

*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

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2019 г.

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

Научный руководитель

– доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Соппротивление материалов, динамика и прочность машин»  
**Рабинский Лев Наумович.**

Официальные оппоненты:

**Москвитин Геннадий Викторович** – доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией надежности и долговечности при термомеханических циклических воздействиях «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН)»;

**Нуштаев Дмитрий Владимирович** – кандидат технических наук, менеджер по моделированию клиентских процессов дирекции по техническому развитию и качеству АО «Северсталь Менеджмент»

Ведущая организация:

**ФГБУН «Институт прикладной механики Российской академии наук»**

Защита диссертации состоится 18 декабря 2019 г. в 16:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.05 при ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4. и на сайте: [https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT\\_ID=108347](https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=108347)

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.125.05

Федотенков Григорий Валерьевич

## Общая характеристика работы

**Актуальность работы.** В настоящее время полимерные композитные материалы (ПКМ) широко используют в различных современных отраслях промышленности: в конструкциях авиационной и космической технике, машиностроении и др. Использование композитов во всем мире быстро увеличивается, потому что они имеют значительные преимущества перед традиционными материалами. 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. 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 ПКМ. В этой области достигнуты значительные успехи. При создании нанокомпозитов ключевыми задачами является разработка эффективных, надежных и доступных в массовом производстве, позволяющих получать материалы со стабильными характеристиками.

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 на остаточное НДС эффективных термомеханических характеристик панелей из слоистых композитов с наномодифицированной матрицей. Поставленная цель достигается на основании решения следующих задач:

- исследование возможностей улучшения механических свойств углепластика;
- разработка математических моделей из углепластика для исследования влияния физико-механических свойств ПКМ на остаточное НДС панелей;
- изучение влияния наномодификации углепластика на остаточное НДС панелей;
- верификация теоретических и экспериментальных исследований на остаточное НДС слоистых углепластиков.

**Методы исследования.** Экспериментальные исследования механических свойств углепластика на растяжение проводились на основе ГОСТ 25.601-80 «Методы механических испытаний композиционных

материалов в полимерной матрице (композитов) и 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 5969 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 работы заключается в следующем:

1. Разработаны теоретические и экспериментальные методы исследования эффективных термомеханических характеристик остаточного НДС панелей из слоистых наномодифицированных материалов.

2. Модернизированы методы изготовления образцов для механических испытаний наномодифицированного углепластика.

3. Исследованы механические свойства монослоя в образцах углепластика, изготовленного с применением эпоксидной матрицы, содержащей фуллеренов сажу.

4. Разработаны методы создания углепластиков с высокими упруго-прочностными характеристиками, а на их основе конструкции с более эффективной весовой характеристикой.

5. Исследовано влияние наномодификации углепластика на остаточное напряженно-деформированное состояние, и с учетом этого разработана методика оценки влияния различных физико-механических факторов на остаточные напряжения и деформации.

**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 достаточной корреляцией аналитических и численных результатов с полученными в работе экспериментальными данными.

**Практическая ценность и применение результатов.** Проведенное в диссертационной работе исследование позволило:

-исследовать остаточные деформации в панелях с несимметричной схемой армирования на основе полученного аналитического решения, а также численного моделирования;

-определить три различных набора значений характеристик монослоев углепластика, изготовленного на основе обычной и наномодифицированной матрицы с учетом проведенных исследований;

-исследовать физико-механические характеристики монослоев композитов и получить решение соответствующей обратной задачи по

результатам проведенных механических испытаний композитов с различными схемами армирования;

- сопоставить результаты аналитических и численных решений с полученными экспериментальными данными, которые 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 конструкции и сплошных сред» им. А. Г. Горшкова, Т.2. 19–23 марта 2018 г., (Московская обл., 2018г.);

- XXV Международный симпозиум «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова, Т.1. 18–22 марта 2019 г., (Московская обл., 2019 г.).

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликовано 7 научных работ, в том числе 1 статья в периодическом издании, включенном в перечень ВАК РФ, 2 статьи в журналах, входящих в базу данных Scopus, 4 публикации в тезисах докладов международных конференций, семинаров и симпозиумов.

**На защиту выносятся следующие положения:**

- теоретическая и экспериментальная методика исследования остаточного НДС слоистых углепластиков с наномодифицированной матрицей;

- результаты экспериментального исследования эффективных характеристик и остаточных деформаций в наномодифицированном углепластике;

- расчет остаточных температурных напряжений в панелях из наномодифицированного углепластика и анализ полученных результатов эксперимента.

