

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)»

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель: кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
Васильев Сергей Леонидович

Москва 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
Глава 1. Анализ проектно-конструкторских решений при создании конструкций из ПКМ и методов их подтверждения.....	14
1.1. Анализ особенности применения ПКМ в авиационных конструкциях.....	14
1.2. Методы экспериментального определения свойств ПКМ..	21
1.3. Анализ внутренних дефектов и методов контроля структуры композиционного материала.....	27
1.4. Выводы по Главе 1.....	40
Глава 2. Выбор и обоснование количественных критериев оценки.....	42
2.1. Типовые методы исследования композиционных материалов методом ВРТ.....	42
2.2. Контролируемые критерии и их взаимосвязь со структурными изменениями в ПКМ.....	46
2.2.1. Процедура обработки сигнала при использовании ВРТ.....	46
2.2.2. Элементы теории математической статистики для обработки экспериментальных результатов.....	50
2.2.3. Обоснование и взаимосвязь количественных критериев и структурной плотности материала.	52
2.3. Выводы по Главе 2.....	64
Глава 3. Описание методики по исследованию внутренней структуры авиационных конструкций.....	66
3.1. Основные положения, лежащие в основе предлагаемой методики.....	66
3.2. Описание специального стенда для проведения исследования.....	74
3.3. Описание методики исследования.....	90

3.4. Выводы по главе 3.....	94
Глава 4. Анализ экспериментального исследования образцов из ПКМ.....	96
4.1. Описание исследуемых образцов и параметров сканирования.....	96
4.2. Обработка и анализ результатов.....	101
4.3. Выводы по Главе 4.....	107
Заключение.....	109
Список сокращений.....	112
Список использованных источников.....	113
Приложения.....	125
П.1. Копии актов о внедрении результатов исследования.....	125
П.2 Копия свидетельства о регистрации патента	129

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время значительно выросла доля применения полимерных композиционных материалов (ПКМ) в авиационных конструкциях. В современных гражданских самолетах объем их использования составляет более 50% [9], [61], [39], в том числе за счет их 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.

Выбору оптимальных конструктивно-технологических решений наработан большой объем теоретических и экспериментальных данных, которые отражены в работах Батаева А.А.[43], Берлина Ал. Ал.[45],

Братухина А.Г.[52], Брызгалина Г.И.[54], Браутмана Л.[89], Васильева В.В.[36,60], Воробья В.В.[64], Гайдачук В.Е.[106, 66], Дудченко А.А.[70], Карпова Я.С.[76], Молодцова Г.А.[84], Образцова И.Ф.[90], Резниченко В.И.[97], Сидоренко Ю.Н.[99], Сироткина О.С.[52, 100], Фитцера Э.[108] и др. Разработка и исследование композиционных материалов на сегодня продолжается в большинстве ведущих научно-исследовательских и проектных организациях. В Российской Федерации в период с 2013 по 2020 гг. действует государственная программа «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности» подпрограммой которой является «Развитие производства композиционных материалов (композитов)» и изделий из них» в частности одним из целевых индикаторов является разработка новых технологических решений, развитие армирующих материалов и связующего.

Под несущей способностью в работе понимается не только способность конструкции выдерживать нагрузку, но и отсутствие развития дефектов при силовом воздействии, что влияет на эксплуатационные характеристики и в том числе прочностные характеристики конструкции.

Снижение объемов испытаний возможно при использовании математического и конечно-элементного моделирования конструкций, базирующихся на работах Бартенева Г.М.[46], Васильева В.В.[59], Дудченко А.А.[71], Лурье С.А.[71, 44], Михайлина Ю.А.[83], Победри Б.Е.[94, 93] и др. Здесь можно отметить недостаточную изученность физики развития повреждений в ПКМ (особенно в части определения начала развития повреждений) и необходимость верификации данных моделей, в связи со значительным отличием процессов разрушения и накопления повреждений для различных конструктивно-технологических решений.

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. [80, 40], Makeev A. [31, 25], Richard H. [10], Шилова А.И. [112], Ai Shigang [32] 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.

Во введении дается обоснование актуальности темы диссертации, описана проблематика производства и проектирования авиационных конструкций из полимерных композиционных материалов, 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. Приведено описание процедуры проектирования изделий из ПКМ, основанной на совместной отработке конструктивных и технологических решений, с учетом прочностного анализа и экспериментальной отработки, принятых решений. Большой объем прочностных испытаний для авиационной конструкции из ПКМ необходим в связи со значительным влиянием конструктивно-технологических решений на выходные свойства изделия. В тоже время отработка технологического процесса и выбор его оптимальных параметров, также требует подтверждение экспериментальной оценкой. Большая часть этих испытаний переносится на начальный этап проектирования (испытание элементарных образцов) для снижения рисков и трудоемкости на следующих этапах проектирования.

