

На правах рукописи



ЮРГЕНСОН
СЕРГЕЙ АНДРЕЕВИЧ

**ИЗМЕНЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ
АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В
ЗАВИСИМОСТИ ОТ СИЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

Специальность 05.07.02 – Проектирование, конструкция и
производство летательных аппаратов

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2016

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

Научный руководитель: кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры №104 «Технологическое проектирование и управление качеством», Васильев Сергей Леонидович

Официальные оппоненты:

Митрофанов Олег Владимирович - доктор технических наук, доцент, заместитель главного конструктора по прочности, заместитель начальника научно-исследовательского отдела прочности акционерного общества «Гражданские самолеты Сухого».

Стрижиус Виталий Ефимович – доктор технических наук, начальник департамента ресурса акционерного общества «Аэрокомполит»

Ведущая организация:

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

Защита диссертации состоится 19 октября 2016 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного Совета Д212.125.10 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» и на сайте: <http://mai.ru/events/defence/>.

Автореферат разослан «_____» _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.125.10,
кандидат технических наук,
доцент

Денискина Антонина Робертовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации.

В настоящее время значительно выросла доля применения полимерных композиционных материалов (ПКМ) в авиационных конструкциях. В современных гражданских самолетах объем их использования составляет более 50%, в том числе за счет применения в особо ответственных конструкциях, к которым предъявляются повышенные требования в части подтверждения прочностных и эксплуатационных характеристик. Преимуществами ПКМ перед традиционными материалами являются: возможность регулирования свойств материала в различных направлениях; высокий процент использования материала; возможность изготовления конструкций двойной кривизны; повышенная удельная жесткость и широкий комплекс тепло- и электрофизических свойств. При изготовлении конструкций из ПКМ одновременно происходит формирование материала, что позволяет рассматривать его как комплекс решений, в который входят армирующий материал, связующее, укладка, тип технологического процесса и его параметры, а также конструктивные решения. Характерной особенностью ПКМ, по сравнению с металлическими материалами, является наличие внутренних дефектов, что требует применения неразрушающих методов контроля на большинстве этапов изготовления конструкции. Для ПКМ также свойственно наличие высокого разброса свойств при изготовлении (порядка 15-20%) и значительное влияние типа технологического процесса и его параметров на несущую способность конструкции. Поэтому для подтверждения прочностных и эксплуатационных характеристик изделий из ПКМ используется большой объем испытаний элементарных и конструктивно-подобных образцов, что увеличивает стоимость разработки.

Снижение объемов испытаний, необходимых для определения и подтверждения несущей способности конструкции возможно при использовании математического и конечно-элементного моделирования конструкций, базирующихся на работах Бартенева Г.М., Васильева В.В., Дудченко А.А., Лурье С.А., Михайлина Ю.А., Победри Б.Е. и др. Однако можно отметить: недостаточную изученность вопросов, связанных с физикой развития повреждений в ПКМ (особенно в части определения начала развития повреждений), а также необходимость верификации данных моделей из-за значительного отличия процессов разрушения и накопления повреждений для различных конструктивно-технологических решений.

Под несущей способностью авиационных конструкций в работе понимается не только ее способность выдерживать нагрузку, но и отсутствие развития дефектов при силовом воздействии. Это оказывает

существенное влияние на эксплуатационные характеристики, включая прочностные характеристики конструкции.

Выбору оптимальных конструктивно-технологических решений для повышения несущей способности авиационных конструкций посвящены теоретические и экспериментальные работы Брызгалова Г.И., Браутмана Л., Батаева А.А., Братухина А.Г., Берлина Ал. Ал., Васильева В.В., Воробья В.В., Гайдачук В.Е., Дудченко А.А., Карпова Я.С., Молодцова Г.А., Образцова И.Ф., Резниченко В.И., Сидоренко Ю.Н., Сироткина О.С., Фитцера Э. и др. Разработка и исследование композиционных материалов в настоящее время продолжается в большинстве ведущих научно-исследовательских и проектных организациях.

С целью повышения точности определения несущей способности конструкций из ПКМ необходимо уточнение, расширение и обобщение возможностей математического аппарата и методов экспериментального исследования. Одним из возможных путей исследования поведения конструкции при внешних воздействиях является совмещение прочностных испытаний и применение методов неразрушающего контроля. Такое решение позволяет получить значительный объем информации для анализа и определить процессы изменения в материале при воздействии нагрузки или факторов внешней среды. Исследования в этом направлении отражены в работах Ларина А.А., Makeev A. Richard H., Шилова А.И., Ai Shigang и др.

Следует отметить, что для ПКМ структура материала значительно влияет на несущую способность конструкции. Это связано с наличием дефектов, полученных как при изготовлении, так и при эксплуатации.

Все это определило направление диссертационной работы, посвященной разработке подхода и выбору критериев исследования конструктивно-технологических параметров конструкций из ПКМ при силовом воздействии для повышения несущей способности.

Целью работы является повышение несущей способности авиационных конструкций за счет оценки изменений структуры материала при различных конструктивно-технологических решениях.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ процессов проектирования и изготовления конструкций из ПКМ.
2. Проанализировать методы исследования внутренней структуры конструкций из ПКМ.
3. Разработать количественные параметры оценки состояния структуры материала, на основе выбранного метода неразрушающего контроля.

4. Разработать методику и техническое решение по исследованию состояния структуры материала конструкций из ПКМ при воздействии нагрузки.

5. Провести апробацию предложенного решения и методики на основе элементарных образцов из ПКМ.

Объектом исследования являются авиационные конструкции из полимерного композиционного материала.

Предметом исследования являются процессы разрушения материала конструкции в зависимости от силового воздействия и конструктивно-технологических параметров.

Наиболее существенные новые научные результаты, полученные автором и выдвигаемые на защиту:

- Количественные критерии, являющиеся дополнительным параметром оценки конструктивно-технологических решений и позволяющие анализировать процессы изменения структуры материала в авиационных конструкциях из ПКМ.

- Методика оценки изменений несущей способности авиационных конструкций посредством анализа поведения структуры материала в зависимости от силового воздействия на основе графических моделей накопления дефектов.

- Графические модели изменения количественных критериев в зависимости от силового воздействия и применяемых компонентов материала, характеризующие структурную плотность элементов авиационных конструкций.

