

На правах рукописи



Русланцев Андрей Николаевич

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ
ВОЛОКНИСТЫХ СЛОЕВ С РАЗЛИЧНОЙ УКЛАДКОЙ**

Специальность 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, доцент **Думанский Александр Митрофанович.**

Официальные оппоненты: **Горбачев Владимир Иванович** – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой механики композитов Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»;
Каюмов Рашит Абдулхакович – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры механики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский государственный архитектурно-строительный университет».

Ведущая организация: **Государственный научный центр Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского».**

Защита состоится 17 октября 2018 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.05 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» и на сайте:

https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=92245

Автореферат разослан «___» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Федотенков Г.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Одна из задач, стоящих перед конструкторами изделий космической техники – повышение весовой эффективности космических аппаратов и удовлетворение возрастающих требований к отклонениям форм и размеров рефлекторов космических радиотелескопов.

Волокнистые композиционные материалы являются высокоэффективными материалами, их удельная прочность в несколько раз выше по сравнению с традиционными материалами. Также они обладают высокой коррозионной и химической стойкостью, низким коэффициентом линейного термического расширения. Кроме того, композиционные материалы дают уникальную возможность создания сложных конструкций с требуемыми характеристиками, именно поэтому они успешно применяются в ракетно-космической технике, на транспорте, в строительстве. Однако они анизотропны, имеют вязкоупругие свойства и склонность к накоплению деформаций, что приводит к необходимости увеличения запаса прочности и массы конструкций.

В связи с постоянным повышением требований к характеристикам современных изделий космической техники, происходит ужесточение условий эксплуатации: повышение нагрузок, расширение диапазона допустимых температур, увеличение длительности эксплуатации. При этом возникает необходимость учета реологических характеристик и длительной прочности. Данная задача является важной для расчета рефлекторов космических радиотелескопов, эксплуатируемых в течение длительного промежутка времени, и к которым предъявляются жесткие требования по допустимым отклонениям поверхности от расчетной.

Кроме того, в связи с анизотропией механических характеристик, закономерности деформирования и разрушения композиционных материалов в составе конструкций существенно отличаются от металлов. Применяемые в настоящее время методы оценки деформационно-прочностных характеристик не позволяют в полной мере учесть особенности механического поведения композиционных материалов, что приводит к необоснованному увеличению веса конструкций. В сложившихся условиях повышение точности расчета деформирования слоистых композиционных материалов при различных видах нагружения позволит учесть значимые для конструкций эффекты и, таким образом, уменьшить избыточные коэффициенты запаса и повысить весовое совершенство конструкций. Следовательно, создание новых моделей расчета сопротивления полимерных волокнистых слоев с различной укладкой деформированию с учетом физической нелинейности, а также реологических

характеристик является актуальной задачей.

Целью диссертационной работы является повышение точности расчета сопротивления полимерных слоистых волокнистых слоев с различной укладкой деформированию с учетом комплекса физико-механических характеристик.

Задачи:

1. Разработка расчетной модели деформирования волокнистых полимерных слоев с различной укладкой с учетом физической нелинейности;
2. Разработка расчетной модели деформирования волокнистых полимерных слоев с различной укладкой при сложном напряженном состоянии и переменных во времени нагрузках;
3. Разработка модели, позволяющей определять напряженно-деформированное состояние криволинейной слоистой композитной балки при воздействии изгибающего момента;
4. Проведение механических испытаний образцов из полимерных композиционных материалов для верификации моделей.

Объектом исследований являются образцы полимерных слоистых композиционных материалов с различной структурой и связующими и образцы, имитирующие элементы конструкций, изготовленные из угле- и стеклопластиков.

Предметом исследования является уточненное напряженно-деформированное состояние полимерных волокнистых слоев с различной укладкой и математические методы его расчета.

Методология и методы исследования включают расчетные и экспериментальные методы определения напряженно-деформированного состояния слоистых полимерных композиционных материалов с различной укладкой. Предлагаемые методы и подходы базируются на положениях механики деформируемого твердого тела, теории вязкоупругости и наследственной механики, а также на методах планирования эксперимента.

Испытания проводились на испытательных машинах Zwick Z-100 и Instron 8801. Для измерения деформаций применялись тензорезисторы и тензостанция СИИТ-4. Для математического моделирования использовались программы MATLAB, Maple, Ansys.

Научная новизна работы:

1. Разработана новая расчетная модель, позволяющая на основе матричной алгебры и соотношений теории слоистых пластин описать анизотропию нелинейных механических характеристик композитных слоистых материалов на основе термореактивных и термопластичных матриц, а также углерод-углеродных композиционных материалов и повысить точность расчета

деформирования полимерных слоев с различной укладкой по сравнению с линейными моделями.

2. Впервые построена расчетная модель прогнозирования ползучести и релаксации слоистых волокнистых композиционных материалов с различными схемами армирования и связующими, позволяющая при помощи ограниченного набора параметров описать анизотропию наследственно-упругих характеристик материалов с использованием матричных преобразований и соотношений наследственной механики.
3. Впервые предложена аналитическая модель, позволяющая определять уточненное напряженно-деформированное состояние криволинейной композитной слоистой балки при изгибе с переменным по толщине окружным модулем упругости.

Практическая значимость

1. Построены алгоритмы для численного и аналитического определения и оценки напряженно-деформированного состояния полимерных волокнистых слоев с различной укладкой и применяемыми связующими с учетом физической нелинейности и при переменных во времени нагрузках. Разработанные алгоритмы использованы для оценки изменения формы главного зеркала космического радиотелескопа «Миллиметрон» вследствие ползучести во время хранения.
2. Разработаны алгоритмы, которые позволяют определять напряженно-деформированное состояние криволинейных слоистых балок при изгибе и могут быть использованы для рационального выбора исходных материалов и оценки предельного состояния элементов конструкций. Предложенные алгоритмы использованы для расчета усилий для коррекции формы главного зеркала космического радиотелескопа «Миллиметрон».
3. Результаты экспериментального анализа анизотропии механических характеристик углепластика БМИ-3/3692, изготовленного на основе углеродной ткани и высокотемпературного бисмалеимидного связующего, позволяют уточнить его временные и нелинейные свойства и могут быть использованы при расчетно-экспериментальной отработке характеристик длительного деформирования и разрушения композитных элементов конструкций авиационной и ракетно-космической техники.

