

На правах рукописи



СОЛОВЬЕВ Павел Владимирович

**ПРОЧНОСТЬ СТЕРЖНЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
КОНСТРУКЦИЙ ИЗ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТОВ С
УЧЕТОМ ИХ СТРУКТУРЫ**

Специальность:

**01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и
аппаратуры**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Уфа – 2016

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» на кафедре сопротивления материалов.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Первушин Юрий Сергеевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Павлов Валентин Фёдорович
ФГАОУ ВО «Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П. Королёва» (национальный исследовательский университет),
заведующий кафедрой «Сопротивление материалов»

доктор технических наук, профессор
Ершов Николай Петрович
директор Межрегионального совета по науке и технологиям

Ведущее предприятие: ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет»
(национальный исследовательский университет)

Защита состоится «20» мая 2016 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.288.10 на базе ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (450000, Уфа-центр, ул. К. Маркса, 12, УГАТУ).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» и на сайте www.ugatu.su.

Автореферат разослан «___» _____ 2016 года

Ученый секретарь диссертационного совета, д-р техн. наук, проф.

Ф.Г. Бакиров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одним из основных направлений улучшения тактико-технических характеристик авиационной техники в настоящее время является использование в их конструкциях композитных материалов (КМ), что подтверждается целым рядом теоретических и экспериментальных исследований отечественных и зарубежных авторов. Композиты обеспечивают высокие удельные характеристики конструкций при существенной экономии массы.

Актуальность исследований в данном направлении подчёркивается постановлением правительства РФ от 24 июля 2013 г № 1307-р «Развитие отрасли производства композитных материалов» (план мероприятий «дорожная карта») и высказываниями президента Российской Федерации Владимира Владимировича Путина, выступающего за возрождение отечественной индустрии композиционных материалов, без которой Россия рискует потерять конкурентоспособность своей экономики, от 24.10.2012: «Считаю, что без развития этого сектора мы рискуем потерять конкурентоспособность многих наших отраслей. Это именно то направление, где мы можем значительно продвинуться вперёд».

Применение композитов открывает широкие возможности для создания «интеллектуальных» конструкций, оптимальным образом подходящих для различных условий эксплуатации. Основным инструментом проектировщиков для этого является варьирование структурой композита (матричной и армирующей компонентами, коэффициентом объёмного содержания волокон, углами и последовательностью укладки слоёв в пакете, величиной гибридности и т.д.). С другой стороны многообразие факторов, воздействующих на свойства КМ, требует более глубокого понимания влияния структуры композита на напряжённое и деформированное состояния (НДС) элементов конструкций.

Особенностью технологического процесса изготовления изделий из КМ является появление в слоях остаточных технологических напряжений, величина и знак которых зависят от соотношений физико-механических характеристик матричной и армирующей компонент, а также от структуры слоёв в слоистом КМ. Остаточные напряжения приводят к короблению и уменьшению несущей способности композитных конструкций.

Учёт остаточных технологических напряжений возможен только при послойном анализе напряжённо-деформированного состояния, который позволяет оценивать НДС каждого слоя в отдельности и пакета в целом. Такой подход является наиболее перспективным, так как он позволяет прогнозировать последовательность разрушения слоёв композита.

Физико-механические свойства слоистого композита всецело зависят от его структуры. Структура композитного материала обуславливает его упругие, прочностные, теплофизические характеристики и др. В элементах конструкций из слоистых КМ обычно используется *симметричная* структура укладки слоёв.

При изготовлении изделий из слоистых КМ имеют место отклонения структуры от расчётной. Это приводит к изменению напряжённого состояния

композитной конструкции и появлению деформаций, несвойственных данному виду нагружения и недопустимых при эксплуатации.

Изменение структуры может быть вызвано следующими *факторами*: отклонениями углов укладки слоёв от расчётных, нарушением последовательности укладки слоёв, наличием разнотолщинности слоёв, неоднородным воздействием температуры, влиянием влажности, локальным разрушением связующего в слоях. Варьирование структурой позволяет обеспечить заданное деформационное поведение элементов конструкций (лопатки компрессоров, лонжероны лопастей несущих винтов вертолётов, ветроэнергетических установок и др.) в условиях эксплуатации.

В связи с этим *актуальными* являются:

- исследование и прогнозирование влияния структуры на напряжённое и деформированное состояния элементов конструкций из слоистых КМ;
- исследование влияния структуры композитов на величину остаточных технологических напряжений в слоях;
- разработка методов компенсации влияния несбалансированности на напряжённо-деформированное состояние композитных конструкций;
- разработка численно-аналитической методики проектирования композитных структур для получения заданного деформационного поведения.

Исследования по теме диссертационной работы проводились в рамках гранта министерства науки и образования по теме: АД-АД-06.11 КФ – «Повышение надёжности и ресурса ГТД транспортных средств, эксплуатирующихся в условиях запылённой атмосферы и морской среды». Данная работа отвечает современным требованиям развития аддитивных технологий.

Цель и задачи исследования. Целью исследования является установление закономерностей влияния структуры слоистых композитных материалов на напряжённое состояние и деформационное поведение элементов конструкций из композитов в процессе проектирования и изготовления.

В рамках поставленной цели в работе решаются следующие *задачи*:

- 1) установить влияние структуры и её изменения, вызванного технологическими отклонениями углов укладки слоёв, нарушением заданной последовательности укладки, наличием разнотолщинности слоёв, локальным разрушением связующего в слоях, на напряжённое и деформированное состояния элементов конструкций из слоистых композитов;
- 2) выявить влияние структуры композита на остаточные технологические напряжения;
- 3) разработка методов компенсации влияния несбалансированности на напряжённо-деформированное состояние элементов композитных конструкций;
- 4) экспериментальная проверка влияния несбалансированности на деформационное поведение слоистых КМ.

Научная новизна.

- 1) решена комплексная задача прогнозирования влияния структуры композитов на напряжённое и деформированное состояния элементов конструкций

из слоистых КМ (композитные лопатки осевых компрессоров, двутавровые балки и другие стержневые элементы конструкций);

2) выявлено влияние структуры слоистых КМ на величину остаточных технологических напряжений;

3) установлены аналитические зависимости напряжённого и деформированного состояний для структур композитов от углов укладки, последовательности укладки, толщин и количества слоёв;

4) предложен параметр несбалансированности композитных структур, который характеризует влияние отклонений структуры от сбалансированности;

5) разработана методика анализа несбалансированных структур композитов с целью получения заданного деформационного и напряжённого состояний элементов конструкций из КМ (лопаток осевых компрессоров, двутавровых балок и др.).