При рассмотрении методов неразрушающего контроля и дефектов в авиационных конструкциях из ПКМ сделан вывод о высокой трудоемкости современных методов исследования внутренней структуры, так как для композиционных материалов свойственно наличие большого объема

внутренних дефектов, значительно влияющих на прочность конечного изделия. Это приводит к необходимости использования методов неразрушающего контроля (НК) на всех этапах изготовления конструкции и при техническом обслуживании во время эксплуатации. На основе качественных критериев, сформированных для диссертационного исследования, в качестве применяемого метода НК выбран метод вычислительной рентгеновской томографии (ВРТ), позволяющий анализировать структурную плотность материала конструкции с обеспечением высокой точности проведения исследования.

Вторая глава посвящена определению и обоснованию количественных критериев, применяемых при проведении исследования. Рассмотрены традиционные методы применения ВРТ при анализе и контроле изделий из ПКМ, основанные на измерении отдельных дефектов.

При описании метода ВРТ, обосновывается возможность применения данного метода для количественной оценки состояния материала на основе алгоритмов, применяемых для реконструкции линейного коэффициента ослабления при плоском просвечивании объекта.

В работе предложены критерии, в комплексе описывающие поведение структурной плотности композиционного материала. Под структурной плотностью определено состояние материала в плоскости сканирования с учетом технологических и эксплуатационных дефектов. Данные критерии базируются на применении методов математической статистики к распределению линейного коэффициента ослабления, определяемому по 90% площади сечения, в контролируемых плоскостях сканирования.

На основе проведенных исследований обосновываются погрешности для данных критериев, составляющие 1-2%, и подтверждается точность использования осреднённых значений ЛКО для определения плотности по сравнению с радиометрическим методом контроля ($\pm 0,4\%$). Приведено обоснование, на основе анализа экспериментальных данных, применения

осредненных критериев и их отклонений от базового сечения для контроля структуры материала авиационных конструкций.

В третьей главе приведены основные положения, лежащие в основе разрабатываемой методики. Рассмотрены механизмы накопления и развития повреждений в ПКМ используемые при прогнозировании разрушения методами математического и конечно-элементного анализа. Рассмотрены элементы механики разрушения, связывающие уровень дефектов в конструкции и процесс ее разрушения. На основе анализа методов прочностного расчета и критериев разрушения, сделан вывод о необходимости верификации данных методов путем анализа конструкции под нагрузкой, что может значительно увеличить достоверность применяемых расчетных моделей.

Приведено описание и конструкция разработанного стенда для создания растягивающей нагрузки на элементарные образцы из ПКМ. Подтверждение точности используемого стенда при анализе напряженно-деформированного состояния конструкции, подтверждена предварительными исследованиями на металлических образцах. На основе применения данного стенда и метода ВРТ сформирована методика проведения исследования элементарных образцов для определения поведения материала конструкции под нагрузкой с использованием количественных критериев.

В четвертой главе приводятся результаты применения предложенной методики для образцов из ПКМ с вариацией связующего и армирующего материала. Представлены графические модели, описывающие изменение структуры образцов по сравнению с базовым состоянием конструкции в зависимости от уровня статической нагрузки. Показано, что при использовании различных армирующих материалов и связующего, при постоянстве других конструктивно-технологических факторов предложенные критерии описывают процессы, сопровождающие нагружение конструкции. В результате исследования получено, что состояние материала

под нагрузкой и после ее снятия носит различный характер, что не позволяет однозначно использовать результаты контроля в ненагруженном состоянии для материалов со значительным накоплением повреждений в прочностных расчетах.

В заключении диссертации приведены основные положения диссертации, характеризующие ее научное содержание как разработку нового метода и критериев оценки состояния структуры материала авиационных конструкций из ПКМ.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСКИХ РЕШЕНИЙ ПРИ СОЗДАНИИ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПКМ И МЕТОДОВ ИХ ПОДТВЕРЖДЕНИЯ

1.1. Анализ особенности применения ПКМ в авиационных конструкциях

Начало применения композиционных материалов в авиационной промышленности началось с 1940х годов. Один из самых ранних этапов применения относится к самолету Spitfire, в конструкции которого применялся материал Gordon Aerolite (рис.1.), разработанный в 1936 году [29]. Данный материал включал в себя фенольное связующее и ориентированные льняные волокна, применяемые в качестве армирующих материалов. Дальнейшее развитие ПКМ в период 1940-1950х годов связано с применением стеклопластиков в конструкциях радарных обтекателей.