Достоверность научных положений и выводов, приведенных в диссертации, подтверждена корректным применением апробированных математических методов расчета, а также хорошим согласием расчетных значений с экспериментальными данными, полученными как в рамках настоящей работы, так и в работах других авторов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Модели нелинейного деформирования и сопротивления деформированию полимерных волокнистых слоев с различной укладкой при переменном во времени нагружении, позволяющие учесть влияние схемы армирования и свойств слоя на нелинейные и временные свойства пакета.
2. Модель деформирования слоистой криволинейной композитной балки при изгибе, позволяющая определять напряженно-деформированное состояние элемента конструкции.
3. Экспериментальные данные по анизотропии наследственно-упругих характеристик углепластика БМИ-3/3692.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались на международных и всероссийских научных конференциях и семинарах: IX Международная конференция по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ'2012) (Алушта, 2012), Всероссийская конференции по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат – 2013» (Москва, 2013), XX и XXI Международная научно-техническая конференция «Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов» (г. Обнинск, Калужская область, 2013, 2016), XXV и XXVII Международная инновационно-ориентированная конференция молодых учёных и студентов (Москва, 2013, 2015), Четвертая международная научная конференция «Ракетно-космическая техника: фундаментальные и прикладные проблемы», (Москва, 2013), «Наследственная механика деформирования и разрушения твердых тел — научное наследие Ю.Н. Работнова» (Москва, 2014), Третья международная научно-техническая конференция «Аэрокосмические технологии», посвященная 100-летию со дня рождения академика В.Н. Челомея (Реутов-Москва, 2014), Первая и Вторая международная конференция «Деформирование и разрушение композиционных материалов и конструкций», (Москва, 2014, 2016), 5-я и 7-я Всероссийская научная конференция с международным участием «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред» (Москва, 2015, 2017), III научно-техническая конференция с участием иностранных специалистов "Динамика и прочность конструкций аэрогидроупругих систем. Численные методы"(Москва, 2015), 4-th International Conference on Advanced Composites and Materials Technologies for Arduous Applications (АСМТАА 2015) (Wrexham, United Kingdom, 2015), 4-я и 5-я Международная научная конференция "Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении" (Москва, 2015, 2017).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 20 научных статей, из них 3 в

изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, 1 работа опубликована в журнале, входящем в базу цитирования Scopus, 12 работ опубликованы в изданиях, входящих в базу цитирования РИНЦ. Общий объем публикаций составляет 6,32 п.л.

Личный вклад автора заключается в разработке расчетных моделей деформирования волокнистых композитных слоев с различной укладкой с учетом физической нелинейности и временных эффектов, разработке модели деформирования криволинейной балки с произвольно изменяющимся окружным модулем упругости, проведении механических испытаний образцов из углепластика БМИ-3/3692 и испытаний на ползучесть и релаксацию образцов из углепластика КМУ-4Л, верификации предложенных моделей на основе сравнения расчетных и экспериментальных данных и расчете деформирования сектора главного зеркала космического аппарата «Спектр-М».

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 192 наименований. Основной текст изложен на 172 страницах, включает 86 рисунков и 14 таблиц.

Благодарности. Автор выражает благодарность Я.М. Портновой за предоставленные для испытаний образцы, к.т.н. Л.П. Таировой за помощь в проведении механических испытаний и предоставленные экспериментальные данные, проф., д.т.н. В.А. Комарову и коллективу кафедры конструкций и проектирования летательных аппаратов Самарского университета за проведение испытаний криволинейных композитных балок на изгиб, к.т.н. А.Г. Попову и Н.В. Матюшевскому за проведение механических испытаний композитных балок и предоставленные экспериментальные данные, а также профессору Токийского Университета науки S. Ogihara за предоставленные данные по испытаниям стеклопластика.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена краткая характеристика работы, обоснована актуальность темы исследования и степень ее разработанности, сформулирована цель и задачи работы, определены объект и предмет исследования, обоснованы научная новизна и практическая значимость работы.

Первая глава носит обзорно-аналитический характер. В ней приведены результаты выполненного литературного обзора отечественных и зарубежных работ по тематике исследования. Рассмотрены особенности механического поведения композитов и подходы к расчету напряженно-деформированного состояния материалов и конструкций. Приведено описание основных моделей

вязкоупругого поведения композитов. Показано, что линейные модели деформирования не позволяют учесть ряд эффектов, а предлагаемые модели нелинейного деформирования и деформирования с учетом пластического течения не приспособлены для расчета слоистых композитных конструкций.

Во второй главе приводятся методика испытаний, экспериментальные данные и метод идентификации упругих постоянных материала.

Для испытаний были изготовлены плоские перекрестно-армированные образцы из углепластика КМУ-4Л со схемами укладки 0° , $\pm 20^\circ$, $\pm 40^\circ$, $\pm 50^\circ$, $\pm 70^\circ$ и 90° , а также из углепластика БМИ-3/3692 на основе равнопрочной ткани, вырезанные под углами 0° , 30° , 45° и 90° к направлению основы. Испытания проводились на испытательных машинах Instron-8801 и Zwick Z100, регистрация деформаций образцов выполнялась при помощи тензорезисторов и тензостанции СИИТ-4. Кроме того, профессор Токийского университета науки S. Ogihara предоставил данные по испытаниям стеклопластика. Для идентификации упругих характеристик материалов был использован метод наименьших квадратов. Минимизация невязки производилась на начальных линейных участках диаграмм деформирования. В результате получены следующие характеристики: углепластик КМУ-4Л: $E_1=150$ ГПа, $E_2=4,0$ ГПа, $G_{12}=3,3$ ГПа, $\nu_{12}=0,32$; углепластик БМИ-3/3692: $E_1=84$ ГПа, $E_2=80$ ГПа, $G_{12}=7,5$ ГПа, $\nu_{12}=0,04$; стеклопластик: $E_1=137$ ГПа, $E_2=9,5$ ГПа, $G_{12}=5,0$ ГПа, $\nu_{12}=0,3$.

Выявлено, что при возникновении сдвиговых напряжений в плоскости слоя диаграммы деформирования принимают существенно нелинейный вид. При нагружении вдоль и поперек направления армирования диаграммы деформирования остаются линейными. Это может быть связано как с нелинейностью, возникающей при сдвиге, так и с временными эффектами.

Третья глава посвящена вопросам нелинейного деформирования слоистых полимерных композиционных материалов и разработке модели, позволяющей учесть влияние свойств слоя и схемы армирования на нелинейные свойства пакета.

Предполагается, что нелинейные свойства материала определяются нелинейностью диаграмм деформирования при сдвиге в плоскости слоя. Тогда определяющие соотношения для слоя могут быть записаны в виде:

$$\sigma_1 = g_{12}^0 \varepsilon_1 + g_{12}^0 \varepsilon_2; \sigma_2 = g_{12}^0 \varepsilon_1 + g_{22}^0 \varepsilon_2; \tau_{12} = \psi(\gamma_{12}) = g_{66}^0 - f,$$

где g_{ij}^0 – элементы матрицы жесткости слоя, ψ, f – функции, аппроксимирующие кривую деформирования при сдвиге в плоскости слоя.

В матричном виде соотношения выглядят следующим образом:

$$G_{12} = G_{12}^0 - I_g f,$$

где G_{12}^0 – матрица жесткости на упругом участке диаграммы деформирования

слоя, $I_g = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$, f – аппроксимирующая функция.