Достоверность полученных результатов обосновывается:

– использованием при решении поставленных задач классических методов механики твёрдого деформируемого тела, теории анизотропных тел;

– применением современного экспериментального оборудования;

– сопоставлением экспериментальных исследований с данными теоретического анализа;

– применением при математическом моделировании хорошо апробированного численного метода анализа – метода конечных элементов.

Практическая ценность результатов работы заключается в:

– установлении влияния структур многослойных композитов на деформированное и напряжённое состояния (послойно) элементов конструкций из КМ с учётом остаточных напряжений, что позволяет конструкторам выбирать более рациональные структуры для проектируемых изделий;

– в создании справочных данных о влиянии структуры на прочность и жёсткость элементов конструкций из композитов, что даёт возможность определить границы допускаемых технологических отклонений для проектируемых изделий;

– в использовании методов компенсации изначальной и технологической несбалансированности слоистых КМ, что позволяет компенсировать отклонения структур от расчётных на этапе проектирования;

– в целевом создании структур для получения заданного деформационного поведения.

Внедрение. Разработанная методика конечно-элементного моделирования напряжённо-деформированного состояния элементов конструкций из слоистых композитов (лопаток компрессора ГТД) используется на ФГУП «НПП «МОТОР», в ОАО НИИТ, в ОАО «КумАПП» и в учебном процессе в ФГБОУ УГАТУ при чтении дисциплины «Основы механики, проектирования и изготовления изделий из слоистых композитных материалов». Акты внедрения прилагаются.

Автор выносит на защиту:

1) результаты решения комплексной задачи влияния структуры и её изменений, вызванных технологическими отклонениями углов укладки слоёв, нарушением последовательности укладки, наличием разнотолщинностей слоёв, на деформационное поведение и напряжённое состояние элементов конструкций из слоистых КМ на примерах лопаток осевых компрессоров, балок из композитов, в том числе гибридных, и др.;

2) выводы о влиянии структуры композитов на величину остаточных технологических напряжений;

3) аналитические зависимости параметра несбалансированности от отклонений углов укладки и числа слоёв для прогнозирования деформационного поведения элементов конструкций из слоистых КМ;

4) целевое проектирование структур для получения заданного деформированного состояния на примере лопаток осевых компрессоров из КМ.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на ВМНК «Мавлютовские чтения», Уфа, УГАТУ, 2010; РНТК «Мавлютовские чтения», Уфа, УГАТУ, 2011; Всероссийской зимней школе-семинаре аспирантов и молодых учёных «Актуальные проблемы в науке и технике», Уфа, УГАТУ, 2012; МНТМК «Новые материалы и технологии глубокой переработки сырья – основа инновационного развития экономики России», Москва, ВИАМ, 2012, в ОАО «КумАПП» в рамках семинара о проблемах технологии изготовления лопастей вертолётов в процессе изготовления (2014 г.).

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 9 печатных работ в рецензируемых изданиях, из них 7 статей, входящих в перечень ВАК РФ.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, списка литературы (116 наименований) и приложения. Основная часть работы содержит 157 страниц, 102 иллюстрации, 17 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель, задачи и основные положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость результатов диссертации. Акцентируется важность выбранной темы исследований при проектировании элементов конструкций из композитных материалов.

В первой главе выполнен анализ работ в области механики слоистых композитов. Отмечены основные подходы к расчёту конструкций из композитных материалов на прочность и жёсткость. Вопросам механики композитных материалов посвящены работы Болотина В.В., Васильева В.В., Королёва В.И., Лехницкого С.Г., Образцова И.Ф., Скудры А.М., Булавса Ф.Я., Тарнопольского Ю.М., Tsai S.W., Jones R.M. и др. В них были рассмотрены особенности дефор-

мированного и напряжённого состояний слоистых композитов *симметричной* структуры.

Структура композитного материала полностью обуславливает его упругие, прочностные, теплофизические характеристики и др. В элементах конструкций из слоистых КМ используется два варианта структур: *симметричная (сбалансированная)* и *несбалансированная*. Под *сбалансированной* понимается такая структура слоистого композитного материала, которая отвечает следующим требованиям:

– симметрии физико-механических характеристик слоёв относительно срединной поверхности слоистого пакета;

– каждому слою с углом укладки $+\varphi$ должен соответствовать слой с углом укладки $-\varphi$, находящийся на таком же расстоянии по другую сторону от срединной поверхности.

Удовлетворить вышеуказанным требованиям возможно лишь в следующих случаях: в однонаправленно армированном композите или при укладке слоёв под углами 0° и 90° .

В случаях, когда имеются слои, уложенные под углами, отличными от вышеупомянутых, структура композитного материала в изделии *несбалансирована*. Несбалансированность также возникает при изготовлении изделий из КМ, когда имеет место отклонения укладки от расчётной. Это приводит к изменению напряжённого и деформированного состояний композитной конструкции.

В работах вышеуказанных авторов рассматриваются вопросы механических свойств КМ с учётом их структуры, упругих и прочностных свойств компонентов, проблемы выбора оптимальной структуры композита и др. Однако, вопросам влияния структуры и её несбалансированности на напряжённое состояние и деформационное поведение многослойных композитов в рассмотренной литературе уделено недостаточное внимание. На основании этого были сформулированы цель и задачи исследований диссертационной работы.

Во второй главе описана теоретическая база исследования несбалансированности слоистых композитных материалов, предложена и реализована модель деформирования КМ, представлены зависимости составляющих матриц жёсткости и упругой податливости модели на основе упругих свойств однонаправленного слоя, выражения для определения упругих свойств слоя при произвольной ориентации главных осей упругости относительно направления нагружения.

В модели деформирования несбалансированных слоистых композитов были использованы следующие предпосылки:

- 1) упругие свойства элементарных слоёв несимметричны относительно срединной плоскости композита;
- 2) элементарные слои и композит в целом деформируются согласно обобщённому закону Гука;
- 3) слои деформируются совместно без скольжения.