Научная новизна диссертационной работы заключается в разработке новой методики оценки изменения несущей способности авиационных конструкций из композиционных материалов при силовом воздействии. Предлагаемая методика позволяет получить новые количественные характеристики развития внутренних дефектов и прогнозировать эксплуатационное состояние конструкции на ранних стадиях проектирования.

Практическая ценность диссертационной работы.

Результаты диссертационной работы могут быть использованы в ОКБ при принятии решения на начальных этапах разработки конструкции из ПКМ в части выбора материала и отработки технологических процессов производства. Они позволяют проводить оценку поведения материала, уточнять существующие прочностные модели и количественно сравнивать существующие материалы и технологии с целью обоснования их выбора для конкретного элемента конструкции. Также результаты работы могут использоваться в проведении научно-исследовательских и поисковых работах в профильных НИИ.

Реализация результатов работы.

Результаты работы внедрены на АО «Камов» и АО «ММП им. В.В. Чернышева», что подтверждается соответствующими актами. Результаты работы также используются при проведении учебного процесса по дисциплине «Технология производства ЛА» на кафедре 104 «Технологическое проектирование и управление качеством» МАИ(НИУ).

Методы исследования.

При выполнении диссертационной работы применялись статистические методы исследования, исходные данные для которых были получены с использованием высокоточного метода неразрушающего контроля.

Достоверность полученных результатов обеспечивается их применением при выполнении научно-исследовательских работ для предприятий аэрокосмической отрасли. Полученные результаты коррелируют с существующими моделями поведения ПКМ под нагрузкой и результатами, полученными в работах других авторов, опубликованных в печатных изданиях.

Апробация работы.

Основные результаты работы были доложены на всероссийских и международных научно-технических и научно-практических конференциях, конгрессе, форуме и семинаре: V Общероссийская молодежная научно-техническая конференция «Молодежь, Техника, Космос», «Военмех» им. Д.Ф. Устинова 20-22 марта 2013; симпозиум с международным участием «Самолетостроение в России. Проблемы и перспективы», 2-5 июля 2012 г; Всероссийская конференция «Развитие инженерного образования в России» Санкт-Петербургский образовательный форум-2012, Санкт-Петербург, 28 марта – 11 апреля 2012 г.; Седьмой международный аэрокосмический конгресс IAC-2012, МГУ, 26 - 31 Августа, 2012 года; IV Международная молодежная научная конференция «Гражданская авиация: XXI век», Ульяновск, 2012; Московская молодежная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике 2013», МАИ, 16-17.04.2013; 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences September 7-12,2014, St. Petersburg; X Международной конференции по Неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ'2014), Алушта, 2014; 2-ая международная конференция «Живучесть и конструкционное материаловедение» 21-23 октября 2014 г. ИМАШ РАН; Всероссийская научная конференция с международным участием «механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред», посвященная 95-летию со дня рождения академика И.Ф. Образцова 15-17 декабря 2015г. ИПРИМ РАН; XXVI Международная конференция Математическое и

компьютерное моделирование в механике деформируемых сред и конструкций, МКМ 2015 28 – 30 сентября 2015.

Публикации.

Полученные научные результаты опубликованы в 15 печатных работах, в том числе 3 - в журналах, рекомендованных ВАК. Результаты диссертации использованы в 5 научно-технических отчетах. В рамках исследований получен патент на полезную модель.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений, списка использованных источников и приложений. Работа объемом 129 страниц, включает 64 рисунка и 7 таблиц. Список использованных источников содержит 112 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении дается обоснование актуальности темы диссертации, описана проблематика производства и проектирования авиационных конструкций из полимерных композиционных материалов, а также текущее состояние исследований в данной области, определены цели и задачи исследования.

В первой главе рассматриваются этапы развития применения ПКМ в авиационной отрасли, описаны достоинства и недостатки использования ПКМ в элементах планера самолета. Приведено описание процедуры проектирования изделий из ПКМ, основанной на совместной обработке конструктивных и технологических решений, с учетом прочностного анализа и экспериментальной оценки принятых решений.

Для разработки новой конструкции из ПКМ требуется проведение большого объема испытаний, связанных с получением необходимых прочностных характеристик, подтверждением принятых конструктивно-технологических решений и обработкой технологического процесса. Большая часть этих испытаний переносится на начальный этап проектирования (испытание элементарных образцов) для снижения рисков и трудоемкости на следующих этапах проектирования (рис. 1). Количество элементарных образцов, как правило, превышает 1600 штук, с учетом необходимых типов испытаний и оценкой влияния факторов внешней среды (влажность, температура и т.д.).

Стоит отметить значительную роль методов неразрушающего контроля (НК) при разработке технологического процесса и эксплуатации конструкций из ПКМ. На рис. 2. представлены необходимые решения по контролю качества на различных этапах изготовления. Необходимость в большем, по сравнению с традиционными материалами, объеме использования методов НК связано с наличием внутренних дефектов, которые в общем виде можно разделить на микродефекты, макродефекты и

минидефекты, влияющие на поведение и прочностные свойства итогового изделия. Для каждого типа технологического процесса характерно различное состояние конструкции после изготовления, характеризующееся объемным содержанием дефектов разного рода, которые можно определить, как первичные дефекты в конструкции (вторичные дефекты появляются в процессе ее эксплуатации).