Матрица жесткости пакета определяется при помощи соотношений теории слоистых пластин:

$$G_{xy} = \sum_k T_1^{(k)} [G_{12}^0 - I_g f] T_1^{(k)T} \bar{h}^{(k)} = G_{xy}^0 - \tilde{G}_{xy} f.$$

Матрица податливости получена обращением матрицы жесткости:

$$S_{xy} = Q \text{diag} \left(\frac{1}{1 - \lambda_i f} \right) Q^{-1} S_{xy}^0, \text{ где } S_{xy}^0 = [G_{xy}^0]^{-1}, [A] = S_{xy}^0 \tilde{G}_{xy}, A = Q \text{diag} (\lambda_i) Q^{-1}.$$

По полученным определяющим соотношениям выполнен расчет диаграмм деформирования для углепластиков КМУ-4Л, БМИ-3/3692, стеклопластика, углерод-углеродного композиционного материала и углепластика на основе термопластичного связующего, определен вид аппроксимирующих функций и определены их параметры. Для углепластика БМИ-3/3692 выбрана степенная аппроксимирующая функция и определены ее параметры: $f = k(\gamma_{12} - \gamma_{12}^{(1)})^n H(\gamma_{12} - \gamma_{12}^{(1)})$, $k=2500$, $n=0.25$, $\gamma_{12}^{(1)}=0.003$. На рис. 1 показаны расчетные и экспериментальные диаграммы для углепластика БМИ-3/3692.

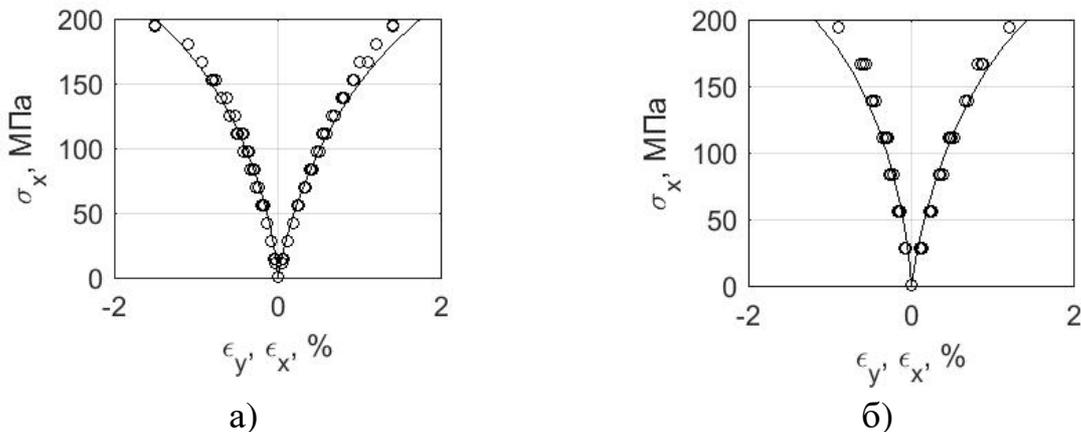


Рис. 1. Расчетные диаграммы деформирования и экспериментальные точки для углепластика БМИ-3/3692. а) $[\pm 45^\circ]$; б) $[30^\circ]$

Также определен вид аппроксимирующей функции для углепластика КМУ-4Л: $f = k(\gamma_{12} - \gamma_{12}^{(1)})^n H(\gamma_{12} - \gamma_{12}^{(1)})$, $k = 1150$, $n = 0.35$, $\gamma_{12}^{(1)} = 0.003$. На рис. 2 показаны расчетные и экспериментальные диаграммы деформирования для углепластика КМУ-4Л.

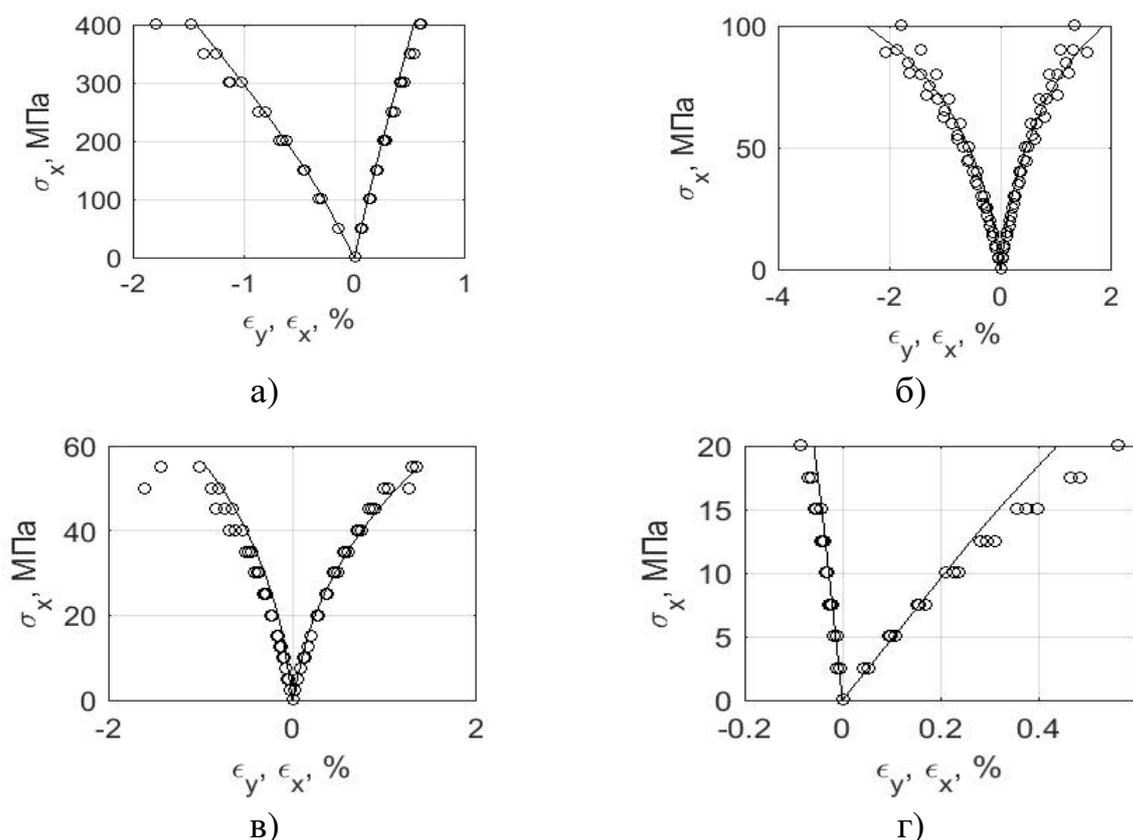


Рис. 2. Расчетные диаграммы деформирования и экспериментальные точки для углепластика КМУ-4Л с различными схемами армирования. а) $\pm 20^0$; б) $\pm 40^0$; в) $\pm 50^0$; г) $\pm 70^0$

Были обработаны данные по деформированию углерод-углеродного композиционного материала. Данный материал имеет нелинейные диаграммы при растяжении вдоль и поперек направления основы и при сдвиге. Упругие характеристики материала определяются как: $E_1=2.5$, $E_1/E_2=1,07$, $E_1/G_{12}=6,5$, $\nu_{12}=0.3$. При помощи предложенной в диссертации модели построены диаграммы деформирования для образцов, вырезанных под углами 15° , 30° , 45° и 75° (рис. 3), а также диаграммы деформирования при пропорциональном нагружении при $\sigma_1 = 5.7\tau_{12}$ (рис. 4) и при сжатии при $2\sigma_1 = \sigma_2$.