Расчётный элемент модели деформирования несбалансированных композитов представлен на рис. 1.

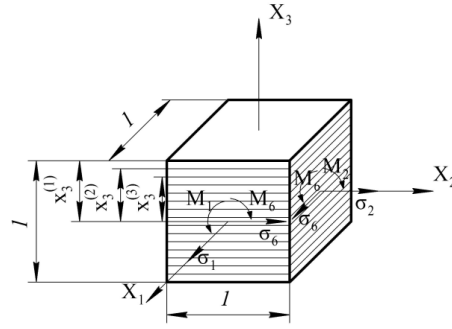


Рис. 1. Расчётный элемент модели деформирования несбалансированных слоистых композитов

Обобщённый закон Гука для i -го слоя:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix}^{(i)} = \begin{bmatrix} S'_{11} & S'_{12} & S'_{16} \\ S'_{12} & S'_{22} & S'_{26} \\ S'_{16} & S'_{26} & S'_{66} \end{bmatrix}^{(i)} \times \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_6 \end{bmatrix}^{(i)}, \quad (1)$$

где $S'_{jl}{}^{(i)}$ – компоненты матрицы упругой податливости i -го слоя в системе координат $X_1 X_2 X_3$ ($j, l = 1, 2, 6$).

Деформации i -го слоя, выраженные через деформации $\varepsilon_j^{(0)}$ и кривизны k_j срединной плоскости, имеют вид

$$\varepsilon_j^{(i)} = \varepsilon_j^{(0)} + x_3 k_j, \quad (j, l = 1, 2, 6). \quad (2)$$

Выражение для определения напряжений в i -м слое

$$\sigma_l^{(i)} = Q_{lj}(\varepsilon_j^{(0)} + x_3 k_j), \quad (j, l = 1, 2, 6) \quad (3)$$

где $Q_{lj}^{(i)} = (S'_{jl}{}^{(i)})^{-1}$ – матрица жёсткости i -го слоя в системе координат $X_1 X_2 X_3$.

Действующие на расчётный элемент напряжения и моменты определяются по формулам

$$\begin{cases} \sigma_l = A_{lj} \varepsilon_j^{(0)} + B_{lj} k_j, \\ M_l = B_{lj} \varepsilon_j^{(0)} + D_{lj} k_j, \end{cases} \quad (4)$$

где

$$A_{lj} = \int_{-1/2}^{1/2} Q_{lj}^{(i)} dx_3; \quad B_{lj} = \int_{-1/2}^{1/2} x_3 Q_{lj}^{(i)} dx_3; \quad D_{lj} = \int_{-1/2}^{1/2} x_3^2 Q_{lj}^{(i)} dx_3. \quad (5)$$

Модель деформирования несбалансированных композитов в плоской постановке выглядит следующим образом:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1^{(0)} \\ \varepsilon_2^{(0)} \\ \varepsilon_6^{(0)} \\ k_1 \\ k_2 \\ k_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{16} & b_{11} & b_{12} & b_{16} \\ & a_{22} & a_{26} & b_{12} & b_{22} & b_{26} \\ & & a_{66} & b_{16} & b_{26} & b_{66} \\ & & & d_{11} & d_{12} & d_{16} \\ & & & & d_{22} & d_{26} \\ & & & & & d_{66} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_6 \\ M_1 \\ M_2 \\ M_6 \end{bmatrix}; \quad (6)$$

здесь $\varepsilon_1^{(0)}, \varepsilon_2^{(0)}, \varepsilon_6^{(0)}$ – деформации срединной плоскости; k_1, k_2, k_6 – кривизны изгиба и кручения срединной плоскости; a_{ij}, b_{ij}, d_{ij} – составляющие матрицы упругой податливости модели деформирования несимметричных КМ; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_6$ – усреднённые нормальные и касательное напряжения, действующие на единичный кубик композита; M_1, M_2, M_6 – усреднённые изгибающие и крутящий моменты, приходящиеся на единицу длины.

Во второй главе приводится метод расчёта НДС стержневых элементов из несбалансированных композитных материалов с учётом сдвиговых деформаций. Для приближенного учёта деформации сдвига ε_{xz} на прогиб балки используется усреднённая по толщине балки деформация сдвига

$$\psi(x) = \frac{1}{h} \int_0^h \varepsilon_{xz}(x, z) dz. \quad (7)$$

Приведены выражения для определения угла поворота и прогиба в сечении стержневых элементов с учётом сдвига.

В третьей главе анализируется влияние несбалансированности, вызванной технологическими отклонениями углов укладки слоёв, нарушением последовательности их укладки, разнотолщинностью слоёв, локальным разрушением связующего в слое, на напряжённое состояние и деформационное поведение стержневых элементов конструкций из композитных материалов. Рассматриваются рабочие части (перо) роторных и статорных лопаток компрессора ГТД из КМ на металлической и полимерной матрицах, двутавровые балки, в том числе из гибридных композитных материалов и др.

Влияние несбалансированности на напряжённое состояние и деформационное поведение рабочей и направляющей лопаток из углемагния оценивалось на моделях рабочих частей роторных и статорных лопаток, построенных на основе геометрических параметров существующих лопаток КНД АГТД (рис. 2). Структура композитной лопатки: $(45 / -45 / 30 / -30 / 0 / -30 / 30 / -45 / 45)^0$.

На рис. 3 представлены графики зависимостей относительного изменения суммарных перемещений в плоскости XOY рассматриваемых узлов (рис. 4) пера рабочей лопатки по отношению к сбалансированному состоянию. Относи-

тельное изменение суммарных перемещений узлов лопатки вычислялось по формуле:

$$\Delta U_{XOY}^{отн} = \left| \frac{U_{XOY}^{сбал} - U_{XOY}^{несбал}}{U_{XOY}^{сбал}} \right| \cdot 100\%, \quad (8)$$

где $U_{XOY}^{сбал}$ – суммарные перемещения узла лопатки в сбалансированном состоянии, а $U_{XOY}^{несбал}$ – суммарные перемещения узла лопатки в несбалансированном состоянии соответственно.