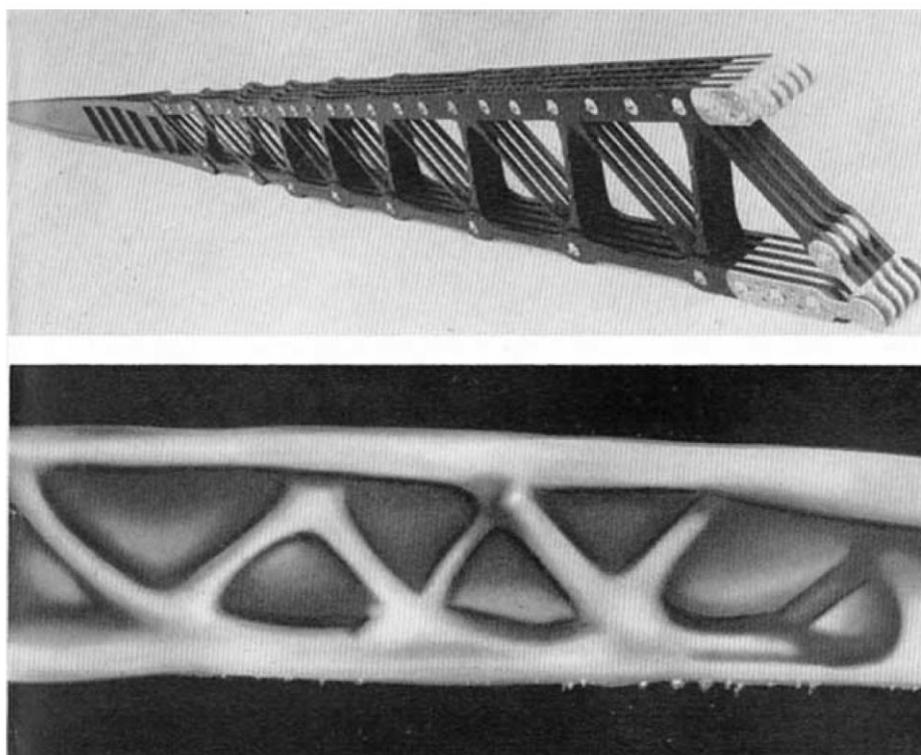


Рис.1. Элемент конструкции крыла самолета Spitfire, выполненный из материала Gordon Aerolite [11]

Начиная с 1970х годов использование ПКМ в конструкциях самолетов стало носить достаточно массовый характер (в основном в слабонагруженных элементах планера (рис. 2)), определяемый развитием угле- и боропластиков, обладающих достаточно высокими прочностными характеристиками [89].

Применение ПКМ в ряде конструкций приводит к значительному снижению массы по сравнению с металлическим исполнением. Элерон сотовой конструкции с композиционными обшивками обеспечивает снижение массы на 20% и уменьшением количества деталей на 50% [9, 61]. В конструкциях фюзеляжа и крыла композиционные элементы наиболее широко начали внедряться на военных самолетах, для которых требования снижения массы превалирует над стоимостными параметрами.