Таким образом показано, что модель применима для широкого спектра материалов: угле- и стеклопластиков, а также углерод-углеродных композиционных материалов.

В четвертой главе предлагается модель расчета деформирования волокнистых полимерных слоев с различной укладкой при переменном нагружении.

Предполагается, что зависимость между напряжениями и деформациями может быть представлена в виде определяющего соотношения наследственного типа: $G_{12}^0 \gamma_{12} = (1 + K^*) \tau_{12}$, $\tau_{12} = G_{12}^0 (1 - R^*) \gamma_{12}$.

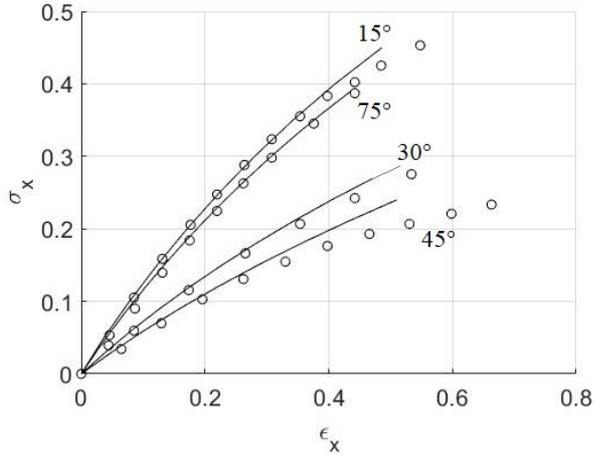


Рис. 3. Расчетные и экспериментальные диаграммы деформирования образцов, вырезанных под различными углами к направлению армирования

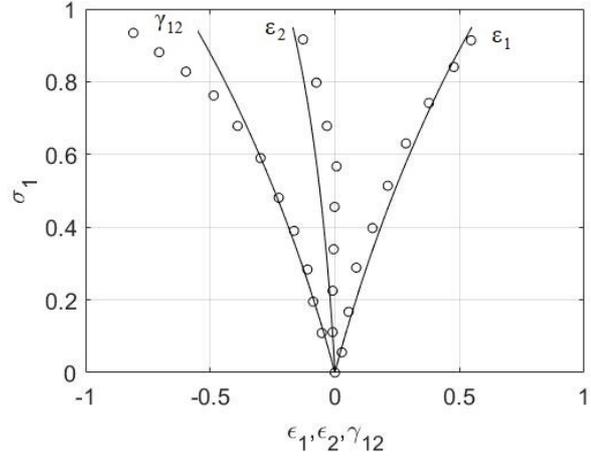


Рис. 4. Расчетные и экспериментальные диаграммы деформирования, $\sigma_1 = 5.7\tau_{12}$

Связь между напряжениями и деформациями записывается как

$$\{\sigma_{12}\} = [G_{12}^0 - G^0 R^*] \{\varepsilon_{12}\}, \text{ где } [G^0] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \text{матрица, позволяющая учесть}$$

эффект ползучести.

Матрица жесткости пакета определяется по соотношениям теории слоистых пластин: $[G_{xy}] = \sum [T_i][G_{12}][T_i]^T \bar{h}_i = [G_{xy}^0] - [\tilde{G}]R^*$.

Матрица податливости получена обращением матрицы жесткости: $[S_{xy}] = [G_{xy}]^{-1} = ([I] - [S_{xy}^0][\tilde{G}]R^*)^{-1} [S_{xy}^0]$. После преобразований при помощи матричного анализа и алгебры резольвентных операторов имеем:

$$[S_{xy}^*] = [Q] \text{diag} (1 + \lambda_i R^* (\mu - \lambda_i)) [Q]^{-1} [S_{xy}^0],$$

$$\text{где } [A] = [S_{xy}^0] [\tilde{G}] = [Q] \text{diag} (\lambda_i) [Q]^{-1}.$$

Определяющие соотношения для пакета записываются в виде:

$$\{\varepsilon(t)\} = [S_{xy}^*] \{\sigma_{xy}(t)\}.$$

По предложенной модели выполнен расчет деформирования образцов из углепластика БМИ-3/3692 при переменном во времени нагружении. В качестве ядер ползучести и релаксации выбраны ядро Абеля и дробно-экспоненциальная функция Работнова. Для данного материала значения параметров ядер равны $\alpha = -0.7$, $\beta = -0.04$, $k = 250$.

На рис. 5 показаны расчетная и экспериментальная зависимость напряжений от времени, в явном виде зависимость деформаций от напряжений для схемы армирования $[\pm 40^\circ]$ имеет вид: $\varepsilon_x = (0,3941 + 0,0210\mathcal{E}_\alpha^*) \cdot 10^{-4} \sigma_x(t)$,

$$\mathcal{E}_\alpha(\beta, t) = kt^\alpha \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\beta^n t^{n(1+\alpha)}}{\Gamma[(n+1)(1+\alpha)]}.$$

Определен тангенс угла механических потерь материала с заданной схемой

армирования и модули накопления и потерь:
$$tg \delta = \frac{\int_0^{\infty} \mathcal{E}_\alpha(z) \sin \omega z dz}{1 + \int_0^{\infty} \mathcal{E}_\alpha(z) \cos \omega z dz} \approx 0.1,$$

$$E' = E_x \cos \delta = 25.3 \text{ МПа}, \quad E'' = E_x \sin \delta = 2.5 \text{ МПа}.$$

Диаграмма деформирования материала при циклическом нагружении определяется системой уравнений, описывающей эллипс:

$$\begin{cases} \sigma(t) = 100 \cdot \sin \omega t \\ \varepsilon(t) = 0.045 \cdot \cos(\omega t - 0.1) \end{cases}.$$

Выполнены расчет кривых ползучести и релаксации для углепластика КМУ-4Л, а также расчет деформирования при переменном во времени нагружении. В качестве ядер ползучести и релаксации выбраны ядро Абеля и дробно-экспоненциальная функция Работнова. Определены параметры ядер: $\alpha = -0.8$, $\beta = -0.05$, $k = 150$.

В явном виде зависимость деформаций от напряжений для пакета с укладкой $[\pm 20^\circ]$ имеет следующий вид: $\varepsilon_x = (0,1098 + 0,0004\mathcal{E}_\alpha^*) \cdot 10^{-4} \sigma_x(t)$. Также был определен тангенс угла механических потерь: $tg \delta \approx 0.04$.

Модуль упругости пакета со схемой армирования $[\pm 20^\circ]$ составляет $E_x = 102$ ГПа. Модули накопления и потерь определяются следующим образом: $E' = E_x \cos \delta = 101.5 \text{ МПа}$, $E'' = E_x \sin \delta = 4.0 \text{ МПа}$.

Модуль упругости пакета со схемой армирования $[\pm 40^\circ]$ составляет $E_x = 17$ ГПа, тангенс угла механических потерь: $tg \delta \approx 0.06$. Модули накопления и потерь определяются следующим образом: $E' = E_x \cos \delta = 15.9 \text{ МПа}$, $E'' = E_x \sin \delta = 1.0 \text{ МПа}$.