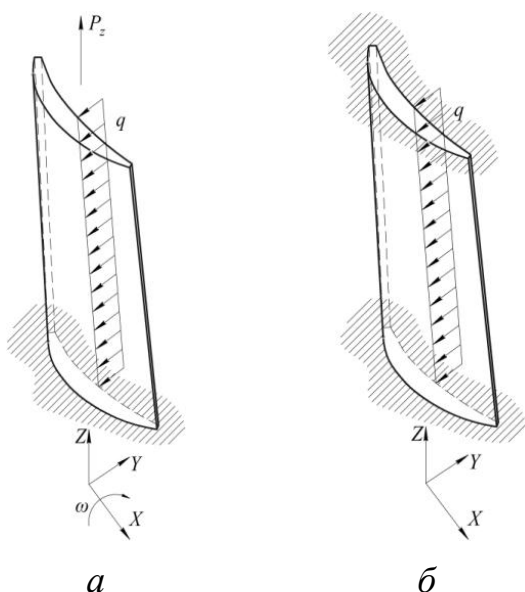


Рис. 2. Расчётная схема рабочей (а) и направляющей (б) лопаток компрессора ГТД

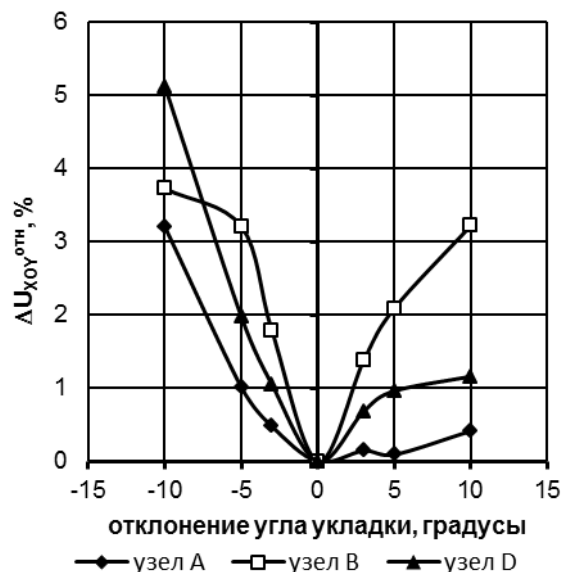


Рис. 3. Зависимость $\Delta U_{XOY}^{отн}$ узлов пера рабочей лопатки от отклонения угла укладки внешнего слоя

Рис. 3 свидетельствует, что отклонение угла укладки одного внешнего слоя на $5 \div 10^\circ$ приводит к изменению деформированного состояния пера лопатки на $3 \div 5\%$.

Изменения нормальных напряжений вдоль волокон в окрестностях узла В наиболее напряжённого (корневого) сечения пера рабочей лопатки представлен на рис. 5. Из рис. 5 видно, что изменение напряжённого состояния в слоях лопатки при отклонении угла укладки одного слоя на $5 \div 10^\circ$ составляет до 50 и более процентов.

Несбалансированность структуры пера композитной лопатки приводит к изменению его угла установки в процессе эксплуатации, что влияет на газодинамические параметры ступени компрессора и приводит к снижению КПД и увеличению потерь полного давления.

При анализе влияния несбалансированности, вызванной отклонениями угла укладки одного из слоёв лопатки, на её НДС приняты следующие обозначения: $\Delta\beta = \beta^{расч} - \beta^{деформ}$ – изменение угла установки сечения лопатки по

сравнению с расчётным. На рис. 6 представлена зависимость изменения угла установки сечения от отклонения угла укладки внешнего слоя по отношению к сбалансированному состоянию. На рис. 7 представлена зависимость изменения угла установки сечения от нарушения последовательности укладки слоёв композитных лопаток.

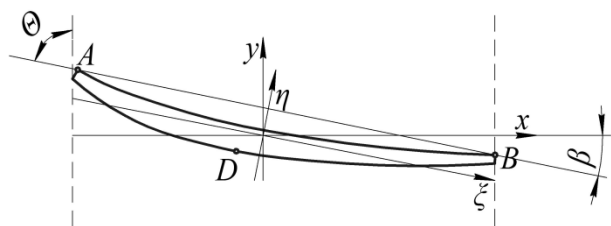


Рис. 4. Схема поперечного сечения лопатки компрессора

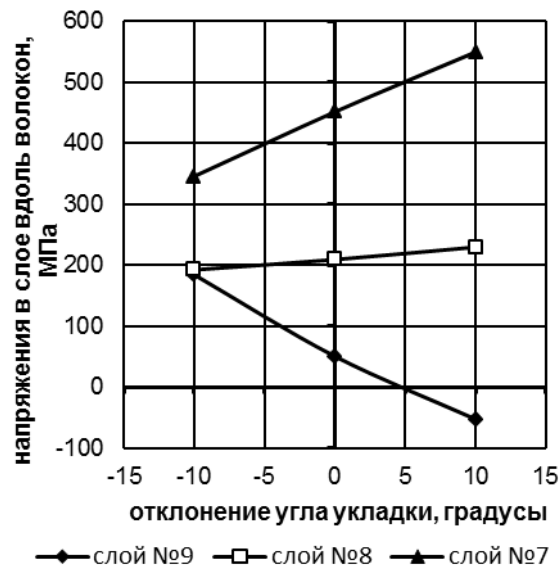


Рис. 5. Зависимость нормальных напряжений вдоль волокон в слоях пера рабочей лопатки в окрестностях узла B от отклонения угла укладки внешнего слоя

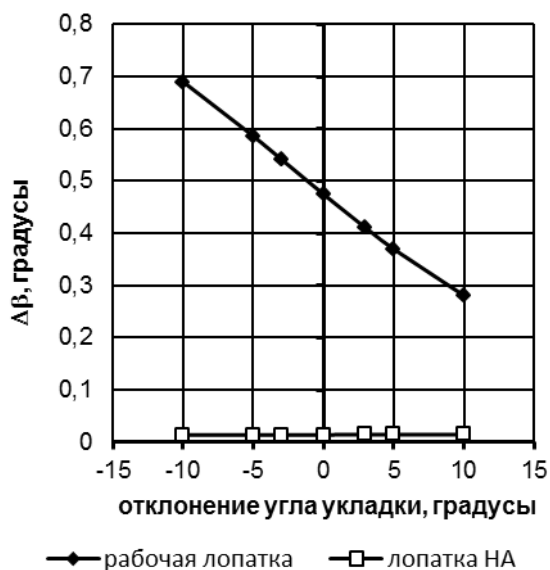


Рис. 6. Зависимость изменения угла установки сечения лопатки от отклонения угла укладки внешнего слоя от сбалансированного состояния