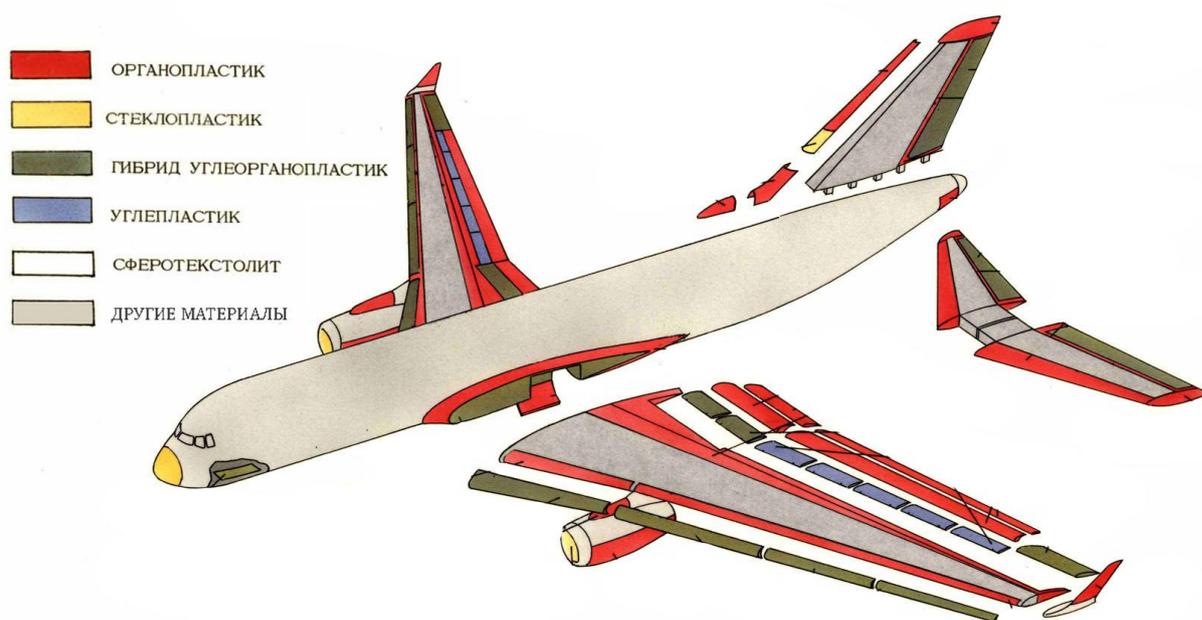


Рис.2. Типовые элементы самолета с применением ПКМ

Дальнейшее внедрение ПКМ в конструкцию планера проходило поэтапно и сильно зависело от научно-исследовательских работ в этой области. В работе [77] предлагается рассматривать развитие ПКМ в рамках трех этапов:

- 1970-1980 гг. – характеризуется развитием методов проектирования, технологии изготовления и проектирования изделий из ПКМ, внедрением в военную авиацию в несущих конструкциях. Основные вопросы, которые решались на данном этапе были связаны повышением продолжительности жизненного цикла, повышению и стабилизации характеристик материалов и конструкций. Началось применение ПКМ в конструкциях гражданских самолетов. Накапливался опыт длительной эксплуатации и поведения конструкции из ПКМ при воздействии различных внешних факторов.

- 1980-1990 гг. – увеличение доли полимерных материалов в конструкциях самолетов военной авиации, начало широкого применения в несущих конструкциях гражданской авиации.

- 1991-2000 гг. – широкое применение ПКМ в гражданских самолетах, в том числе в силовых конструкциях планера.

На сегодняшний день можно выделить четвертый этап, который обусловлен увеличением доли композиционных материалов в гражданских самолетах до 50% от веса планера. [95] Если на предыдущих этапах основными элементами, которые создавались из ПКМ были механизация, киль и не силовые конструкции, то на сегодняшний день к этим элементам добавились высоконагруженные особоответственные части конструкций – крыло и фюзеляж (рис. 3), что стало результатом большого количества научно-исследовательских программ, в том числе по повышению физико-химических свойств волокна и матрицы.