При помощи предложенной модели выполнен расчет деформирования главного зеркала космического радиотелескопа «Миллиметр» (рис 6) вследствие ползучести при хранении. Верхняя и нижняя панели производятся из углепластика со схемой армирования $[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]$ на основе волокна M55j и термопластичного связующего. При формовке за счет предварительного

натяжения волокон и температурных деформаций в обшивках возникают остаточные напряжения до 0.4%, а их релаксация в процессе хранения приводит к искажению формы главного зеркала, изменению фокуса и снижению качества работы космического аппарата. Непосредственно после изготовления сектор центральной части (рис. 7), имеющий диаметр 3 м, главного зеркала имеет фокус 2400 мм, через полтора года после изготовления фокус составляет 2393 мм, однако требуется обеспечение точности формы главного зеркала в пределах 10-50 мкм

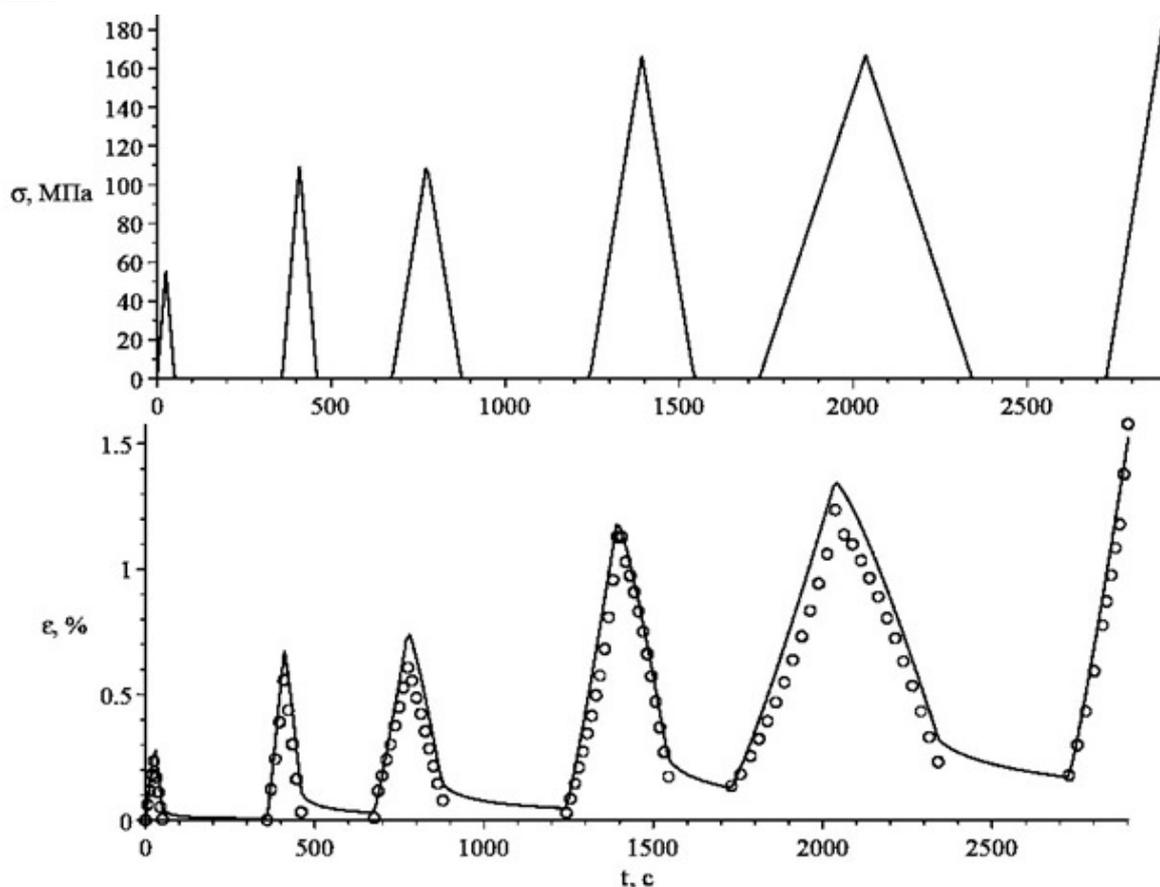


Рис. 5. Зависимости напряжений и деформаций от времени для углепластика БМИ-3/3692. Маркеры –экспериментальные данные, линия – расчет.

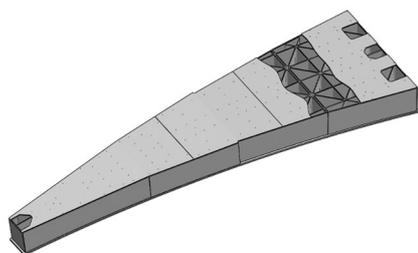


Рис. 6. Сектор центральной части главного зеркала космического аппарата «Спектр-М»

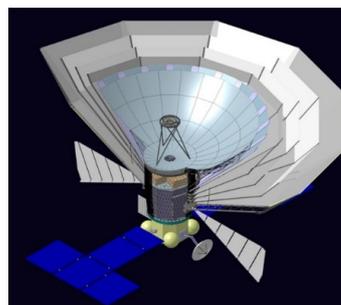


Рис. 7. Космический аппарат «Спектр-М»

Панели центральной части главного зеркала состоят из отражающей и тыльной обшивок с укладкой $[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]$, имеющих толщину 2 и 1 мм соответственно, и ребер жесткости толщиной 0,5 мм и высотой 50 мм с укладкой $[0^\circ/90^\circ]$. Материал обшивки имеет следующие упругие характеристики: $E = 102$ ГПа, $G = 12$ ГПа, материал ребер: $E_x = E_y = 150$ ГПа, $G_{xy} = 5$ ГПа. Методами идентификации получены следующие упругие характеристики монослоя: $E_1 = 220$ ГПа, $E_2 = 15$ ГПа, $G_{12} = 5$ ГПа, $\nu_{12} = 0.3$.

Для описания наследственно-упругих характеристик в качестве ядер ползучести и релаксации использованы ядро Абеля и его резольвента – дробно-экспоненциальная функция Работнова: $K(t) = kt^\alpha (\Gamma(1 + \alpha))^{-1}$,

$$\mathcal{E}_\alpha(\beta, t) = kt^\alpha \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\beta^n t^{n(1+\alpha)}}{\Gamma[(n+1)(1+\alpha)]},$$

минимизацией невязки между расчетными и экспериментальными данными методом наименьших квадратов определены параметры ядер: $\alpha = -0,85$, $\beta = -0,08$, $k = 0,6$.

Предполагая уровень остаточных деформаций равным 0.4%, проведен расчет изменения деформаций во времени. Определено изменение фокусного расстояния главного зеркала с течением времени, оно связано с деформациями следующей зависимостью: $F' = F(1 + \varepsilon_x)$. Зависимость остаточных деформаций от времени для сектора центральной части главного зеркала показана на рис. 8. На рис. 9 показано изменение фокусного расстояния во времени.