- результаты аналитического и численного моделирования остаточных деформаций в панелях с несимметричной схемой армирования в наномодифицированном углепластике.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из списка сокращений, введения, трех глав, заключения, списка использованной литературы, приложения 1 и приложения 2. Объем диссертации: 117 страниц. В диссертации 52 рисунка, 23 таблицы. Список используемой литературы включает 56 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность работы диссертации, поставлены цели и задачи исследований, определена научная новизна и теоретическая ценность диссертационной работы.

**В первой главе** приведен обзор и анализ методов исследования эффективных характеристик и остаточных деформаций в наномодифицированных композитах. Исследованы особенности изготовления и проведены механические испытания образцов из наномодифицированного углепластика. Проведена оценка коэффициентов температурного расширения.

***Метод изготовления образцов наномодифицированного углепластика.***

Таблица 1. Общее количество плит, образцов и материала.

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

Для определения остаточных деформаций изготавливаются 4 плиты, отличающиеся укладкой слоев и связующим. Две плиты выполнены из обычного связующего с укладками 0<sub>2</sub>/90<sub>4</sub>/0<sub>2</sub> и 0<sub>2</sub>/45<sub>4</sub>/0<sub>2</sub> и две плиты из модифицированного связующего с укладками 0<sub>2</sub>/90<sub>4</sub>/0<sub>2</sub> и 0<sub>2</sub>/45<sub>4</sub>/0<sub>2</sub>.

Для определения термомеханических свойств композита из плит вырезаются образцы из двух плит с укладкой 0/90 и одной плиты с укладкой 0<sub>4</sub>. Исследуются образцы с укладками 0<sub>2</sub>/90<sub>4</sub>/0<sub>2</sub>, +45<sub>2</sub>/-45<sub>4</sub>/+45<sub>2</sub>, 0<sub>4</sub>, 90<sub>4</sub>. Для каждого варианта укладки применяется обычное и модифицированное связующее. Образцы отвержденного связующего, выполнены из обычного и модифицированного связующего без использования волокон. В таблице 1 представлено общее количество плит, образцов и материала. При изготовлении плит была использована лента общей площадью 15,36 м<sup>2</sup> (с учетом количества монослоев равном 120 и площадью плиты 0,128 м<sup>2</sup>), 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.

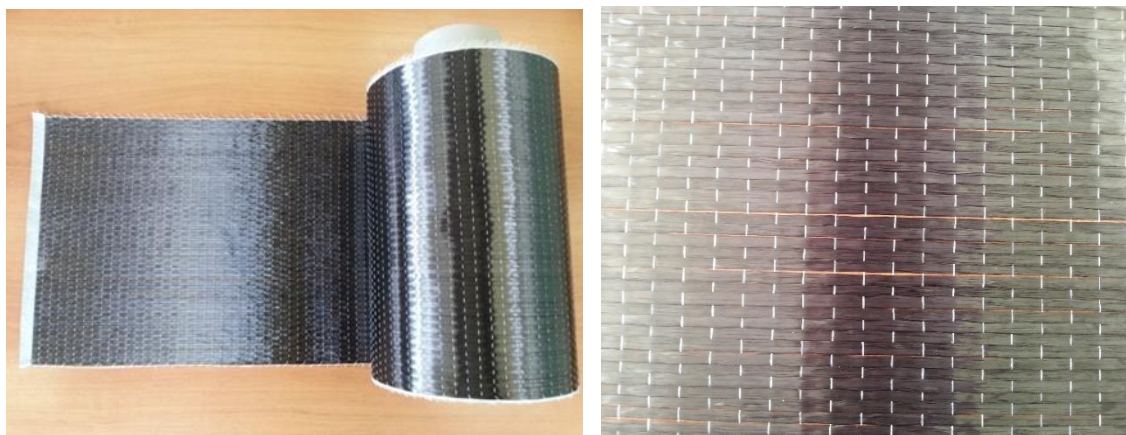


Рис. 1. углеродное волокно лента

В исследованиях использовалась фуллереновая сажа производства «Нанополимер» (Россия). Эта фуллереновая сажа содержит 10% фуллеренов C<sub>60</sub> и C<sub>70</sub> и 100% углерода, т.е. без других добавок. Плотность сажи составляет 0,3 г / см<sup>3</sup>. 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. 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. При изготовлении образцов матрица смешивалась лопастным смесителем в течение 30 минут с последующим ультразвуковым диспергированием в течение 5 минут для уменьшения агломерации. Предварительно пропитанная однонаправленная лента была использована для производства образцов из композиционных материалов на основе чистых и наномодифицированных связующих по пять образцов каждого типа. Образцы со схемой армирования 0<sub>2</sub>/90<sub>4</sub>/0<sub>2</sub>, + 45<sub>2</sub> / -45<sub>4</sub> / + 45<sub>2</sub>, 0<sub>4</sub>, 90<sub>4</sub> изготавливались вакуумным формованием. Также были изготовлены образцы из неармированных связующих с и без нанонаполнителей. Размер образцов составляет 250 × 20 мм. 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 при комнатной температуре с помощью устройства Instron 5969. Скорость испытания была 1 мм / мин. Деформация образца измерялась

бесконтактным оптическим видеоэкстензометром. Интервал (расстояние между двумя метками на образце поверхность) составляет 50 мм. Тест на определение прочности с помощью межслойного сдвига проводился на композитных образцах в соответствии со стандартом: ISO 14130: 1997.