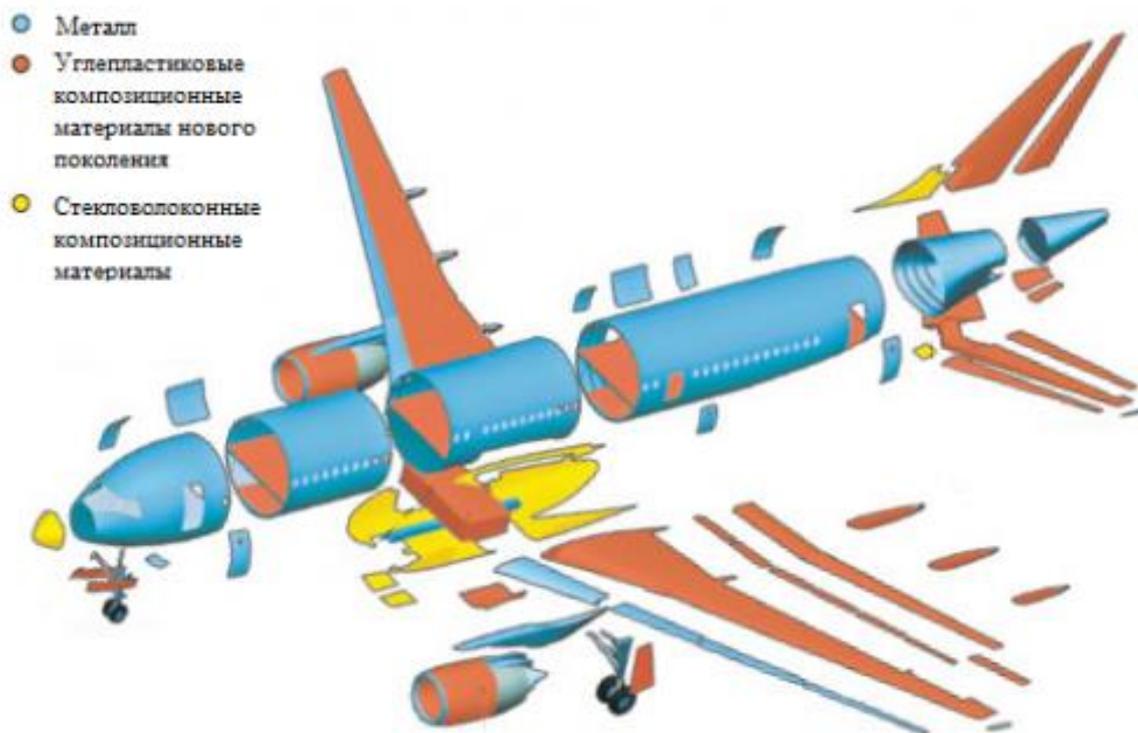


Рис. 3. Доля ПКМ в современных гражданских самолетах

На рисунке 4 представлен график изменения доли ПКМ в массе планера самолетов гражданской и транспортной авиации.

По прогнозам, приведенным на рисунках 5 и 6, в ближайшее время продолжится снижение стоимости сырья, что так же может положительно повлиять на рост применения КМ в аэрокосмических конструкциях.

Одновременно с расширением доли использования композиционных материалов в силовых конструкциях гражданских самолетов увеличиваются требования по контролю и сертификационным испытаниям композиционных материалов. Это связано с тем, что КМ шире используется в элементах, относящихся к основным силовым конструктивным элементам, к которым предъявляются повышенные требования по прочности и стабильности выходных характеристик [98].

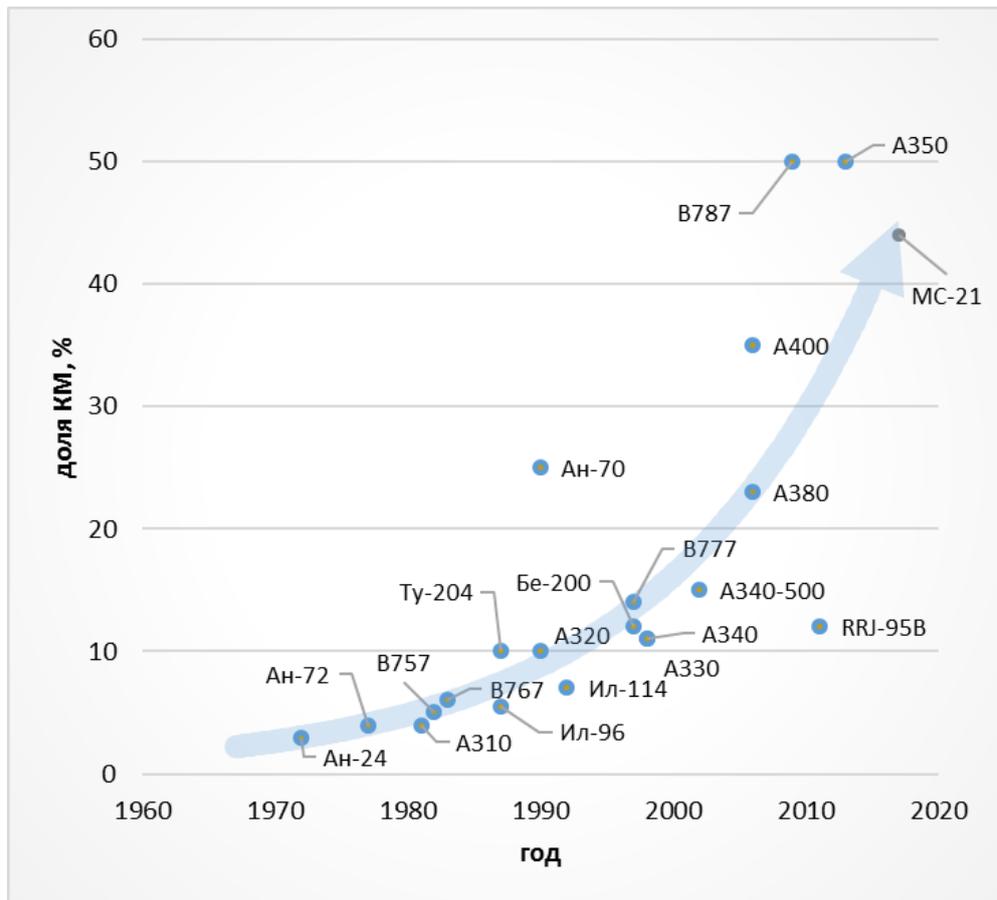


Рис. 3. Доля композиционных материалов в массе планера транспортных и пассажирских самолетов [1,13]