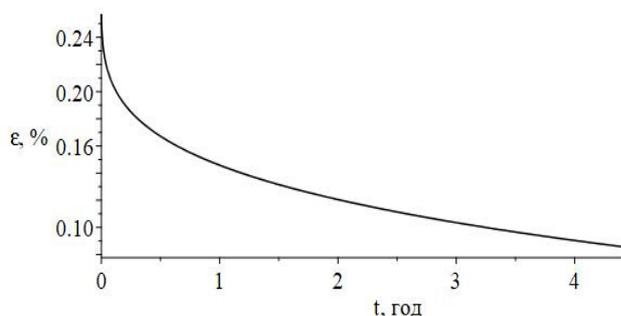


Рис. 8. Зависимость остаточных деформаций главного зеркала космического аппарата «Спектр-М» от времени

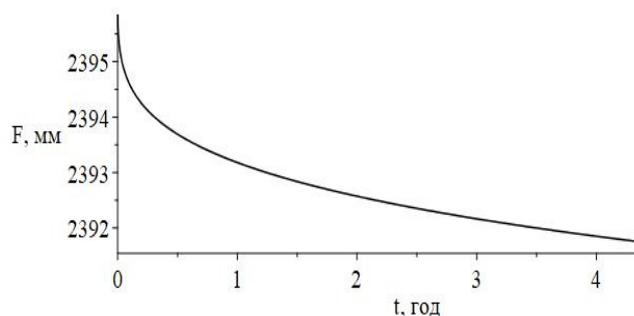


Рис. 9. Изменение фокусного расстояния центральной части главного зеркала космического аппарата «Спектр-М»

При помощи предложенной модели выполнен расчет деформирования элемента конструкции – центральной части главного зеркала космического аппарата «Спектр-М». Показано, что при хранении происходит изменение фокуса центральной части главного зеркала, что при предъявляемых

требованиях к точности поверхности приводит к потере функциональной способности космического аппарата.

Для придания требуемой формы главному зеркалу требуется либо изменение формы оснастки с учетом ползучести конструкции при хранении, либо применение корректирующих усилий, расчет которых приведен в главе 5, где приведено исследование деформирования криволинейной балки.

В пятой главе предложена методика расчета напряженного состояния слоистой криволинейной композитной балки под действием изгибающего момента.

Предложена расчетная схема деформирования балки под действием изгибающего момента (рис. 10). Предполагается наличие нейтральной линии, которая при деформировании меняет кривизну, но сохраняет свою длину, и имеет координату r_0 . Приравняв длину нейтральной линии до деформирования и после деформирования, получаем: $dr_0\theta - r_0d\theta = 0$.

Окружные деформации вычисляются через деформацию произвольного слоя: $\varepsilon_\theta(r) = \left(1 - \frac{r_0}{r}\right) \frac{d\theta}{\theta}$. Окружные напряжения связаны с деформациями законом Гука: $\sigma_\theta(r) = E\varepsilon_\theta(r)$. Так как балка нагружена только изгибающим моментом, и на сечение не действуют ни нормальные, ни перерезывающие силы, то $\int_r \sigma_\theta dr = 0$.

Момент связан с окружными напряжениями следующим образом:

$$M = \int_r \sigma_\theta r dr = E \frac{d\theta}{\theta} \int_{r_1}^{r_2} \left(1 - \frac{r_0}{r}\right) dr = E \frac{d\theta}{\theta} \left[\frac{r_2^2 - r_1^2}{2} - r_0(r_2 - r_1) \right].$$

Рассматривая равновесие элемента криволинейной балки относительно вертикальной оси (рис. 11), записываем следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{\sigma_r}{r} + \frac{d\sigma_r}{dr} = \frac{\sigma_\theta}{r}.$$

Решая дифференциальные уравнения и предполагая, что окружной модуль упругости изменяется по толщине, получаем выражения для нейтральной линии, раскрытия угла и напряжений.

$$r_0 = \int_{r_1}^{r_2} E(r) dr \cdot \left(\int_{r_1}^{r_2} \frac{E(r)}{r} dr \right)^{-1}$$

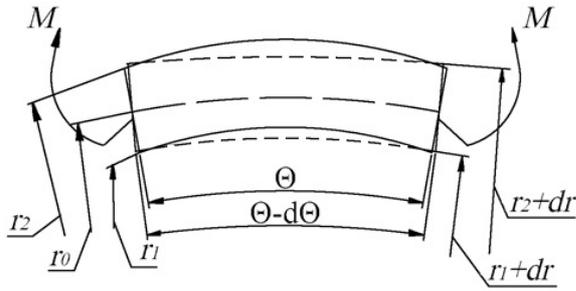


Рис. 10. Расчетная схема деформирования

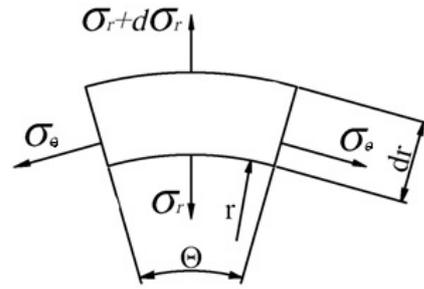


Рис. 11. Равновесие элемента балки

$$\frac{d\theta}{\theta} = \frac{M}{\int_{r_1}^{r_2} E r dr - r_0 \int_{r_1}^{r_2} E dr} ; \sigma_r = \frac{d\theta}{\theta} \frac{\int_{r_1}^r E(r) dr - r_0 \int_{r_1}^r \frac{E(r)}{r} dr}{r} ; \sigma_\theta = \frac{d\theta}{\theta} \left(1 - \frac{r_0}{r}\right) E(r)$$

Был проведен расчет пятислойной балки. На графиках показаны распределения окружных и радиальных напряжений, полученные аналитическим методом (линия) и методом конечных элементов (круглый маркер), рис. 12.

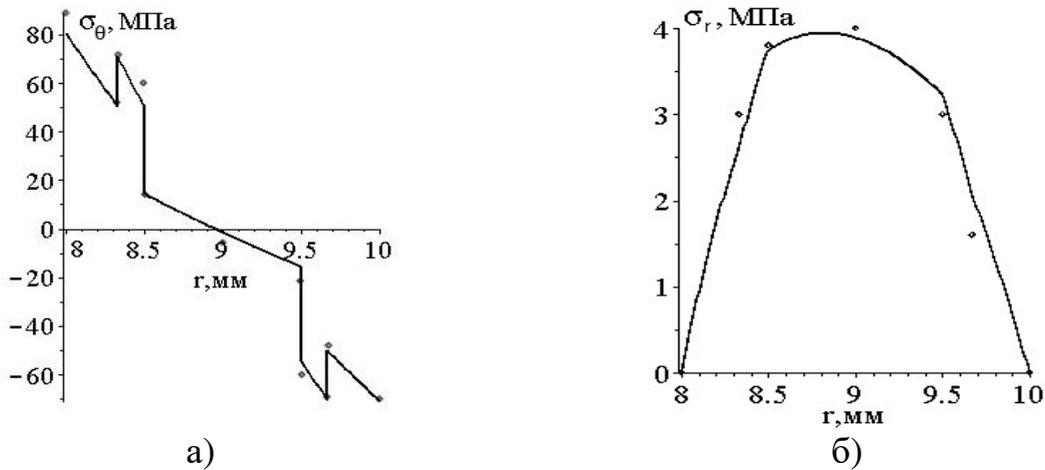


Рис. 12. Распределение напряжений по толщине балки, линией показан расчет по предложенной модели, круглыми маркерами – методом конечных элементов. а) окружные напряжения; б) радиальные напряжения

При помощи предложенной модели выполнен расчет усилий для корректировки формы главного зеркала космического радиотелескопа «Миллиметрон». Предполагается, что сектор рефлектора будет разбит на 10 участков. Значение момента можно рассчитать следующим образом. Отношение приращения радиуса кривизны участка зеркала к радиусу нейтральной линии описывается следующим выражением:

$$\frac{\Delta r_0}{r_0} = \frac{\Delta \theta}{\theta} = \frac{\mu}{\int_{r_1}^{r_2} E r dr - r_0 \int_{r_1}^{r_2} E dr},$$

где $r_0 = \int_{r_1}^{r_2} E(r) dr \left(\int_{r_1}^{r_2} \frac{E(r)}{r} dr \right)^{-1}$.

