}{H} \left(A_{11} - \frac{A_{12}^2}{A_{22}} \right) \quad (2.1)$$

Здесь $H = nh$ – толщина пакета, составленного из n монослоев толщиной h ,

$A_{ij} = h \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k$ – компоненты матрицы жесткости слоистого материала для

случая плоского напряженного состояния, образованного слоями одинаковой

толщины, $(\bar{Q}_{ij})_k$ – приведенные модули упругости k -го слоя в системе

координат пакета, определяемые на основании стандартных соотношений

через искомые характеристики жесткости монослоев и их углы ориентации θ_k

. В матричной форме эти соотношения могут быть представлены в следующем

виде [45]:

$$(\bar{Q}_{ij})_k = [\bar{Q}]_k = [T]_k^{-1} [Q]_k [R]_k [T]_k [R]_k^{-1},$$

где:

$$[T]_k = \begin{pmatrix} \cos^2 \theta_k & \sin^2 \theta_k & 2 \cos \theta_k \sin \theta_k \\ \sin^2 \theta_k & \cos^2 \theta_k & -2 \cos \theta_k \sin \theta_k \\ -\cos \theta_k \sin \theta_k & \cos \theta_k \sin \theta_k & \cos^2 \theta_k - \sin^2 \theta_k \end{pmatrix}$$

$$[R] = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{pmatrix}, [Q]_k = \begin{pmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{pmatrix}$$

$$Q_{11} = E_1 / (1 - \nu_{12} \nu_{21}), \quad Q_{22} = E_2 / (1 - \nu_{12} \nu_{21}), \quad Q_{12} = \nu_{12} E_2 / (1 - \nu_{12} \nu_{21}), \quad Q_{66} = G_{12},$$

причем выполняется $\nu_{21} E_1 = \nu_{12} E_2$.

Таким образом, искомыми характеристиками монослоя являются модули упругости вдоль и поперек волокон E_1 и E_2 , коэффициент Пуассона ν_{12} и модуль сдвига в плоскости G_{12} . Эти величины идентифицируем из условий минимума среднеквадратического отклонения результатов расчетов и экспериментальных данных для модулей упругости композитов, представленных в таблице 2.3. Соответственно, рассматриваем следующую функцию:

$$f(E_1, E_2, \nu_{12}, G_{12}) = \frac{1}{2} \sqrt{(\Delta E_0)^2 + (\Delta E_{90})^2 + (\Delta E_{\pm 45})^2 + (\Delta E_{0/90})^2}, \quad (2.2)$$

где ΔE_{\dots} – это разность экспериментально найденного значения модуля упругости композита в заданном направлении (табл. 2.3) и его расчетного значения, определяемого выражением (2.1).

Значения переменных E_1 , E_2 , ν_{12} и G_{12} , при которых функция (2.2) достигает минимума, являются искомыми характеристиками монослоя.

2.3. Микромеханический подход

Для определения свойств однонаправленных слоев волокнистых композитов используем модель цилиндрического включения. Для учета влияния дисперсного наполнителя (фуллереновой сажи) будем считать, что в наномодифицированной матрице дополнительно находятся включения сферической формы, которые являются частицами технического углерода и фуллеренами C60 и C70.

На основании исходных экспериментальных данных [26] известно, что объемное содержание волокон составляет 50%. Содержание фуллереновой сажи в матрице составляет 0,2 мас. %. С учетом известной плотности эпоксидной матрицы и фуллереновой сажи получим, что объемное содержание наполнителя в матрице составляет 0,82%. При этом содержание фуллеренов составляют только 1/10 от этого значения, то есть 0,082%. Остальные 0,738% являются частицами технического углерода.

Диаметр волокон составляет 7 мкм. Размер фуллеренов составляет, порядка, 1 нм, а частиц технического углерода – 50-1000 нм [26]. Для частиц технического углерода при построении представительных фрагментов материала для численных расчетов будем задавать нормальное распределение по размерам.

Свойства матрицы и волокон известны (табл. 2.1 и 2.2). Модуль упругости фуллеренов будем считать, приблизительно, равным 1 ТПа [35], а коэффициент Пуассона 0,35 [39]. Для частиц технического углерода соответствующие характеристики приняты равными 80 ГПа и 0,3 [37]. Для

оценки термоупругих характеристик монослоев КТР частиц наполнителя примем равными $5 \cdot 10^{-6} \text{ C}^{-1}$ [34, 52].

Расчеты будем проводить в системе Digimat. Аналитический расчет для определения эффективных упругих свойств монослоя будем проводить в модуле Digimat-MF с использованием метода осреднения Мори-Танака. Отдельно также будем оценивать влияние наполнителя на модуль упругости матрицы, рассматривая материал, содержащий в качестве включений только фуллереновую сажу. На основании этих расчетов будем определять «эффективное» объемное содержание включений с учетом влияния межфазных слоев, образующихся вокруг включений. Влиянием этих слоев, как будет показано далее, пренебречь нельзя, так как в этом случае будут получены заниженные значения упругих характеристик матрицы. Поэтому, фактически, зная из экспериментов модуль упругости наномодифицированной матрицы, будет подобрано такое содержание наполнителя, при котором расчет и эксперимент будут совпадать. Найденное значение эффективного объемного содержания включений далее используется в аналитических и численных расчетах свойств монослоя.

Численные расчеты будем проводить с использованием модуля Digimat-FE. Размер кубического представительного фрагмента устанавливался системой автоматически. Эффективные упругие свойства вычислялись путем определения отношения осредненного по объему представительного фрагмента уровня напряжений к заданной величине однородных деформаций. При этом граничные условия и геометрия самого фрагмента являются периодическими. Расчеты проводились с применением метода конечных элементов.

Пример представительного фрагмента однонаправленного композита, содержащего дисперсный наполнитель, представлен на рис. 2.2а. На этом рисунке показаны только армирующие волокна и частицы технического углерода. Фуллерены, даже при очень малом объемном содержании (менее 0,1%) содержатся в таком фрагменте в очень большом количестве, и

моделировать их влияние на этом масштабном уровне невозможно. Например, в кубическом фрагменте матрицы размером 1 мкм содержится более 400 тысяч фуллеренов для заданного объемного содержания. Поэтому, в частности, нано-модифицированное связующее имеет черный цвет, в то время как обычное связующее – желтый. Для моделирования таких материалов необходимо прибегать к многомасштабным подходам и проводить последовательное определение эффективных свойств на различных масштабных уровнях. Эта задача существенно упрощается, если из экспериментов известны свойства наномодифицированной матрицы. В частности, известно [26] что её модуль Юнга составляет 2,5 ГПа. Недостающей характеристикой является коэффициент Пуассона, который можно приближенно принять неизменным, либо оценить на основании аналитических расчетов с использованием найденного значения «эффективного» объемного содержания наполнителя, что было сделано. Далее достаточно численно решить задачу осреднения на представительном фрагменте, содержащем только волокна (рис. 2.2б).

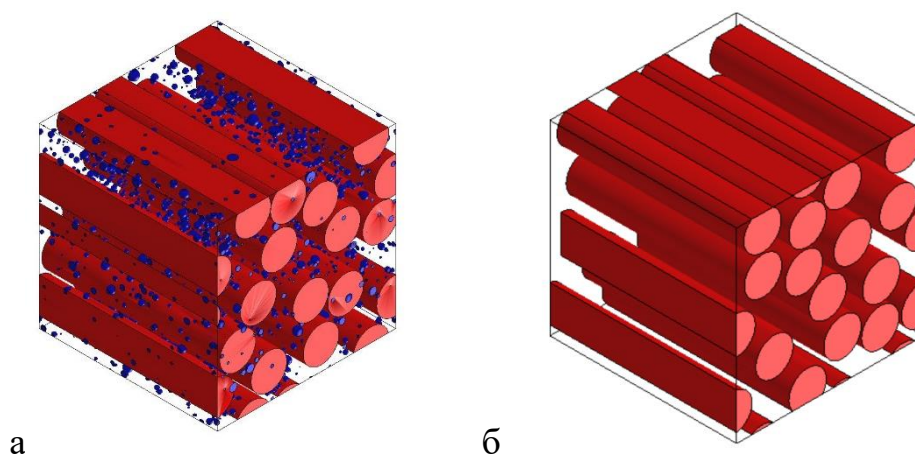


Рисунок. 2.2. Примеры кубических представительных фрагментов однонаправленного слоя на основе матрицы с наполнителем (а) и однородной матрицы (б). Размер фрагмента 35 мкм.

2.4. Сопоставление результатов в рамках макро- и микромеханического моделирования и экспериментальных данных

Решение задачи минимизации функции (2.2) в рамках макромеханического подхода (раздел 2.2) строилось с использованием системы Matlab. В процессе поиска минимума функции (2.2) ставилось ограничение, что коэффициент Пуассона однонаправленного слоя ν_{12} не может превышать коэффициента Пуассона матрицы. Без этого условия минимизация приводила к определению очевидно завышенных значений ν_{12} для композитов с исходной матрицей. На основании имеющихся экспериментальных данных (табл. 2.3) были найдены следующие характеристики упругости монослоя на основе исходной матрицы:

$$E_1 = 131 \text{ ГПа}, E_2 = 8.3 \text{ ГПа}, \nu_{12} = 0.4, G_{12} = 2.4 \text{ ГПа} \quad (2.3)$$

и на основе наномодифицированной матрицы:

$$E_1 = 136 \text{ ГПа}, E_2 = 4 \text{ ГПа}, \nu_{12} \approx 0, G_{12} = 3.3 \text{ ГПа}. \quad (2.4)$$

В рамках микромеханического подхода (раздел 2.3) характеристики однонаправленного слоя без наночастиц определялись на основе классического решения задачи осреднения для модели цилиндрического включения по методу Мори-Танака, и они составили:

$$E_1 = 129.5 \text{ ГПа}, E_2 = 5.2 \text{ ГПа}, \nu_{12} = 0.33, G_{12} = 1.9 \text{ ГПа}, \quad (2.5)$$
$$\alpha_1 = 4.5 \cdot 10^{-7} \text{ C}^{-1}, \alpha_2 = 4.2 \cdot 10^{-5} \text{ C}^{-1}$$

Для получения аналитической оценки свойств наномодифицированного монослоя далее предварительно было определено «эффективное» объемное содержание фуллереновой сажи в матрице, при котором расчетное значение эффективного модуля Юнга наномодифицированной матрицы совпадает с известным экспериментальным значением (2,5 ГПа). Было установлено, что если не учитывать межфазных эффектов, то расчет прогнозирует эффективный модуль Юнга равным 2,04 ГПа, при исходном значении 2 ГПа. То есть при столь малом содержании (0.82%) даже очень жестких включений они не должны были бы оказывать существенного влияния на свойства материала. Установленное в эксперименте повышение модуля матрицы может

быть объяснено влиянием упрочненных и жестких межфазных зон, образующихся вокруг включений. Для приближенной оценки их влияния вводится понятие «эффективного» объемного содержания включений. Предполагается, что свойства межфазных зон и включений совпадают, и в расчетах следует использоваться значение «эффективного» объемного содержания включений, которое является суммой их реального объемного содержания и содержания межфазных зон. Эта величина составила для рассматриваемого композита, приблизительно, 10%. В этом случае прогнозируемый модуль Юнга модифицированной матрицы составляет 2.5 ГПа, коэффициент Пуассона равен 0.39, КТР равен $5.76 \cdot 10^{-5} \text{ C}^{-1}$. Далее, с учетом «эффективного» содержания включений, были найдены следующие характеристики однонаправленного слоя с наночастицами:

$$E_1 = 130 \text{ ГПа}, E_2 = 5.9 \text{ ГПа}, \nu_{12} = 0.33, G_{12} = 2.2 \text{ ГПа} \quad (2.6)$$

$$\alpha_1 = 5.3 \cdot 10^{-7} \text{ C}^{-1}, \alpha_2 = 3.3 \cdot 10^{-5} \text{ C}^{-1}$$

В результате численного моделирования с использованием трехмерных представительных фрагментов (рис. 2.2б) были найдены следующие значения характеристик монослоев. Без добавления наночастиц:

$$E_1 = 124.8 \text{ ГПа}, E_2 = 4.9 \text{ ГПа}, \nu_{12} = 0.33, G_{12} = 1.5 \text{ ГПа}, \quad (2.7)$$

$$\alpha_1 = 5 \cdot 10^{-7} \text{ C}^{-1}, \alpha_2 = 4.3 \cdot 10^{-5} \text{ C}^{-1}$$

Для наномодифицированного слоя:

$$E_1 = 125 \text{ ГПа}, E_2 = 6 \text{ ГПа}, \nu_{12} = 0.33, G_{12} = 1.8 \text{ ГПа} \quad (2.8)$$

$$\alpha_1 = 5.6 \cdot 10^{-7} \text{ C}^{-1}, \alpha_2 = 3.8 \cdot 10^{-5} \text{ C}^{-1}$$

При использовании найденных в рамках макромеханического подхода характеристик монослоев (2.3) и (2.4) среднеквадратическое отклонение результатов расчетов от экспериментов составляет 1.6 ГПа для обычной матрицы и 2.5 ГПа для наномодифицированной. Соответствующие отклонения для характеристик (2.5) и (2.6), найденных в результате микромеханического моделирования и аналитических расчетов, составили 2.6 ГПа и 4.5 ГПа. Для наборов характеристик (2.7) и (2.8),

найденных в численных расчетах, были получены отклонения 4,3 ГПа и 6,7 ГПа.

Сопоставление полученных результатов расчетов в рамках макро- и микромеханического моделирования и экспериментальных данных представлено на рис. 2.3. Здесь показаны значения упругих модулей композитов с различными схемами армирования, найденные экспериментально и теоретически на основе идентифицированных свойств монослоев (2.3) - (2.8).

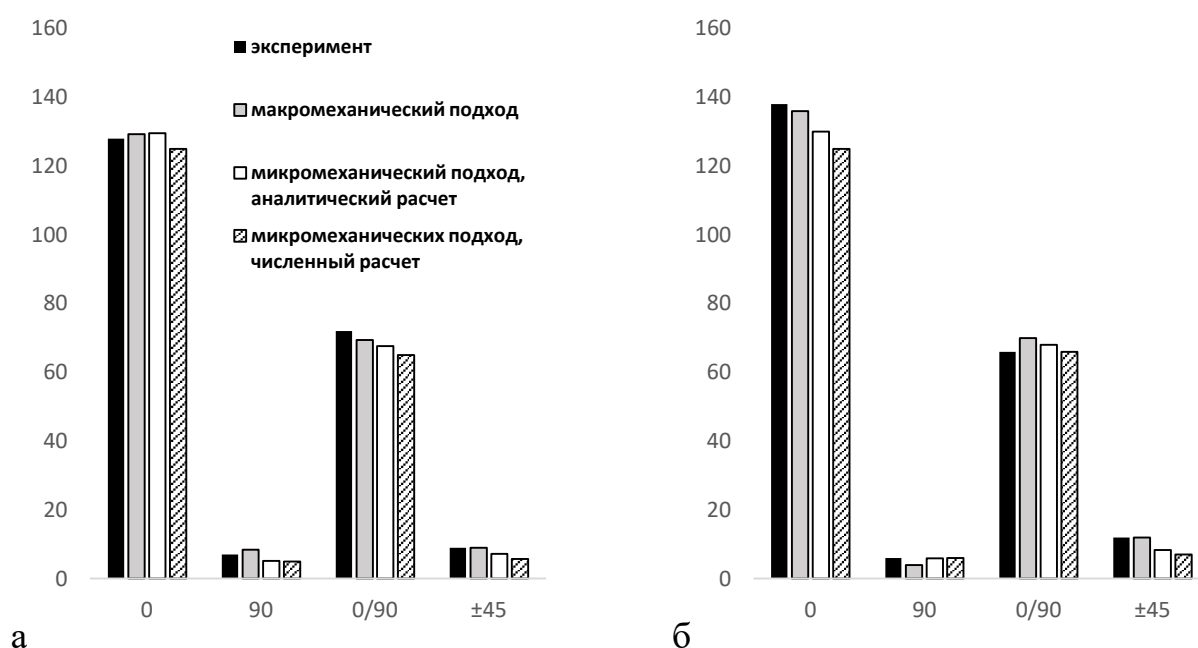


Рисунок. 2.3. Сопоставление экспериментальных значений и результатов расчетов модулей упругости композитов на основе обычной (а) и наномодифицированной матрицы (б) с учетом идентифицированных значений модулей упругости монослоя. Шкала по вертикальной оси в ГПа.

Глава 3. Теоретическое и экспериментальное исследование остаточных температурных напряжений в панелях из наномодифицированного углепластика.

В данной главе проводится исследование влияния наномодификации углепластика на остаточное напряженно-деформированное состояние после формования. Как правило, композиты формируются при повышенных температурах, после чего происходит их охлаждение до температуры эксплуатации. В силу высокой анизотропии физико-механических свойств при охлаждении происходит неравномерная по толщине и направлениям усадка слоев композита. Это приводит к появлению остаточных прогибов и внутренних напряжений в композитных деталях. Одним из способов снижения остаточных напряжений и деформаций является наномодификация. Внедрение наноразмерных частиц в состав композита или его компонентов (волокна или связующего) позволяет не только повысить его физико-механические свойства, но и улучшить картину остаточного напряженно-деформированного состояния. Основной задачей является определение степени влияния параметров наномодификации на остаточное НДС. С этой целью была проведена работа по определению остаточного НДС с помощью предложенной ранее модели термоупругости слоистого композита. Эффективные физико-механические свойства определены на основании раздела 2. Были изготовлены натурные образцы, а также элементарные образцы для определения физико-механических свойств композита экспериментальным путем. Для верификации данных проводилось сравнение расчетных и полученных на экспериментальных образцах прогибов.

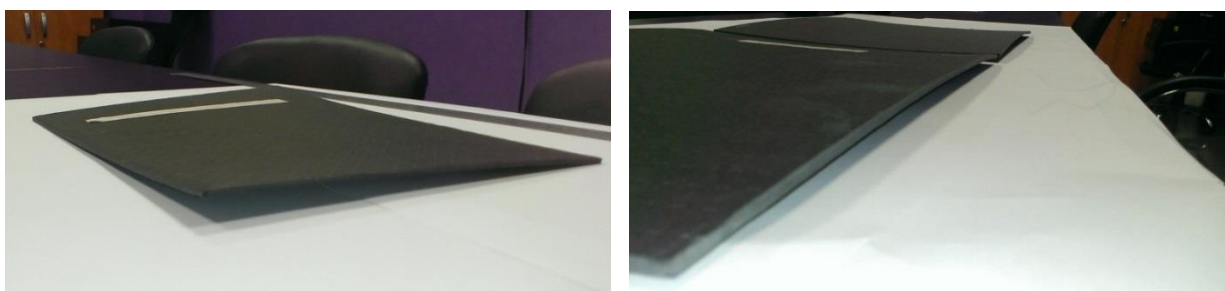
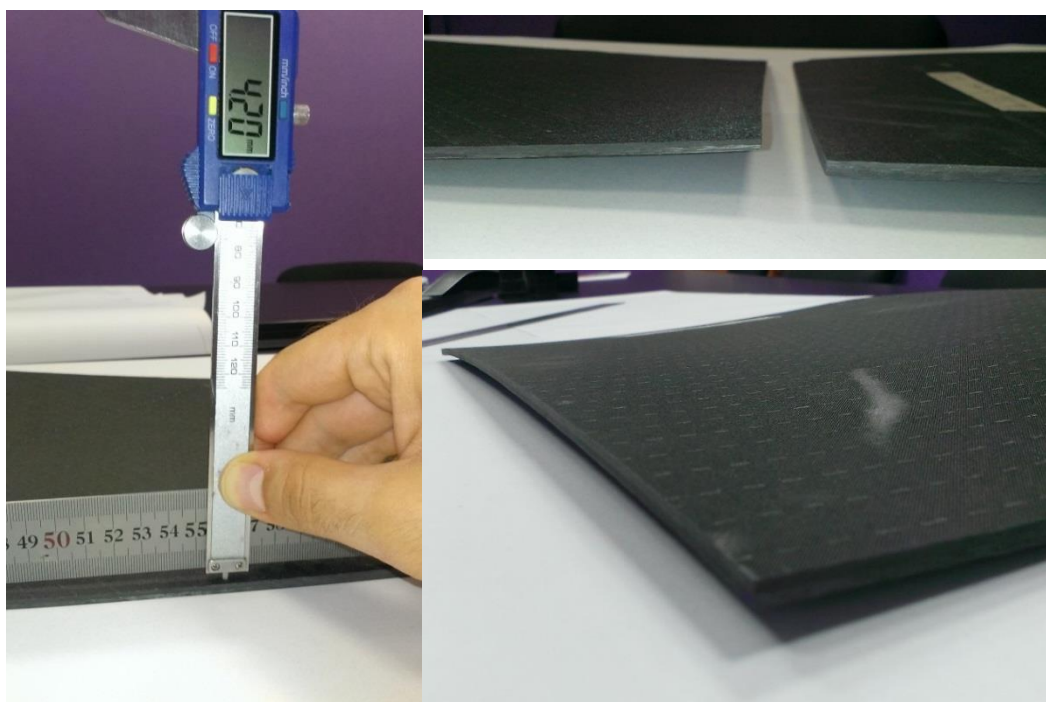
3.1. Экспериментальное определение остаточных деформации в панелях из наномодифицированного углепластика

Для изготовленных пластин измерялись по прогибы по каждой из четырех сторон. Для этого на ровной поверхности фиксировались две крайние точки, прогиб замерялся по центру стороны штангенциркулем. В табл. 3.1

представлены результаты замеров прогибов изготовленной пластины со структурой слоев $[0_{10} / 45_{10}]$ и со структурой слоев $[0_{10} / 90_{10}]$.

Таблица 3.1 – Сравнение прогибов для вариантов 1-4 и укладки $[0_{10} / 45_{10}]$ с экспериментом и для вариантов 1-4 и укладки $[0_{10} / 90_{10}]$ с экспериментом.

		Эксперимент для укладки $[0_{10} / 45_{10}]$	Эксперимент для укладки $[0_{10} / 90_{10}]$
Прогиб по длинной стороне, мм	С нано	5,85	4,35
	Без нано	5,95	3,2
Прогиб по короткой стороне, мм	С нано	4,1	2,1
	Без нано	3,7	2,75



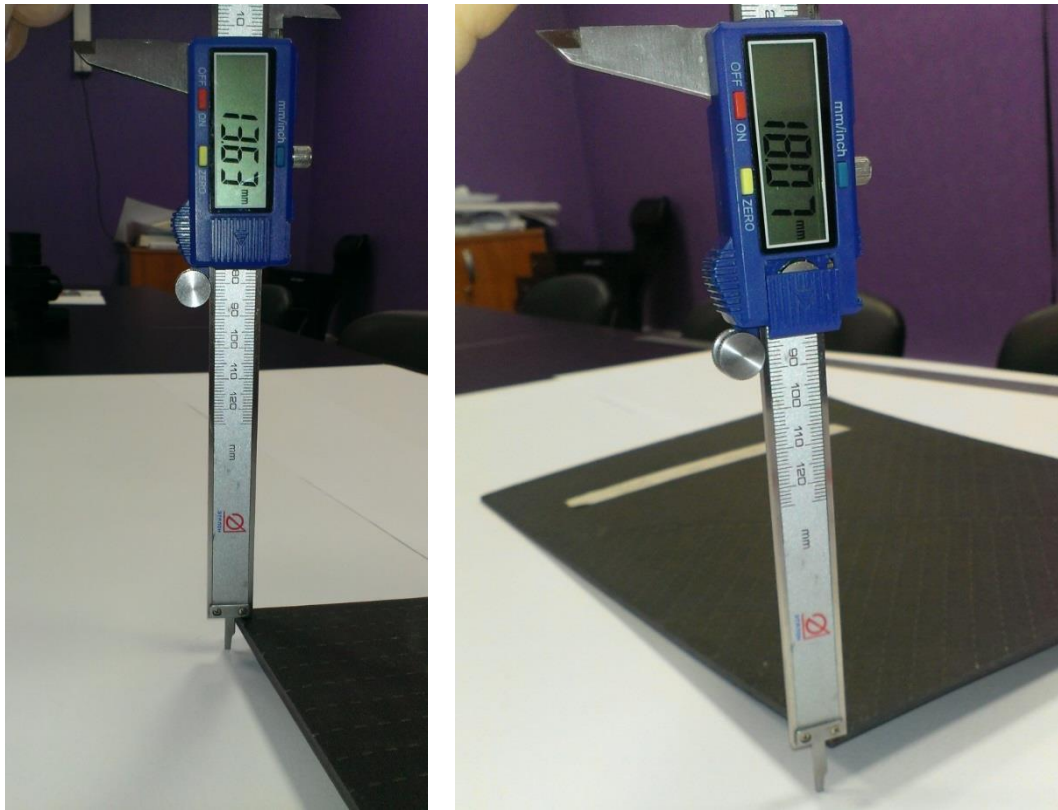


Рисунок 3.1. Замер прогиба плиты штангенциркулем.