**Механические испытания образцов наномодифицированного углепластика.** В работе исследуются механические свойства образцов путем испытания их на растяжение и изгиб. Испытания углепластика на растяжение проводились на образцах с наночастицами и без. 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 испытывались 4 - 6 однотипных образцов. 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». Для определения прочности при межслойном сдвиге испытания проводились на образцах в соответствии с ГОСТ 32659-2014. на универсальной испытательной машине Instron серии 5969 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. При испытаниях на растяжение и изгиб определялись соответствующие модули упругости и пределы прочности. Диаграммы напряжение – деформация для каждого варианта укладки представлены на рисунках 2 – 4. Результаты испытаний на растяжение для углепластика на рис. 2, а для наномодифицированного углепластика на рис. 3. Результаты испытаний на изгиб образцов с укладкой  $90_4$  с наномодифицированным углепластиком и чистым углепластиком представлен на рис. 4.

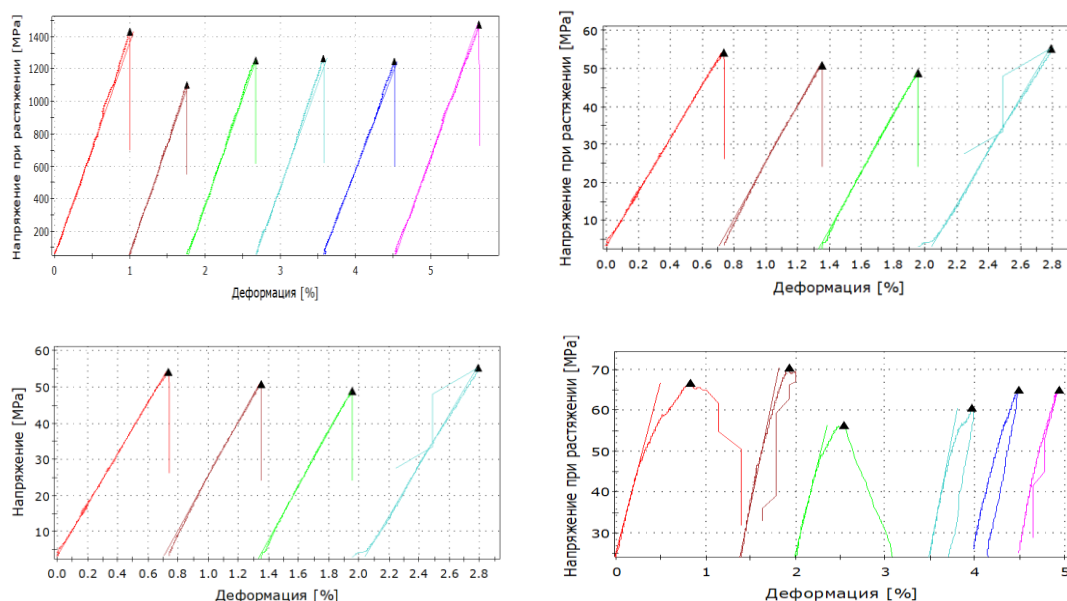


Рис 2. Диаграмма напряжение – деформация при испытании на растяжение партии  $0_4$ ,  $0_2/90_4/0_2$ ,  $90_4$ ,  $+45_2/-45_4/+45_2$ .