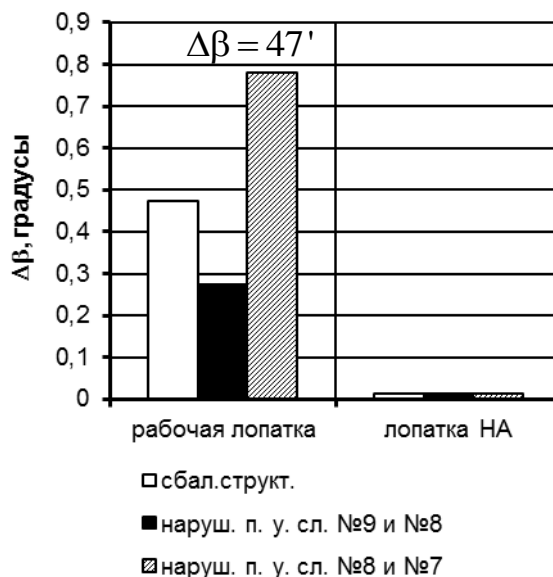


Рис. 7. Зависимость изменения угла установки сечения лопатки от характера нарушения последовательности укладки слоёв

График на рис. 6 свидетельствует, что при *отклонении угла укладки* на -10° величина изменения угла установки сечения составляет $42'$. В статье И. Воронича, Л. Ивчика, В. Коньшина и др. «Газодинамический расчёт первой ступени экспериментального двухступенчатого компрессора с использованием программного комплекса CFX» с помощью сопоставления расчётных и экспериментальных данных показано, что подобные деформации (порядка 1°) приводят к ухудшению КПД ступени на 1 %, что существенно для компрессоров авиационных ГТД.

Изменяя угол укладки внешнего слоя можно существенно уменьшить величину изменения угла установки $\Delta\beta$ (при угле укладки внешнего слоя $\varphi_9 = 68^\circ$ $\Delta\beta < 9'$). Таким образом, управляя несбалансированностью структуры, можно получить необходимые расчётные параметры композитной конструкции.

Максимальное изменение угла установки сечения рабочей лопатки $\Delta\beta$ при *нарушении последовательности укладки слоёв* (рис. 7) составляет до $47'$, что также влияет на газодинамические режимы работы компрессора. Для лопаток направляющего аппарата изменение угла установки незначительно ($\Delta\beta < 1'$).

Влияние несбалансированности на деформационное поведение композитной лопатки существенно зависит от материала матрицы. При выборе в качестве материала пера лопатки слоистого углепластика величина изменения угла установки сечения лопатки $\Delta\beta$ достигает $1^\circ 12'$. Влияние несбалансированности на изменение нормальных напряжений в исследуемых слоях пера лопатки составляет 50 и более процентов.

При моделировании влияния несбалансированности структуры двухопорной двутавровой балки, являющейся составной частью силовых элементов авиационных конструкций, находящейся под действием распределённой нагрузки q , на её НДС была реализована схема нагружения, представленная на рис. 8. На рис. 9 приведена зависимость максимального изменения относительного прогиба несбалансированных двутавровых балок из гибридных КМ по отношению к сбалансированным структурам при отклонении углов укладки внешнего слоя. Изменение относительного прогиба вычислялось по формуле

$$\Delta U_z^{отн} = \left| \frac{U_z^{сбал} - U_z^{несбал}}{U_z^{сбал}} \right| \cdot 100\%, \quad (9)$$

где $U_z^{сбал}$ – прогиб балки в сбалансированном состоянии, а $U_z^{несбал}$ – прогиб балки в несбалансированном состоянии соответственно.

Из графика (рис. 9) видно, что при увеличении количества слоёв в полке влияние несбалансированности на деформационное поведение двутавровых балок уменьшается. При числе слоёв ≤ 9 влияние несбалансированности весьма существенно ($\Delta U_z^{отн}$ составляет $5 \div 10\%$). Для двутавровых балок с количеством

слоёв в полке ≥ 13 величина изменения относительного прогиба составляет 2...3%. В случае отклонения углов укладки двух и более слоёв полки двутавра изменение деформированного состояния может достигать $\Delta U_z^{omn} \geq 5\%$. Увеличение напряжений в слоях двутавровых балок вследствие влияния несбалансированности может составлять до 30%.

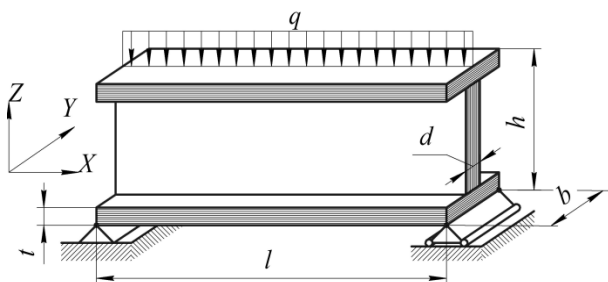


Рис. 8. Расчётная схема двухопорной двутавровой слоистой композитной балки

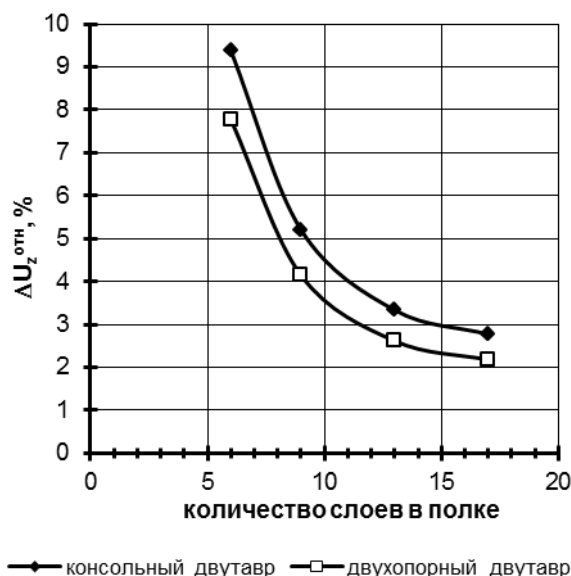


Рис. 9. Зависимость максимального изменения относительного прогиба консольных и двухопорных двутавровых балок от числа слоёв в полке