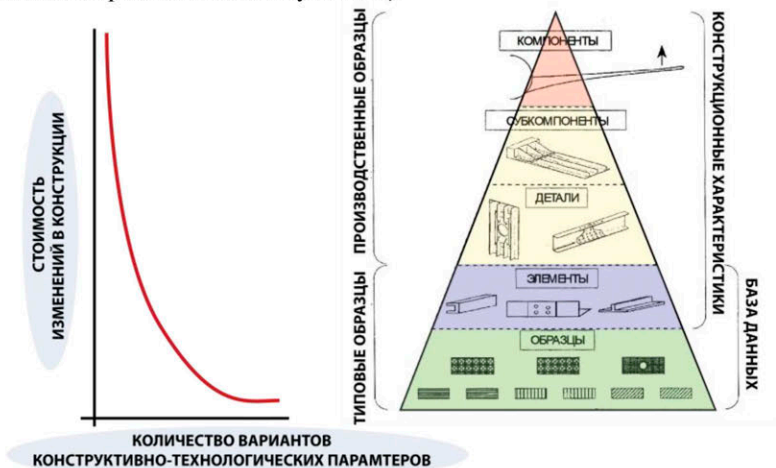


Рис. 1. Схематичная диаграмма построения испытаний для консоли крыла

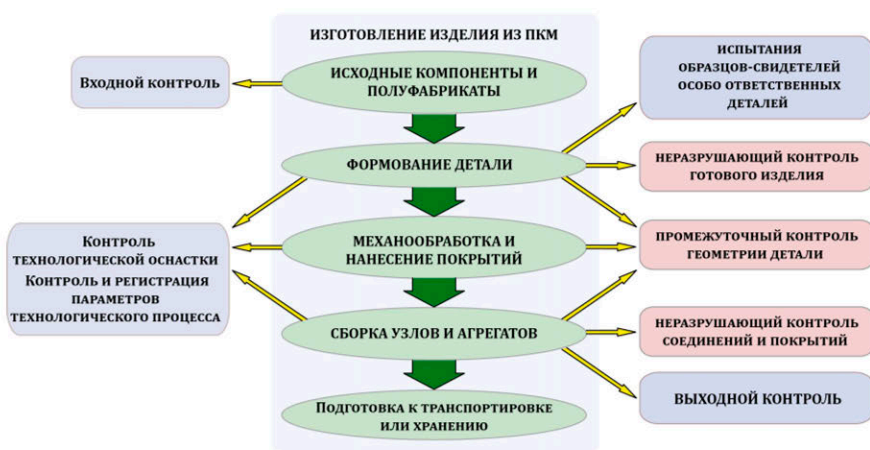


Рис. 2. Контроль качества изготовления на различных этапах технологического процесса

Качественный анализ методов НК проводился на основе следующих критериев:

1. Высокая точность определения состояния структуры материала и изделия.
2. Возможность повторного однозначного определения контролируемого сечения.
3. Наличие количественной информации для проведения анализа.
4. Возможность контроля композиционного материала с учетом его структурных особенностей.
5. Возможность проведения контроля в труднодоступных местах (при работе на испытательной установке) или возможность контроля крупногабаритных изделий (сканирование вместе с испытательным оборудованием).
6. Отсутствие необходимости разработки специальных методов работы с оборудованием.

Были проанализированы следующие методы контроля: визуальный контроль, спектральная интерферометрия, акустические методы контроля, акустическая эмиссия, конструкционный контроль и метод вычислительной рентгеновской томографии. Для использования в диссертационном исследовании выбран метод вычислительной рентгеновской томографии (ВРТ), как наиболее удовлетворяющий приведенным выше критериям.

Вторая глава посвящена определению количественных критериев, применяемых для анализа структурной плотности материала с использованием метода ВРТ.

Анализ открытых данных показал, что на сегодняшний день можно выделить три основных направления применения метода ВРТ:

1. Исследование структуры ПКМ с целью выявления дефектов.
2. Определение изменений в структуре ПКМ при силовом воздействии.
3. Верификация конечно-элементных моделей и их дополнение информацией о развитии и наличии внутренних расслоений.

Анализ метода обработки информации при получении плоских сечений методом ВРТ показал, что выходные данные (массив значений линейного коэффициента ослабления (ЛКО)), характеризует структурную плотность материала. В диссертационной работе под структурой материала понимается комплекс из укладки, компонентов материала и дефектов. Одновременно с этим структура материала меняется в процессе эксплуатации конструкции. На ее состояние влияют силовые факторы, факторы внешней среды, ударные повреждения и т.д., которые снижают несущую способность конструкции.

В работе показано, что точность определения объемной плотности методом ВРТ по сравнению с радиометрическим методом контроля составляет $\pm 0,4\%$ при перерасчете значений ЛКО в плотность по образцу-свидетелю с известной плотностью. В первом приближении принимается, что значения ЛКО при анализе его распределения, определенном по 90% площади сечения (рис. 3), характеризуется нормальным распределением.

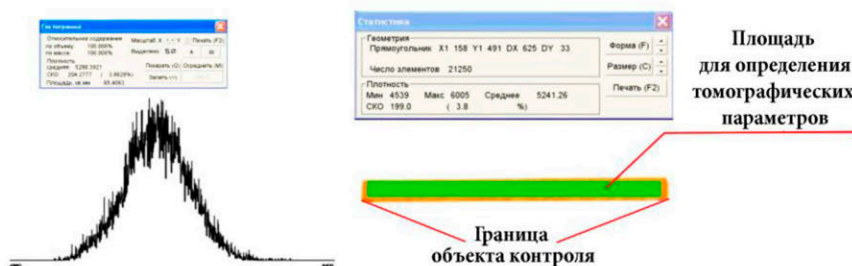


Рис. 3. Гистограмма и зона определения ЛКО

Для анализа распределения плотности по выбранной зоне используются параметры математической статистики:

1. Среднее значение линейного коэффициента ослабления (μ_c) – исходные данные, полученные методом ВРТ. Анализ среднего значения (формула (1)) позволяет оценить структурную плотность внутри конкретного сечения с учетом всех дефектов в выделенной области. Данный параметр можно пересчитать в объемную плотность по образцу-свидетелю и необходимому массиву сечений.

2. Минимальное значение ЛКО (μ_{min}) характеризует минимальное значение плотности в контролируемых сечениях. Данный параметр меняется в зависимости от роста дефекта, что связано с наличием наклона графика распределения ЛКО при переходе между различными средами. С одной стороны, это не позволяет точно определить размер дефекта без специального алгоритма обработки, но в тоже время по минимальному значению возможно оценить раскрытие дефекта, т.е. его рост в плоскости сканирования в процессе нагружения.

3. Максимальное значение ЛКО (μ_{max}) характеризует процессы уплотнения материала, которые влияют на среднюю структурную плотность материала.