3.2. Численное и аналитическое моделирование остаточных деформаций в панелях с несимметричной укладкой

Рассмотрим многослойную панель из полимерного композита, обладающего анизотропией вследствие несимметрии свойств структуры пакета по толщине. Рассматриваемая панель свободна от нагрузки и закрепления.

Введем систему координат $1,2,3$ (рис. 3.2), связанную с направлением армирования. Для однонаправленного материала ось 1 совмещена с направлением волокон, для тканого – ось 1 совпадает с направлением нити основы. Ось 2 перпендикулярна оси 1 и лежит в плоскости армирования. Ось 3 направлена по толщине слоя и ортогональна плоскости слоя. Для панели введем систему координат x, y, z таким образом, чтобы оси x, y лежали в плоскости армирования, а ось z была направлена по толщине пакета.

В общем случае в панели возникают шесть внутренних силовых факторов: N_x , N_y , N_{xy} , M_x , M_y , M_{xy} (рис. 3.3).

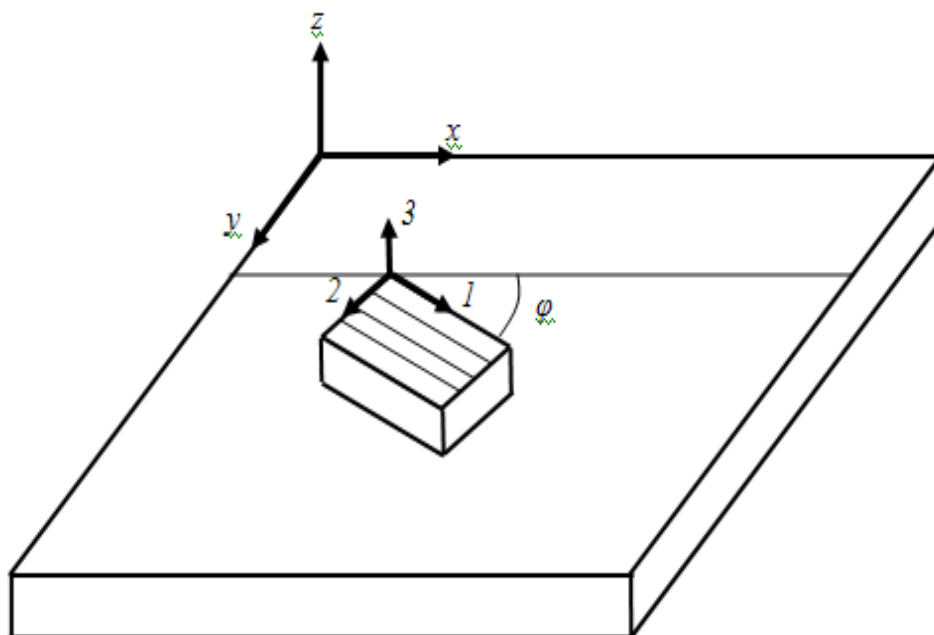


Рисунок 3.2. Системы координат слоя и панели

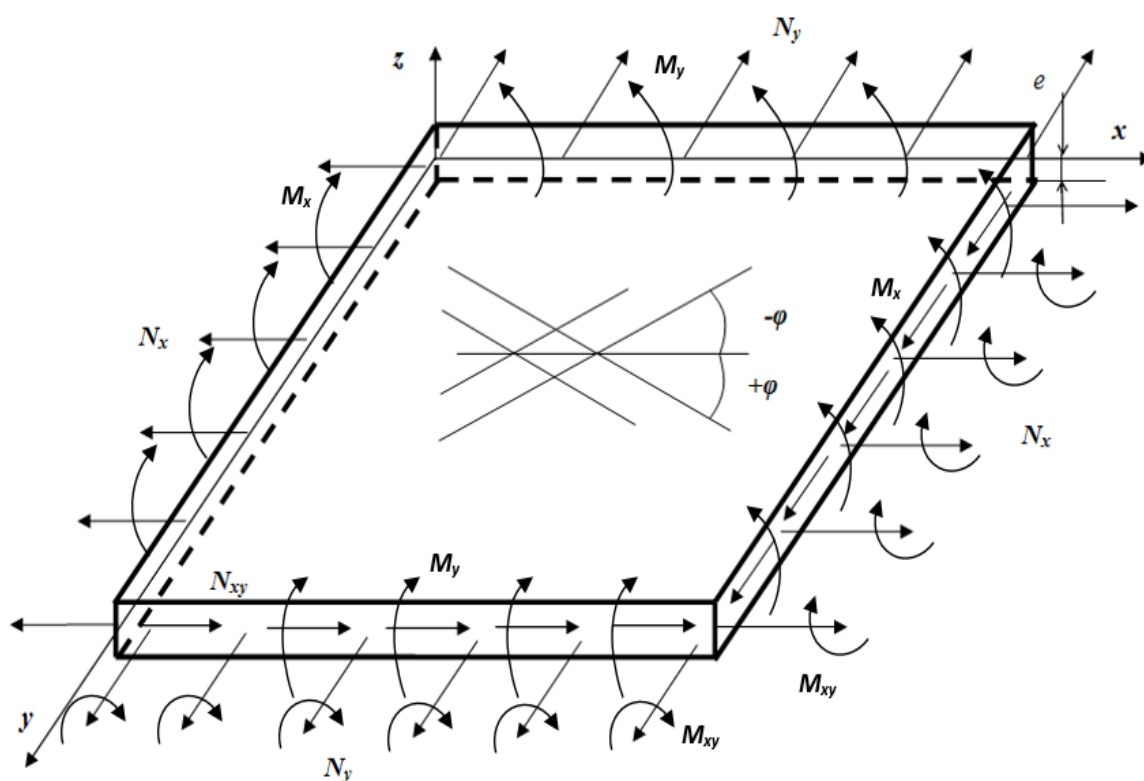


Рисунок 3.3. Геометрическая модель и возникающие внутренние силовые факторы пластины с несимметричной структурой пакета

Физические соотношения в этом случае будут иметь следующий вид:

$$\begin{pmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} & C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} & C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} & C_{31} & C_{32} & C_{33} \\ C_{11} & C_{12} & C_{13} & D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & D_{21} & D_{22} & D_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & D_{31} & D_{32} & D_{33} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} N_x^T \\ N_y^T \\ N_{xy}^T \\ M_x^T \\ M_y^T \\ M_{xy}^T \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} N_x^H \\ N_y^H \\ N_{xy}^H \\ M_x^H \\ M_y^H \\ M_{xy}^H \end{pmatrix}. \quad (3.1)$$

Где $N_x^T, N_y^T, N_{xy}^T, N_x^H, N_y^H, N_{xy}^H$ - погонные силы, вызванные температурной деформацией (индекс T) и начальным натяжением слоев (индекс H);

$M_x^T, M_y^T, M_{xy}^T, M_x^H, M_y^H, M_{xy}^H$ - погонные моменты, вызванные температурной деформацией (индекс T) и начальным натяжением слоев (индекс H);

B_{mn}, C_{mn}, D_{mn} - обобщенные жесткости пакета ($m, n = 1, 2, 3$);

$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_{xy}$ - линейные деформации пакета в плоскости приведения;

$\kappa_x, \kappa_y, \kappa_{xy}$ - кривизны пакета в плоскости приведения.

Запишем связь деформации панели в плоскости приведения с перемещениями u_0, v_0 :

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u_0}{\partial x}; \varepsilon_y = \frac{\partial v_0}{\partial y}; \varepsilon_{xy} = \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x}. \quad (3.2)$$

Связь кривизны панели с углами поворота нормали θ_x, θ_y :

$$\kappa_x = \frac{\partial \theta_x}{\partial x}; \kappa_y = \frac{\partial \theta_y}{\partial y}; \kappa_{xy} = \frac{\partial \theta_x}{\partial y} + \frac{\partial \theta_y}{\partial x}. \quad (3.3)$$

Связь углов поворота нормали с прогибом w имеет следующий вид:

$$\theta_x = \psi_x - \frac{\partial w}{\partial x}; \theta_y = \psi_y - \frac{\partial w}{\partial y}, \quad (3.4)$$

ψ_x, ψ_y - поперечные сдвиги.

Обобщенные жесткости пакета определяются следующим образом:

$$B_{mn} = I^{(0)}_{mn},$$

$$C_{mn} = I^{(1)}_{mn} - eI^{(0)}_{mn}, \quad (3.5)$$

$$D_{mn} = I^{(2)}_{mn} - 2eI^{(1)}_{mn} + e^2I^{(0)}_{mn},$$

$$I^{(r)}_{mn} = \int_0^h b_{mn} Z^r dt = \frac{1}{r+1} \sum_{k=1}^N b_{mn}^{(k)} (Z_k^{r+1} - Z_{k-1}^{r+1}),$$

Где e – координата плоскости приведения (для несимметричного пакета выбирается произвольно);

$$m, n = 1, 2, 3, r = 0, 1, 2.$$

Запишем выражения для усилий и моментов, вызванных температурными полями:

$$N_x^T = \sum_{j=1}^3 N_{1j}^T, N_y^T = \sum_{j=1}^3 N_{2j}^T, N_{xy}^T = \sum_{j=1}^3 N_{3j}^T, \quad (3.6)$$

$$M_x^T = \sum_{j=1}^3 M_{1j}^T, M_y^T = \sum_{j=1}^3 M_{2j}^T, M_{xy}^T = \sum_{j=1}^3 M_{3j}^T, \quad (3.7)$$

$$\text{где } N_{ij}^T = \Delta T \sum_{k=1}^N [b_{ij}^{(k)} \overline{\alpha_j^{(k)}} (Z_k - Z_{k-1})];$$

$$M_{ij}^T = \Delta T \sum_{k=1}^N b_{ij}^{(k)} \overline{\alpha_j^{(k)}} \left[\frac{1}{2} (Z_k^2 - Z_{k-1}^2) - e(Z_k - Z_{k-1}) \right];$$

Z_k – координата k -го слоя, отсчитываемая от плоскости приведения;

N – количество слоев;

$b_{ij}^{(k)}$ – линейные жесткости k -го слоя, приведенные к осям панели (x, y)

($i, j = 1, 2, 3$);

ΔT – перепад температуры вследствие охлаждения;

$\overline{\alpha_1^{(k)}}, \overline{\alpha_2^{(k)}}, \overline{\alpha_3^{(k)}}$ – коэффициенты линейного температурного расширения k -го слоя в осях панели;

Аналогично запишем усилия и моменты от начального натяжения:

$$N_x^H = \sum_{j=1}^3 N_{1j}^H, N_y^H = \sum_{j=1}^3 N_{2j}^H, N_{xy}^H = \sum_{j=1}^3 N_{3j}^H, \quad (3.8)$$

$$M_x^H = \sum_{j=1}^3 M_{1j}^H, M_y^H = \sum_{j=1}^3 M_{2j}^H, M_{xy}^H = \sum_{j=1}^3 M_{3j}^H, \quad (3.9)$$

где
$$N_{ij}^H = \sum_{k=1}^N [b_{ij}^{(k)} \overline{\varepsilon_{ij}^{(k)}} (Z_k - Z_{k-1})];$$

$$M_{ij}^H = \sum_{k=1}^N b_{ij}^{(k)} \overline{\varepsilon_{ij}^{(k)}} \left[\frac{1}{2} (Z_k^2 - Z_{k-1}^2) - e (Z_k - Z_{k-1}) \right];$$

$\overline{\varepsilon_{n1}^{(k)}}, \overline{\varepsilon_{n2}^{(k)}}, \overline{\varepsilon_{n3}^{(k)}}$ – начальные деформации слоев в осях панели.

Линейные жесткости для k -го слоя в случае несимметричного пакета имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
b_{11}^{(k)} &= [\overline{E}_1 m^4 + \overline{E}_2 n^4 + 2(\overline{E}_1 \nu_{12} + 2G_{12})m^2 n^2]^{(k)} \\
b_{22}^{(k)} &= [\overline{E}_1 n^4 + \overline{E}_2 m^4 + 2(\overline{E}_1 \nu_{12} + 2G_{12})m^2 n^2]^{(k)} \\
b_{12}^{(k)} &= b_{21}^{(k)} = [\overline{E}_1 \nu_{12} + [\overline{E}_1 + \overline{E}_2 - 2(\overline{E}_1 \nu_{12} + 2G_{12})]m^2 n^2]^{(k)} \\
b_{13}^{(k)} &= b_{31}^{(k)} = [mn[\overline{E}_1 m^2 - \overline{E}_2 n^2 - (\overline{E}_1 \nu_{12} + 2G_{12})(m^2 - n^2)]]^{(k)}, \\
b_{23}^{(k)} &= b_{32}^{(k)} = [mn[\overline{E}_1 n^2 - \overline{E}_2 m^2 + (\overline{E}_1 \nu_{12} + 2G_{12})(m^2 - n^2)]]^{(k)} \\
b_{33}^{(k)} &= [(\overline{E}_1 + \overline{E}_2 - 2\overline{E}_1 \nu_{12})m^2 n^2 + G_{12}(m^2 - n^2)]^{(k)}
\end{aligned} \tag{3.10}$$

$$\begin{aligned}
E_1^{(k)} &= \frac{E_1^{(k)}}{1 - \nu_{12}^{(k)} \nu_{21}^{(k)}}, \\
E_2^{(k)} &= \frac{E_2^{(k)}}{1 - \nu_{12}^{(k)} \nu_{21}^{(k)}}.
\end{aligned} \tag{3.11}$$

Коэффициенты линейного температурного расширения для k -го слоя, а также деформации слоя, вызванные начальным натяжением, в осях панели определяются путем соответствующего преобразования:

$$\begin{pmatrix} \overline{\alpha}_1 \\ \overline{\alpha}_2 \\ \overline{\alpha}_3 \end{pmatrix}^{(k)} = \begin{pmatrix} m^2 & n^2 \\ n^2 & m^2 \\ 2mn & -2mn \end{pmatrix}^{(k)} \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{pmatrix}^{(k)}, \tag{3.12}$$

$$\begin{pmatrix} \overline{\varepsilon}_{H1} \\ \overline{\varepsilon}_{H2} \\ \overline{\varepsilon}_{H3} \end{pmatrix}^{(k)} = \begin{pmatrix} m^2 \\ n^2 \\ 2mn \end{pmatrix}^{(k)} (\varepsilon_H)^{(k)}. \tag{3.13}$$

В приведенных выше формулах $m^{(k)}$ и $n^{(k)}$ – тригонометрические функции угла ориентации слоев $\varphi^{(k)}$ относительно оси x панели:

$$\begin{aligned}
m^{(k)} &= \cos(\varphi^{(k)}), \\
n^{(k)} &= \sin(\varphi^{(k)}).
\end{aligned} \tag{3.14}$$

Будем рассматривать плоскую панель без начальной кривизны со свободными от нагрузки и закрепления краями, подверженную действию температурного поля, равномерно распределенного по толщине. Поверхность приведения совпадает с серединой поверхностью. Для ортотропной структуры композита $B_{13} = B_{31} = 0$, а коэффициенты $C_{13}, C_{31}, C_{23}, C_{32}, D_{13}, D_{31}$ малы и ими можно пренебречь. С учетом этого физические соотношения для ортотропной структуры композита в развернутом виде примут вид:

$$\begin{cases} 0 = B_{11}\varepsilon_x + B_{12}\varepsilon_y + C_{11}\kappa_x + C_{12}\kappa_y - N_x^T - N_x^H \\ 0 = B_{12}\varepsilon_x + B_{22}\varepsilon_y + C_{21}\kappa_x + C_{22}\kappa_y - N_y^T - N_y^H \\ 0 = C_{11}\varepsilon_x + C_{12}\varepsilon_y + D_{11}\kappa_x + D_{12}\kappa_y - M_x^T - M_x^H \\ 0 = C_{21}\varepsilon_x + C_{22}\varepsilon_y + D_{21}\kappa_x + D_{22}\kappa_y - M_y^T - M_y^H \end{cases} \quad (3.15)$$

$$\begin{cases} 0 = B_{33}\varepsilon_{xy} + C_{33}\kappa_{xy} - N_{xy}^T - N_{xy}^H \\ 0 = C_{33}\varepsilon_{xy} + D_{33}\kappa_{xy} - M_{xy}^T - M_{xy}^H \end{cases} \quad (3.16)$$

Таким образом, нетрудно видеть, что в случае ортотропной структуры композиционного материала, определение деформированного состояния распадается на 2 независимые задачи нахождения прогибов (компонент кривизны κ_x, κ_y) и крутки (κ_{xy}).

Напряжения в слоях определяются из закона Гука, используя полученные из (1) компоненты кривизны и деформации, т.е.

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix}^{(k)} = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{pmatrix}^{(k)} \begin{pmatrix} \varepsilon_x + \kappa_x \cdot z_k - \overline{\alpha_1}^{(k)} \cdot \Delta T - \overline{\varepsilon_{n1}}^{(k)} \\ \varepsilon_y + \kappa_y \cdot z_k - \overline{\alpha_2}^{(k)} \cdot \Delta T - \overline{\varepsilon_{n2}}^{(k)} \\ \varepsilon_{xy} + \kappa_{xy} \cdot z_k - \overline{\alpha_3}^{(k)} \cdot \Delta T - \overline{\varepsilon_{n3}}^{(k)} \end{pmatrix} \quad (3.17)$$

В данном случае z_k является координатой серединой поверхности слоя, то есть $z_k = (Z_k - e) - h_k / 2$.

Для перехода к напряжениям $\sigma_1, \sigma_2, \tau_{12}$ в осях слоя необходимо воспользоваться формулами преобразования при повороте осей координат:

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{pmatrix}^{(k)} = \begin{pmatrix} m^2 & n^2 & 2mn \\ n^2 & m^2 & -2mn \\ -mn & mn & (m^2 - n^2) \end{pmatrix}^{(k)} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix}^{(k)}. \quad (3.18)$$

Как видно из физических соотношений (3.1) в многослойных панелях с несимметричной укладкой слои, подверженные растяжению-сжатию, будут вызывать изгиб панели. Такое сложное поведение панелей в составе высоконагруженных конструкций может привести к снижению эффективности их работы.

Кроме того, формование таких панелей будет сопровождаться возникновением остаточных температурных изгибных деформаций (короблением).

Этого недостатка лишены панели с симметричным расположением слоев, т.е. когда слою (k) соответствует такой же слой ($N-k$), где N -общее число слоев в пакете. С учетом этого запишем выражения для обобщенных жесткостей в следующем упрощенном виде:

$$\begin{aligned} B_{mn} &= 2 \sum_{k=1}^{N/2} b_{mn}^{(k)} (Z_k - Z_{k-1}) \\ D_{mn} &= \frac{2}{3} \sum_{k=1}^{N/2} b_{mn}^{(k)} (Z_k^3 - Z_{k-1}^3) \\ C_{mn} &= 0 \end{aligned} \quad (3.19)$$

Координата Z_k при этом отсчитывается от срединной плоскости $e=h/2$, а сумма вычисляется только по половине пакета. Физические соотношения (3.1) для ортотропной панели со свободными от нагрузки краями тогда примут вид:

$$\begin{cases} 0 = B_{11}\varepsilon_x + B_{12}\varepsilon_y - N_x^t - N_x^h \\ 0 = B_{12}\varepsilon_x + B_{22}\varepsilon_y - N_y^t - N_y^h \\ 0 = D_{11}\kappa_x + D_{12}\kappa_y \\ 0 = D_{21}\kappa_x + D_{22}\kappa_y \end{cases} \quad (3.20)$$

$$\begin{cases} 0 = B_{33}\varepsilon_{xy} - N_{xy}^t - N_{xy}^h \\ 0 = D_{33}\kappa_{xy} \end{cases} \quad (3.21)$$

Из (3.21) нетрудно видеть, что формование плоских панелей с симметричной структурой пакета не приведет к их короблению.

Алгоритм анализа остаточного напряженного деформированного состояния, таким образом, условно можно разделить на четыре этапа:

1. расчет жесткостных характеристик пакета по формулам (3.5), (3.10) - (3.14);
2. определение внутренних силовых факторов, вызванных начальным натяжением и перепадом температур по формулам (3.16) -(3.19);
3. определение компонент деформаций и кривизны из физических соотношений (3.1);
4. расчет напряжений в слоях композита с помощью закона Гука (3.17), (3.18).

Для аналитического расчета: пластина свободна от закрепления и внешней силовой нагрузки, температурная нагрузка – перепад на 100°C. Для КЭ-расчета: пластина закреплена в точке геометрического центра, силовая нагрузка отсутствует, температурная нагрузка – перепад 100°C.

Характеристики материалов, используемых при моделировании, представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2– Физико-механические характеристики материалов

№		E_{11}	E_{22}	G_{12}	ν_{12}	α_1	α_2, α_3	G_{23}
		[МПа]	[МПа]	[МПа]		[10^{-6} K^{-1}]	[10^{-6} K^{-1}]	
1	Углепластик	129960	7056	2658	0.593	0.7	42	2214
	Наномодифицированный углепластик	135130	19078	8225	0.567	3.4	44	6085
2	Углепластик	129510	5211	1917	0.596	0.46	42	1632
	Наномодифицированный углепластик	129760	6266	2337	0.594	0.6	42	1965
3	Углепластик	129500	4730	2050	0.29	0.19	20	1670
	Наномодифицированный углепластик	129750	5700	2500	0.29	0.26	20	2010
4	Углепластик	129500	4730	2050	0.29	-10.4	20	1670
	Наномодифицированный углепластик	129750	5700	2500	0.29	-12	20	2010

Рассматривалось два варианта укладки композита (табл. 3.3. и 3.3.):

Таблица 3.3– укладка слоев $[0_{10} / 45_{10}]$

№	Материал	Кол-во слоев	Угол, град	Толщина слоя, мм
1	Углепластик	10	0	0,2
2	Углепластик	10	45	0,2
Общая толщина:				4,1

Таблица 3.4– укладка слоев $[0_{10} / 90_{10}]$

№	Материал	Кол-во слоев	Угол, град	Толщина слоя, мм
1	Углепластик	10	0	0,2
2	Углепластик	10	90	0,2
Общая толщина:				4,1

Для каждого варианта укладки было проведено 4 расчета с использованием свойств монослоя углепластика из табл. 3.2.

Аналогично было проведено 4 расчета с использованием свойств монослоя наномодифицированного углепластика из табл. 3.2.