В работе исследуется влияние несбалансированности, вызванной отклонением угла укладки внешнего слоя, на несущую способность и кинетику разрушения двухопорной двутавровой балки с полкой, состоящей из 9-ти слоёв. В качестве критерия прочности при послойном анализе используется критерий Цзя-Хилла:

$$H_{cr} = \left(\frac{\sigma_1}{\bar{\sigma}_1} \right)^2 - \frac{\sigma_1 \sigma_2}{\bar{\sigma}_1 \bar{\sigma}_2} + \left(\frac{\sigma_2}{\bar{\sigma}_2} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{\bar{\tau}_{12}} \right)^2 = 1, \quad (10)$$

где σ_1 , σ_2 и τ_{12} – действующие значения напряжений в однонаправленном слое, $\bar{\sigma}_1$, $\bar{\sigma}_2$ и $\bar{\tau}_{12}$ – предельные напряжения в слое в направлении параллельно и перпендикулярно волокнам и при сдвиге в плоскости слоя соответственно.

В табл. 1. представлена кинетика разрушения слоёв балки по критерию Хилла в зависимости от величины отклонения угла укладки 9-го слоя и прикладываемой нагрузки.

Из табл. 1 следует, что разрушение связующего в одном из слоёв не приводит к мгновенному разрушению всей конструкции, происходит перераспределение напряжений и работоспособность сохраняется, однако имеет место существенное изменение деформационного поведения (на 13%). Принято считать,

что при разрушении связующего в двух и более слоях конструкция теряет работоспособность.

В третьей главе рассмотрены методы компенсации *технологической несбалансированности*, причиной которой являются отклонения углов укладки слоёв от расчётных. Одним из предложенных методов *компенсации* несбалансированности является *варьирование углами укладки* одного или нескольких слоёв. Установлено, что наиболее эффективным при изгибе является изменение угла укладки слоя, имеющего наибольшую изгибную жёсткость в продольном направлении.

Таблица 1

Нагрузка, кПа	Отклонение угла укладки слоя №9	$\Delta U_z^{отн}$, %	Величина критерия Хилла				
			слой №9	слой №8	слой №7	слой №2	слой №6
450	10	2,3	0,09	0,73	0,12	0,58	-
	5	1,5	0,15	0,86	0,12	0,58	-
	3	1,0	0,19	0,93	0,12	0,58	-
	0	0,0	0,26	0,98	0,13	0,58	-
	-3	-1,2	0,34	1,17	0,14	0,58	-
	-3, разрушен слой №8	-13,0	0,42	0,00	0,16	0,60	-
515	-3, разрушен слой №8	-29,3	0,55	0,00	0,21	0,78	1,03
	-3, разрушены слои №8, 6	-40,1	0,57	0,00	0,23	0,79	0,00
580	-3, разрушены слои №8, 6	-57,8	0,72	0,00	0,29	1,01	-
	-3, разрушены слои №8, 6, 2	-323,9	0,74	0,00	0,29	0,00	-

Возможность компенсации *изначальной структурной несбалансированности* исследуется на 5-слойной консольной балке со структурой $(45^\circ / -45^\circ / 0^\circ / -45^\circ / 45^\circ)$. При практической реализации структура балки будет несбалансированной, и, соответственно, при изгибе возникает кручение. Варьируя углом укладки внешнего слоя, определяется значение угла укладки, при котором угол закручивания свободного конца Θ (рис. 10) сводится к минимуму (структура $45^\circ / -45^\circ / 0^\circ / -45^\circ / 52^\circ$). На рис. 11 представлена зависимость изменения угла закручивания свободного конца Θ от величины отклонения угла укладки внешнего слоя и числа слоёв. Из рис. 11 следует, что отклонение угла укладки внешнего слоя на 7° минимизирует параметр Θ .

В третьей главе приведены аппроксимирующие функции относительного изменения прогиба для консольных и двухопорных балок в зависимости от числа слоёв. Построены поверхности изменения относительного прогиба балок в зависимости от отклонения угла укладки внешнего слоя, числа слоёв и условий закрепления (рис. 12), а также аппроксимирующие поверхности для трёхмерных графиков этих поверхностей консольных и двухопорных балок (рис. 13). Также в работе представлены уравнения аппроксимирующих функции для

поверхностей изменения относительного прогиба в зависимости от количества слоёв и величины отклонения угла укладки для двухопорных и консольных балок. Все вышеописанные результаты (рис. 12, 13) в совокупности позволяют при проектировочном расчёте элементов конструкций из композитов оценить влияние технологических отклонений структуры КМ на его напряжённо-деформированное состояние и определить границы допустимых отклонений.

В четвертой главе приведены результаты исследования влияния структуры КМ на *остаточные технологические напряжения* в стержневых элементах конструкций из слоистых композитов с учётом зависимостей коэффициентов термического расширения и упругих характеристик однонаправленного слоя от температуры, а также методика прогнозирования термоупругих характеристик однонаправленного слоя КМ как функций от температуры; представлены результаты влияния несбалансированности, вызванной отклонениями углов укладки слоёв, на величину остаточных напряжений в слоистых композитных балках.

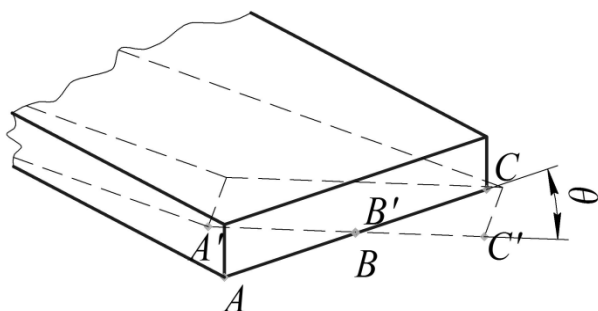


Рис. 10. Схема кручения свободного торца консольной балки при изгибе

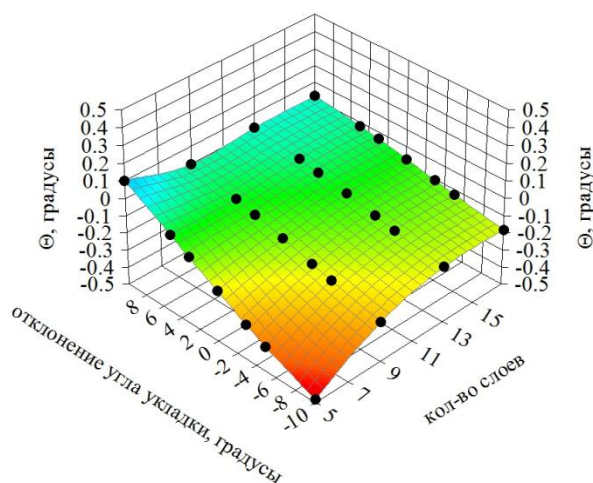


Рис. 11. Изменение угла закручивания Θ при отклонении угла укладки внешнего слоя в зависимости от числа слоёв