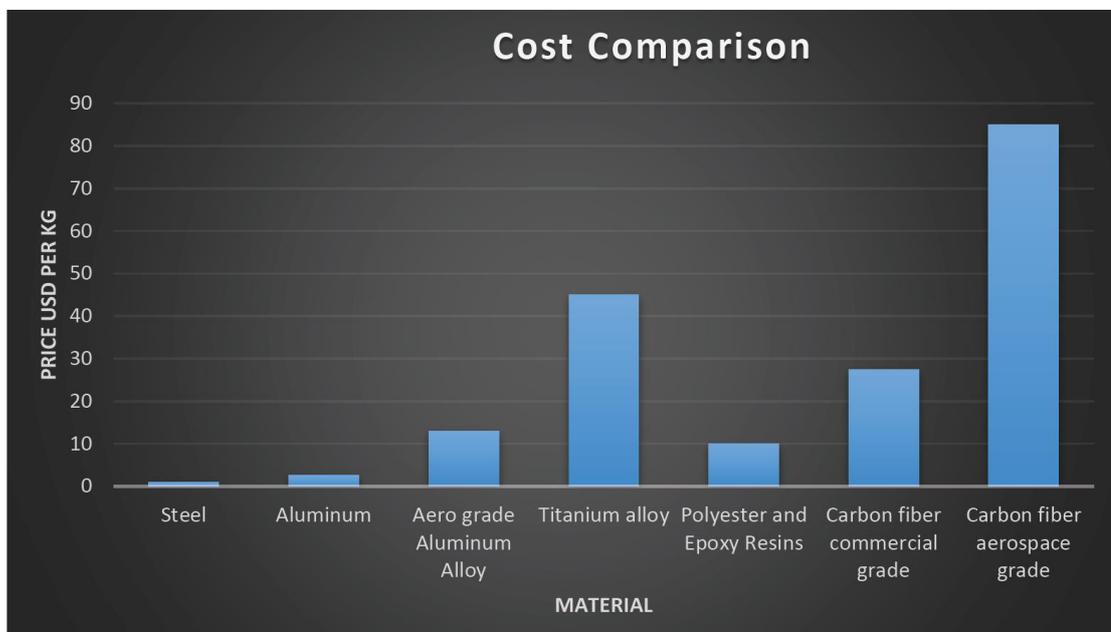


Рис. 5 Сравнение стоимости различных типов материалов [16]

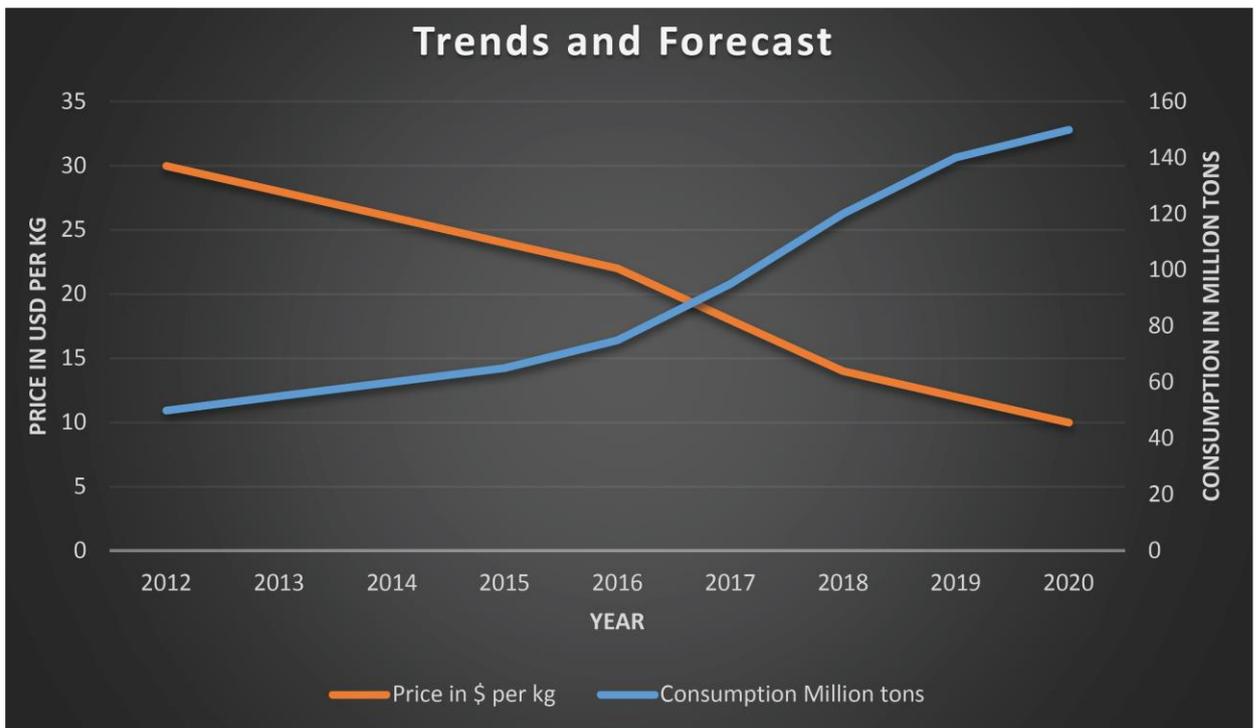


Рис. 6. Тенденция и прогноз на изменение стоимости углеродных волокон [6]