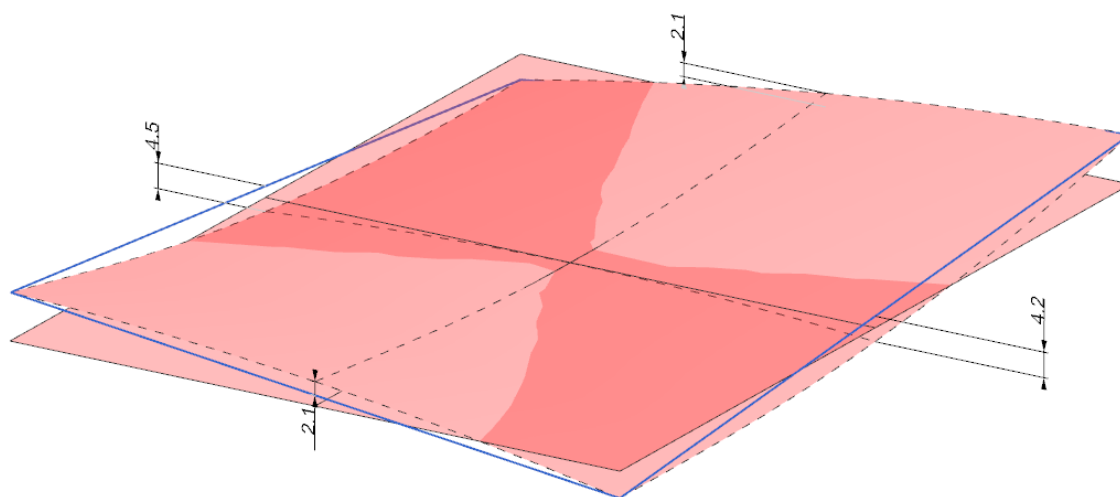
Итого проведено по 8 расчетов для варианта укладки $[0_{10} / 45_{10}]$ и 8 расчетов – для $[0_{10} / 90_{10}]$.

3.3. Расчетные и экспериментальные результаты для пластин с укладкой $[0_{10} / 45_{10}]$

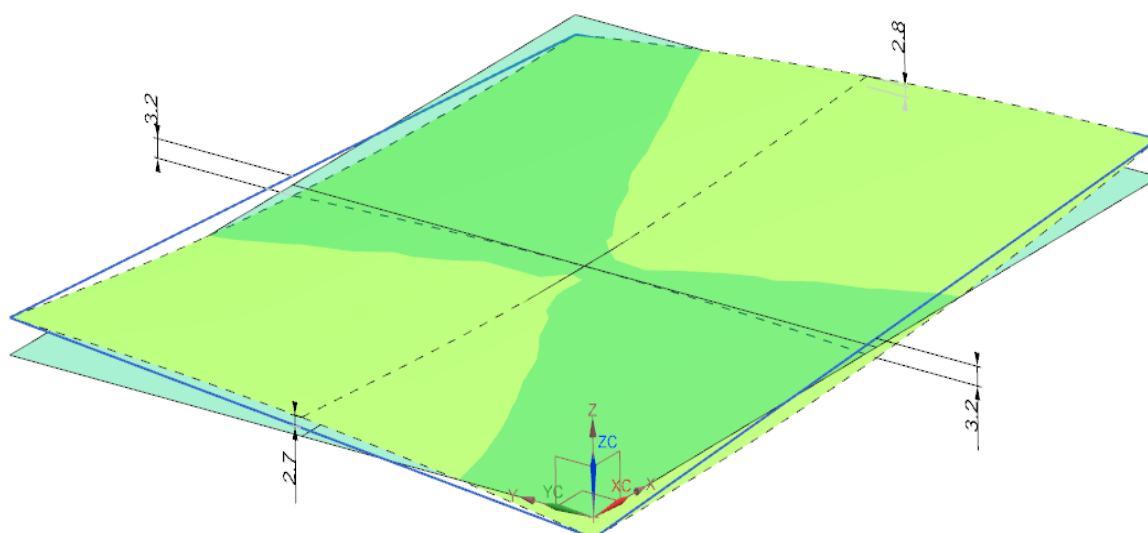
Для изготовленных пластин измерялись по прогибы по каждой из четырех сторон. Для этого на ровной поверхности фиксировались две крайние точки, прогиб замерялся по центру стороны штангенциркулем.

На рисунке 3.4 представлены результаты замеров прогибов изготовленной пластины со структурой слоев $[0_{10} / 45_{10}]$.

На рисунке 3.5 - 3.8 приведены расчетные значения прогибов (3.5а - 3.8а) и соответствующие им величины прогибов каждой из сторон пластины (3.5б - 3.8б).

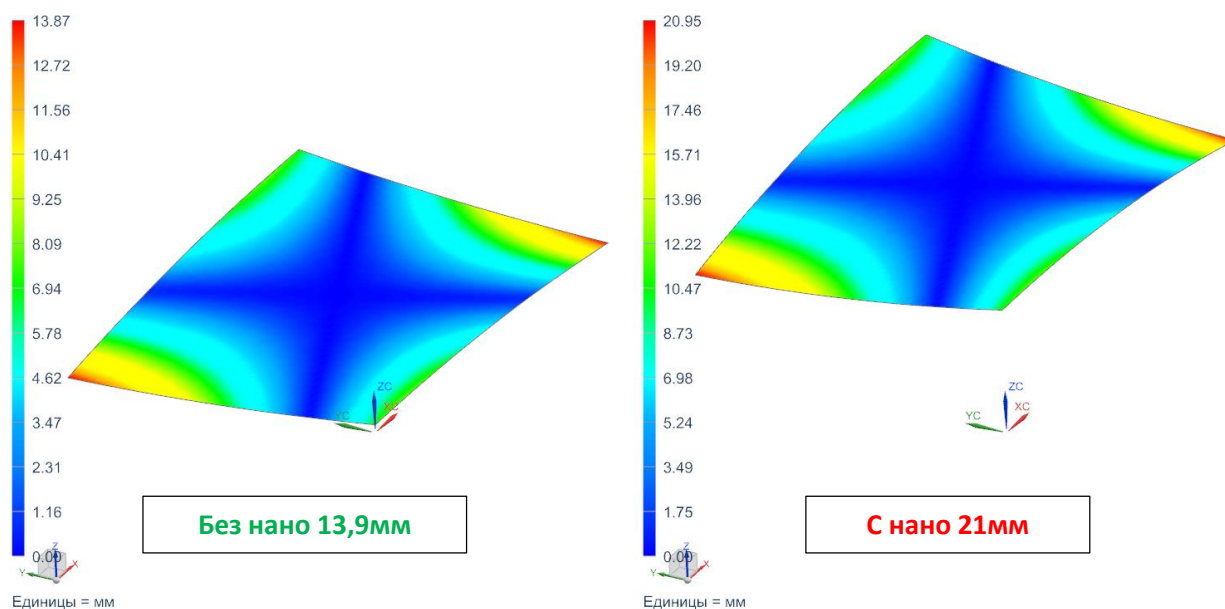


С нано



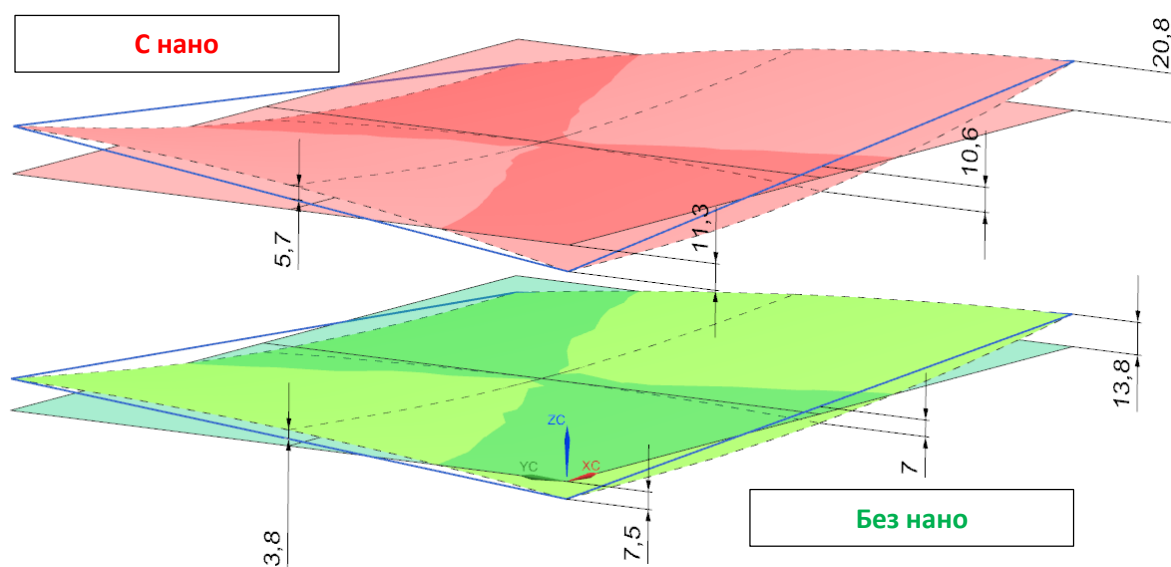
Без Нано

Рисунок 3.4. Экспериментальное определение прогибов пластины



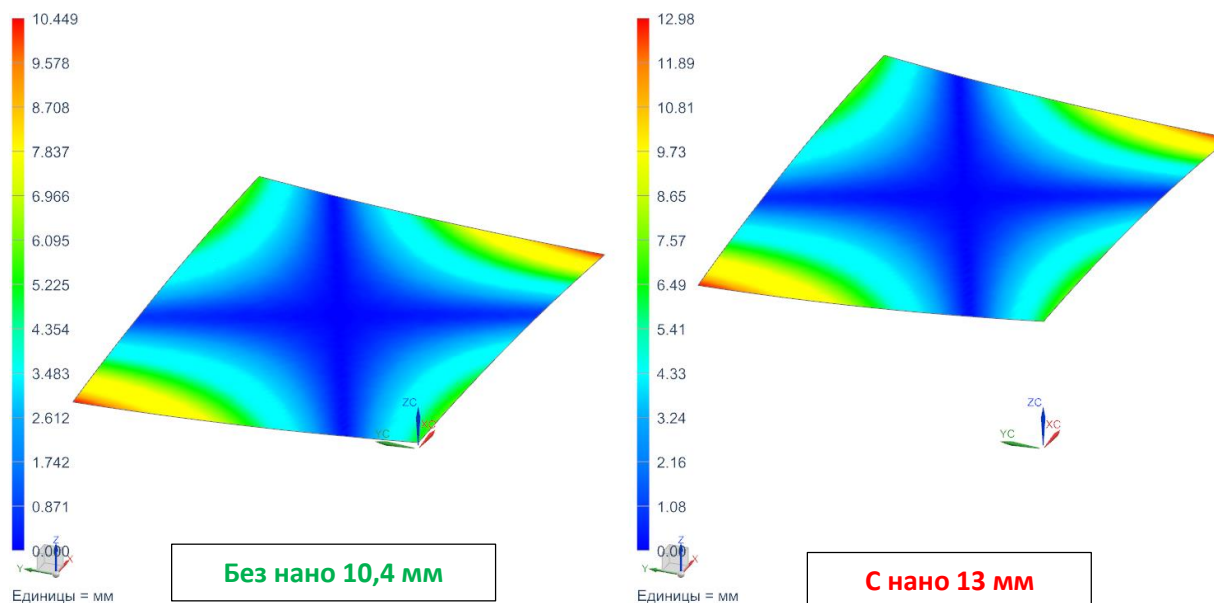
Перемещения узлов, мм

Рисунок 3.5а. Расчетные значения прогибов для варианта 1



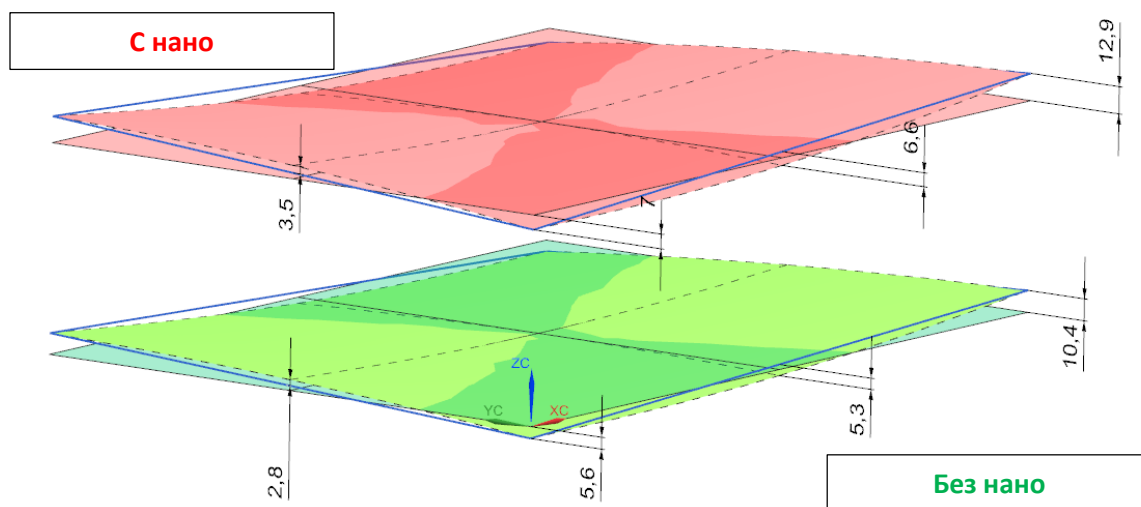
Значение прогибов по сторонам, мм

Рисунок 3.5б. Экспериментальное определение прогибов для варианта 1



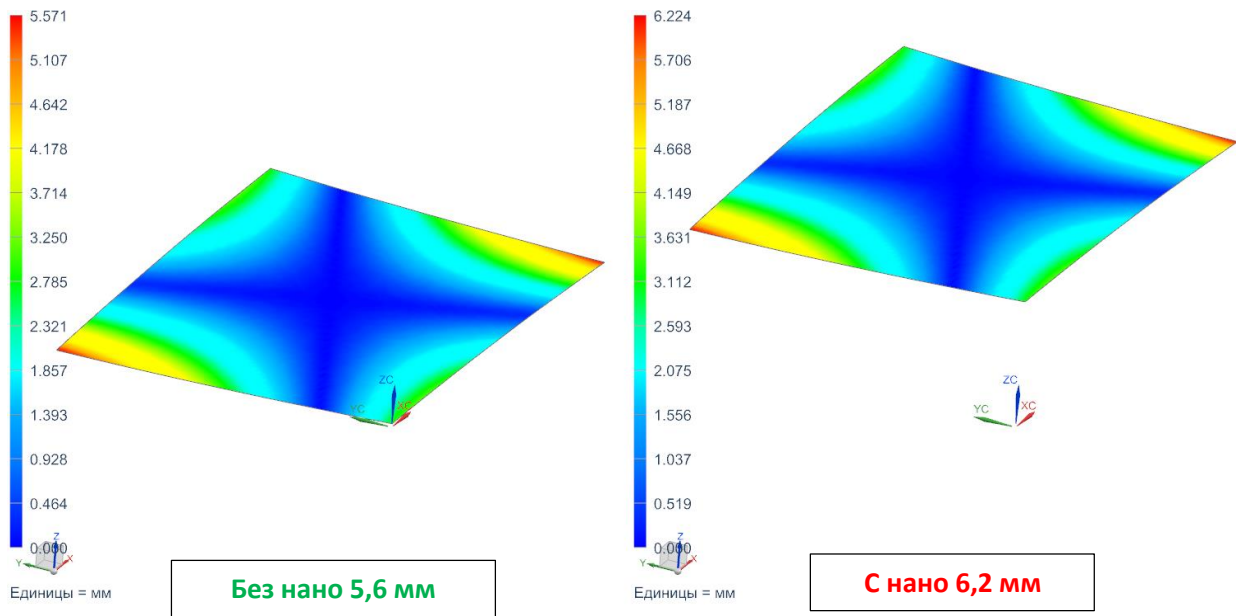
Перемещения узлов, мм

Рисунок 3.6а. Расчетные значения прогибов для варианта 2



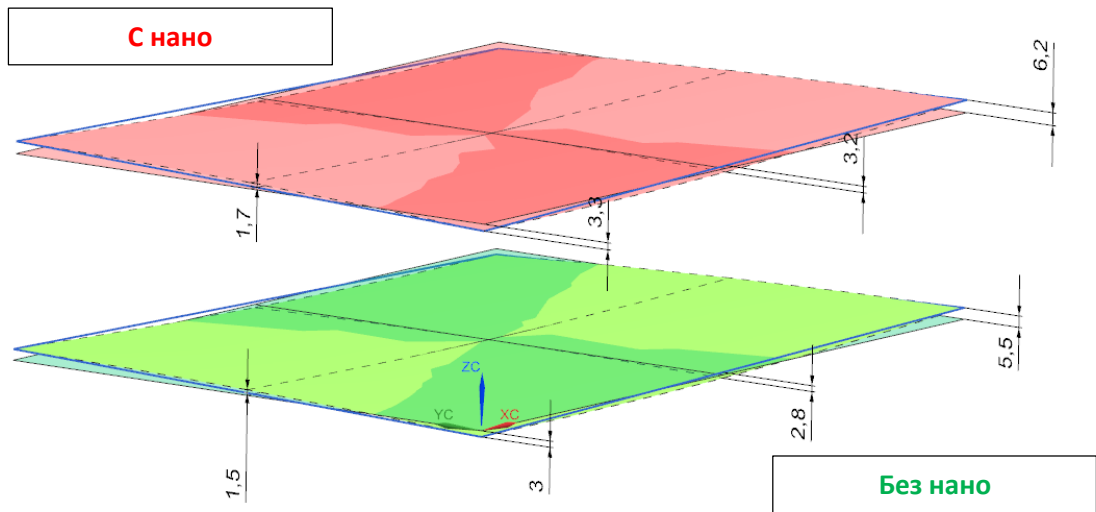
Значение прогибов по сторонам, мм

Рисунок 3.6б. Экспериментальное определение прогибов для варианта 2



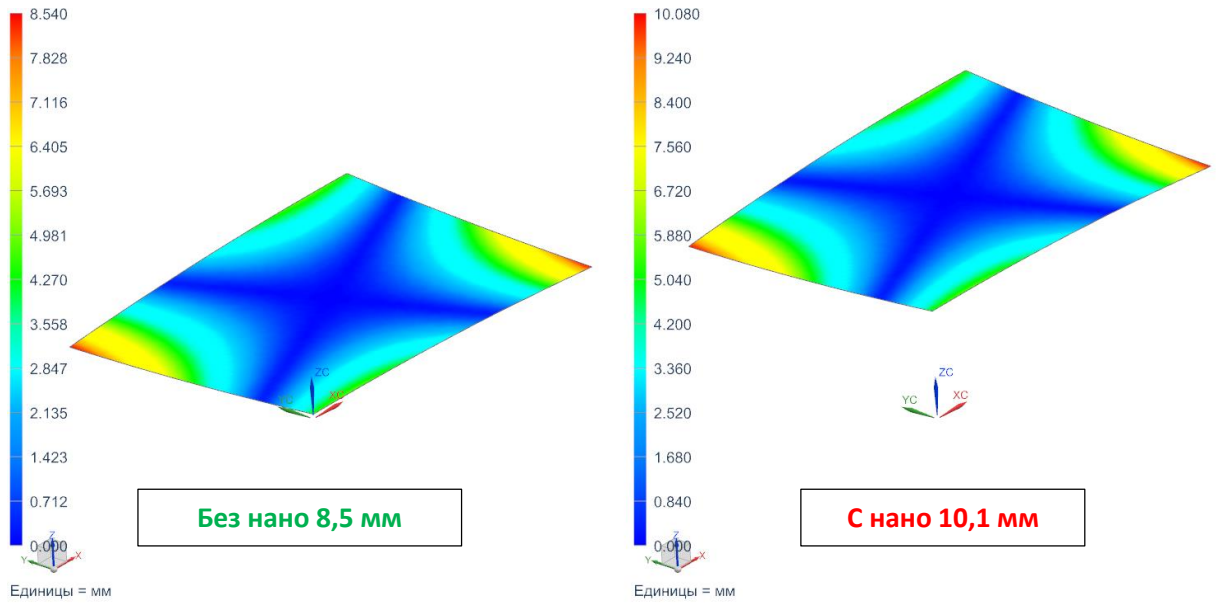
Перемещения узлов, мм

Рисунок 3.7а. Расчетные значения прогибов для варианта 3



Значение прогибов по сторонам, мм

Рисунок 3.7б. Экспериментальное определение прогибов для варианта 3



Перемещения узлов, мм

Рисунок 3.8а. Расчетные значения прогибов для варианта 4

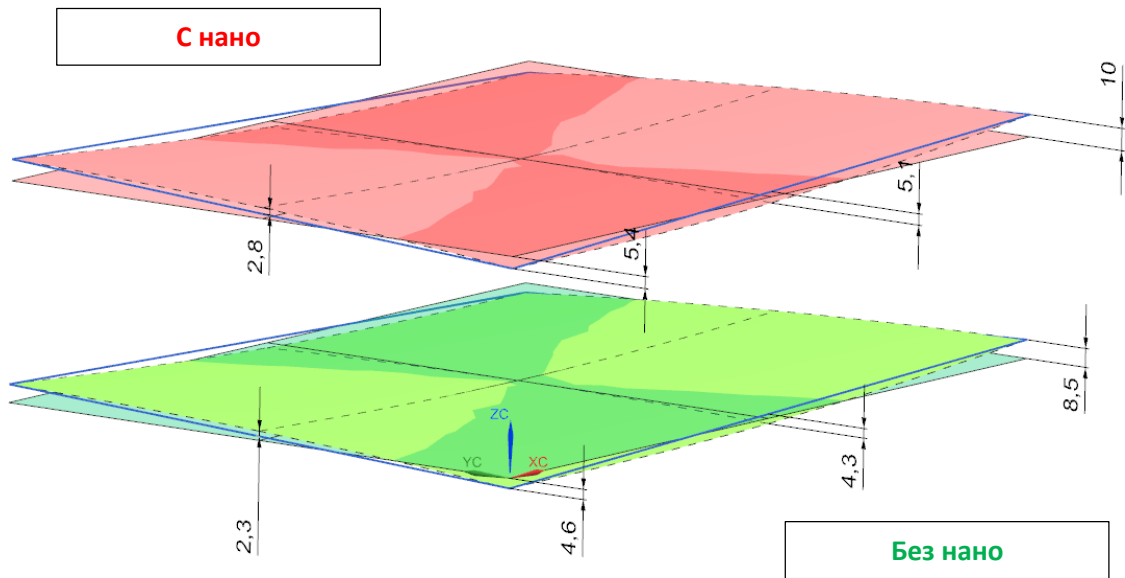
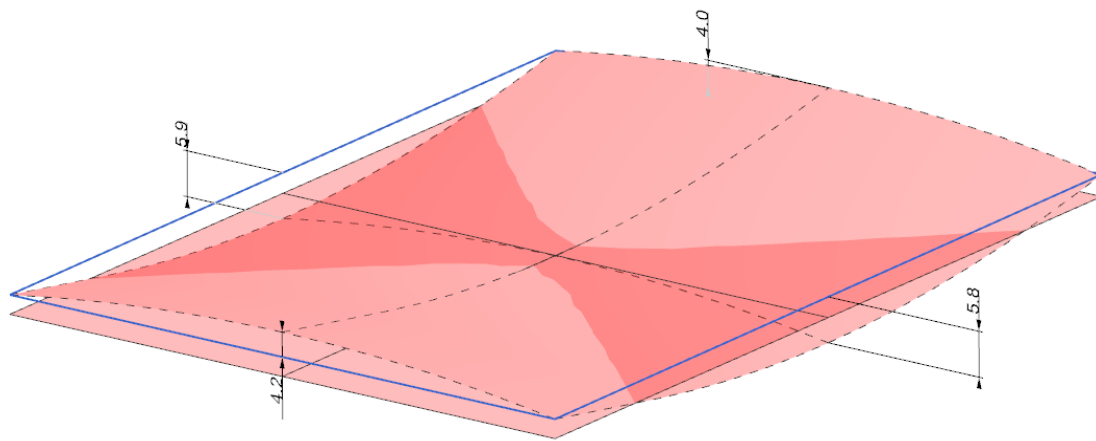


Рисунок 3.8б. Экспериментальное определение прогибов для варианта 4

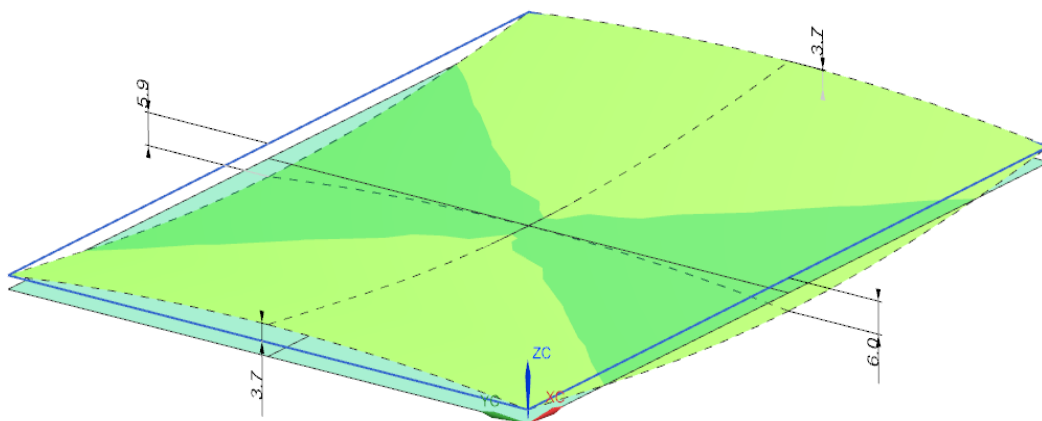
3.4. Расчетные и экспериментальные результаты для пластин с укладкой $[0_{10} / 90_{10}]$

На рисунке 3.9 представлены результаты замеров прогибов изготовленной пластины со структурой слоев $[0_{10} / 90_{10}]$.