4. Среднеквадратичное отклонение ЛКО (S) параметр, определяющий рыхлость материала, учитывающий уровень отклонений от среднего значения ЛКО и определяющий разнородность структуры материала (формула (2)).

$$\mu_c = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \mu_i . \quad (1)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \left(\sum_{i=1}^n \mu_i^2 - n(\mu_c)^2 \right)} . \quad (2)$$

Данные критерии в каждом слое оценивают распределение структурной плотности и позволяют оценить уровень дефектов в нем. После определения данных параметров для каждого плоского сечения рассчитываются их средние значения для конструкции, что позволяет оценить ее качество без привязки к конкретному сечению или дефекту. Оценка точности такого подхода проводилась на основе анализа 50 сечений в образцах с рабочей зоной 150 мм по шести сериям сечений (исходное состояние материала, при приложении нагрузки (5%, 10%, 20% и 40% от разрушающей нагрузки) и в разгруженном состоянии). Оценка описанных выше критериев проводилась по среднеквадратичной погрешности измерений, рассчитанной по формуле (2) и значению в процентах относительно среднего (\bar{S}) по формуле (3). В результате получено, что погрешность применения осредненных значений по сравнению с анализом каждого сечения, при значительном разбросе свойств исходного материала (вариация значений ЛКО в материале составляет 3-6%) не превышает 1,5%.

$$\bar{S} = \frac{S}{\bar{X}} \cdot 100\% . \quad (3)$$

В дальнейшем в качестве контролируемых критериев при проведении исследования с нагружением исходного материала или наличием других внешних воздействий результирующие значения рассчитываются относительно базового состояния материала. Сравнение проводится по формулам (4) - (7), где i – номер нагружения, а B – значение в базовом сечении

$$\Delta S = \frac{S_i - S_B}{S_B} \cdot 100\% ; \quad (4)$$

$$\Delta \mu_c = \frac{\mu_{ci} - \mu_{cB}}{\mu_{cB}} \cdot 100\% ; \quad (5)$$

$$\Delta \mu_{\max} = \frac{\mu_{\max i} - \mu_{\max B}}{\mu_{\max B}} \cdot 100\% ; \quad (6)$$

$$\Delta\mu_{\min} = \frac{\mu_{\min i} - \mu_{\min B}}{\mu_{\min B}} \cdot 100\% . \quad (7)$$

Данные критерии можно рассматривать в привязке к целевой функции проектирования, характеризующейся формулой (8)

$$X = \max F(x; u; Y) \min G(f; r; Y), \quad (8)$$

где, x и f – функции целевых параметров:

$$x = X(E, \sigma_{0,2}, G, \tau_{0,2}, \mu, \sigma_B) - \text{прочность конструкции}$$

$$f = F(\rho, f_1, f_2, f_3) (f_1 - \text{пористость, } f_2 - \text{количество дефектов в единице объема, } f_3 - \text{остаточные напряжения});$$

u и r – функции ограничений:

$$u = U(U_1, U_2, U_3) (U_1 - \text{стоимость конструкции, } U_2 - \text{внешние условия, } U_3 - \text{характеристики компонентов материала),}$$

$$r = R(R_1, R_2, R_3) (R_1 - \text{технологические дефекты, } R_2 - \text{параметры технологического процесса, } R_3 - \text{стоимость оборудования}).$$

Функция Y в данном случае выступает критерием оценки структурной плотности и является дополнительным критерием оценки целевой функции

$$Y = f(\rho) = F(\mu_C, S, \mu_{\min}, \mu_{\max}).$$

Для материала с хрупким разрушением поведение параметров данной функции представлено в формуле (9) и характеризуется их незначительным изменением (в пределах погрешности). Для материалов с накоплением повреждений – критерии меняются в соответствии с формулой (10).

$$Y(P) = \left(\begin{array}{l} \Delta\mu_C = const \\ \Delta S = const \\ \Delta\mu_{\min} = const \\ \Delta\mu_{\max} = const \end{array} \right); \quad (9)$$

$$Y(P) = \begin{pmatrix} \Delta\mu_c \rightarrow \min \\ \Delta S \rightarrow \max \\ \Delta\mu_{\min} \rightarrow \min \\ \Delta\mu_{\max} \rightarrow \min \end{pmatrix}. \quad (10)$$

В третьей главе приводятся основные положения, являющиеся основой разрабатываемой методики оценки конструктивно-технологических решений при совместном применении метода ВРТ и специального стендового приспособления, реализующего силовое воздействие.

За основу разрабатываемой методики принято положение о различных моделях поведения конструкций из ПКМ в зависимости от конструктивно-технологических параметров. Графически наглядно данные модели представлены в работе Васильева В.В., в которой рассматриваются 4 варианта разрушения ПКМ (рис. 4).

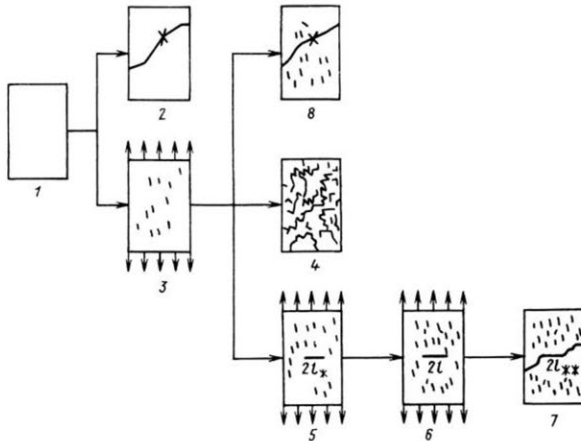


Рис. 4. Схема этапов разрушения композитов:

1 - начальное состояние, 2 - хрупкое разрушение, 3 - накопление микроповреждений, 4 - разрушение вследствие потери целостности, 5 - образование макроскопической трещины, 6 - рост макроскопической трещины, 7 - финальное разрушение, 8 - хрупкое разрушение, как результат накопления микроповреждений.

Принято рассматривать три типа моделей деградации свойств ПКМ – мгновенная, постепенная деградация и деградация на основе переменной состояния (до некоторого конечного уровня), при этом модель постепенной

деградации строится на основе экспериментальных данных. Все эти модели заключаются в постепенном исключении из работы отдельных связей в материале, определяемых адгезией между отдельными элементами или их разрушением.

Алгоритмы анализа прогрессирующего развития разрушения включают в себя 4 этапа:

- Этап 1. Расчёт напряжений в композите, волокне и матрице.
- Этап 2. Применение критериев разрушения для элементов КМ и определение элементов, в которых произошло разрушение.
- Этап 3. Применение одного из методов деградации свойств.
- Этап 4. Перезапуск расчёта и принятие решений об остановке и переходе на следующий шаг нагрузки.