Преимуществом КМ перед традиционными материалами, применяемыми в авиационных конструкциях [88, 82], является:

- Повышенные вибропрочностные и демпфирующие свойства.
- Возможность регулирования свойств в различных направлениях.
- Повышенная удельная жесткость и сопротивление усталости.
- Многофункциональность применения.
- Широкий комплекс тепло- и электрофизических свойств.

В тоже время ПКМ имеет и ряд существенных недостатков, к которым относится:

- Высокие требования к постоянству технологического процесса.
- Сложность контроля после производства и эксплуатации.
- Сильное влияние на прочностные свойства ударных и климатических воздействий (при водопоглощении в 1% уменьшение

прочности в касательном направлении составляет 10-15% и увеличивается чувствительность к концентраторам напряжений) [82].

Вопросы проектирования и расчета конструкций из ПКМ рассматриваются в работах Брызгалина Г.И.[54], Браутмана Л.[89], Васильева В.В.[36, 60], Воробья В.В.[64], Дудченко А.А.[70], Резниченко В.И.[96], Карпова Я.С.[76], Образцова И.Ф.[90] и др. Процедура проектирования конструкций из ПКМ значительно отличается от «традиционного» подхода к проектированию авиационной техники, принятому для изделий из металлических материалов. Первоначально на основе существующих геометрических обводов [105] формируют примерную конструктивно-силовую схему, на которую накладывают действующие силовые факторы, температуры эксплуатации, с учетом возможных климатических и ударных воздействий. Исходя из этих параметров выбирают тип композиционного материала и возможные технологии изготовления конструкции. Так как сам материал представляет из себя многокомпонентную структуру на начальных этапах разработки возможно использование только экспертных оценок при выборе конкретных типов компонентов. На втором этапе, исходя из действующих напряжений и предварительных толщинах элементов конструкции, уточняются требования к материалу и технологии изготовления, формируются требования к допустимым дефектам и определяются базовые эксплуатационно-прочностные характеристики. Далее формируется необходимая укладка и утверждается тип формования изделия, что может потребовать определённого пересмотра первоначальной конструктивно-технологической схемы конструкции.

Так как процесс проектирования и определения необходимых конструктивно-технологических параметров носит вариативный характер и не сформирован единый подход, большая часть работ переносится на экспериментальную отработку, что значительно влияет на процесс

разработки нового изделия. Сама процедура проектирования при этом включает в себя тесную взаимосвязь между проектно-конструкторскими решениями, технологическим проектированием и прочностными расчетами конструкции [22], сопряженные с большим количеством экспериментальных работ как в части определения прочностных параметров конструкции, так и отработки технологического процесса и технологий ремонта.

Комплекс работ, который проводится при конструировании изделий из ПКМ включает в себя следующие этапы:

- выбор типов (типа) КМ и силовой схемы конструкции;
- определение эксплуатационных требований и прочностной анализ;
- экспериментальное определение свойств материала;
- расчет на прочность типовых элементов конструкции (с учетом структуры и укладки материала);
- оценка влияния эксплуатационных факторов;
- конструктивно-технологическая отработка элементов регулярной зоны и соединений конструкции;
- отработка конструкции в составе планера при статических и ресурсных испытаниях.

1.2. Методы экспериментального определения свойств ПКМ

При формировании конструкции и эксплуатации авиационных конструкций из ПКМ возможно протекание процессов, сказывающихся на прочностных характеристиках и процедуре их эксплуатации, поэтому при анализе необходимо учитывать широкий набор параметров и свойств. Большинство характеристик необходимо получить не только в зависимости от технологии изготовления и типа материала, но и после воздействия различных факторов, к которым относится температура, окружающая среда, вибрация, длительные нагрузки и другие для оценки возможных изменений.

Таким образом, методы анализа свойств композитов можно разделить на несколько групп методов, причем многие из них необходимо применять как до воздействия на материал, так и после, для оценки произошедших в композите изменений (рис.7) [38].