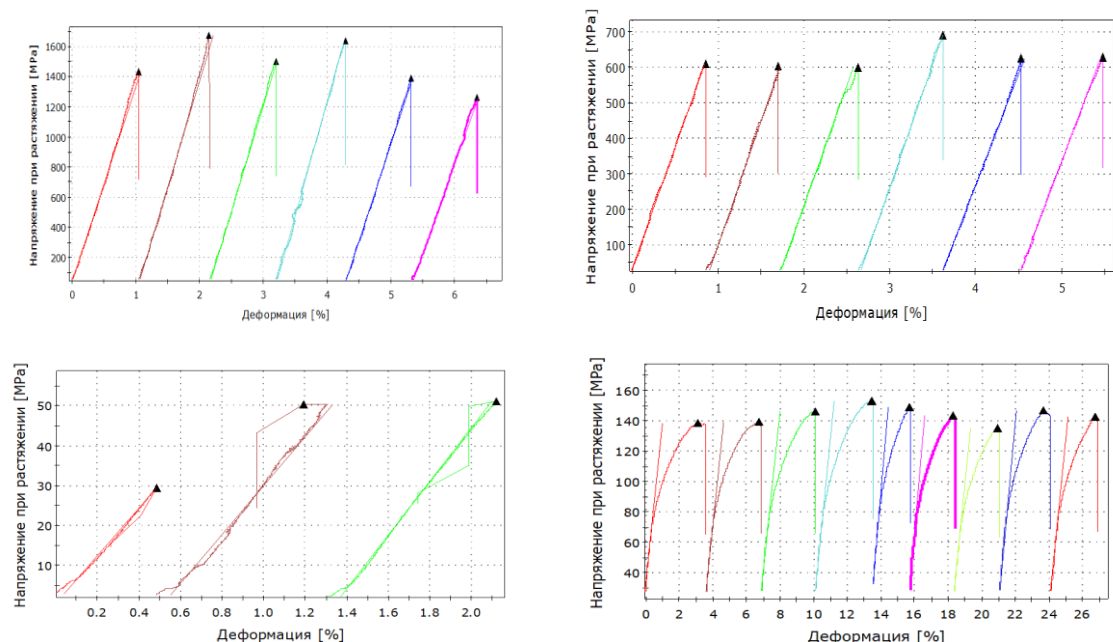


Рис 3. Диаграмма напряжение – деформация при испытании на растяжение образцов наномодифицированного углепластика для партии с укладкой  $0_4$ ,  $0_2/90_4/0_2$ ,  $90_4$ ,  $+45_2/-45_4/+45_2$ .

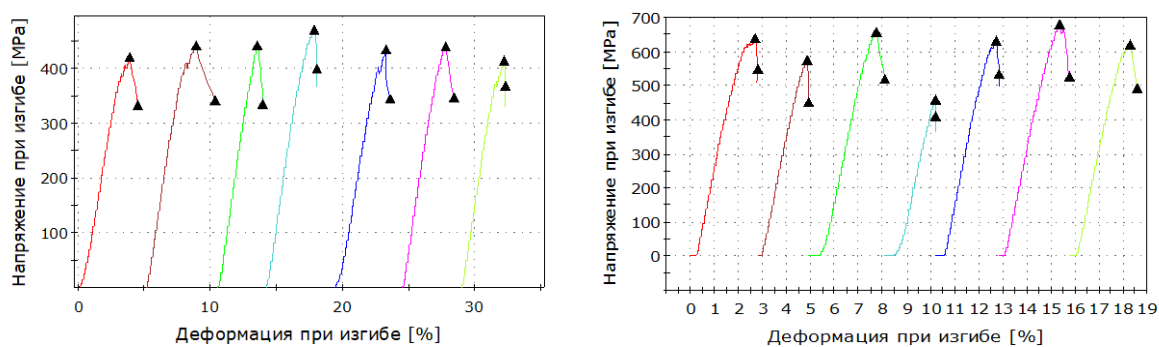


Рис 4 Диаграмма напряжение – деформация при испытании на изгиб углепластика с укладкой  $90_4$ , наномодифицированного углепластика с укладкой  $90_4$ .

**Во второй главе** проведено моделирование эффективных термомеханических характеристик наномодифицированного углепластика.

**Экспериментальные данные.** В экспериментах 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  $0,3 \text{ г/см}^3$ . 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 волокон матрицы представлены в таблицах 2 и 3.

Для наномодифицированной матрицы также известно, что модуль Юнга составил 2,5 ГПа.

Таблица 2. Свойства волокон НТА-40

Характеристики	Единица	Значение
Модуль упругости, $E_1$	ГПа	257
Модуль упругости, $E_2$	ГПа	24
Модуль сдвига, $G_{12}$	ГПа	16
Коэффициент Пуассона, $\nu_{21}$	-	0,279
Коэффициент Пуассона, $\nu_{23}$	-	0,49
КТР	$10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	-0,1
Плотность	г/см <sup>3</sup>	1,7

Таблица 3. Свойства матрицы ЭДТ-10

Характеристики	Единица	Значение
Модуль упругости, $E$	ГПа	2
Коэффициент Пуассона, $\nu$	-	0,4
КТР	$10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	65
Плотность	г/см <sup>3</sup>	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 4. Толщина монослоев в образцах составила 0,2 мм. 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. 5 а, б), в то время как обычная матрица полностью отслаивается (рис. 5 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 полученных композитах.