Верификация данных методов возможна с применением метода ВРТ, путем сравнения результатов томографии с результатами конечно-элементного анализа. При этом повышение точности верификации может достигаться путем проведения исследования конструкции под нагрузкой.

Для анализа внутренней структуры под нагрузкой была разработана методика проведения исследования. При ее построении приняты следующие допущения:

- В процессе сканирования считается, что нагрузка не меняется. Минимизация этого эффекта достигается конструктивным исполнением специального стенда.

- Отсутствие прогрева тензометрических датчиков при снятии деформации. Минимизация этого эффекта достигается снижением времени опроса датчиков.

- Базовое состояние образца (наличие внутренних дефектов, в том числе макродефектов) считается особенностью технологического процесса изготовления конструкции и рассматривается только в качестве исходной информации без отбраковки изделия.

Для анализа материала под нагрузкой разработан специальный стенд, основанный на следующих принципах:

- Конструкция стенда должна обеспечивать и фиксировать определенный уровень нагрузки на протяжении заданного времени.

- Элементы стенда должны обеспечивать возможность определения приложенной нагрузки и деформации исследуемого образца.

- Диаметр рабочей зоны должен составлять не менее 100 мм.

- Стенд не должен создавать дополнительные артефакты сканирования.

- Изменение параметров сканирования после включения в схему сканирования стендового приспособления должно быть минимальным.

- Стенд должен надежно фиксировать образец в процессе испытания, компенсировать возможную непараллельность при установке образца и создавать нагрузку достаточную для разрушения образца.

- Стенд должен устанавливаться на рабочий стол томографа и не мешать проведению сканирования (не требовать отключения или демонтажа отдельных элементов томографа).

В разработанном стенде реализовано силовое воздействие на примере растягивающей нагрузки, характерной для многих элементов авиационных конструкций. Общий вид разработанного стенда представлен на рис. 5.

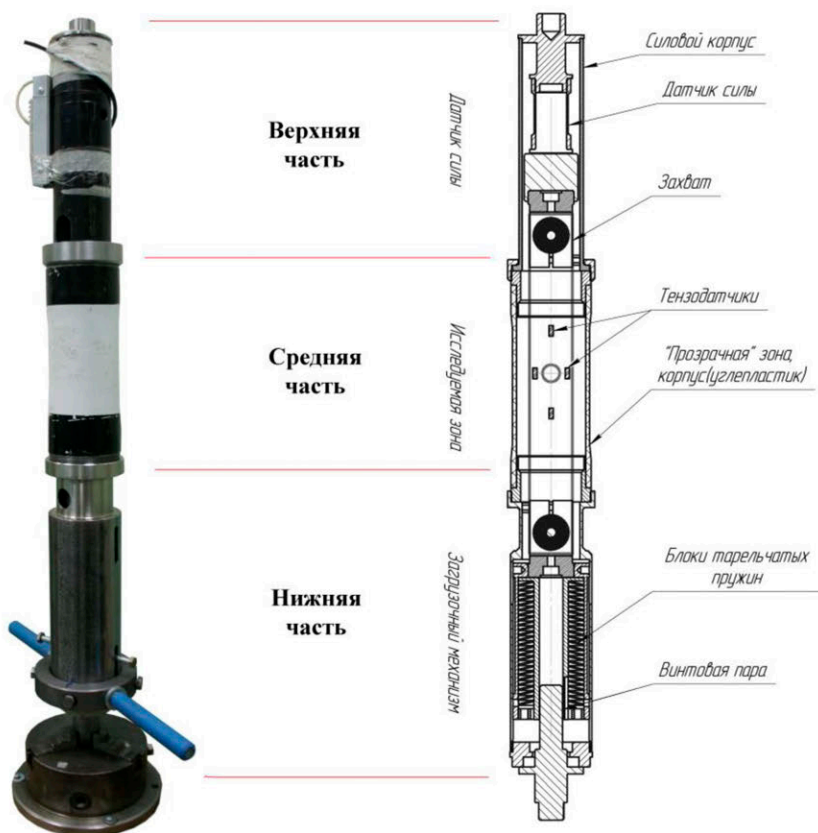


Рис.5. Общий вид и функциональные элементы стенда для наружения

Функционально стенд состоит из двух отдельных блоков:

- Блок сбора информации о напряженно-деформированном состоянии (НДС).
- Устройство создания силового воздействия, фиксации образца и элементов получения информации о НДС, создающий растягивающее усилие до 10 000 кгс.

Стенд состоит из трех конструктивных частей – верхней, средней и нижней. Верхняя часть – два шарнирных механизма, датчик контроля нагрузки (датчик силы), верхний захват для крепления образца и блок передачи данных. Средняя часть («прозрачная зона») выполнена из композиционного материала. Изготовление ее в виде цилиндра из углеродного материала позволило значительно снизить количество артефактов на томограммах, а также уменьшить потребную для исследования величину излучения. Нижняя часть включает в себя винтовой механизм, который обеспечивает перемещение нижнего захвата вниз и создает растягивающую нагрузку на образец, а также блок удержания нагрузки в виде тарельчатых пружин.

Силовой стакан стенда тарировался на испытательной машине Zwick/Roell Z250 на растягивающую и сжимающую нагрузки, в результате был получен переводной коэффициент для перевода изменений напряжения (мВ) на тензодатчиках в нагрузку (Н). На той же машине получены значения разрушающей нагрузки и предельных деформаций для образцов-свидетелей, исследуемых серий образцов.

Для комплексной проверки работоспособности всей системы создания НДС в образце, текущего замера относительных деформации и стабильности параметров томографии был исследован образец из сплава Д16Т, для которого получены данные по изменению контролируемого сечения (в частности изменения площади, которое составило 7%). Для подтверждения правильности снятия нагрузки были сопоставлены расчетный предел пропорциональности и данные тензометрии (погрешность составила 5%).

В рамках предварительных исследований выявлено следующее:

- необходимо проводить сканирование с учетом первоначального положения образца;
- присутствует достаточно сильное изменение положения контролируемых сечений в образце при приложении нагрузки (до 2 мм), поэтому необходим контроль данного параметра;

Для контроля изменения положения образца при приложении нагрузки (повторяемости сечений) были выбраны маркеры, обеспечивающие определение изменения положения высоты контролируемого сечения. Маркеры (рис. 6) выполняются из высокоплотного материала (плотность выше 10 г/см³) и располагаются на

торцах образца. В работе были использованы маркеры из медной проволоки диаметром 0,1 мм.