На рисунках 3.10 - 3.13 приведены расчетные значения прогибов и соответствующие им величины прогибов каждой из сторон пластины.

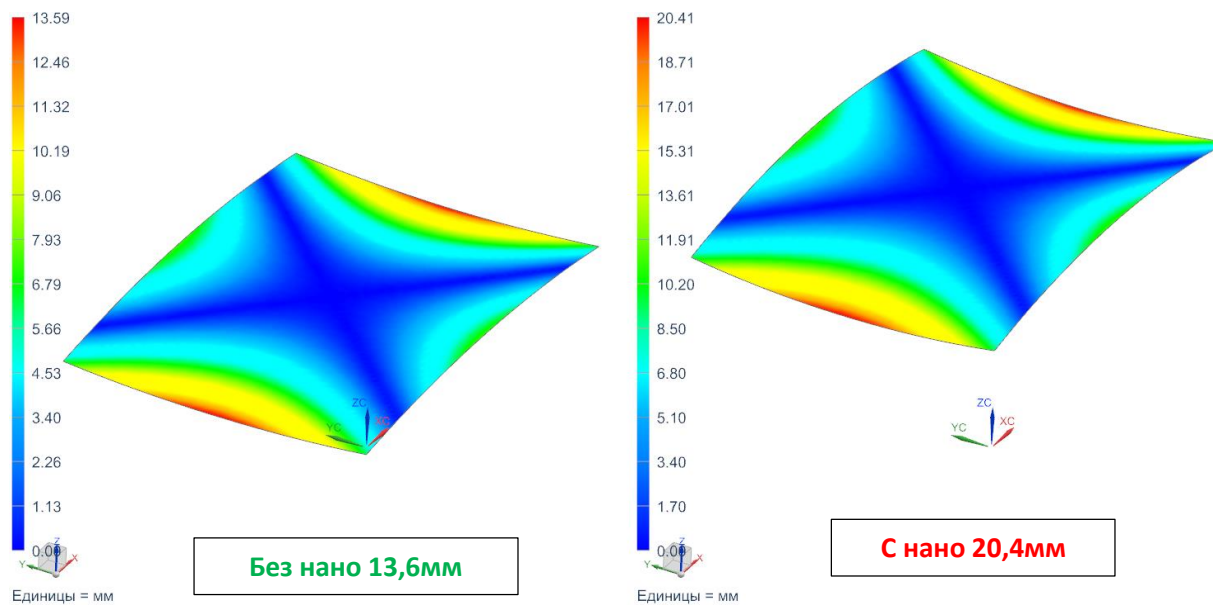


С нано



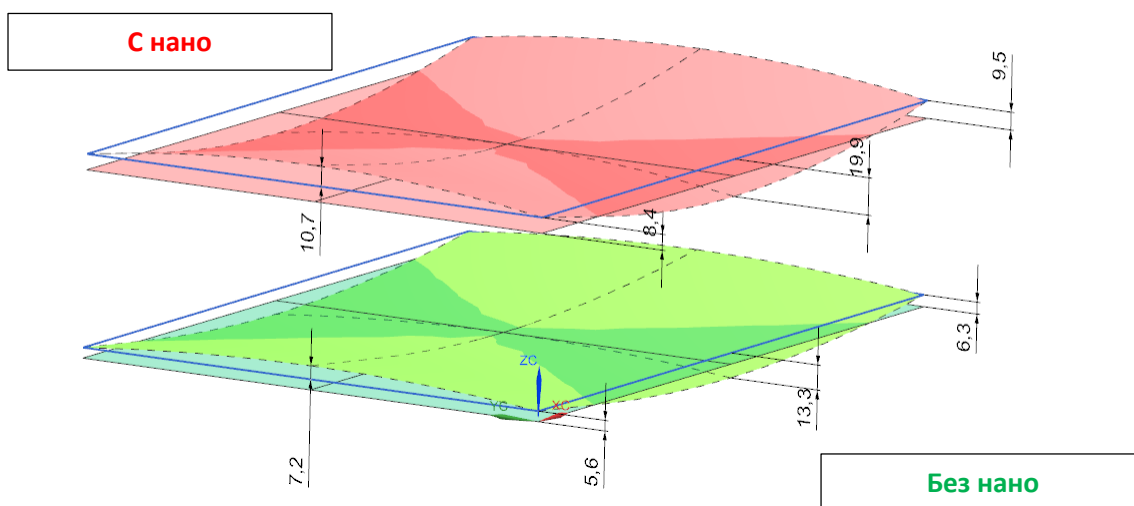
Без нано

Рисунок 3.9. Экспериментальные прогибы пластины



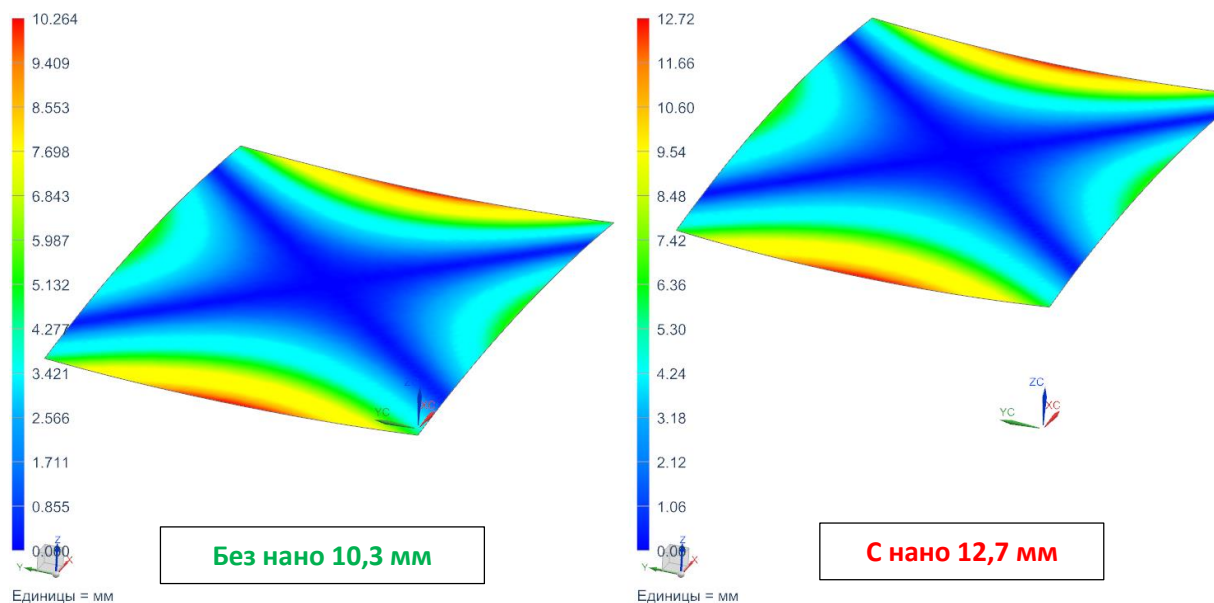
Перемещения узлов, мм

Рисунок 3.10а. Расчетные значения прогибов для варианта 1



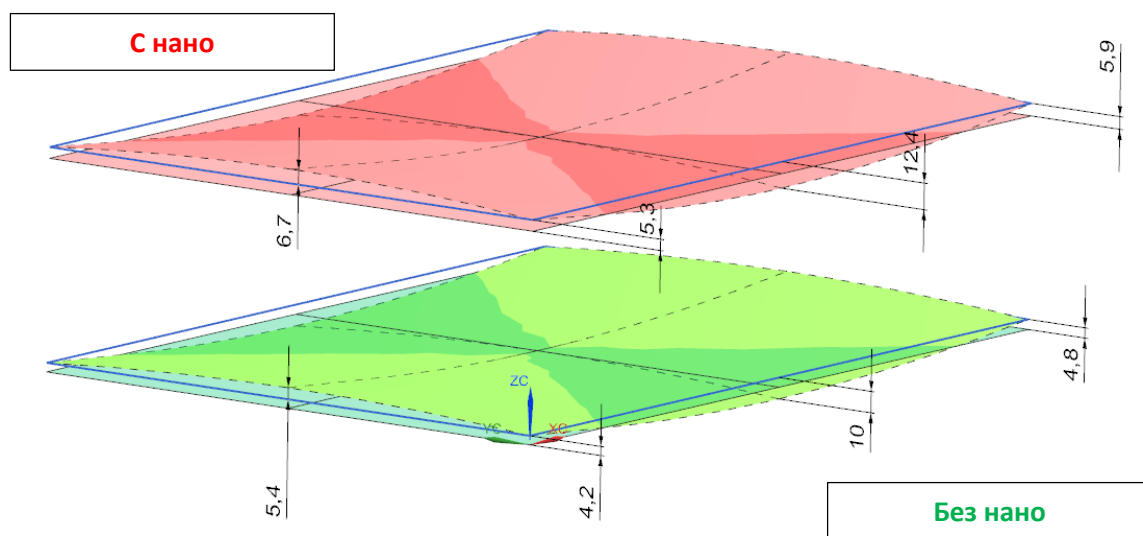
Значение прогибов по сторонам, мм

Рисунок 3.10б. Экспериментальное определение прогибов для варианта 1



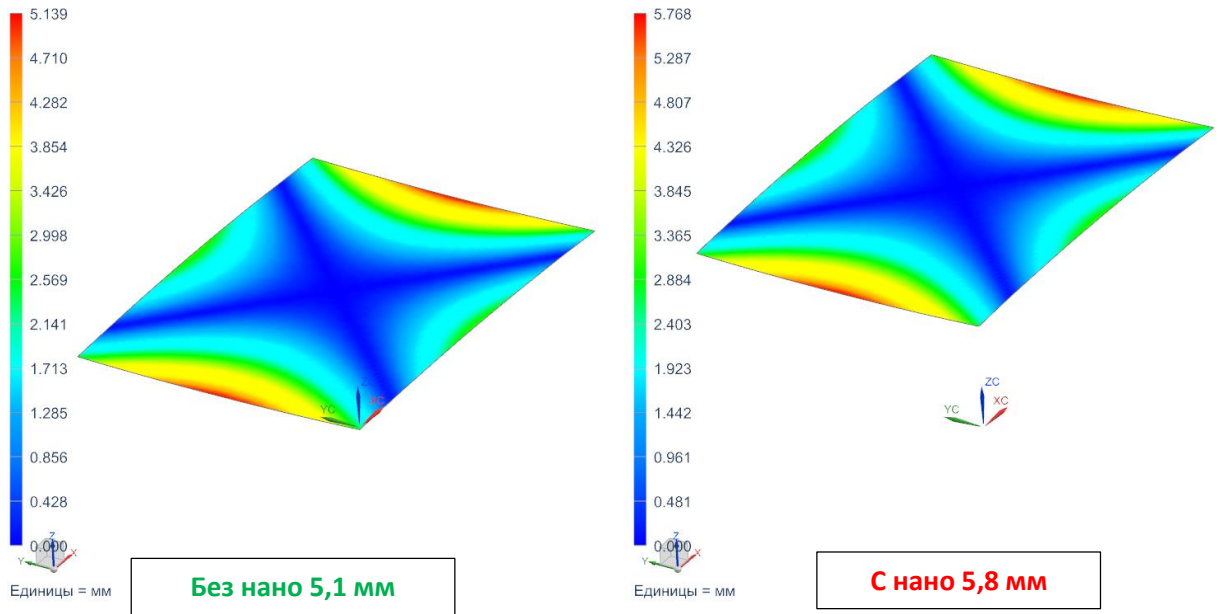
Перемещения узлов, мм

Рисунок 3.11а – Расчетные значения прогибов для варианта 2



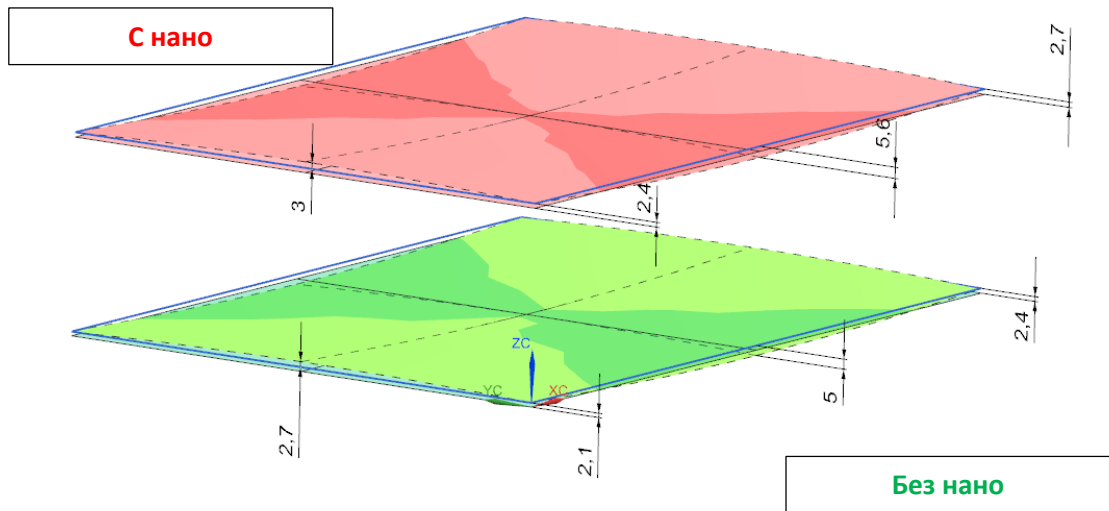
Значение прогибов по сторонам, мм

Рисунок 3.11б. Экспериментальное определение прогибов для варианта 2



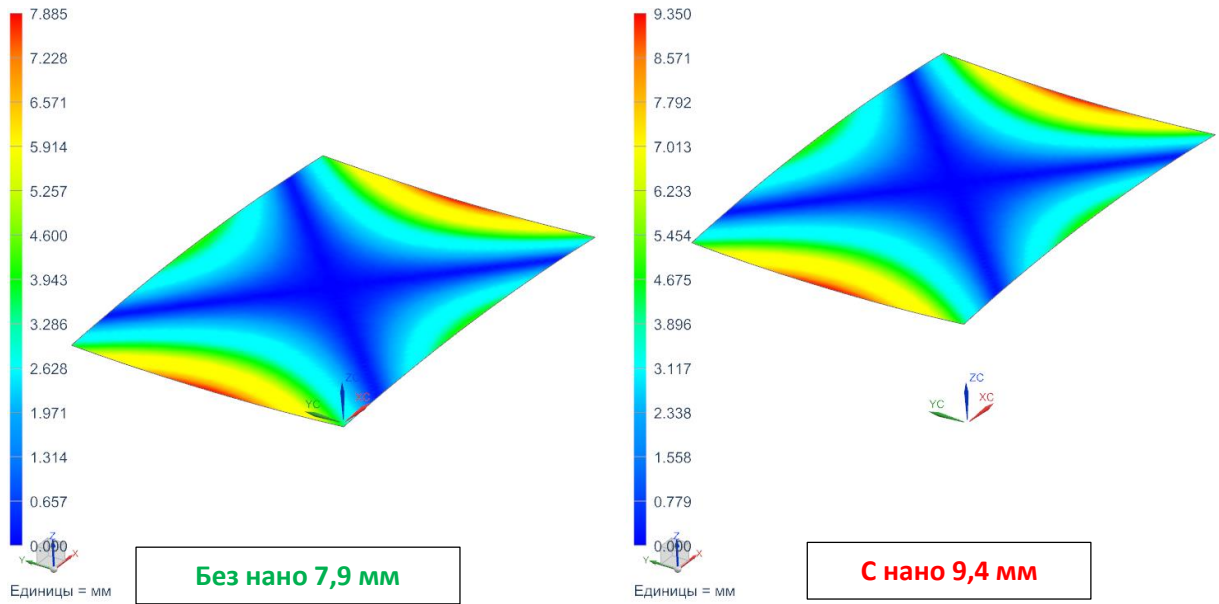
Перемещения узлов, мм

Рисунок 3.12а. Расчетные значения прогибов для варианта 3



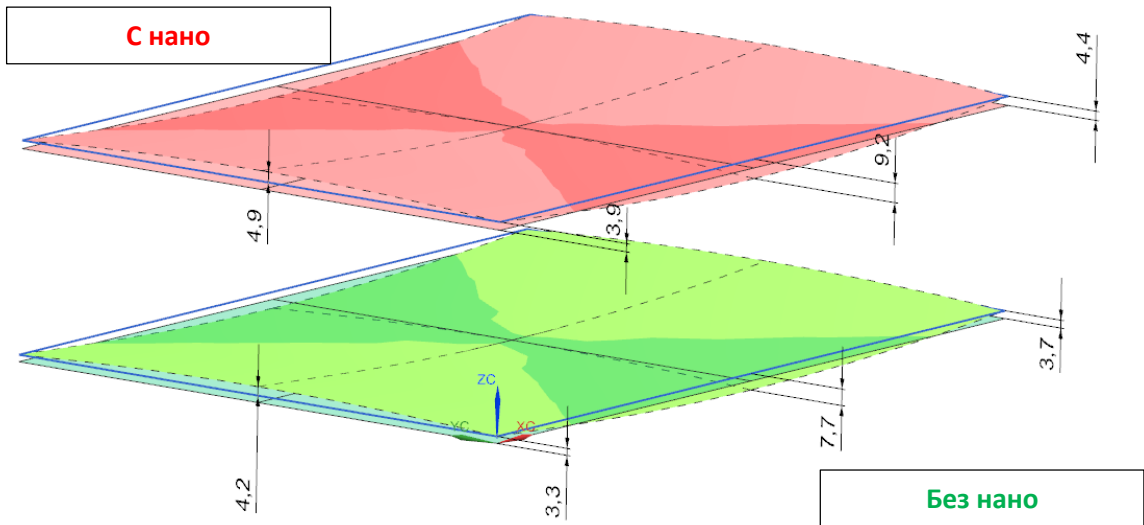
Значение прогибов по сторонам, мм

Рисунок 3.12б. Экспериментальное определение прогибов для варианта 3



Перемещения узлов, мм

Рисунок 3.13а. Расчетные значения прогибов для варианта 4



Значение прогибов по сторонам, мм

Рисунок 3.13б. Экспериментальное определение прогибов для варианта 4

3.5. Анализ полученных результатов

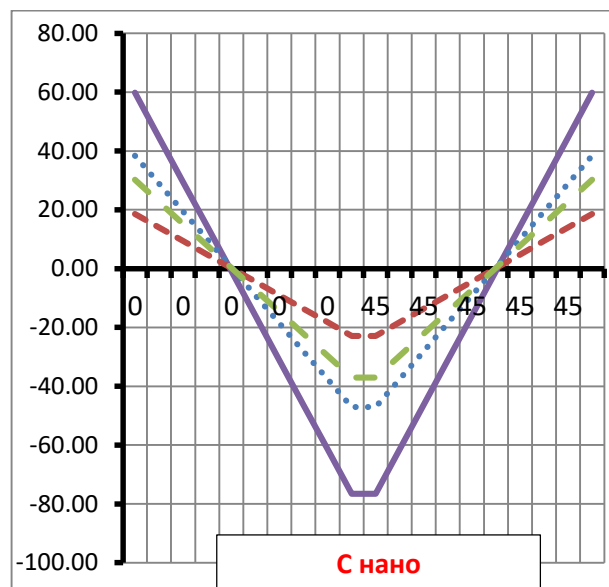
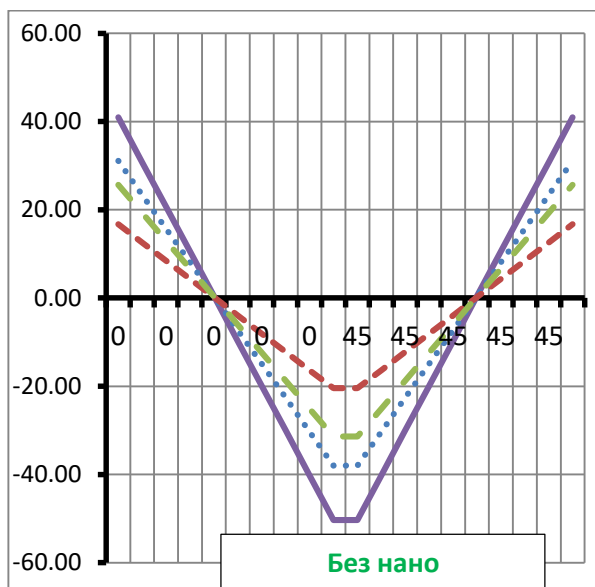
Таблица 3.5 – Сравнение прогибов для вариантов 1-4 и укладки $[0_{10} / 45_{10}]$ с экспериментом.