Таблица 4 результаты испытаний образцов углепластика.

Схема армирования образцов	Обычное связующее		С наполнителем	
	Модуль упругости, ГПа	Предел прочности, МПа	Модуль упругости, ГПа	Предел прочности, МПа
[0 <sub>4</sub> ]	128	1260	138	1526
[90 <sub>4</sub> ]	7	52	6	43
[0 <sub>2</sub> /90 <sub>4</sub> /0 <sub>2</sub> ]	72	764	66	579
[+45 <sub>2</sub> /-45 <sub>4</sub> /+45 <sub>2</sub> ]	9	123	12	146

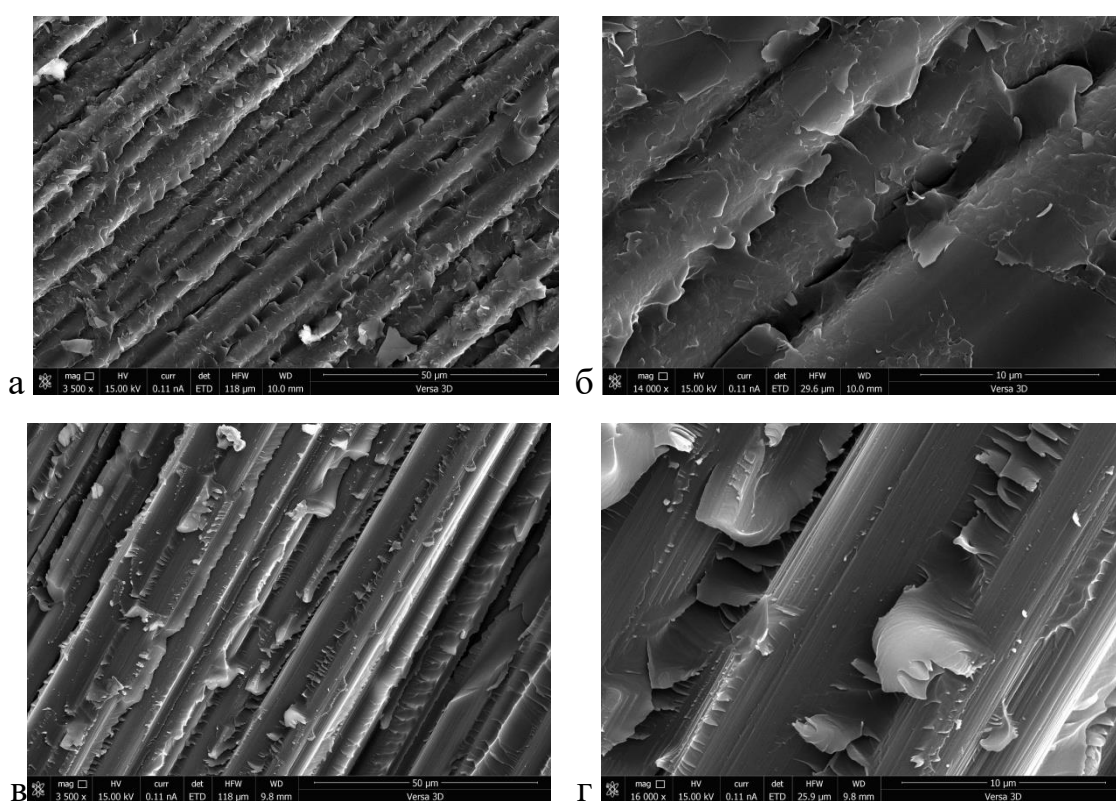


Рис. 5. Микроснимки поверхности разрушения композитов с наномодифицированной (а, б) и обычной (в, г) матрицей.

Задачей проводимого моделирования является определение упругих свойств монослоя исследуемых композитов. Для этого применяется два подхода. Во-первых, на основе макромеханической модели слоистого композита решается обратная задача и подбираются свойства монослоя для наилучшего описания экспериментальных данных для композитов с различными схемами армирования. Во-вторых, решается задача определения эффективных свойств однонаправленных слоев, содержащих волокна и частицы наномодификатора. Эта задача решается аналитически и

численно в рамках микромеханического подхода, где рассматривается представительный фрагмент композита и решается задача осреднения. Для вычислений привлекался программный комплекс Digimat.

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:

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

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  $\theta_k$ . В матричной форме эти соотношения могут быть представлены в следующем виде:

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

где:

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

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

$Q_{11} = E_1 / (1 - \nu_{12}\nu_{21})$ ,  $Q_{22} = E_2 / (1 - \nu_{12}\nu_{21})$ ,  $Q_{12} = \nu_{12}E_2 / (1 - \nu_{12}\nu_{21})$ ,  $Q_{66} = G_{12}$ , 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  $\nu_{12}$  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 4. Соответственно, рассматриваем следующую функцию:

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

где  $\Delta E_{\dots}$  – это разность экспериментально найденного значения модуля упругости композита в заданном направлении (табл. 4) и его расчетного значения, определяемого выражением (1).