Окружной модуль упругости определяется как:

$$E(r) = 103[H(r - r_u) - H(r - r_u - 1)] + \\ 0.5[H(r - r_u - 1) - H(r - r_u - 51)] + \\ 103[H(r - r_u - 51) - H(r - r_u - 51.5)].$$

Требуемое приращение радиуса кривизны равно разности между расчетным значением и реальным значением $\Delta r_0 = r_p - r_{и}$.

Соответственно, значение распределенного момента определяется как:

$$\mu = \frac{\Delta r_0}{r_0} \left(\int_{r_1}^{r_2} E r dr - r_0 \int_{r_1}^{r_2} E dr \right).$$

Полный момент определяется как погонный момент μ , умноженный на среднюю ширину сектора L : $M = \mu L$, где $L = \frac{\pi r}{12}$.

В таблице показаны требуемые и измеренные радиусы кривизны сектора центральной части главного зеркала космического аппарата и необходимые значения регулирующих усилий.

Максимальные окружные и радиальные напряжения достигаются на первом участке с наименьшим радиусом кривизны. Максимальные растягивающие и сжимающие напряжения достигаются в обшивках и равны 10 МПа, максимальные радиальные напряжения достигаются в ребрах и составляют 0.03 МПа, что меньше предельно допустимых значений.

Таким образом, определены необходимые регулирующие усилия для придания главному зеркалу космического аппарата «Спектр-М» требуемой формы.

Также предложенная модель позволяет построить прогноз, как будут меняться кривизны участков главного зеркала космического аппарата «Спектр-М» при воздействии корректирующих усилий в течение трех лет. Показано, что применение корректирующих усилий позволяет придать зеркалу параболическую форму с требуемыми параметрами для обеспечения функциональности космического аппарата.

Таблица.

Корректирующие усилия для главного зеркала космического аппарата
«Спектр-М».

№ участка	Координата середины участка r , мм	r_p , мм	r_n , мм	Δr_0 , мм	μ , Н	L , мм	M , Н мм
1	217,5	4815	4808	7	66	57	3762
2	352,5	4839	4833	6	58	92	5336
3	487,5	4874	4868	6	51	128	6528
4	622,5	4922	4917	5	46	163	7498
5	757,5	4980	4975	5	42	198	8316
6	892,5	5051	5046	5	37	234	8858
7	1027,5	5133	5129	4	35	269	9415
8	1162,5	5228	5224	4	33	304	10032
9	1297,5	5335	5331	4	31	340	10540
10	1432,5	5455	5451	4	30	375	11250

В заключении сформулированы следующие основные результаты и выводы по диссертационной работе:

1. Разработана математическая модель расчета нелинейного деформирования полимерных волокнистых слоев с различной укладкой и деформирования волокнистых слоев при длительном переменном во времени нагружении. Модель позволяет более точно определять напряженно-деформированное состояние волокнистых композитов с различной укладкой на основе термореактивных и термопластичных матриц. Также модель применима к углерод-углеродным композиционным материалам. С помощью матричного анализа получены удобные для практического использования выражения для характеристик жесткости, податливости и технических характеристик упругости, позволяющие оценить анизотропию механических нелинейных и наследственно-упругих характеристик материала. Данная модель может быть использована для аналитических и численных расчетов деформирования конструкций при переменных нагрузках, а также для анализа и управления анизотропией диссипативных свойств материалов аналитическими методами, что актуально для решения задач вибрационного и динамического анализа, а также для оценки трещиностойкости материала.

2. Проведены квазистатические испытания образцов из углепластика КМУ-4Л и БМИ-3/3692. Выполнены испытания на ползучесть и релаксацию для углепластика КМУ-4Л с перекрестным армированием для выявления реологических свойств. Также проведены испытания по длительному и

переменному во времени нагружению углепластика БМИ-3/3692. Исследована анизотропия наследственно-упругих свойств материалов, выявлены закономерности нелинейного деформирования и проявления временных эффектов в полимерных композитах, армированных непрерывными волокнами. Полученные результаты позволили уточнить нелинейные и наследственно-упругие характеристики материала и могут быть применены для расчета композитных элементов изделий авиационной и ракетно-космической техники.

3. Для проверки адекватности модели нелинейного деформирования проведены расчеты деформирования образцов из перекрестно-армированного углепластика КМУ-4Л, углепластика БМИ-3/3692, стеклопластика, углерод-углеродного композиционного материала, а также углепластиков на основе термопластичного связующего. Показано хорошее согласие расчетных и экспериментальных данных, средняя относительная ошибка по сравнению с линейной моделью уменьшена в 2,8 раза, а средняя квадратическая ошибка – в 3,3 раза. Выполнен расчет ползучести и релаксации для углепластика КМУ-4Л с различными укладками, а также проведено моделирование ползучести и переменного во времени нагружения для углепластика БМИ-3/3692. Средняя относительная ошибка по сравнению с линейной моделью уменьшена в 2,3 раза, а средняя квадратическая ошибка – в 2,0 раза.

4. Разработана модель деформирования криволинейной слоистой композитной балки. Модель позволяет определять окружные и радиальные напряжения для изотропных и слоистых конструкций. Выявлены наиболее опасные области балки, определено оптимальное соотношение прочности материала в радиальном и окружном направлениях, выработаны рекомендации по повышению несущей способности элемента.

5. При помощи предложенных моделей выполнен расчет деформирования элемента центральной части главного зеркала космического аппарата «Спектр-М». Показано, что при хранении при нормальных условиях будет происходить ползучесть конструкции за счет релаксации внутренних напряжений, что негативно сказывается на качестве работы космического аппарата. Для придания требуемой формы главному зеркалу требуется либо изготовление новой оснастки, позволяющей учесть процесс ползучести при хранении, либо применение корректирующих усилий для придания зеркалу требуемой формы. При помощи разработанных моделей проведен расчет усилий для коррекции формы главного зеркала космического аппарата «Спектр-М», выполнена оценка изменения формы главного зеркала аппарата в зависимости от времени при хранении в нормальных условиях. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что применение корректирующих усилий позволяет придать зеркалу

параболическую форму с требуемыми параметрами для обеспечения функциональности космического аппарата. Таким образом, применение разработанных в диссертационной работе моделей позволило провести расчет элемента конструкции космического аппарата и устранить недостатки, влияющие на его работоспособность.