		1	2	3	4	Эксперимент
Прогиб по длинной стороне, мм	С нано	10,6	6,6	3,2	5,1	4,35
	Без нано	7	5,3	2,8	4,3	3,2
Прогиб по короткой стороне, мм	С нано	5,7	3,5	1,7	2,8	2,1
	Без нано	3,8	2,8	1,5	2,3	2,75

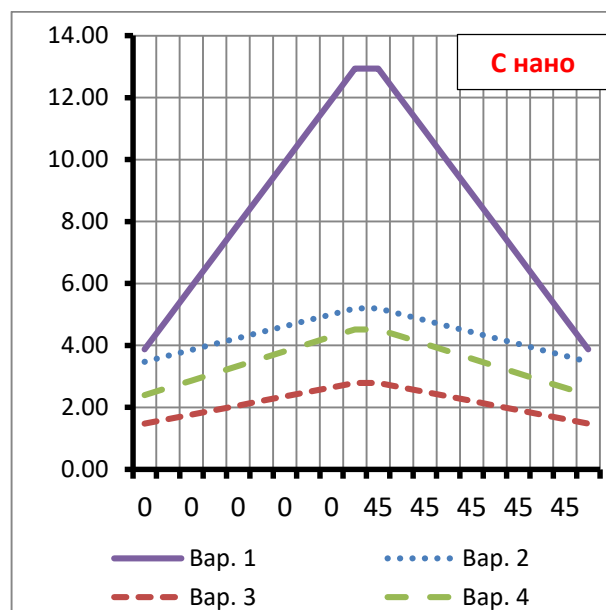
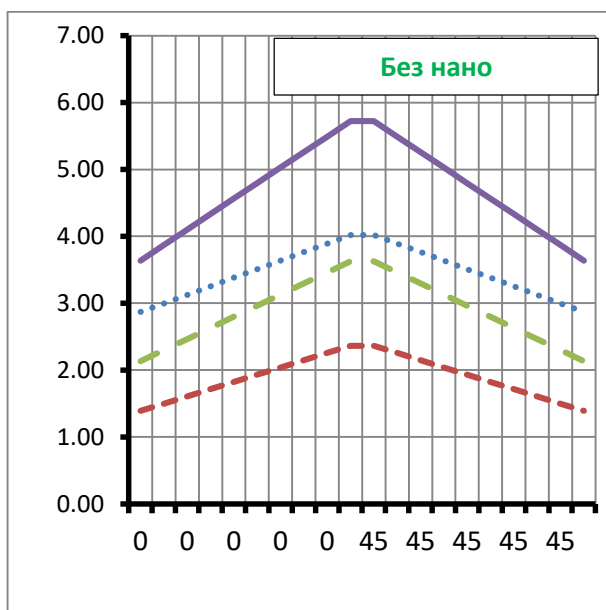
Таблица 3.6 – Сравнение прогибов для вариантов 1-4 и укладки $[0_{10} / 90_{10}]$ с экспериментом.

		1	2	3	4	Эксперимент
Прогиб по длинной стороне, мм	С нано	19,9	12,4	5,6	9,2	5,85
	Без нано	13,3	10	5	7,7	5,95
Прогиб по короткой стороне, мм	С нано	10,7	6,7	3	4,9	4,1
	Без нано	7,2	5,4	2,7	4,2	3,7

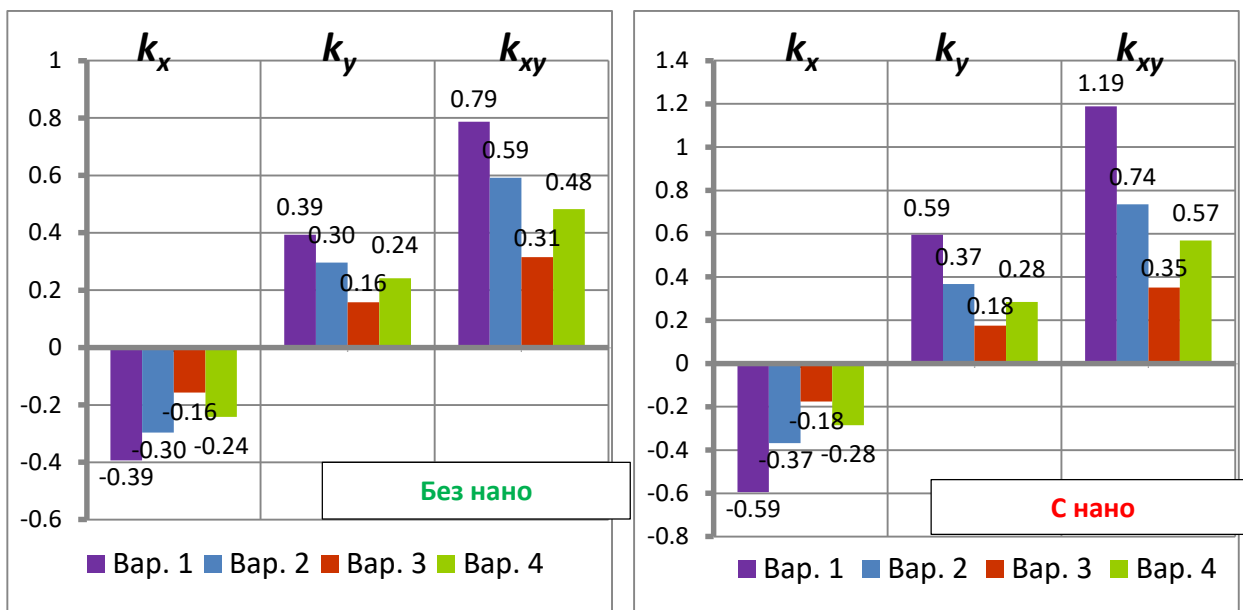
Таблица 3.7 – Сводная таблица результатов для вариантов 1-4 и укладки [0₁₀ / 45₁₀]



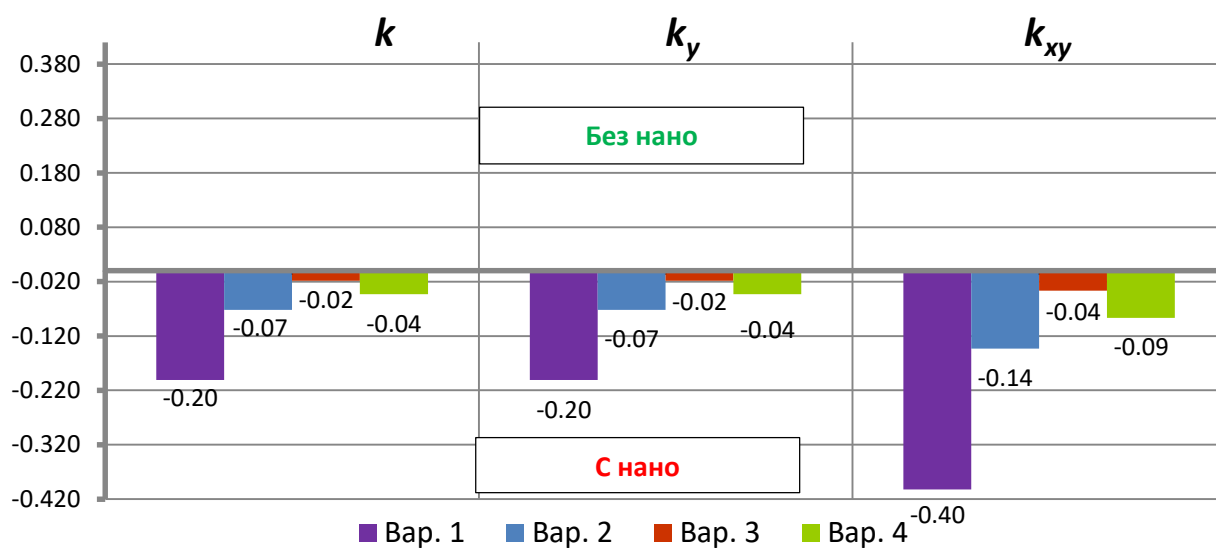
Распределение нормальных напряжений по слоям σ_1 , МПа



Распределение нормальных напряжений по слоям σ_2 , МПа

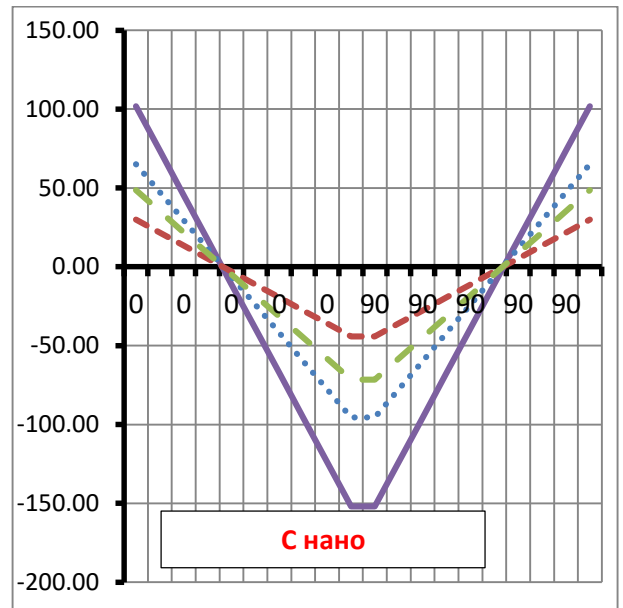
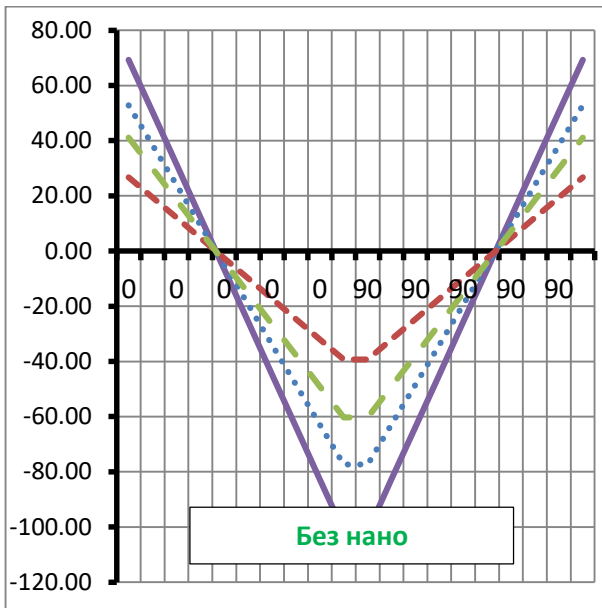


Значения компонент кривизны

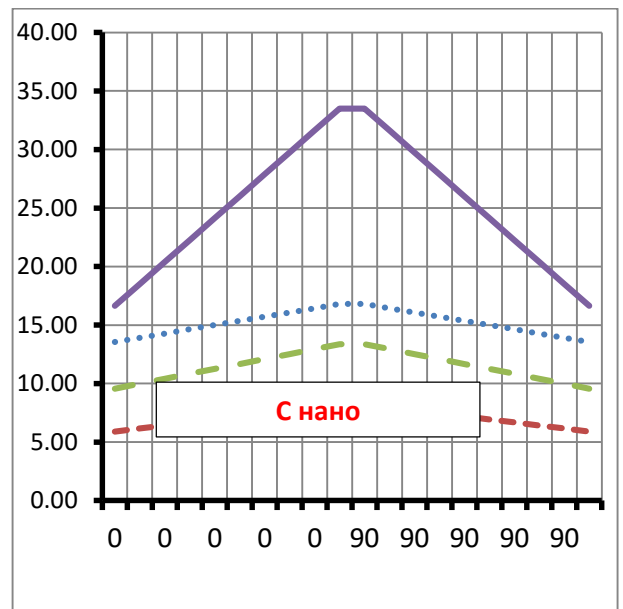
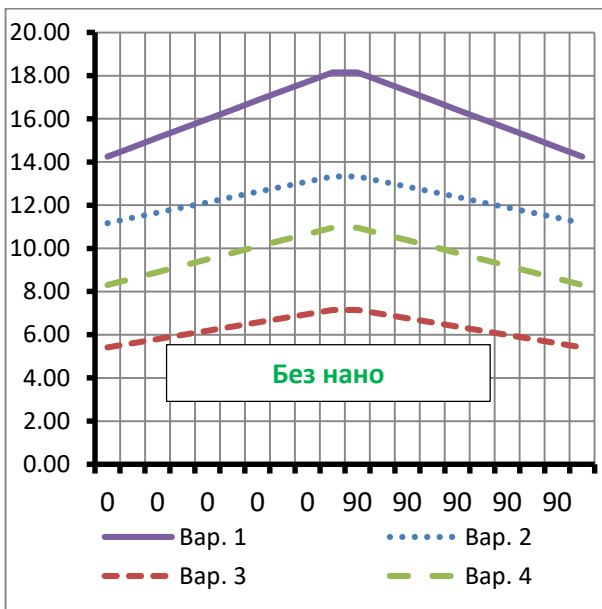


Разница между компонентами кривизны для углепластика с наномодификацией и без

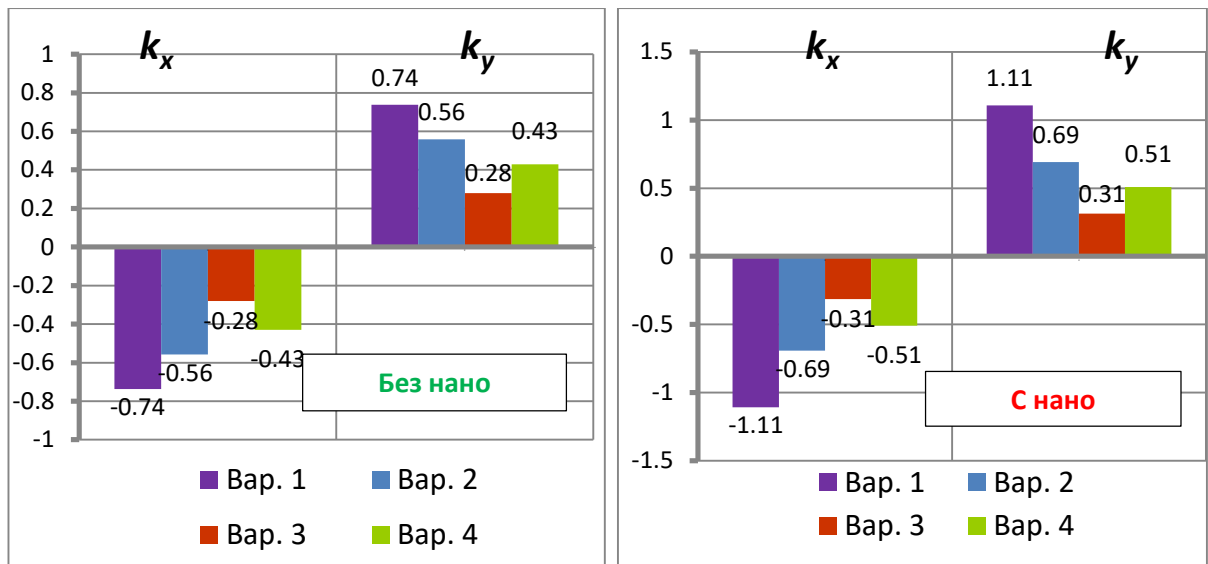
Таблица 3.8 – Сводная таблица результатов для вариантов 1-4 и укладки [0₁₀ / 90₁₀]



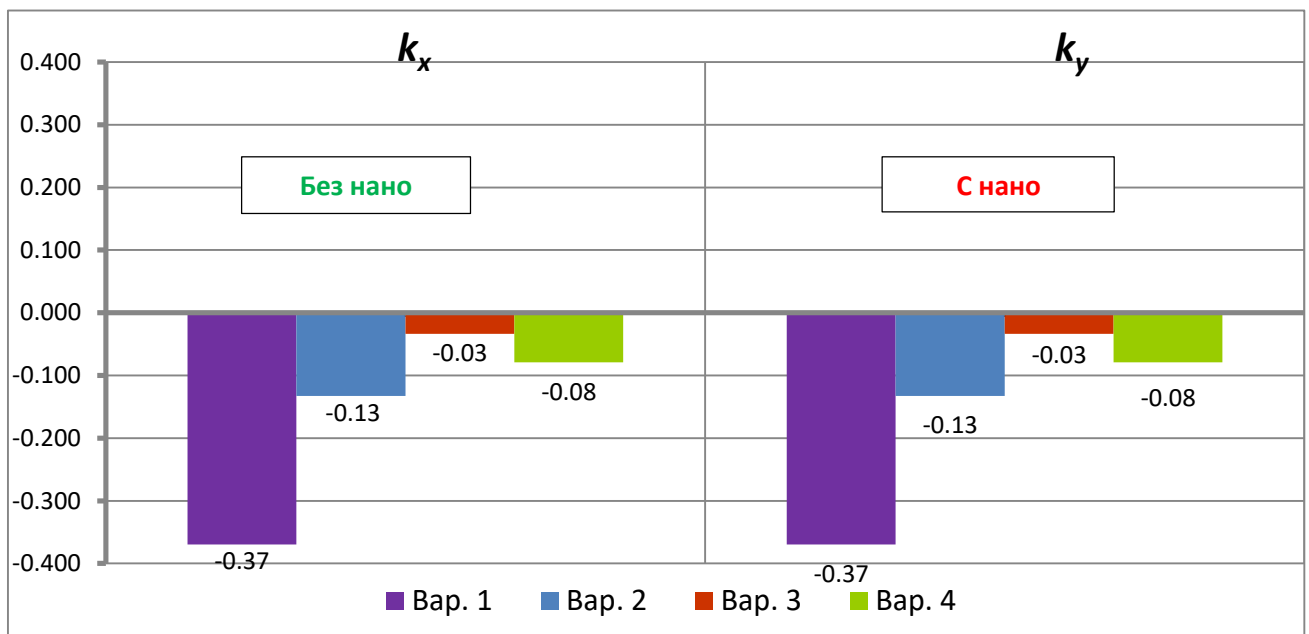
Распределение нормальных напряжений по слоям σ_1 , МПа



Распределение нормальных напряжений по слоям σ_2 , МПа



Значения компонент кривизны



Разница между компонентами кривизны для углепластика с наномодификацией и без

Результаты, полученные аналитическим и численным методами идентичны. Наибольшее сходство с экспериментальными данными дает 4 метод определения эффективных свойств монослоя.

Заключение

На основании проведенных исследований можно сформулировать следующие выводы:

1. Разработаны теоретические и экспериментальные методы для исследования эффективных термомеханических характеристик и остаточных напряжении и деформации в панелях из наномодифицированных материалов с несимметричной схемой армирования.
2. По результатам экспериментальных исследований определены эффективные характеристики монослоя из углепластика, изготовленного на основе как обычной так и наномодифицированной матрицы, и получено решение соответствующей обратной задачи.
3. Установлено, что добавление наночастиц в пределах рекомендуемого стандартом диапазона 10% приводят лишь к незначительному повышению продольного модуля упругости и модуля сдвига монослоя. При этом происходит практически двукратное снижения модуля упругости в поперечном направлении и снижение до нуля коэффициента Пуассона.
4. Достоверность разработанных численных моделей подтверждается хорошей корреляцией результатов как численных и аналитических решений, так и полученных экспериментальных данных по исследованию термомеханических характеристик наномодифицированных материалов.
5. Исследование остаточного напряженно-деформированного состояния элементов конструкций из углепластика с использованием идентифицированных на основе разработанных методик значений термоупругих характеристик монослоев композитов позволило выявить возможность снижения остаточного НДС и поводок в структурах с несимметричными схемами армирования при использовании матрицы, содержащей углеродные наночастицы.

Список литературы

1. Антохонов В.Б., Петровский А.В. Термоупругие краевые эффекты и коробление плит из перекрестно армированных композитов. Механика композитных материалов. 1981. №4 - с.677-683.
2. Афанасьев А.В., Дудченко А.А., Нгуен Д.К., Рабинский Л.Н., Соляев Ю.О. Моделирование влияния параметров вискеризации волокон на остаточное напряженно-деформированное состояние слоистых композитов. Механика композиционных материалов и конструкций. 2014, 20(3), 333-342.
3. Афанасьев А.В., Дудченко А.А., Рабинский Л.Н. Влияние тканых слоев на остаточное напряженно-деформированное состояние изделий из полимерных композиционных материалов. Электр.журнал «Труды МАИ». 2010. - №37.
4. Болдырева А.А., Яруничева Ю.А., Дернакова А.В., Ивашов И.В. Прочность полимерного композита (стеклопластика) при межслойном сдвиге. Инженерно-строительный журнал, №2, 2016. С 42-50.
5. В.А. Стрижало, М. П. Земцов. Жесткость и прочность слоистых углепластиков при одноосном нагружении. Институт проблем прочности НАН Украины, Киев. 2000, pp:61-71.
6. В.Ю. Зуйко, Д.С. Лобанов, А.Н. Аношкин. методики определения предела прочности и прочности полунатурных образцов панелей из композиционных материалов при статических испытаниях на растяжение, сжатие и сдвиг. Механика. № 2. 2012. С 99-111.
7. Д.И. Коган, М.И. Душин, А.В. Борщёв, Е.А. Вешкин, П.А. Абрамов, К.В. Макрушин. Свойства конструкционных углепластиков изготовлены пропикой пов вакуумом. Известия Самарского научного центра Российской академии наук, т. 14, №4(2), 2012, pp:762-766.
8. Дудченко А. А., Лурье С. А., Шумова Н. П. Особенности свойств матрицы в окрестности жесткой наночастицы. Вестник Московского авиационного института. 2009. Т.16. №5. С. 144-148.

9. Егорова О.В., Рабинский Л.Н., Чжо Аунг Лин, Идентификации упругих и термоупругих характеристик монослоя в образцах углепластика, изготовленного с применением эпоксидной матрицы // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред: Материалы XXIV Междунар. симп. им. А.Г. Горшкова. – М. 2018. – Т2. – С 47-48.

10. Егорова О.В., Рабинский Л.Н., Чжо Аунг Лин, исследование влияния наномодификации углепластика на остаточное напряженно-деформированное состояние после формования. // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред: Материалы XXIV Междунар. симп. им. А.Г. Горшкова. – М. 2018. – Т2. – С 50-51.

11. Егорова О.В., Рабинский Л.Н., Чжо Аунг Лин, Оценки свойств монослоя с использованием микромеханического аналитического и численного моделирования и решения соответствующих задач осреднения // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред: Материалы XXIV Междунар. симп. им. А.Г. Горшкова. – М. 2018. – Т2. – С 49-50.

12. Композиционные материалы: Справочник/В.В. Васильев, В.Д. Протасов, В.В. Болотинидр. Подобр. Ред. В.В. Васильева, Ю.М. Таронопольского. - М.: Машиностроение, 1990. – 510с.

13. Молодцов Г.А., Биткин В.Е., Симонов В.Ф., Урмансов Ф.Ф. Формостабильные и интеллектуальные конструкции из композиционных материалов. – М.: Машиностроение, 2000. – 352с.

14. Н. К. Кучер, М. П. Земцов, М. Н. Заразовский. Деформирование и прочность слоистых полимерных углепластиков. Институт проблем прочности им. Киев. С 127-134.

15. Нгуен Дак Куанг, диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по теме «Влияние термоциклических нагрузок на механические характеристики материала композитных панелей». МАИ, 2015 г. 168 стр.

16. Павлов В.П., Нусратуллин Э.М., Филиппов А.А. and Мухамедова И.З., Методика определения упругих характеристик гибридного композиционного материала и оценка ее точности. Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета, Механика, 2012. С 167-174.
17. Раскутин А.Е., Соколов И.И. Углепластики и стеклопластики нового поколения. Труды ВИАМ», №4, 2013.
18. Скудра А.М., Булавс Ф.Я. Прочность армированных пластиков. - М: Химия, 1982. - 214 с.
19. Ставиченко В.Г. Моделирование остаточного напряженно-деформированного состояния панелей из композиционных материалов малой кривизны. Технологические системы. 2007. - №4 - с.7-11.
20. Турусов Р.А., Бабич В.Ф. Температурные напряжения в полимерах. – В кн: Физико-химия и механика ориентированных стеклопластиков. М, 1967. С. 155-161.
21. Фатыхов М.А., Еникеев Т.И., Акимов И.А. Механические свойства композиционных материалов в зависимости от температурного режима их изготовления. ВЕСТНИК ОГУ №2, 2006 Том 2. С 87-92.
22. Чжо Аунг Лин, Рабинский Л.Н., Идентификация свойств наномодифицированной матрицы при моделировании остаточного НДС панелей из углепластика // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред: Материалы XXIV Междунар. симп. им. А.Г. Горшкова. – М. 2019. – Т1. – С139-140.
23. Чжо Аунг Лин. Идентификация свойств монослоя в углепластике с наномодифицированной матрицей / Артемьев А.В., Афанасьев А.В., Рабинский Л.Н., Семенов Н.А., Соляев Ю.О. // Вестник Московского авиационного института «Вестник МАИ». – 2017. – Т.24. №2. С 197-208.
24. Языева С.Б., Андреев В.И., Блягоз А.М. Эффект «Ямы» коэффициента линейного температурного расширения армированных стеклопластиков. 2012.
25. A. V. Afanasiev, D.Q. Nguen, Y.O. Solyaev, A.A. Dudchenko. Modeling of fiber whiskerization impact on the residual stress–strain state of layered composites.