Значения переменных  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $\nu_{12}$  и  $G_{12}$ , при которых функция (2) достигает минимума, являются искомыми характеристиками монослоя.

Численные расчеты проводились 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. 6 а. 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, наномодифицированное 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, 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. Далее численно решается задача осреднения на представительном фрагменте, содержащем только волокна (рис. 6 б).

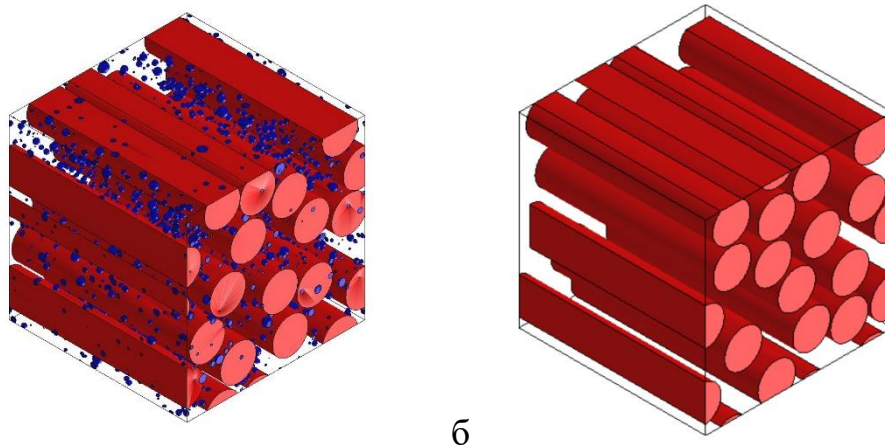


Рис. 6. Примеры кубических представительных фрагментов однонаправленного слоя на основе матрицы с наполнителем (а) и однородной матрицы (б). Размер фрагмента 35 мкм.

**Сопоставление результатов в рамках макро- и микромеханического моделирования и экспериментальных данных.** Решение задачи минимизации функции (2) в рамках макромеханического подхода строилось с использованием системы Matlab. В процессе поиска минимума функции (2) ставилось ограничение, что коэффициент Пуассона однонаправленного слоя  $\nu_{12}$  не может превышать коэффициента Пуассона матрицы. Без этого условия минимизация приводила к определению очевидно завышенных значений  $\nu_{12}$  для композитов с исходной матрицей. На основании имеющихся экспериментальных данных были найдены следующие характеристики упругости монослоя на основе исходной матрицы:

$$E_1 = 131 \text{ ГПа}, E_2 = 8.3 \text{ ГПа}, \nu_{12} = 0.4, G_{12} = 2.4 \text{ ГПа} \quad (3)$$

и на основе наномодифицированной матрицы:

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

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

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

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 использовать 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:

$$\begin{aligned} E_1 &= 130 \text{ ГПа}, E_2 = 5.9 \text{ ГПа}, \nu_{12} = 0.33, G_{12} = 2.2 \text{ ГПа} \\ \alpha_1 &= 5.3 \cdot 10^{-7} \text{ C}^{-1}, \alpha_2 = 3.3 \cdot 10^{-5} \text{ C}^{-1} \end{aligned} \quad (6)$$

В результате численного моделирования с использованием трехмерных представительных фрагментов (рис. 6б) были найдены следующие значения характеристик монослоев. Без добавления наночастиц:

$$\begin{aligned} E_1 &= 124.8 \text{ ГПа}, E_2 = 4.9 \text{ ГПа}, \nu_{12} = 0.33, G_{12} = 1.5 \text{ ГПа}, \\ \alpha_1 &= 5 \cdot 10^{-7} \text{ C}^{-1}, \alpha_2 = 4.3 \cdot 10^{-5} \text{ C}^{-1} \end{aligned} \quad (7)$$

Для наномодифицированного слоя:

$$\begin{aligned} E_1 &= 125 \text{ ГПа}, E_2 = 6 \text{ ГПа}, \nu_{12} = 0.33, G_{12} = 1.8 \text{ ГПа} \\ \alpha_1 &= 5.6 \cdot 10^{-7} \text{ C}^{-1}, \alpha_2 = 3.8 \cdot 10^{-5} \text{ C}^{-1} \end{aligned} \quad (8)$$

При использовании найденных в рамках макромеханического подхода характеристик монослоев (3) и (4) среднеквадратическое отклонение результатов расчетов от экспериментов составляет 1.6 ГПа для обычной матрицы и 2.5 ГПа для наномодифицированной. Соответствующие отклонения для характеристик (5) и (6), найденных в результате микромеханического моделирования и аналитических расчетов, составили 2.6 ГПа и 4.5 ГПа. Для наборов характеристик (7) и (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, а так же экспериментальных данных

представлено на рис. 7. Здесь показаны значения модулей упругости композитов с различными схемами армирования, найденные экспериментально и теоретически на основе идентифицированных свойств монослоев (3) - (8).