Рис. 6. Рентгенограмма, установленного в стенде образца с наклеенными маркерами

На основе приведенных выше положений была разработана методика для оценки изменения несущей способности в процессе силового воздействия, которая включает в себя три составных части – применение метода ВРТ, количественных критериев оценки и стендовое приспособление (рис. 7). Результатом исследования с применением данной методики являются графические модели контролируемых характеристик структуры материала в зависимости от силового воздействия. В рамках данной работы разработаны количественные критерии (основанные на применении метода ВРТ и статистической обработке информации) и стендовое приспособление.

Алгоритм проведения исследования с применением разработанной методики:

- Подготовка образца – наклеивание тензодатчиков и нанесение маркеров.
- Формирование матрицы нагружения и выбор сетки сканирования. Сетка сканирования выбирается в соответствии с конструктивными особенностями исследуемой конструкции.
- Установка образца в испытательный стенд.
- Предварительное нагружение нагрузкой 1000-2000 Н, для устранения зазоров и обеспечения жесткости стенда.
- Проведение сканирования в соответствии с матрицей нагружения. Сканирование начинается с определения базового (исходного) состояния образца. Исследование включает в себя определение параметров и зоны сканирования. Матрица нагружения формируется исходя из разрушающей

нагрузки и включает в себя поэтапное нагружение и разгрузку образца, что позволяет проводить сравнение этих состояний.

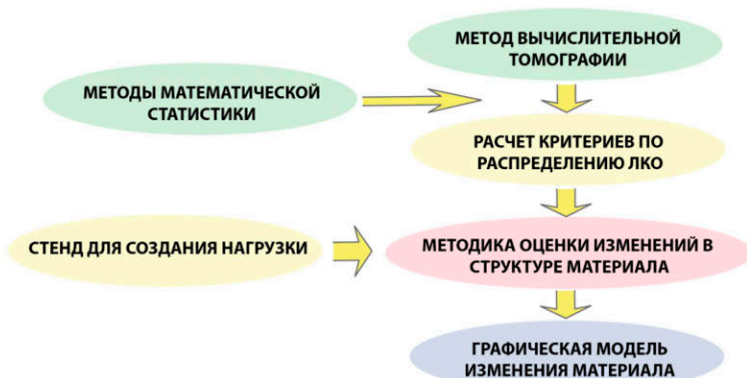


Рис. 7. Компоненты методики

- Фиксация ЛКО через программное обеспечение томографа.
- Обработка результатов и построение графической модели поведения контролируемых критериев в зависимости от приложенной нагрузки.

В четвертой главе приводятся результаты исследования элементарных образцов, выполненных по одной технологии с использованием различных армирующих материалов и связующего, подтверждающие работоспособность разработанной методики.

Для исследования топологии изменений в структуре слоистых ПКМ при растяжении были изготовлены плоские образцы двух серий:

1. Серия 1 - углеродная лента УОЛ-300-1 ТУ 1916-167-05763346-96 и связующее ЭПС-И-108 ТУ 2225-047-17411121-2012.

2. Серия 2 - углеродная лента ЛУП-0,1Б ГОСТ 28006-98 и связующее ЭДТ-10П ПИ 1.2.029-77.

Общая высота рабочей зоны образца составляет 200 мм, часть из которой занята тензодатчиками продольной деформации. Ширина рабочей зоны образца - 40 мм, толщина - 3 мм. Укладка образцов [0,-45,90, +45,0, 0, -45,90,+45,0/].

Образцы изготовлены методом пропитки и формования под двойным вакуумным пакетом (технология DBVI). На образцы наклеивались накладки из стеклоткани Э3100 ТУ 5952-002-99544202-2011 со связующим ВК-9 ПИ 1.2.А.256-99 ВИАМ. Образцы вырезались из пластины, в зонах захватов разделялись отверстия под стяжные болты и наклеивались тензодатчики.

Матрица проведения нагружения представлена на рис. 8. В процессе исследования проводилось поэтапное нагружение и разгрузка образца. Сканирование проводилось по 10 сечениям с шагом сканирования 10 мм. Разрушение образцов происходило в галтели, что типично для образцов без концентраторов.

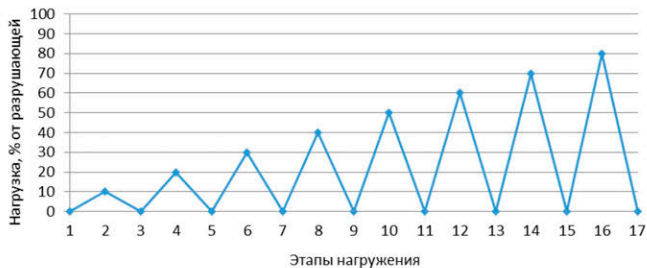


Рис. 8. Матрица проведения исследования

При обработке данных проводилась оценка предложенных критериев в нагруженном и разгруженном состоянии относительно исходного сечения. Полученные графические модели представлены на рис. 9 и 10.

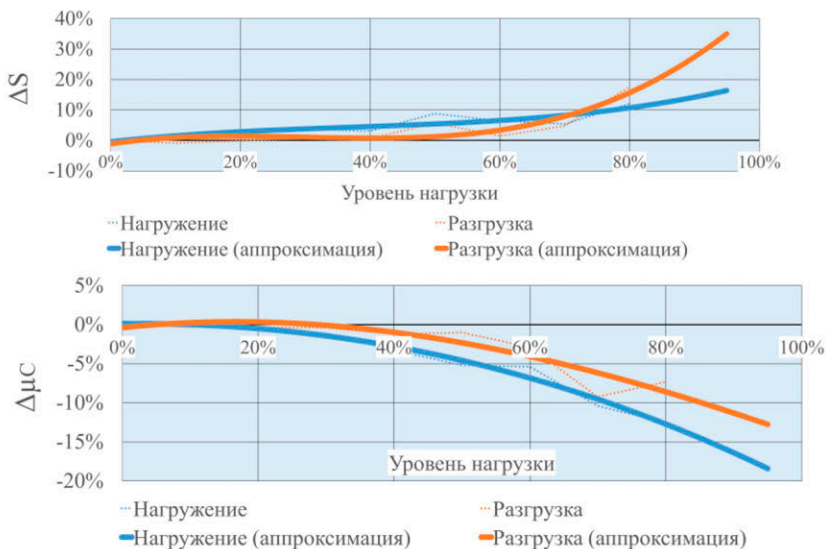


Рис. 9. Графики изменения отдельных контролируемых параметров для образцов Серии 1