Nanomechanics Science and Technology: An International Journal. 2014, 5(3), 229-238.

26. A. V. Artemiev, A. V. Afanasiev, L.N. Rabinskiy, Jo Aung Lin. Mechanical Properties of Carbon Fiber-Reinforced Plastic Containing Additions of Fullerene Soot. Nanomechanics Science and Technology: An International Journal. 2015. 6(4), p. 251-260.

27. Bakis C.E., Bank L.C., Brown V.L., Cosenza E, Davalos J.F., Lesko J.J., Machida A., Rizkalla S.H., Triantafillou T.C., Fiber-reinforced polymer composites for construction-state-of-the-art review. J Compos Constr, 2002, pp: 73–87.

28. Caitlin O Brien and Zaghi A.E., Mechanical Characteristics of Hybrid Composites with $\pm 45^\circ$ Glass and $0^\circ/90^\circ$ Stainless Steel Fibers. University of Connecticut. 261 Glenbrook Road, Unit 3037, Storrs, CT 06269-3037, 4 August 2018, USA. P 1-17.

29. Carl Zweben., Tensile strength of hybrid composites. E. L du Pont de Nemours & Co, inc, Experimental Station, Wilmington, Delaware, USA., Journal of Materials Science 12, pp.1325-1337, 1977.

30. Chensong Dong and Ian J Davies., Flexural properties of glass and carbon fiber reinforced epoxy hybrid composites, Proc IMechE Part L: J Materials: Design and Applications, UK, pp. 308–317, 2012.

31. Gojny F.H., Wichmann M.H.G., Fiedler B.K., Schulte K. Influence of different carbon nanotubes on the mechanical properties of epoxy matrix composites—a comparative study. Comp Sci Technol. 2005, pp: 2300–2313.

32. Gururaja M.N., Hari Rao A.N., A Review on Recent Applications and Future Prospectus of Hybrid Composites, International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE) ISSN: 2231-2307, Volume-1, Issue-6, January 2012 ,pp.352 - 355.

33. Hsu P.W., Herakovich C.T. Edge effects on termally induced stresses in composite laminated. // Composite Materials. 1977 – vol. - №5 – p.442-428.

34. http://www.tokaicarbon.co.jp/en/products/fine_carbon/characteristics.html

35. Hucho, C., Kraus, M., Maurer, D., Müller, V., Werner, H., Wohlers, M., &Schlögl, R. (1994). Elastic Properties of Fullerenes. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 245(1), 277–282.
36. Jagannatha T.D., Harish G. Mechanical properties of carbon/glass fiber reinforced epoxy hybrid polymer composite. *Int. J. Mech. Eng. & Rob. Res.* Vol. 4, No. 2, April 2015, p 131-137.
37. Jean, a., Willot, F., Cantournet, S., Forest, S., &Jeulin, D. (2011). Large-scale computations of effective elastic properties of rubber with carbon black fillers. *International Journal for Multiscale Computational Engineering*, 9(3), 271–303.
38. K. Ditcher, F. E. Rhodes, J. P. H. Webber. Non-linear stress-strain behaviour of CFRP laminates. *JOURNAL OF STRAIN ANALYSIS VOL 16*. 1981, pp:43-51.
39. Karl M. Kadish, Rodney S. Ruoff. *Fullerenes: Chemistry, Physics, and Technology*. John Wiley & Sons, 2000: 968p.
40. Kunz S.C., Beaumont P.W.R., Low-temperature behavior of epoxy-rubber particulate composites. *J Mater Sci*. 1981, pp. 3141–3152.
41. Kyaw Aung Lin, RABINSKIY Lev N. Investigation of the nanoscale modification of matrices on the residual stress-strain state of plastic. Porto Alegre, RS. Brasil. www.periodico.tchequimica.com. (2018). Vol. 15. Special Issue 1, p 153-165.
42. Ma C., Ji L.J., Zhang R.P., Zhu Y.F., Zhang W., Koratkar N. Alignment and dispersion of functionalized carbon nanotubes in polymer composites induced by an electric field. *Carbon*.2008, pp: 706–710.
43. Manders P.W. and Bader M.G. The strength of hybrid glass/carbon fiber composites. Part 1 Failure strain enhancement and failure mode. *Journal of Materials Science*, Vol. 16, pp. 2233-2245, 1981.
44. Marom G., Fischer S., Tuler F.R., and Wagner H.D. Hybrid effects in composites: conditions for positive or negative effects versus rule-of-mixtures behavior. *Journal of Materials Science*, Vol. 13, pp. 1419-1426, 1978.
45. *Mechanics of Composite Materials*. Robert M. Jones. CRC Press, 1998, 538 p.

46. Mohammad A., Rafiee F.Y., Javad Rafiee N.K., Fullerene–epoxy nanocomposites-enhanced mechanical properties at low nanofiller loading. *J Nanopart Res.* 2011, pp: 733- 737.
47. Mouritz A.P., Bannister M.K., Falzon P.J., Leong K.H. Review of applications for advanced three-dimensional fibre textile composites. *Compos A*, 1999, pp.1445–1461.
48. Njuguna J. *Structural Nanocomposites Perspectives for Future Applications.* Springer Berlin Heidelberg. 2014. 269 p.
49. R.M.Christensen. *Mechanics of composite materials.* A.Wiley-Interscience Publication John Wiley&Sons, New York, Chichester, Brisbane, Toronto.1982, 336p.
50. Raghavalu Thirumalai, Løgstrup Andersen D.P., Markussen T., Madsen C. M. and Lilholt, B.H. Tensile and compression properties of hybrid composites – A comparative study. *Proceedings of the 19th International Conference on Composite Materials (ICCM19).* Canadian Association for Composite Structures and Materials. 2013. pp. 1029-1035.
51. Sathishkumar T.P., Naveen J.and Satheeshkumar S., Hybrid fiber reinforced polymer composites – a review, *Journal of Reinforced Plastics and Composites* Vol. 33(5), pp.454– 471, 2014.
52. VasyilHarik. *Trends in Nanoscale Mechanics: Mechanics of Carbon Nanotubes, Graphene, Nanocomposites and Molecular Dynamics.* Springer, 2014: 226p.
53. Yentl Swolfs, Larissa Gorbatikh and Ignaas Verpoest., Fibre hybridisation in polymer composites: a review, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 67, Belgium, 2014, pp.181-200.
54. Yerramalli C.S. and Waas A.M. Compressive behavior of hybrid composites. *Proceedings of 44th AIAA/ASME/ASCE/AHS structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, 07-10 April 2003, Norfolk, Virginia (AIAA-2003-1509).
55. Zhang W., Picu R.C, Koratkar N., Suppression of fatigue crack growth in carbon nanotube composites. *Appl Phys.* 2007, pp.193-109.

56. Zhang W., Srivastava I., Zhu Y.F., Picu R.C., Koratkar N. Heterogeneity in epoxy nanocomposites initiates crazing: Significant improvements in fatigue resistance and toughening. 2009, pp.1403–1407.

Приложение 1. Идентификация свойств монослоя.

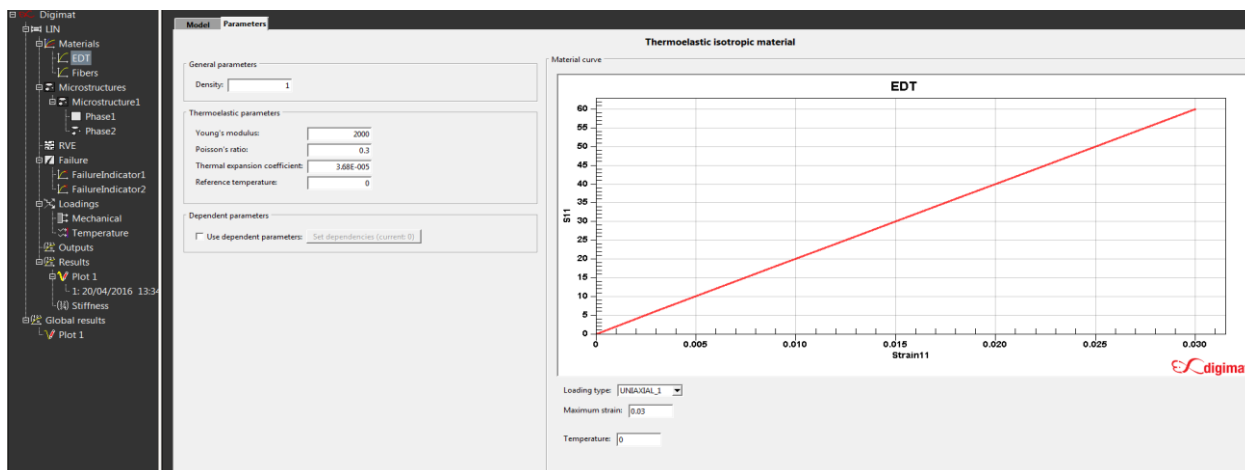


Рисунок 1. Задание свойств матрицы в «DIGIMAT».

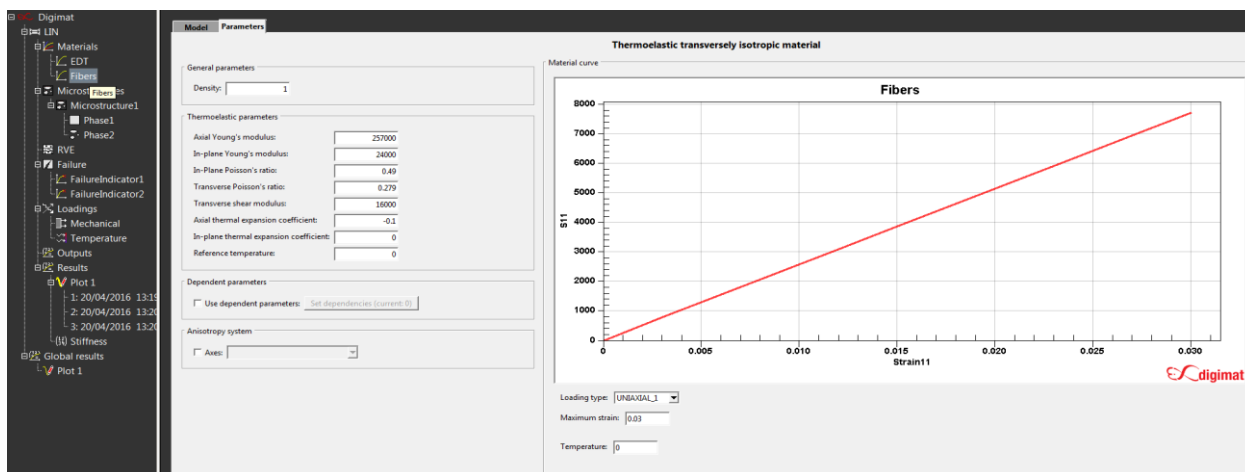


Рисунок 2. Задание свойств волокна в «DIGIMAT».

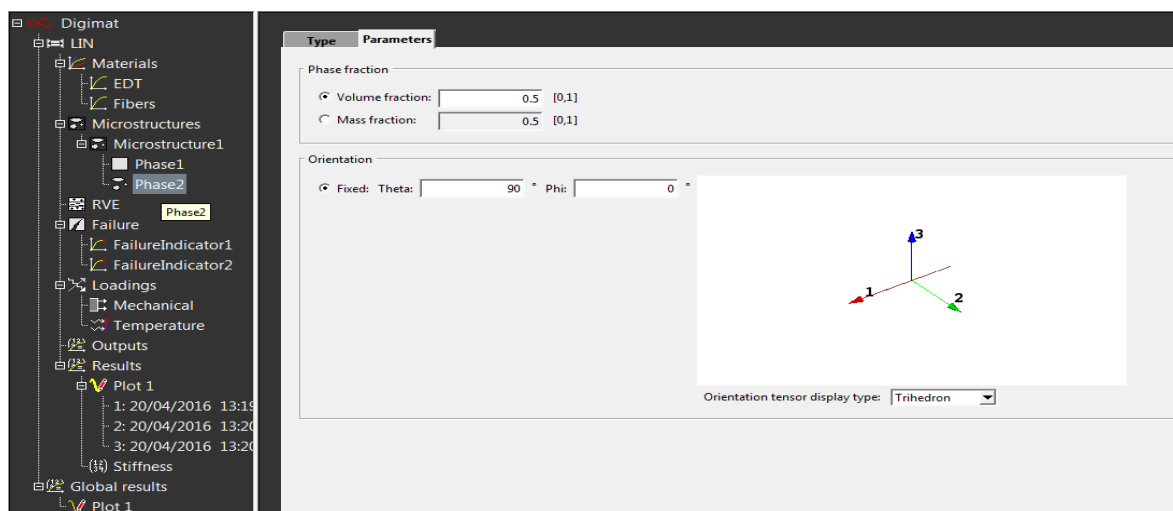


Рисунок 3. Задание ориентации в «DIGIMAT».

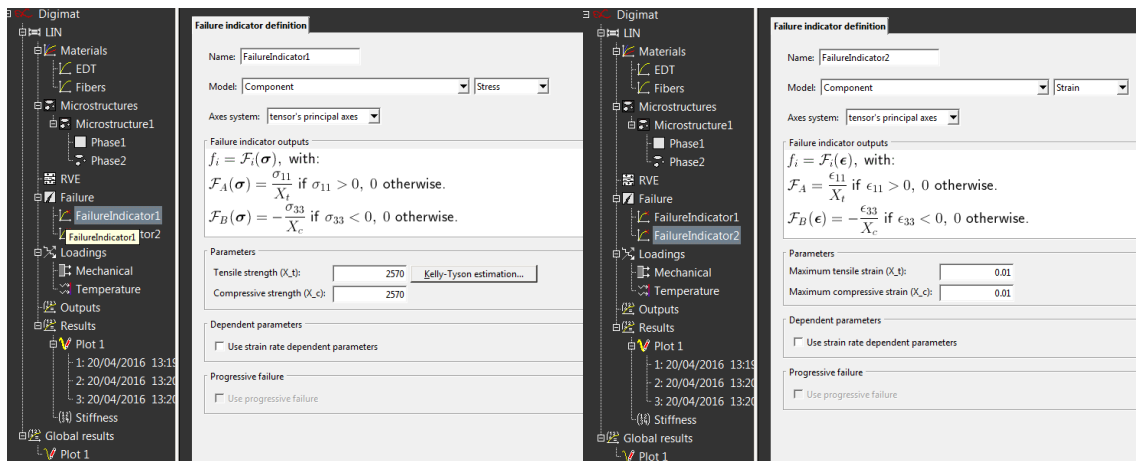


Рисунок 4. Задание параметров прочности для каждой из части структуры «DIGIMAT».

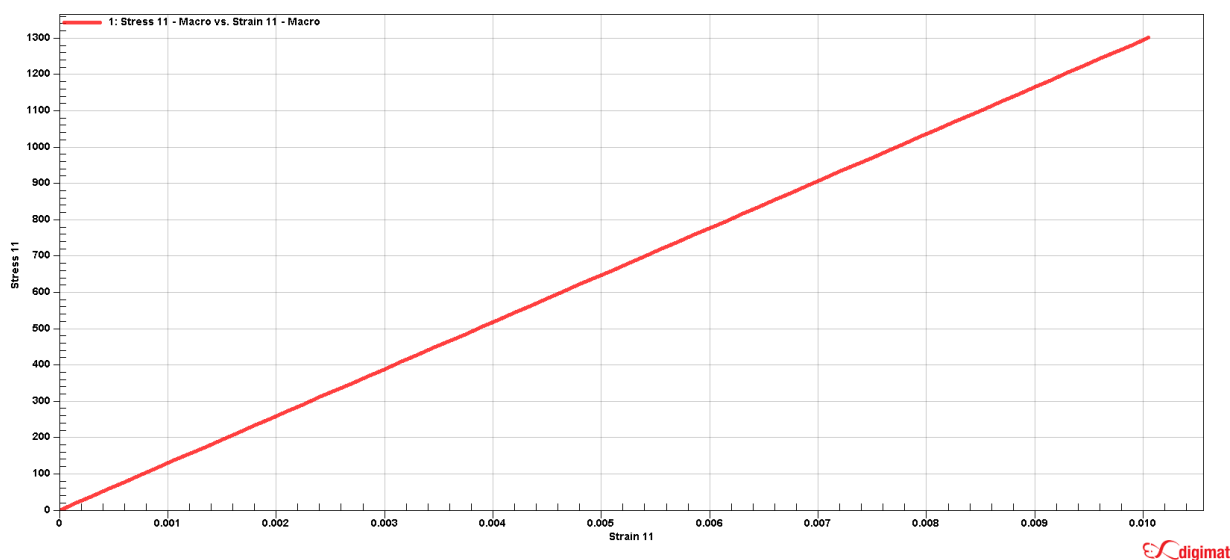


Рисунок 5. Диаграмма σ – ϵ образца с укладкой типа $[0^0]_s$ (в «DIGIMAT»).

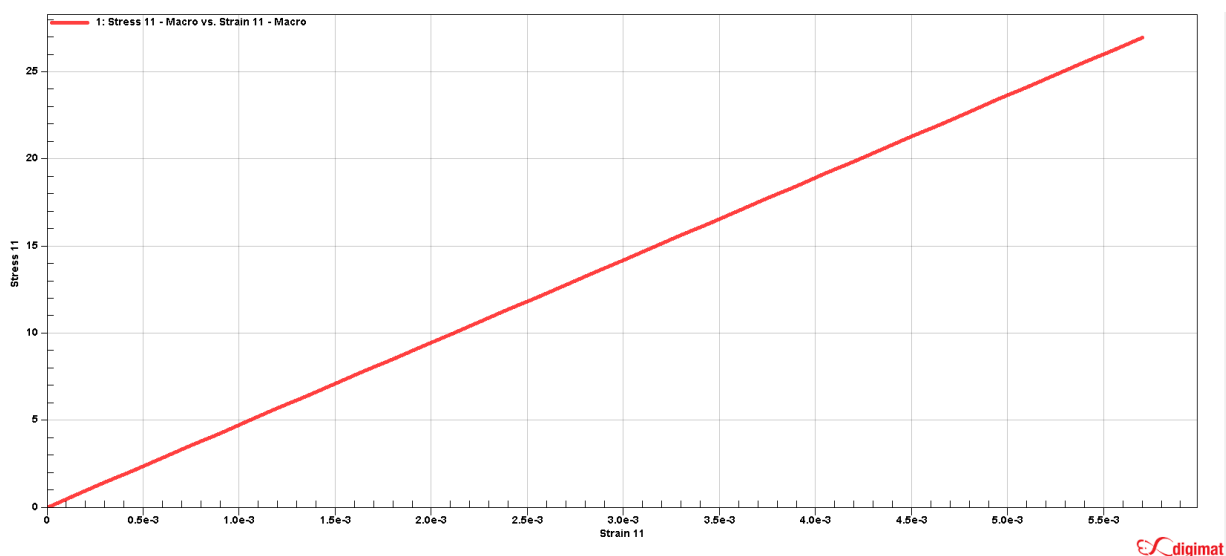


Рисунок 6. Диаграмма σ – ϵ образца с укладкой типа $[90^0]_s$ (в «DIGIMAT»)

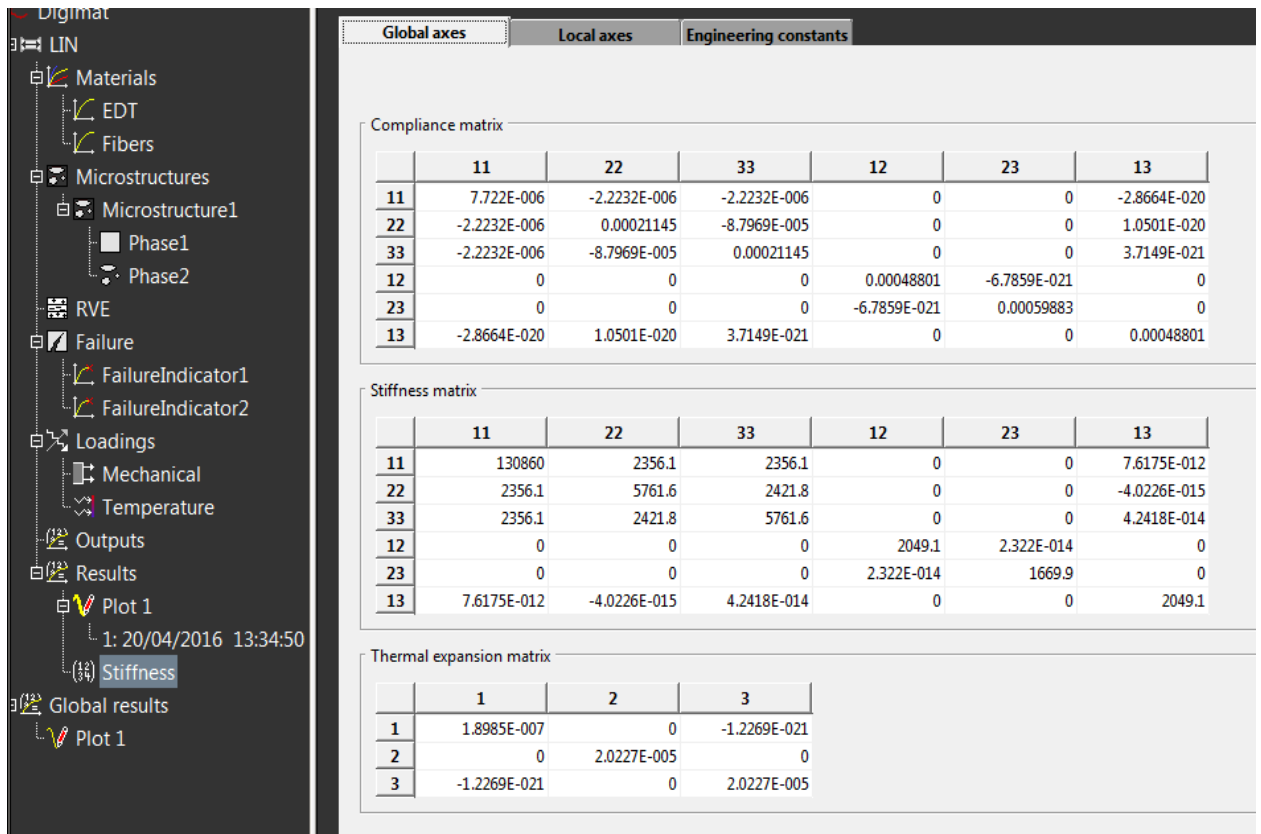
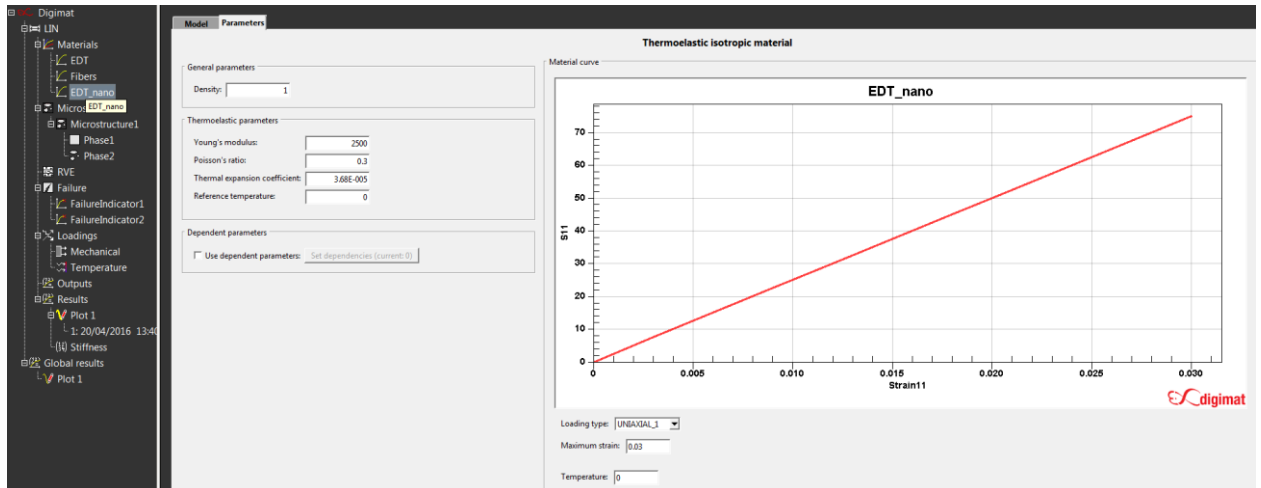


Рисунок 7. Матрица жесткостей из Digimat.