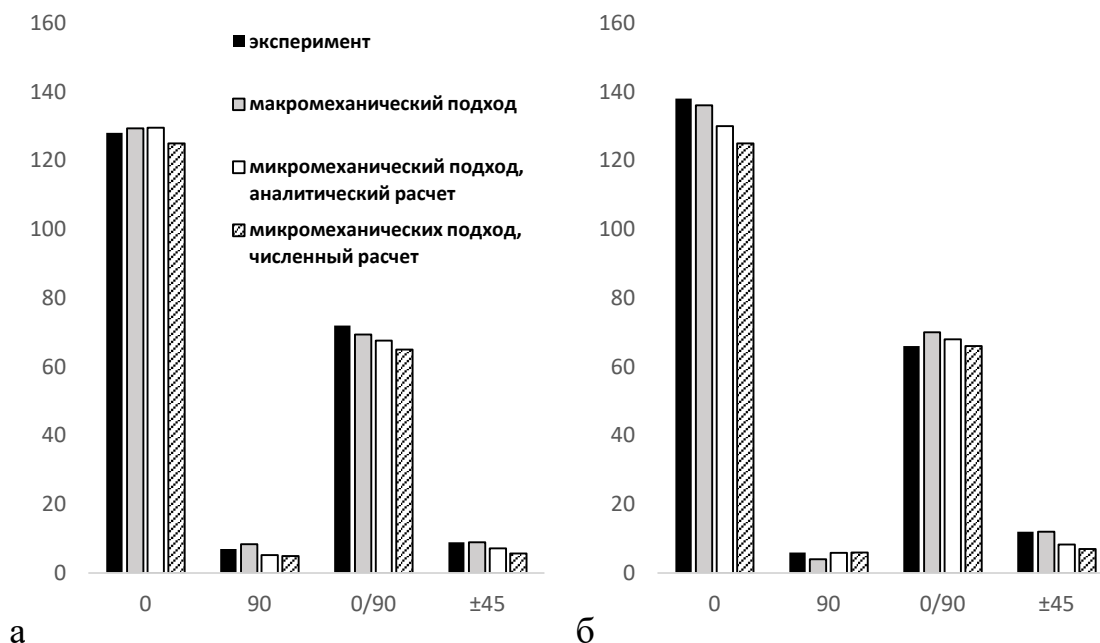


Рис. 7. Сопоставление экспериментальных значений и результатов расчетов модулей упругости композитов на основе обычной (а) и наномодифицированной матрицы (б) с учетом идентифицированных значений модулей упругости монослоя. Шкала по вертикальной оси в ГПа.

**В третьей главе** представлены результаты теоретического и экспериментального определения остаточных деформаций 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 эксплуатационной температуры. 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. 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.

Для изготовленных пластин измерялись прогибы каждой из четырех сторон. Для этого на ровной поверхности фиксировались две крайние точки, прогиб замерялся по центру стороны штангенциркулем (рис 8). В табл. 5 представлены результаты замеров прогибов изготовленных пластин со структурой слоев  $[0_{10} / 45_{10}]$  и со структурой слоев  $[0_{10} / 90_{10}]$ .

Таблица 5 – Сравнение прогибов, полученных экспериментально с nano и без по длинной и короткой стороне для укладок  $[0_{10} / 45_{10}]$  и  $[0_{10} / 90_{10}]$ .