На рис. 14 показано изменение деформированного состояния (коробление) 5-слойной композитной балки при наличии несбалансированности структуры, вызванной отклонениями угла укладки внешнего слоя. На рис. 15 представлено изменение величины остаточных нормальных напряжений вдоль волокон при наличии несбалансированности структуры. Внешние нагрузки в данном случае отсутствуют.

Полученные данные (рис. 14, 15) показывают, что влияние несбалансированности на величину максимального коробления $\Delta U_z^{\text{отн}}$ может составлять до 4% (по отношению к длине балки), изменение остаточных технологических напряжений в этом случае может достигать 50% и более (по отношению к сбалансированному состоянию).

В четвертой главе приведены результаты экспериментов по определению влияния несбалансированности, вызванной технологическими отклонениями

угла укладки внешнего слоя, на деформационное поведение слоистых композитных балок; представлены данные экспериментального исследования остаточных напряжений в композитном углепластике и методика их определения.

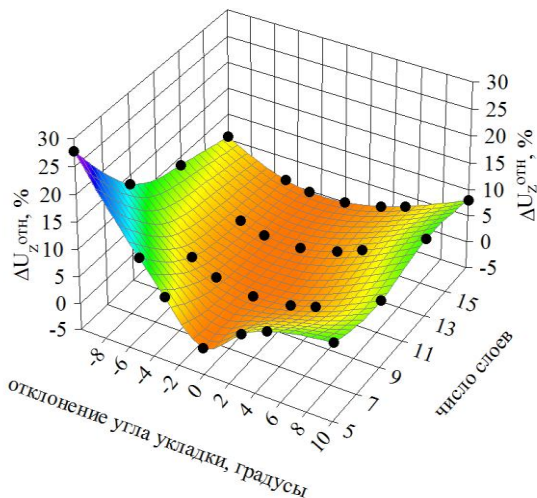


Рис. 12. График поверхности изменения относительного прогиба двухпорных балок от отклонений углов укладки внешнего слоя при разных числах слоёв

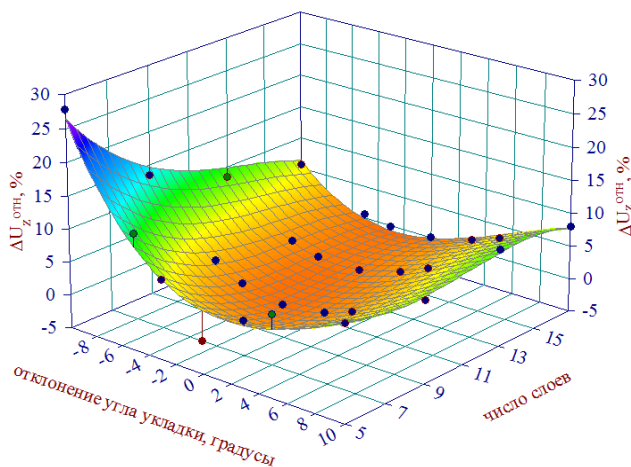


Рис. 13. График аппроксимирующей поверхности изменения относительного прогиба двухпорных балок от отклонений углов укладки внешнего слоя при разных числах слоёв

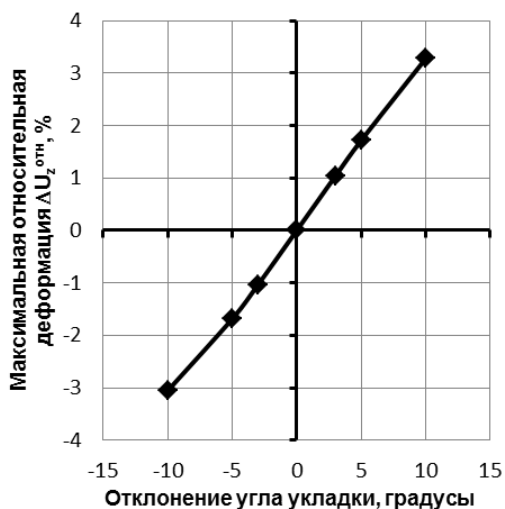


Рис. 14. Зависимость относительного изменения прогиба $\Delta U_z^{\text{отн}}$ 5-слойной балки от отклонения угла укладки внешнего слоя $\Delta\varphi$

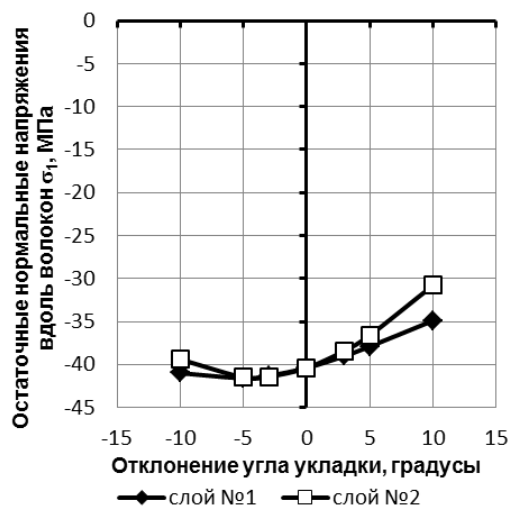


Рис. 15. Зависимость остаточных нормальных напряжений σ_1 в слоях 5-слойной консольной балки от величины отклонения угла укладки внешнего слоя $\Delta\varphi$

Анализируя данные по всем испытанным образцам, имеем: величина остаточных напряжений вдоль волокон составляет от 1,5 до 7,5 МПа, в поперечном направлении от 0,1 до 0,9 МПа. Большие напряжения в продольном направлении обусловлены тем, что разница между термоупругими характеристиками волокон и матрицы в продольном направлении существенно больше,

чем в поперечном, приблизительно на порядок, а также более высокой жёсткостью композита в данном направлении.