Engineering constants	
	Value
Axial Young's modulus	129500
In-plane Young's modulus	4729.3
In-plane Poisson's ratio	0.41603
Transverse Poisson's ratio	0.28791
In-plane shear modulus	1669.9
Transverse shear modulus	2049.1
Global density	1

Рисунок 8. Механические свойства из Digimat.

Для структуры с нано:



Failure indicator definition

Name:

Model:

Axes system:

Failure indicator outputs

$$f_i = \mathcal{F}_i(\epsilon), \text{ with:}$$

$$\mathcal{F}_A = \frac{\epsilon_{11}}{X_t} \text{ if } \epsilon_{11} > 0, 0 \text{ otherwise.}$$

$$\mathcal{F}_B(\epsilon) = -\frac{\epsilon_{33}}{X_c} \text{ if } \epsilon_{33} < 0, 0 \text{ otherwise.}$$

Parameters

Maximum tensile strain (X_t):

Maximum compressive strain (X_c):

Engineering constants

	Value
Axial Young's modulus	129750
In-plane Young's modulus	5712.9
In-plane Poisson's ratio	0.41862
Transverse Poisson's ratio	0.28795
In-plane shear modulus	2013.5
Transverse shear modulus	2493
Global density	1

Рисунок 9. Задание свойств в «DIGIMAT» для структуры с нано.

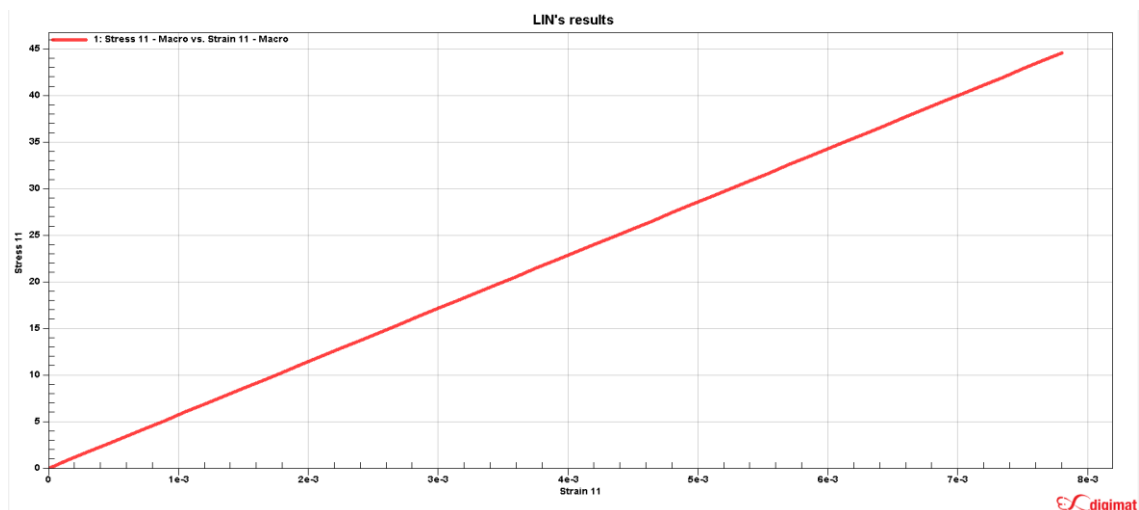


Рисунок 10. Диаграмма σ – ε образцас укладкой типа $[90_0]_s$ с нано (в «DIGIMAT»).

Compliance matrix						
	11	22	33	12	23	13
11	7.7071E-006	-2.2193E-006	-2.2193E-006	0	0	-2.3347E-020
22	-2.2193E-006	0.00017504	-7.3277E-005	0	0	8.7021E-021
33	-2.2193E-006	-7.3277E-005	0.00017504	0	0	2.8539E-021
12	0	0	0	0.00040113	-5.8482E-021	0
23	0	0	0	-5.8482E-021	0.00049664	0
13	-2.3347E-020	8.7021E-021	2.8539E-021	0	0	0.00040113

Stiffness matrix						
	11	22	33	12	23	13
11	131400	2865.5	2865.5	0	0	7.5652E-012
22	2865.5	6989.3	2962.2	0	0	-5.9201E-015
33	2865.5	2962.2	6989.3	0	0	5.2791E-014
12	0	0	0	2493	2.9356E-014	0
23	0	0	0	2.9356E-014	2013.5	0
13	7.5652E-012	-5.9201E-015	5.2791E-014	0	0	2493

Thermal expansion matrix			
	1	2	3
1	2.616E-007	0	-1.2268E-021
2	0	2.0296E-005	0
3	-1.2268E-021	0	2.0296E-005

Рисунок 11. Матрица жесткостей с нано из Digimat.

Таблица 1. Получаемые свойства монослоя.

		E11 [МПа]	$\nu_{12}=\nu_{13}$	G12 [МПа]	G23 [МПа]	E22 [МПа]	$\nu_{23}=\nu_{32}$	α_1 [10^{-6} K^{-1}]	α_2, α_3 [10^{-6} K^{-1}]
1	Углепластик	129960	0.593	2658	2214	7056	0,335	0.7	42
	Наномодифицированный углепластик	135130	0.567	8225	6085	19078	0.339	3.4	44
2	Углепластик	129510	0.596	1917	1632	5211	0.334	0.46	42
	Наномодифицированный углепластик	129760	0.594	2337	1965	6266	0.335	0.6	42
3	Углепластик	129500	0.29	2050	1670	4730	0.42	0.19	20
	Наномодифицированный углепластик	129750	0.29	2500	2010	5700	0.42	0.26	20
4	Углепластик	129500	0.29	2050	1670	4730	0.42	-10.4	20
	Наномодифицированный углепластик	129750	0.29	2500	2010	5700	0.42	-12	20

Для третьего варианта КТР взяты из расчета, а для четвертого – из эксперимента для однонаправленного образца. Далее необходимо уточнить свойства наномодифицированной матрицы.

Идентификация свойств наномодифицированной матрицы

В экспериментах было определено свойства матрицы:

Модуль упругости: 2 ГПа

Предел прочности: 20 МПа

Предельные деформации: 0,01

КТР (25-50 °C): $36.8 \cdot 10^{-6} \text{ C}^{-1}$

КТР (50-60 °С): $64.72 \cdot 10^{-6} \text{ C}^{-1}$

Плотность: $1,2 \text{ г/см}^3$

Из справочных данных берем значение коэффициента Пуассона для эпоксидной смолы: 0,2.

В экспериментах было определено свойства наномодифицированной матрицы:

Модуль упругости: 2,5 ГПа

Предел прочности: 30 МПа

Предельные деформации: 0,013

КТР (25-50 °С): $46 \cdot 10^{-6} \text{ C}^{-1}$

КТР (50-60 °С): $70 \cdot 10^{-6} \text{ C}^{-1}$

Используем модель сферических включений для моделирования свойств наполненной матрицы. Предположив, что армирующие частицы фуллереновой сажи – сферы. Считаем, что частицы абсолютно твердые и не разрушаются (оценка сверху). Объемное содержание 0,6%. Используем модуль Digimat - MF, метод осреднения – Мори - Танака. Критерий прочности – по максимальным главным напряжениям, действующим в матрице.

Если задавать исходное объемное содержание (0,6%) модель прогнозирует, что свойства матрицы не изменятся, так как включений слишком мало. Необходимо учитывать влияние межфазного слоя. Для этого проведем расчет с заданием эффективного объемного содержания (объемное содержание наполнителя + объемное содержание межфазного слоя, в предположении, что их свойства равны). Подберем эффективное объемное содержание, которое позволяет описать полученные экспериментальные данные в отношении модуля упругости и предела прочности.

Если подбираем по пределу прочности, то эффективное объемное содержание включений должно составлять 50%, и модуль композита по расчету должен быть 6 ГПа.

Если подбираем по модулю, то эффективное объемное содержание включений должно составлять 11%, и предел прочности композита по расчету должен быть 23 МПа.

Чтобы описать эксперимент, можем предположить, что эффективное объемное содержание включений составляет 11% (получаем совпадение расчета и эксперимента по модулю), и прочность матрицы повышается, при добавлении наполнителя до 30 МПа (получаем совпадение расчета и эксперимента по прочности).

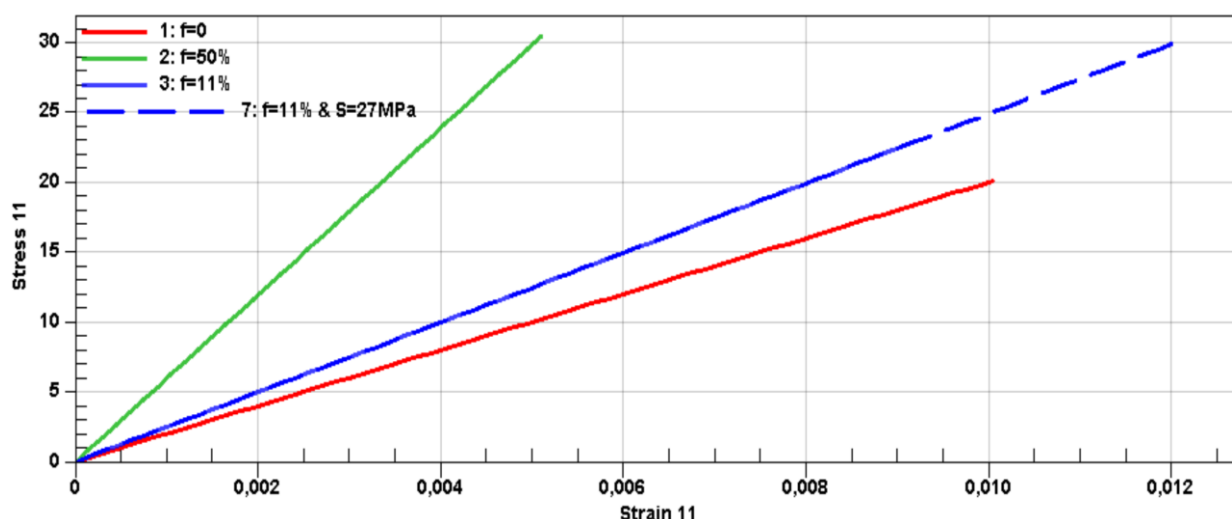


Рисунок 12. Диаграмма σ – ε образцов с различным объемным содержанием включений (в «DIGIMAT- MF»), (зеленый-50%, синий-11%, красный-0%).

Для найденного объемного содержания включений, подбором определим, какое должно быть объемное содержание включений, чтобы расчет и эксперимент по измерению КТР композита совпадали. Для 11%, получаем, что КТР наполнителя (и окружающего его межфазного слоя) должен составлять $85 \cdot 10^{-6} \text{ C}^{-1}$. Полученное высокое значение КТР наполнителя и экспериментально установленное явление повышение КТР композитов с наномодифицированной матрицей может быть связано с изменением

структуры полимерной матрицы или может быть следствием протекающих химических реакций между наполнителем и матрицей.

Исходными данными для моделирования процесса деградации механических свойств испытуемых образцов являются характеристики монослоя. В испытании используем волокно маркой НТА-40 и матрицу маркой ЭДТ-10, свойства которых приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 2. Свойства волокна НТА-40.

Характеристики	Единица	Значение
E_1	<i>МПа</i>	257000
E_2	<i>МПа</i>	24000
G_{12}	<i>МПа</i>	16000
μ_{21}	----	0,279
μ_{23}	----	0,49
$\alpha \cdot 10^{-6}$	$^{\circ}\text{C}^{-1}$	-0,1
ρ	$\text{г}/\text{см}^2$	1,7
σ_b	<i>МПа</i>	1200

Таблица 3. Свойства матрицы ЭДТ-10.

Характеристики	Единица	Значение
E	<i>МПа</i>	2900
μ	----	0,2

Задача определения свойств монослоя, основанного на свойствах волокна НТА-40 и матрицы ЭДТ-10, решается с помощью программы «DIGIMAT». «DIGIMAT» предназначен для быстрого и высокоточного прогноза нелинейного поведения многокомпонентных материалов, таких как пластмассы, полимеры, угле- и стеклопластики, наноматериалы и т.д., для

точной оценки локального и глобального поведения многокомпонентных структур с помощью метода конечных элементов, для подготовки, хранения и конфиденциального обмена моделями материалов, для лёгкого и высокоэффективного проектирования сотовых сэндвич-панелей. Также «DIGIMAT» представляет пользователю ряд интерфейсов для конечно-элементных программных систем компьютерного инжиниринга («ANSYS», «LS-DYNA», «SIMULIA/Abaqus» и др.), предназначенных для компьютерного моделирования и исследования проблем механики деформируемого твердого тела, механики конструкций и программных систем конечно-элементного моделирования процессов литья пластмасс («MOLDEX3D», «MOLDFLOW» и др.).

Этапы моделирования в «DIGIMAT-MF»:

- Зададим свойства волокна (рис.13), которые приведены в табл. 2

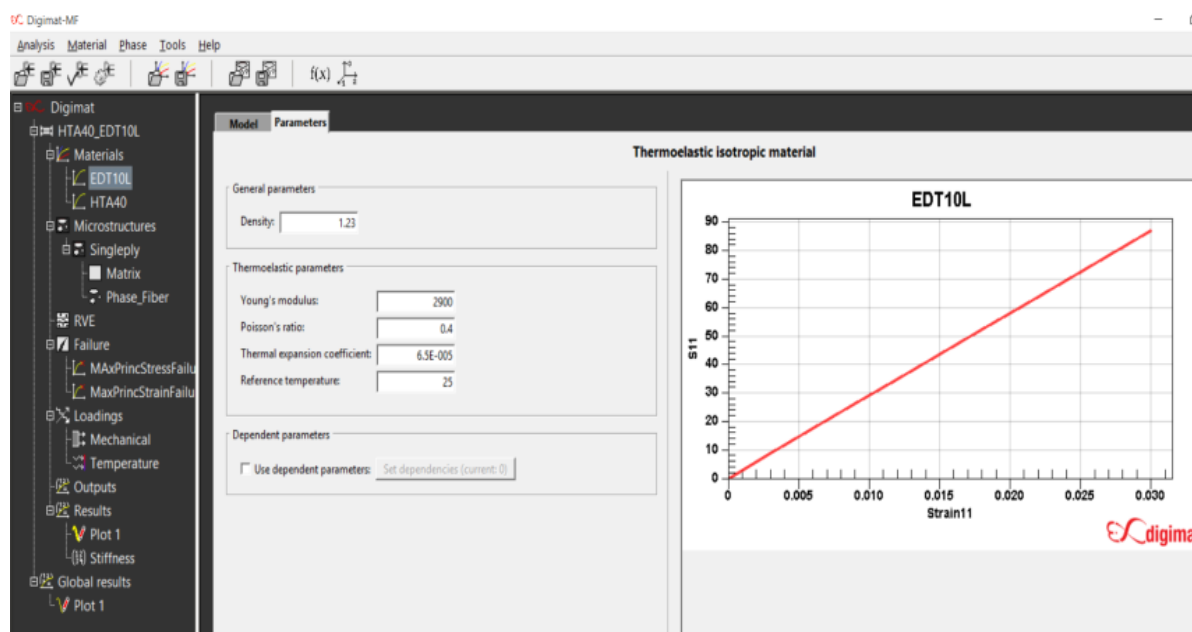


Рисунок.13. Задание свойств волокна в «DIGIMAT MF».

- Зададим свойства матрицы (рис.14), которые приведены в табл. 3

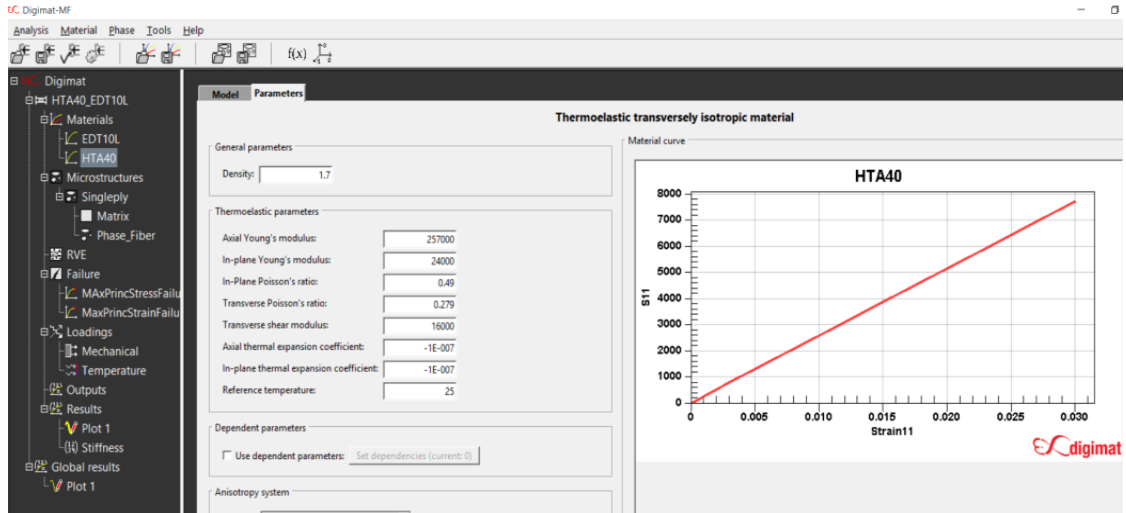


Рисунок.14. Задание свойств матрицы в «DIGIMAT MF».

- Создать пакет из четырех слоев типа $[0^{\circ}, 90^{\circ}]_s$.
- Реализуем программу.
- Выводим результат моделирования

На рис.15 показаны диаграммы σ - ϵ , полученные в результате КЭ анализа в связке с «DIGIMAT». Были приведены 2 анализа: однонаправленный образец и образец с продольно-поперечной укладкой типа $[0^{\circ}, 90^{\circ}]_s$. Эти диаграммы точно совпадали с диаграммами, которые получили при проведении испытания этих двух типов образцов (рис.10 и табл. 4).

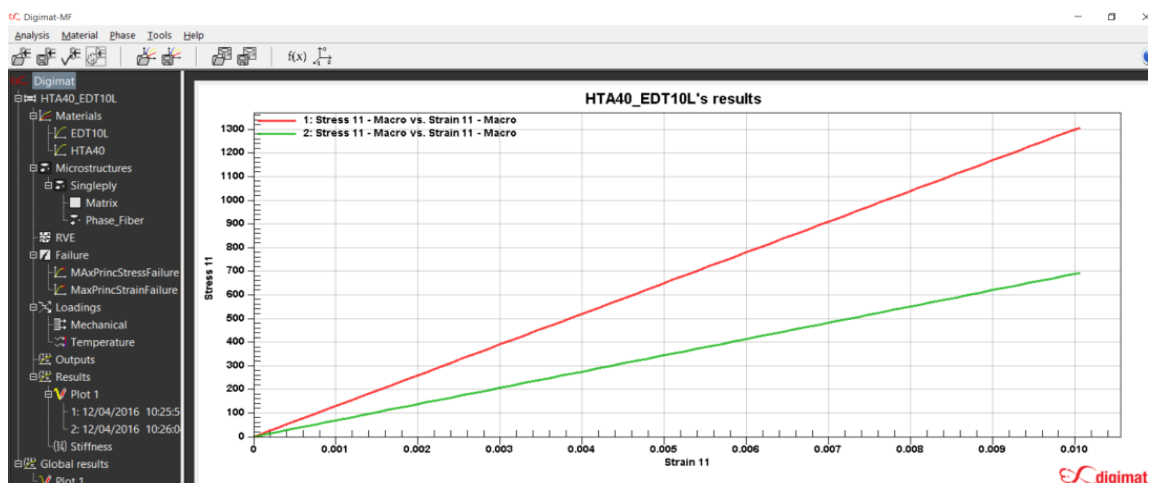


Рисунок.15. Диаграмма σ – ε однонаправленного образца и образца с укладкой типа $[0^\circ,90^\circ]_s$ (в «DIGIMAT MF»).

По результатам моделирования свойств получим матрицу жесткостей пакета $[0^\circ,90^\circ]_s$, которые представляют в табл. 4.

Таблица 4. Найденная матрица жесткостей из Digimat.

C11=133980	C12=5993.5	C13=5993.5	-	-	-
C21=5993.5	C22=11153	C23=6723.9	-	-	-
C31=5993.5	C32=6723.9	C33=11153	-	-	-
-	-	-	C44=2658	-	-
-	-	-	-	C55=2214.7	-
-	-	-	-	-	C66=2658

Найдем средний модуль по формуле:

$$E_{11} = C_{11} - \frac{2C_{12}^2}{C_{22} + C_{23}} = 133979$$

Полученное значение среднего модуля Юнга пакета отличается от испытания. Известно, что при использовании данных испытаний для однонаправленного материала в расчете свойств слоистого пакета могут возникать погрешности, поэтому обычно необходимо использовать данные о жесткости нескольких вариантов пакетов с различными укладками слоев (см.например [39]). Если используют значения модулей, то не удаются описать данные испытания. В данной работе для свойств монослоя будем использовать завышенное значение поперечного модуля, равное 28 ГПа, которое больше экспериментальных данных, полученных на однонаправленных образцах (6,5 ГПа). В этом случае удастся достоверно описать полученные экспериментальные данные по модулю Юнга образцов композита с симметричной укладкой $[0^\circ,90^\circ]_s$.

В итоге моделирования получим свойства монослоя, которые представляются в табл. 5.

Таблица 5. Свойства монослоя.

Характеристики	Единица	Значение
E_1	<i>МПа</i>	129960
E_2	<i>МПа</i>	7056
G_{12}	<i>МПа</i>	2658
μ_{12}	-----	0.59
α_1	$^{\circ}C^{-1}$	$0,746 \cdot 10^{-6}$
α_2	$^{\circ}C^{-1}$	$42 \cdot 10^{-6}$
$[\sigma_2]$	<i>МПа</i>	32
$[\tau]$	<i>МПа</i>	30

Таблица 6. Свойства монослоя.

		E11 [МПа]	$\nu_{12} =$ ν_{13}	G12 [МПа]	G23 [МПа]	E22 [МПа]	$\nu_{21} =$ ν_{31}	$\nu_{23} =$ ν_{32}	α_1 [K ⁻¹]	α_2, α_3 [K ⁻¹]
1	Углепластик	129960	0.593	2658	2214	7056	0.032	0,335	7.0469 E-007	4.2005 E-005
	Наномодифицированный углепластик	135130	0.567	8225	6085	19078	0.25	0.339	3.3877 E-006	4.4171 E-005
2	Углепластик	129510	0.596	1917	1632	5211	0.067	0.334	4.5723 E-007	4.1798 E-005
	Наномодифицированный углепластик	129760	0.594	2337	1965	6266	0.081	0.335	5.9496 E-007	41914 E-005

Таблица 7. Свойства КМ.