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

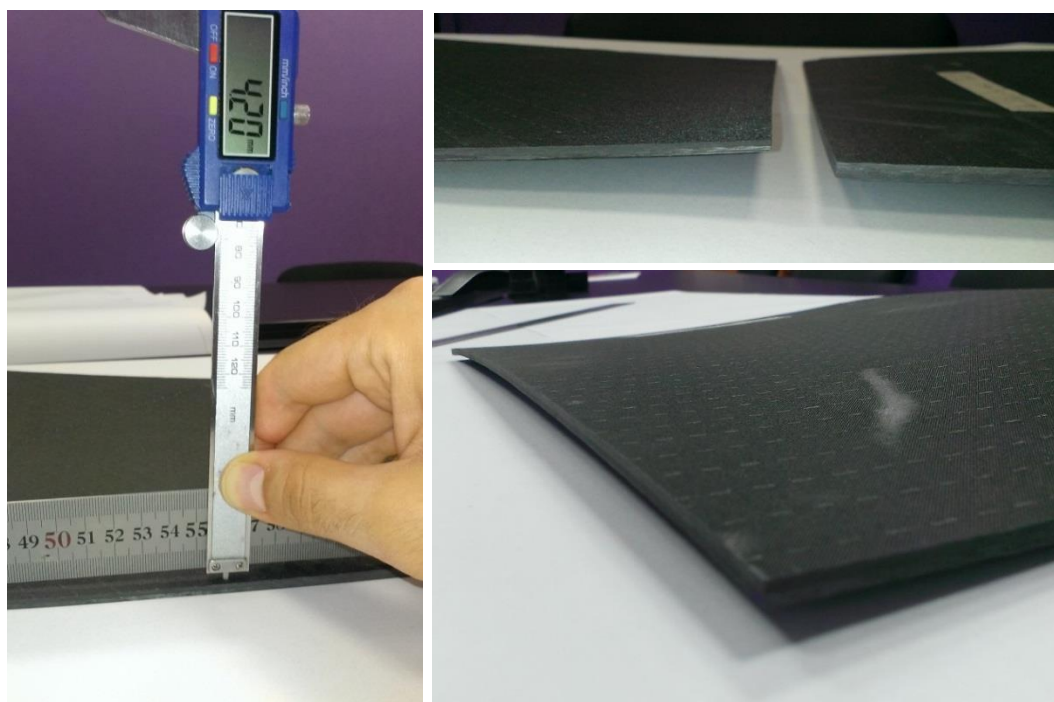


Рис. 8. Замер прогиба плиты штангенциркулем.

Для аналитического расчета: пластина свободна от закрепления и внешней силовой нагрузки, температурный перепад равен  $100^{\circ}\text{C}$ . Для конечно элементного расчета: пластина закреплена в точке геометрического центра, силовая нагрузка отсутствует, температурный перепад равен  $100^{\circ}\text{C}$ .

Характеристики материалов, используемых при моделировании, представлены в таблице 6.

Таблица 6– Физико-механические характеристики материалов

№		$E_{11}$ [МПа]	$E_{22}$ [МПа]	$G_{12}$ [МПа]	$\nu_{12}$	$\alpha_1$ [ $10^{-6} K^{-1}$ ]	$\alpha_2, \alpha_3$ [ $10^{-6} K^{-1}$ ]	$G_{23}$ [МПа]
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

Таблица 7 – 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
<b>Общая толщина:</b>				<b>4,1</b>

Таблица 8 – 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
<b>Общая толщина:</b>				<b>4,1</b>

Для каждого варианта укладки было проведено 4 расчета с использованием свойств монослоя углепластика. Аналогично было проведено 4 расчета с использованием свойств монослоя наномодифицированного углепластика. Итого проведено по 8 расчетов для варианта укладки  $[0_{10} / 45_{10}]$  и 8 расчетов – для  $[0_{10} / 90_{10}]$ . (Таб. 7, Таб. 8)

Результаты, полученные аналитическим и численным методами практически совпадают. Наибольшее сходство с экспериментальными

данными дает 4 метод определения эффективных свойств монослоя, представленных в таблицах 9 и 10.

Таблица 9 – 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	<b>4,35</b>
	Без нано	7	5,3	2,8	4,3	<b>3,2</b>
Прогиб по короткой стороне, мм	С нано	5,7	3,5	1,7	2,8	<b>2,1</b>
	Без нано	3,8	2,8	1,5	2,3	<b>2,75</b>

Таблица 10 – 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	<b>5,85</b>
	Без нано	13,3	10	5	7,7	<b>5,95</b>
Прогиб по короткой стороне, мм	С нано	10,7	6,7	3	4,9	<b>4,1</b>
	Без нано	7,2	5,4	2,7	4,2	<b>3,7</b>

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

1. Разработаны теоретические и экспериментальные методы для исследования эффективных термомеханических характеристик и остаточных напряжений и деформаций в панелях из наномодифицированных материалов с несимметричной схемой армирования.

2. По результатам экспериментальных исследований определены эффективные характеристики монослоя из углепластика, изготовленного из обычной и наномодифицированной матрицы, было 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.

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

**В приложении 2** представлен процесс изготовления КМ.

**По теме диссертации опубликованы следующие работы:**

**В изданиях ВАК:**

1. 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.

**Публикации в изданиях, входящих в базу данных Scopus**

2. 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.

3. 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, ISSN 2179-0302, p 153-168.

**В других изданиях:**

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. 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.