В **приложении** приведены результаты количественного влияния несбалансированности, вызванной отклонениями углов укладки слоёв, нарушением последовательности укладки, наличием разнотолщинности слоёв или локального разрушения связующего в слое, на напряжённое и деформированное состояния стержней и балок прямоугольного сечения при растяжении и изгибе; представлен алгоритм конечно-элементного моделирования элементов конструкций из слоистых КМ с послойным анализом прочности; представлены статистически обработанные результаты различных упругих и прочностных испытаний композитных образцов, в том числе высокотемпературных испытаний ($T = 285^\circ\text{C}$) углепластиков.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Решена комплексная задача влияния структуры и её изменений, вызванных технологическими и эксплуатационными факторами, на напряжённо-деформированное состояние (с учётом остаточных технологических напряжений) стержневых элементов, результаты которой позволяют:

- управлять напряжённым состоянием в слоях элементов конструкций из слоистых композитов (снизить напряжения на $15\div 20\%$);

- повысить несущую способность сложноармированных композитов с учётом температуры эксплуатации (до 14%);

- управлять деформационным поведением элементов конструкций из слоистых КМ (применительно к лопаткам компрессора снизить упругую раскрутку пера до $9'$).

2. Разработана методика конечно-элементного моделирования и расчёта композитных конструкций сложной формы (роторных и статорных лопаток компрессоров ГТД и др.), заключающаяся в послойном анализе напряжённого и деформированного состояний, которая позволяет:

- оценить несущую способность многослойных КМ;

- раскрыть характер и последовательность разрушения слоёв в элементах композитных конструкций, что дает возможность проследить кинетику разрушения композита;

- создавать структуры для получения требуемого деформационного поведения элементов конструкций в условиях эксплуатации;

3. Разработаны методы компенсации структурной и технологической несбалансированности, заключающиеся в варьировании углом укладки внешнего слоя или в использовании дополнительного компенсационного слоя, позволяющие минимизировать их влияние на деформационное поведение элементов конструкций из КМ ($\Delta U_z^{\text{отн}} \leq 3\%$);

4. Выявлено влияние структуры композитов на величину остаточных технологических напряжений, что позволяет проектировать элементы конструкции с минимальными остаточными напряжениями (снижение напряжений на 20%).

Основные публикации по теме диссертации

В рецензируемых журналах из списка ВАК

1. Напряженное и деформированное состояния балочных стержневых элементов из несбалансированных композитов при изгибе. / Ю.С. Первушин, П.В. Соловьев // Вестник УГАТУ. Изд. УГАТУ, Уфа – 2011. Т.15, №1 (41). – С. 55–59.
2. Механическое поведение стержневых элементов из несбалансированных композитов при изгибе. / П.В. Соловьев // Вестник УГАТУ. Изд. УГАТУ, Уфа – 2011. Т. 15, №4 (44). – С. 107–110.
3. Напряженно-деформированное состояние двутавровых балок из гибридных несбалансированных композиционных материалов. / Ю.С. Первушин, П.В. Соловьев // Вестник Самарского Государственного Технического Университета. Серия «Технические науки». Изд. СамГТУ, Самара – 2012. № 1 (33). – С. 99–105.
4. Особенности деформационного поведения и напряженного состояния пластин из несбалансированных слоистых композиционных материалов. / Ю.С. Первушин, П.В. Соловьев // Вестник Самарского Государственного Аэрокосмического Университета им. академика С.П. Королева. Изд. СГАУ, Самара – 2012. № 1 (32). – С. 153–160.
5. Особенности напряженного и деформированного состояний лопатки компрессора ГТД из несбалансированных композитов / Ю.С. Первушин, П.В. Соловьев. // Вестник УГАТУ. Изд. УГАТУ, Уфа – 2013. Т.17, №3 (56). – С. 253–259.
6. Влияние структуры композитов на напряженно-деформированное состояние стержневых элементов конструкций при изгибе / Ю.С. Первушин, П.В. Соловьев. // Вестник УГАТУ. Изд. УГАТУ, Уфа – 2014. Т.18, №3 (64). – С. 67–72.
7. Влияние несбалансированности структуры слоистого композитного материала на технологические (остаточные) напряжения в балочных элементах конструкций / В.С. Жернаков, Ю.С. Первушин, П.В. Соловьев. // Вестник УГАТУ. Изд. УГАТУ, Уфа – 2015. Т.19, №3 (69). – С. 139–149.

В других изданиях

8. Механическое поведение стержневых элементов из несбалансированных композитов. / Ю.С. Первушин, П.В. Соловьев // Мавлютовские чтения: Российская научно-техническая конференция, посвященная 85-летию со дня рождения член-корр. РАН, д.т.н., профессора Р.Р. Мавлютова: сб. тр. в 5 т. Том 3. Механика процессов деформирования и разрушения вязкоупругопластических тел / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа: УГАТУ, 2011. – 227 с. – С. 184-188.
9. Влияние структурной несбалансированности слоистых композитов на механическое поведение стержней при растяжении. / П.В. Соловьев // Актуальные проблемы в науке и технике. Том 2. Машиностроение, электроника, приборостроение. Сборник трудов седьмой Всероссийской зимней школы-семинара аспирантов и молодых ученых, 14-16 февраля, 2012 г. / Уфимск. гос. авиац. тех. ун-т. – Уфа: УГАТУ, 2012. – 332 с. – С. 26-29.

СОЛОВЬЕВ Павел Владимирович

ПРОЧНОСТЬ СТЕРЖНЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ
СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТОВ С УЧЕТОМ ИХ СТРУКТУРЫ

Специальность 01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов,
аппаратуры

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано к печати __.__.2016 г. Формат 60 84 1/16.
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Times New Roman.
Усл. печ. л. 1,0. Усл. кр-отт. 1,0. Уч.-изд. л. 0,9.
Тираж ___ экз. Заказ № ___.

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный
технический университет»
Центр оперативной полиграфии
450000, Уфа-центр, ул. К. Маркса, 12