	Модуль Упругости (ГПа)	Предел прочности [МПа]	Предельные Деформации (%)	Прочность при короткая балака	КТР (*10 ⁶)
матрица	2(17)	20.4(22)		-	
	2.5(7)	30.18(14.2)		-	
0	119 (3.4)	1252 (7)	0,0092(10.3)	50.61(0.6)	129,81 (1307,7)
0-90	72(4)	723(5.3)	0,0097(7.3)	49.32(1.01)	
90	7,3(4)	52(7)	0,007(16)		
+45	10(11.03)	70(18)	0,0065(36)	48.71(1.82)	
0 нано	135(8.3)	1 482(10.4)	0,0105(3.5)	42.36(2)	135,13 (1482,3)
0-90 нано	66(4.5)	580 (8.82)	0,0086(10)		
90 нано	6,3(6)	44(28.06)	0,0067(25)		
+45 нано	12(7.2)	143(4)	0,0272(12)		

Таблица 8. Свойства матрицы ЭДТ-10

Характеристики	Единица	Значение
E	ГПа	2900
μ	-	0,4
ε		3.6. 0.02

Таблица 9. Свойства матрицы ЭДТ-10 с фуллереновой сажой

Характеристики	Единица	Значение
E	ГПа	13150
μ	-	0,4
ε		0.02

Таблица 10. Свойства волокна НТА-40.

Характеристики	Единица	Значение
E_1	МПа	257000
E_2	МПа	24000
G_{12}	МПа	16000
μ_{21}	-	0,279
μ_{23}	-	0,49
$\alpha \cdot 10^{-6}$	$^{\circ}\text{C}^{-1}$	-0,1
ρ	г/см ³	1,7
σ_B	МПа	2570

Таблица 11. Сравнение результатов эксперимента и Digimat.

	Эксперимент		Расчет из Digimat	
	Модуль <i>ГПа</i>	Предельная прочность <i>МПа</i>	Модуль <i>ГПа</i>	Предельная прочность <i>МПа</i>
0	129,81	1307,69	129.9	1306.9
90	7,28	52,33	7.15	65.6
0-90	72,22	764,47	68.86	697.4
+45	9,63	117,73	9.8	117.02
0 нано	135.13	1482.30	135.13	1467.23
90 нано	6.26	43.59	6.26	43.25
0-90 нано	65.95	579.56	69.19	578.64
+45 нано	11.88	142.72	11.93	142.16

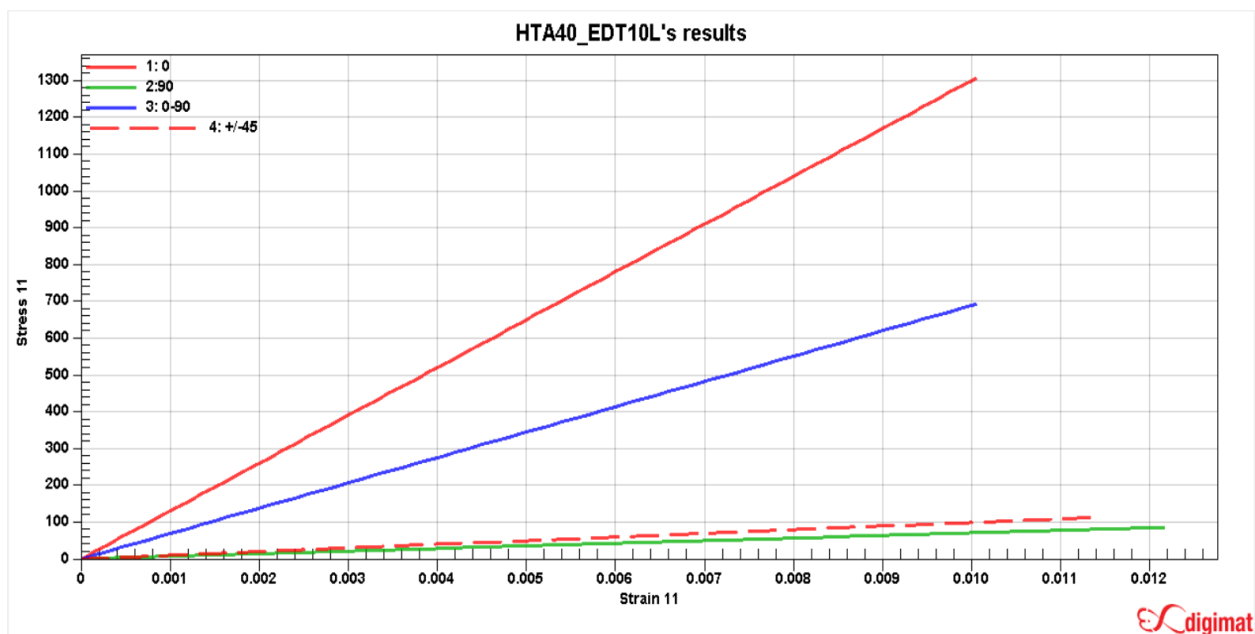


Рисунок.16. Диаграмма σ – ε образцов с различной укладкой (в «DIGIMAT MF»).

Таблица 12. Матрицы жесткости.

C11=133980	C12=5993.5	C13=5993.5			
C21=5993.5	C22=11153	C23=6723.9			
C31=5993.5	C32=6723.9	C33=11153			
			C44=2658		
				C55=2214.7	
					C66=2658

Где пять констант C_{11} , C_{12} , C_{22} , C_{23} и C_{66} – обозначают пять независимых эффективных свойств среды.

Величина E_{11} , определяемая непосредственно из эксперимента.

Изменение поперечных размеров образца при одноосном нагружении используется для определения коэффициентов Пуассона через отношения

$$\nu_{12} = \frac{-\varepsilon_{22}}{\varepsilon_{11}} \quad \text{и} \quad \nu_{13} = \frac{-\varepsilon_{33}}{\varepsilon_{11}}$$

где в обозначении ν_{ij} принято, что первый индекс i относится к направлению приложения напряжения (деформации), а второй $j - k$ направлению вызванной им поперечной деформации.

Из ранее полученного следует, что при одноосном нагружении в направлении 1:

$$\nu_{12} = \nu_{13} = \frac{C_{12}}{C_{22} + C_{23}}$$

Рассматривая состояние, когда $\varepsilon_{11} = 0$, $\varepsilon_{22} = \varepsilon_{33} = E$. С учетом $\sigma_{22} = \sigma_{33} = \sigma$, тогда мы можем определить, что $\sigma = 2K_{23}\varepsilon$ где

$$K_{23} = \frac{1}{2}(C_{22} + C_{23}).$$

Величина K_{23} называется объемным модулем упругости при плоском деформированном состоянии.

Тогда, модули сдвига, которые можно измерить непосредственно, выражаются следующим образом:

$$\mu_{12} = \mu_{31} = C_{66},$$

$$\mu_{23} = \frac{1}{2}(C_{22} - C_{23}).$$

Полученные соотношения можно преобразовать:

$$C_{11} = E_{11} + 4\nu_{12}^2 K_{23},$$

$$C_{12} = 2K_{23}\nu_{12},$$

$$C_{22} = \mu_{23} + K_{23},$$

$$C_{23} = -\mu_{23} + K_{23},$$

$$C_{66} = \mu_{12},$$

С учетом полученного получаем:

$$E_{11} = C_{11} - \frac{2C_{12}^2}{C_{22} + C_{23}} = 133979$$

$$\mu_{12} = 0.59, \quad \mu_{21} = \frac{E_2}{E_1} \mu_{12} = 0.032, \quad G_{xy} = \mu_{12} = C_{66} = 2658 \quad [49]$$

Таблица 13. Свойства матрицы ЭДТ-10

Характеристики	Единица	Значение
E	ГПа	2000
μ	-	0,4
ε		3.7. 20.4/2000=(0.0102)
		3.8.

Таблица 14. Свойства матрицы ЭДТ-10 с фуллереновой сажой

Характеристики	Единица	Значение
E	ГПа	2500
μ	-	0,4
ε		30.18/2500=(0.012072)

Таблица 15. Сравнение результатов эксперимента и Digimat.

	Эксперимент		Расчет из Digimat	
	Модуль <i>ГПа</i>	Пределная прочность, <i>МПа</i>	Модуль <i>ГПа</i>	Пределная прочность, <i>МПа</i>
0	129,81	1307,69	129.51	1301.9
90	7,28	52,33	5.2	31.43
0-90	72,22	764,47	67.63	407.95
+45	9,63	117,73	7.27	41.85
0 нано	135.13	1482.30	129.76	1311.102
90 нано	6.26	43.59	6.26	45.36
0-90 нано	65.95	579.56	68.32	493.46
+45 нано	11.88	142.72	8.76	60.81

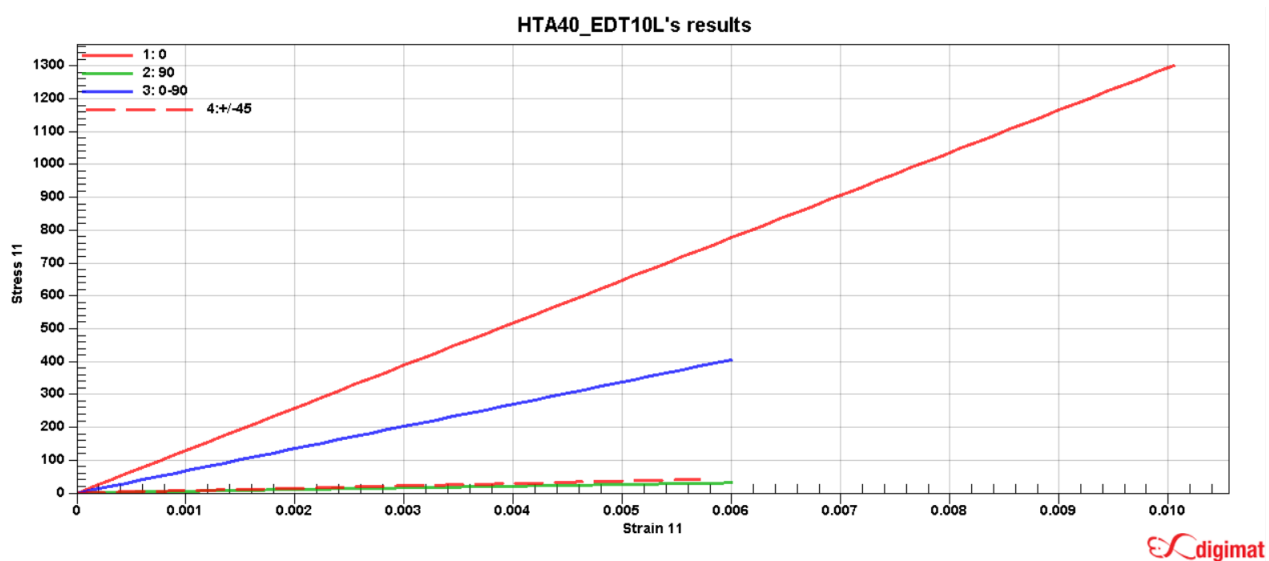


Рисунок.17. Диаграмма σ – ε образцов с различной укладкой (в «DIGIMAT MF»).

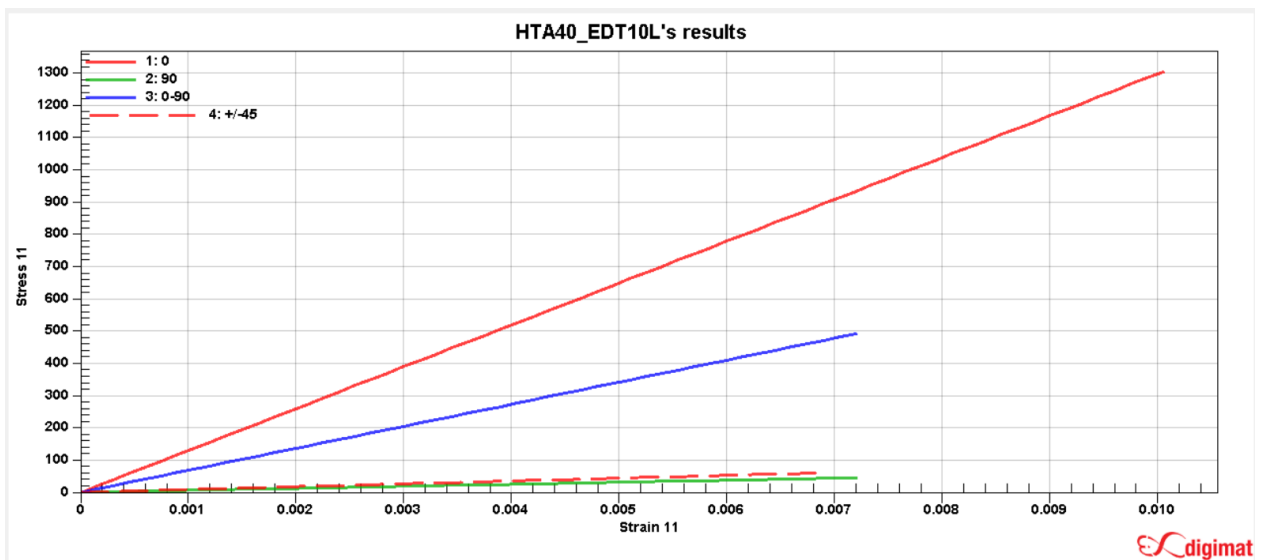


Рисунок.18. Диаграмма σ – ε образцов с различной укладкой (в «DIGIMAT MF»).

Приложение 2. Процесс изготовления КМ.

Технология ручной укладки, также называемой мокрой укладкой, является самым простым и наиболее широко используемым производственным процессом. Процесс состоит из укладки слоев углепластика в последовательную укладку с использованием матрицы эпоксидной смолы. Мокрая укладка - это процесс формования, который объединяет слои армированного углеродного волокна с эпоксидной смолой для создания высококачественного ламината. Перед началом процесса укладки необходимо подготовить соответствующую форму или стол, рис. 19. Эта подготовка состоит из очистки стола и нанесения антиадгезива на поверхность. Процесс ручной укладки можно разделить на четыре основных этапа: подготовка формы, покрытие эпоксидной смолой, укладка и отверждение. Подготовка формы является одним из наиболее важных этапов процесса укладки. Этот процесс требует сухих армирующих слоев и нанесения мокрой эпоксидной смолы – матрицы. Они соединяются совместно – углеродное волокно (армирующий) материал, пропитывается матрицей – эпоксидной смолой. Этапы процесса формования:

- Планирование и проектирование - тип волокна, вес, ориентация и количество слоев, система смолы и планирование проекта от начала до конца.
- Укладка - на этом этапе армирующие слои помещаются в форму, чтобы сформировать желаемую конечную форму композита с соответствующей ориентацией волокна.
- Отверждение – после укладки происходит процесс отверждения.
- Удаление из формы - на этом этапе отвержденная часть удаляется из формы.

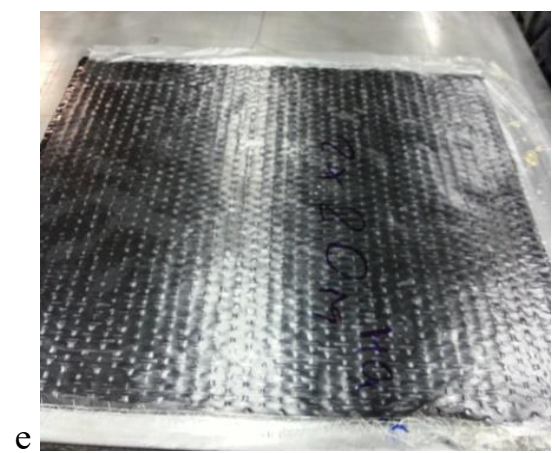
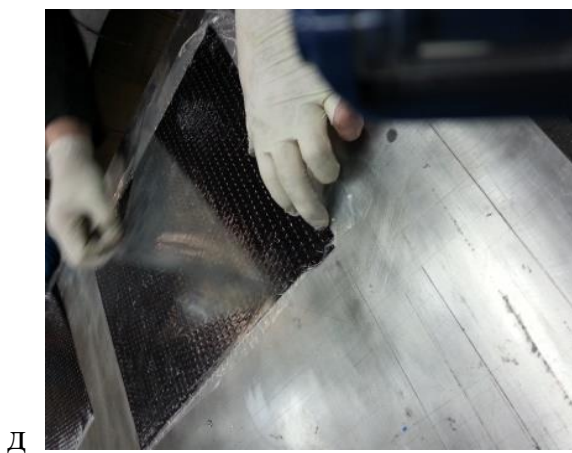
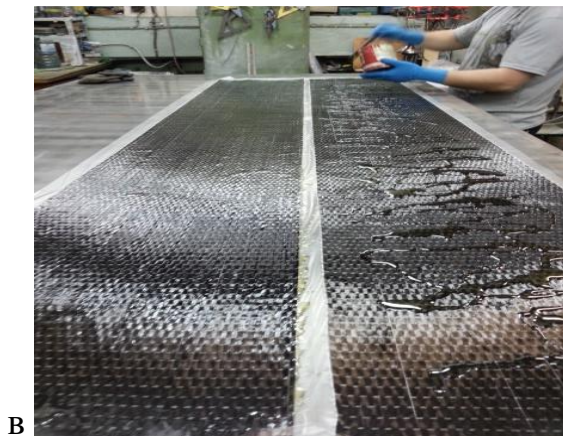
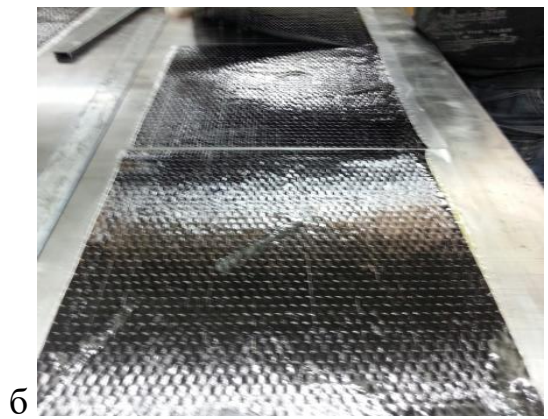
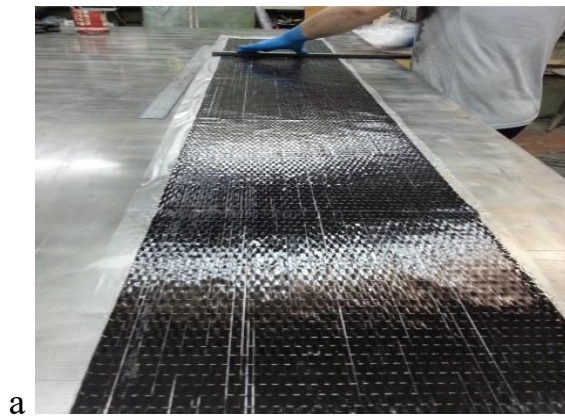
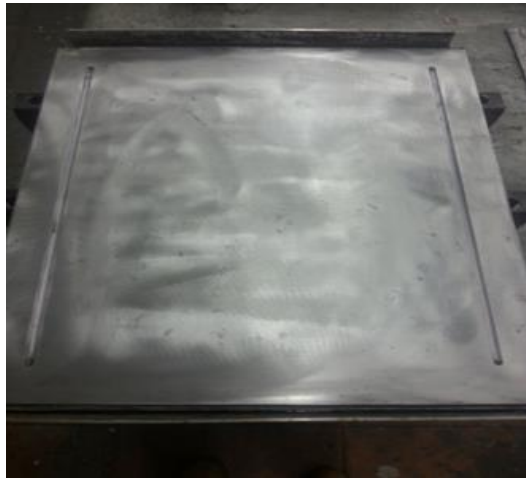


Рисунок 19. Подготовка процессов формования и укладки (а), измерение листа углепластика (б), вырезание листа углепластика (в), покрытие эпоксидной смолой (г), ручная укладка (д), нанесение покрытия на лист углепластика (е).



а



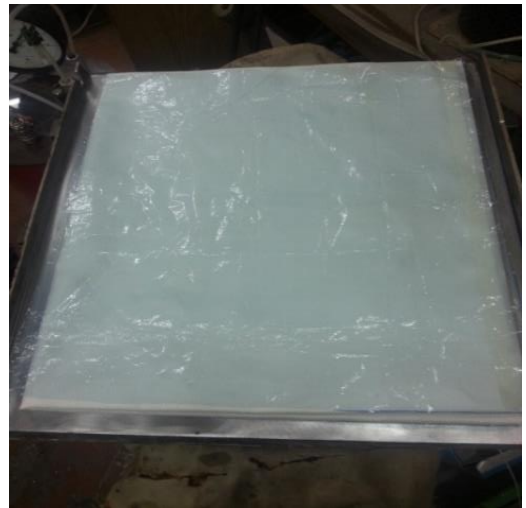
б



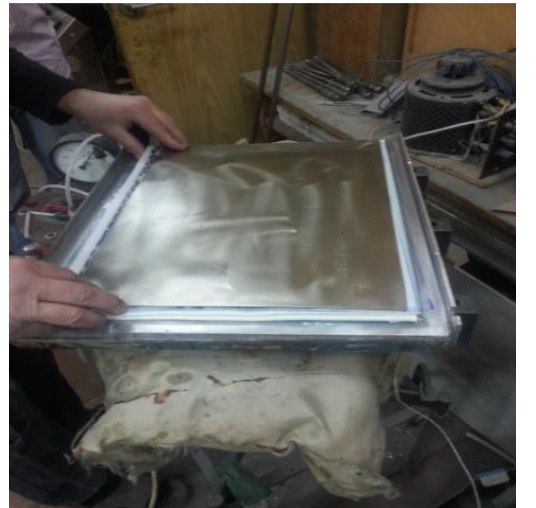
в



г



д



е



ё



ж

Рисунок 20. Ламинат в вакуумном мешке, подготовленный для отверждения и процесс вакуумной упаковки.



а



б



в

Рисунок 21. а) Вакуумный мешок с манометром, б) Прибор для измерения давления, в) Термометр.

Ламинат с использованием однонаправленных слоев, обозначения укладки представлены на рис.22.

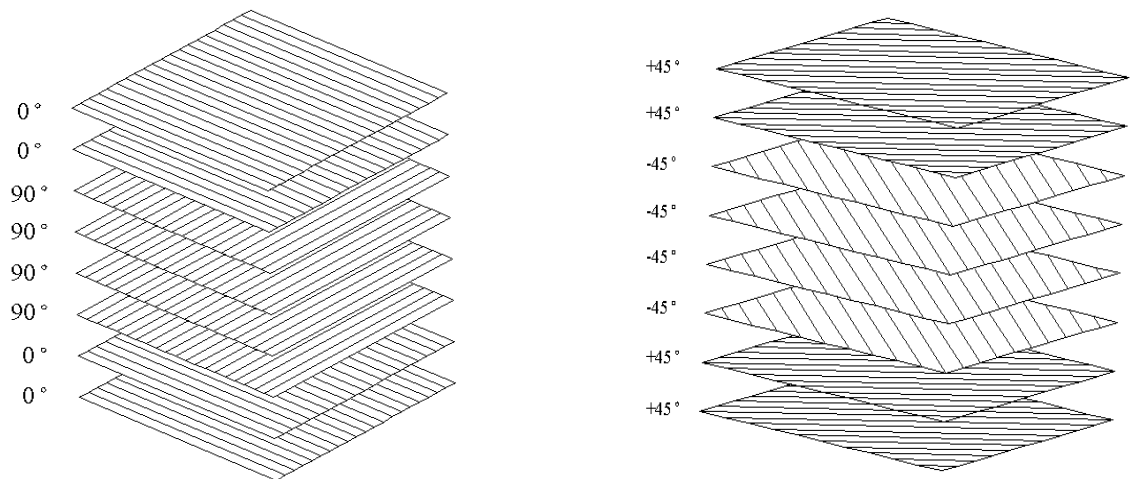


Рисунок 22. Последовательность укладки слоев