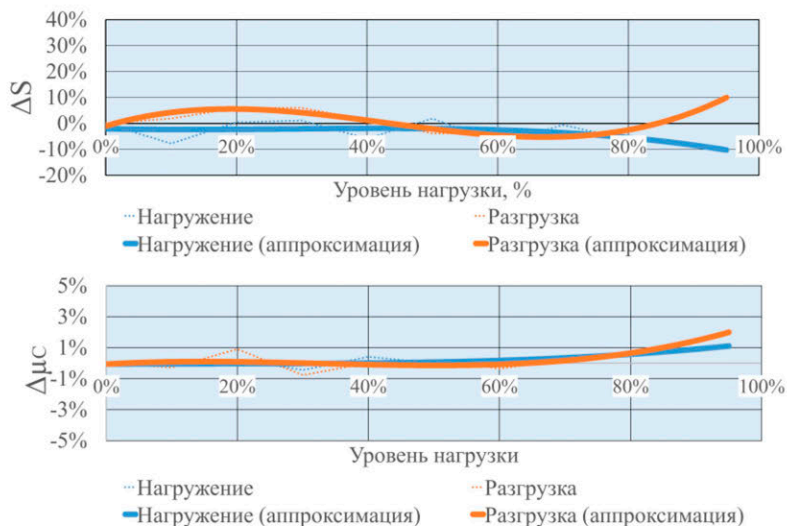


Рис. 10. Графики изменения отдельных контролируемых параметров для образцов Серии 2

По представленным графикам поведения контролируемых критериев в зависимости от нагрузки для Серии 1 можно сделать следующие выводы:

- Общее поведение характеризует склонность данного материала к накоплению дефектов. При этом изменение структуры наблюдается с начального момента приложения нагрузки. Это позволяет сделать вывод о необходимости проведения предварительного нагружения перед проведением дефектоскопии для данного материала в производственных условиях.

- После 60% нагрузки наблюдается значительное изменение структурной плотности, связанное с увеличением количества дефектов, что характеризуется ростом ΔS и снижением $\Delta \mu_c$.

- Состояние материала во время приложения нагрузки и после ее снятия значительно различается. По $\Delta \mu_c$ различие составит до 5%, по ΔS – до 8%.

- Развитие магистрального дефекта (значительного роста отдельного дефекта) в материале отсутствует до нагрузки 60%.

Для образцов Серии 2 можно сделать следующие выводы:

- Общее поведение характеризует склонность данного материала к хрупкому разрушению, без накопления макродефектов в структуре

материала. В соответствии с этим наличие в структуре материала технологических микродефектов может не вызывать разрушение образца при их развитии в процессе нагружения.

• Изменение $\Delta\rho_c$ свидетельствует о незначительном изменении структурной плотности, т.е. перераспределении дефектов без их существенного накопления.

В **заключении** диссертации приведены основные положения диссертации, характеризующие ее научное содержание как разработку нового метода и технического решения для повышения несущей способности конструкций из ПКМ, за счет анализа структурной плотности.

Приложения к диссертационной работе включают следующие материалы:

- копии актов внедрения результатов исследования;
- копия свидетельства о государственной регистрации патента на полезную модель № 157585 «Устройство для определения структуры материала или изделия, преимущественно полимерного композиционного материала» от 22.09.2014.

ВЫВОДЫ

Для оценки изменений несущей способности авиационных конструкций разработана методика анализа поведения структуры материала в зависимости от силового воздействия на основе графических моделей накопления дефектов. В результате анализа возможен выбор конструктивно-технологических параметров, повышающих несущую способность конструкций в процессе эксплуатации. Эффективность разработанной методики заключается в количественном описании процесса накопления дефектов в конструкции, позволяющем проводить сравнение механизмов разрушения при выборе различных конструктивно-технологических параметров. Цель диссертационной работы была достигнута за счет комплексного применения метода вычислительной рентгеновской томографии, создания напряженно-деформированного состояния в конструкции и статистической обработки результатов томографического исследования.

В диссертационной работе получены следующие основные результаты, обладающие научной новизной и практической ценностью:

1. Анализ проектных работ и методов неразрушающего контроля, применяемых в авиационной промышленности, показал, что для изучения структуры ПКМ при выборе конструктивно-технологических параметров, влияющих на несущую способность, целесообразно применение метода ВРТ и исследование конструкций при силовом воздействии.

2. Предложены количественные критерии на базе осредненных по высоте рабочей зоны образца результатов томографической информации,

позволяющие сравнивать различные конструктивно-технологические параметры и исследовать поведение конструкции при силовом воздействии. Критерии основываются на описании распределения ЛКО относительно исходного состояния конструкции и могут рассматриваться как дополнительный параметр оценки конструктивно-технологических решений, что позволяет анализировать процессы изменения структуры материала в авиационных конструкциях из ПКМ.

3. Разработан и изготовлен специальный стенд для исследования структурной плотности материала с применением метода ВРТ. Стенд включает датчик определения приложенной силы, «прозрачную» рабочую зону, выполненную из композиционного материала, механизм загрузки, блок поддержания постоянства нагрузки (погрешность определения нагрузки составляет $\pm 0,250$ кН).

4. Доказана возможность проведения исследований на элементарных образцах без конструктивных и технологических концентраторов с применением критериев, осредненных по высоте изделия, что значительно снижает трудоемкость проведения исследования. При этом среднеквадратичная погрешность измерений составила 1%.

5. Разработана методика, основанная на использовании силового воздействия и статистической обработке результатов, позволяющая получать новый массив информации о состоянии конструкции под нагрузкой.

6. Установлено, что изменение значений разработанных критериев состояния конструкции во время и после снятия силового воздействия составляет до 7%.