Основные результаты диссертации отражены в следующих работах

1. Думанский А.М., Русланцев А.Н., Таирова Л.П. Модель нелинейного деформирования углепластиков // Конструкции из композиционных материалов. 2013. – №4 (132). – С. 6-12. (0.440 п.л./0.150 п.л.)
2. Русланцев А.Н., Думанский А.М., Алимов М.А. Модель напряженно-деформированного состояния криволинейной слоистой композитной балки // Труды МАИ. – 2017. – №96. – С. 1-21. http://trudymai.ru/upload/iblock/ef2/Ruslantsev_Dumanskiy_Alimov_rus.pdf (1.125 п.л./0.375 п.л.)
3. Русланцев А.Н., Думанский А.М. Деформирование углепластиков под действием переменных во времени нагрузок // Труды МАИ. – 2017. – №97. – С. 1-17. http://trudymai.ru/upload/iblock/46b/Ruslantsev_Dumanskiy_rus.pdf (0.875 п.л./0.438 п.л.)
4. Ruslantsev A.N., Portnova Ya.M., Tairova L.P., Dumansky A.M. Analysis of mechanical properties anisotropy of nanomodified carbon fiber-reinforced woven composites // IOP Conference Series: Material Science and Engineering (MSE). Электрон. журн. – 2016. – Vol.153. DOI: 10.1088/1757-899 (0.500 п.л./0.125 п.л.)
5. Думанский А.М., Русланцев А.Н., Карасева А.А. Расчет нелинейного деформирования перекрестно армированных углепластиков // Материалы IX Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ'2012), 25-31 мая 2012г., Алушта. – М.: Изд-во МАИ, 2012. – С. 363-365. (0.188 п.л./0.063 п.л.)
6. Думанский А.М., Русланцев А.Н. Закономерности нелинейного деформирования слоистых углепластиков // Сборник докладов всероссийской конференции по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат–2013». – М.: ВИАМ, 2013. – С. 22 (0.063 п.л./0.031 п.л.)
7. Русланцев А.Н. Анализ собственных чисел матриц, описывающих нелинейное деформирование слоистых углепластиков // XX Международная научно-техническая конференция «Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов». Сб. научных трудов. г. Обнинск, 2013. – С. 170-173. (0.250 п.л./0.250 п.л.)
8. Русланцев А.Н. Модель нелинейного деформирования полимерных композиционных материалов // Юбилейная XXV международная инновационно-

ориентированная конференция молодых учёных и студентов (МИКМУС — 2013): Материалы конференции (Москва, 13-15 ноября 2013 г.). – М.: Изд-во ИМАШ РАН, 2013. – С 87. (0.063 п.л./0.063 п.л.)

9. Русланцев А.Н., Думанский А.М. Модель нелинейного деформирования и накопление повреждений в полимерных композитах // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 2. DOI: <http://dx.doi.org/10.7463/0214.0687567> (0.500 п.л./0.250 п.л.)

10. Думанский А.М., Русланцев А.Н., Таирова Л.П. Наследственно-упругие свойства косоугольно армированного углепластика // Наследственная механика деформирования и разрушения твердых тел — научное наследие Ю.Н. Работнова: Матер. конференции (24-26 февраля 2014 г.). – М.: Изд-во ИМАШ РАН, 2014. – С.35-36. (0.124 п.л./0.041 п.л.)

11. Русланцев А.Н., Думанский А.М., Портнова Я.М. Анализ деформирования и разрушения при растяжении слоистого углепластика на основе равнопрочной ткани // Тезисы докладов Первой международной конференции «Деформирование и разрушение композиционных материалов и конструкций». – М.: Изд-во ИМАШ РАН, 2014. – С. 40. (0.063 п.л./0.021 п.л.)

12. Русланцев А.Н., Таирова Л.П., Портнова Я.М., Думанский А.М. Экспериментальное исследование деформирования и разрушения тканого углепластика с учетом фактора времени // Динамика и прочность конструкций аэрогидроупругих систем. Численные методы: Труды третьей научно-технической конференции. – М.: Изд-во ИМАШ РАН, 2015 г. – С. 40. (0.063 п.л./0.016 п.л.)

13. Русланцев А.Н., Портнова Я.М., Таирова Л.П., Думанский А.М. Экспериментальное исследование деформирования и разрушения тканого углепластика БМИ-3/3692 с учетом фактора времени // Научные труды IV-й Международной конференции «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении». – М.: Изд-во ИМАШ РАН. 2015 г. – С. 222-224. (0.188 п.л./0.063 п.л.)

14. Русланцев А.Н., Портнова Я.М., Таирова Л.П., Думанский А.М. Анализ анизотропии механических свойств наномодифицированного тканого углепластика БМИ-3/3692 // XXVII Международная инновационно-ориентированная конференция молодых ученых и студентов (МИКМУС - 2015): Труды конференции. 2015. – М.: Изд-во ИМАШ РАН, 2015 г. – С. 32-35. (0.250 п.л./0.063 п.л.)

15. Русланцев А.Н., Портнова Я.М., Таирова Л.П., Думанский А.М. Анализ анизотропии механических свойств наномодифицированного тканого углепластика БМИ-3/3692 // Механика композиционных материалов и

конструкций, сложных и гетерогенных сред: Сборник материалов Всероссийской научной конференции. – М.: ИПРИМ РАН, 2015. – С. 266-269. (0.250 п.л./0.063 п.л.)

16. Русланцев А.Н., Думанский А.М., Алимов М.А. Задача о изгибе криволинейной композитной балки // Труды Второй международной конференции «Деформирование и разрушение композиционных материалов и конструкций» – М.: Столица. 2016. – С. 146-148. (0.188 п.л./0.063 п.л.)

17. Русланцев А.Н., Думанский А.М., Портнова Я.М. Анализ анизотропии механических свойств тканого углепластика с бисмалемимдным связующим // Труды Второй международной конференции «Деформирование и разрушение композиционных материалов и конструкций» – М.: Столица. – 2016. – С. 149-150. (0.125 п.л./0.041 п.л.)

18. Русланцев А.Н., Думанский А.М., Алимов М.А. Задача об изгибе криволинейной композитной балки // Научные труды V-й Международной научной конференции «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении». М.: Издательский дом «Спектр». – 2017. – С. 241-243. (0.188 п.л./0.063 п.л.)

19. Русланцев А.Н., Думанский А.М., Портнова Я.М., Таирова Л.П. Модель прогнозирования ползучести в перекрестно-армированных углепластиках // Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред: Сборник трудов Всероссийской научной конференции. Москва, 21-23 ноября 2017 г. – М.: ИПРИМ РАН, 2017. – С. 166-168. (0.188 п.л./0.047 п.л.)

20. Русланцев А.Н., Феста Ю.Ю., Думанский А.М., Алимов М.А. Модель напряженно-деформированного состояния криволинейной слоистой балки при изгибе // Политехнический молодежный журнал. — 2017. — №8. DOI: 10.18698/2541-8009-2017-8-143 (0.688 п.л./0.172 п.л.)