7. В случае исследования материалов, для которых характерно накопление повреждений, деградация структуры материала начинается с начального этапа приложения нагрузки (до 20% от разрушающей нагрузки) и достигает 3-4%. В процессе нагружения образцов до разрушения изменения в структуре их материала могут достигать 15-18% по отдельным критериям.

Результаты диссертационной работы позволяют повысить эффективность верификации прочностных моделей прогрессирующего разрушения конструкций из ПКМ при оптимизации различных конструктивно технологических параметров.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основное содержание диссертации отражено в следующих публикациях.

Публикации в журналах, рекомендованных ВАК для публикации результатов работ по диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук:

1. **Бойцов Б.В., Громашев А. Г., Юргенсон С. А., Васильев С.Л.** Методы неразрушающего контроля, применяемые для конструкций из перспективных композиционных материалов / Бойцов Б.В., Громашев А. Г., Юргенсон С. А., Васильев С.Л. // Труды МАИ. – 2011. - вып. 49.
2. **Артемьев А.В., Васильев С.Л., Юргенсон С.А., Кулаков В.В., Авдеев В.В.** Исследование макроструктуры углеродных фрикционных материалов методом рентгеновской томографии / Артемьев А.В., Васильев С.Л., Юргенсон С.А., Кулаков В.В., Авдеев В.В. // Цветные металлы. - 2012 - Выпуск 12.
3. **Васильев С.Л., Артемьев А.В., Бакулин В.Н., Юргенсон С.А.** Контроль образцов методом вычислительной рентгеновской томографии под нагрузкой /С.Л. Васильев, А.В. Артемьев, В.Н. Бакулин, С.А. Юргенсон// Дефектоскопия. – 2016.- № 5. - с. 52-61.

Патент:

4. Устройство для определения структуры материала или изделия, преимущественно полимерного композиционного материала: пат. 157585 Рос. Федерация: МПК G01N 3/02/ **Юргенсон С.А.**; заявитель и патентообладатель Юргенсон С.А.- № 2014138148/28; заявл. 22.09.2014; опубл. 10.12.2015 Бюл. №34

Печатные публикации:

5. **Бойцов Б.В., Васильев С.Л., Артемьев А.В., Юргенсон С.А.** Неразрушающий контроль элементов конструкций из ПКМ методом вычислительной рентгеновской томографии/ Бойцов Б. В., Васильев С. Л., Артемьев А.В., Юргенсон С. А. //Научные труды «Академии проблем качества» «Качество и жизнь -2014». - М. – 2014.
6. **Бойцов Б.В., Васильев С. Л., Артемьев А.В., Юргенсон С.А.** Применение метода вычислительной рентгеновской томографии при исследовании топологии структуры и остаточных изменений в ПКМ при их поэтапном нагружении/ Бойцов Б. В., Васильев С. Л., Артемьев А.В., Юргенсон С. А. //Научные труды «Академии проблем качества» «Качество и жизнь -2014». - М. – 2014.
7. **Бойцов Б.В., Васильев С.Л., Артемьев А.В., Юргенсон С.А.** Исследование процесса накопления и развития повреждений в слоистом композиционном материале на основе рентгеновской вычислительной томографии/ Бойцов Б. В., Васильев С. Л., Артемьев А.В., Юргенсон С. А. //Научные труды «Академии проблем качества» «Качество и жизнь -2014». - М. – 2014.
8. **Артемьев А.В. Васильев С.Л., Шундрин М.В., Юргенсон С.А.,** Исследование процесса накопления и развития повреждений в слоистом композиционном материале на основе рентгеновской вычислительной томографии/ Артемьев А.В. Васильев С.Л., Шундрин М.В., Юргенсон С.А.//

- Сборник тезисов докладов Московская молодежная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике 2013». – М. – 2013.
9. **Артемьев А.В., Васильев С.Л., Юргенсон С.А.** Анализ конструкций из полимерных композиционных материалов методом вычислительной рентгеновской томографии / Артемьев А.В., Васильев С.Л., Юргенсон С.А.// Сборник тезисов докладов, Симпозиум с международным участием «Самолетостроение в России. Проблемы и перспективы». – Самара. – 2012.
 10. **Васильев С.Л., Юргенсон С.А.** Анализ качества конструкций из полимерных композиционных материалов методом вычислительной рентгеновской томографии / Васильев С.Л., Юргенсон С.А.// Сборник тезисов докладов, Седьмой международный аэрокосмический конгресс IAC-2012. – М. – 2012.
 11. **Артемьев А.В., Юргенсон С.А. Васильев С.Л.,** Применение метода вычислительной рентгеновской томографии при создании безопасно повреждаемых конструкций из композиционных материалов / Артемьев А.В., Юргенсон С.А. Васильев С.Л.//Сборник материалов Всероссийской конференции «Развитие инженерного образования в России». Выставка молодежный научно-исследовательских проектов. Санкт-Петербургский образовательный форум-2012. – СПб. - 2012
 12. **Васильев С. Л., Артемьев А.В., Юргенсон С. А.,** Анализ методом вычислительной рентгеновской томографии воздействия статической нагрузки на структуру полимерного композиционного материала», сборник материалов / Васильев С. Л., Артемьев А.В., Юргенсон С. А.// X Международной конференции по Неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ'2014). - М. – 2014.
 13. **Vasiliev S., Artemiev A., Jurgenson S.** X-ray computer tomography investigation for polymer composite material under the static load / Vasiliev S, Artemiev A, Jurgenson S.// proceedings of 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences ICAS-2014. – SPb. – 2014.
 14. **Васильев С.Л., Бакулин В.Н., Юргенсон С.А.** Определение методом компьютерной рентгеновской томографии структурных изменений в композиционных материалах при воздействии статической нагрузки композиционных материалах / Васильев С.Л., Бакулин В.Н., Юргенсон С.А.// Сборник материалов Всероссийской научной конференции с международным участием (к 95-летию со дня рождения академика И.Ф. Образцова). – М. - 2015. - С. 62-64
 15. **Юргенсон С.А., Васильев С.Л., Бакулин В.Н.** Анализ развития изменений структурной неоднородности в композиционных материалах, применяемых в летательных аппаратах / Юргенсон С.А., Васильев С.Л., Бакулин В.Н.// Материалы XXVI Международной конференции Математическое и компьютерное моделирование в механике деформируемых сред и конструкций 28 сентября. – СПб. - 2015.