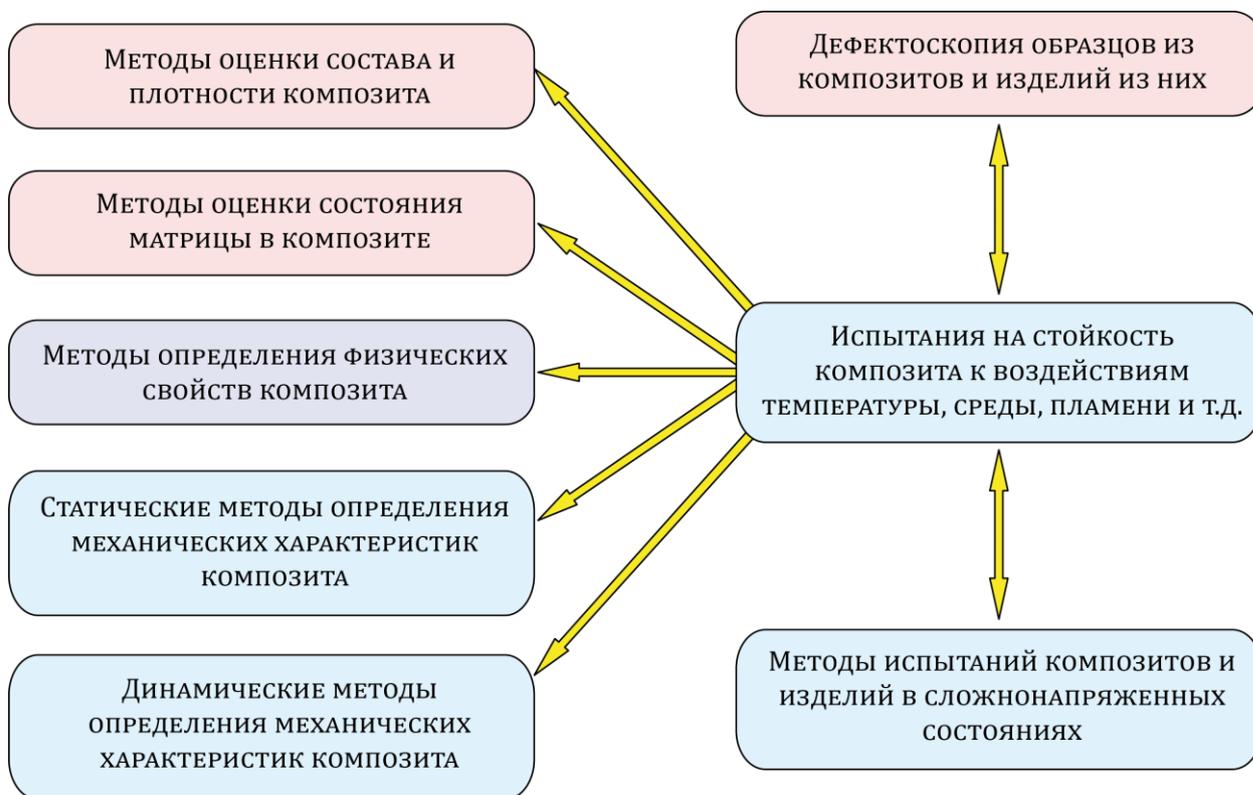


Рис. 7. Методы анализа свойств изделий и образцов из ПКМ [29]

Большое количество типов используемых материалов, вариантов конструктивных решений и технологий изготовлений приводит к необходимости проведения значительного объема испытаний конструкций при разработке нового изделия [8]. Это связано с более сложными, чем у традиционных материалов, процессами разрушения, которые при их прогнозировании современными расчетными методами, также требуют экспериментальной верификации. Порядок испытаний, сопровождающий разработку конструкции представлен на рисунке 8 [12]. Так как формирование материала и его выбор проводится параллельно с этапом

проектирования, то большой объем испытаний, подтверждающих принятые конструктивно-технологические решения, приходится на испытания элементарных образцов. Одно из основных требований при проведении испытаний – используется технология, аналогичная серийной производственной технологии. В тоже время каждый технологический процесс, изготовления конструкций из ПКМ имеет достаточно большое количество параметров, влияющих на дефектность и уровень выходных характеристик материала. Вопросы влияния конструктивно-технологических решений на выходные характеристики конструкции из ПКМ изложены в работах Батаева А.А.[43], Братухина А.Г.[52], Гайдачук В.Е.[106, 66], Молодцова Г.А.[84], Резниченко В.И.[97], Сидоренко Ю.Н.[99], Сироткина О.С.[52, 100], Берлина Ал. Ал.[45], Фитцера Э.[108] и др.

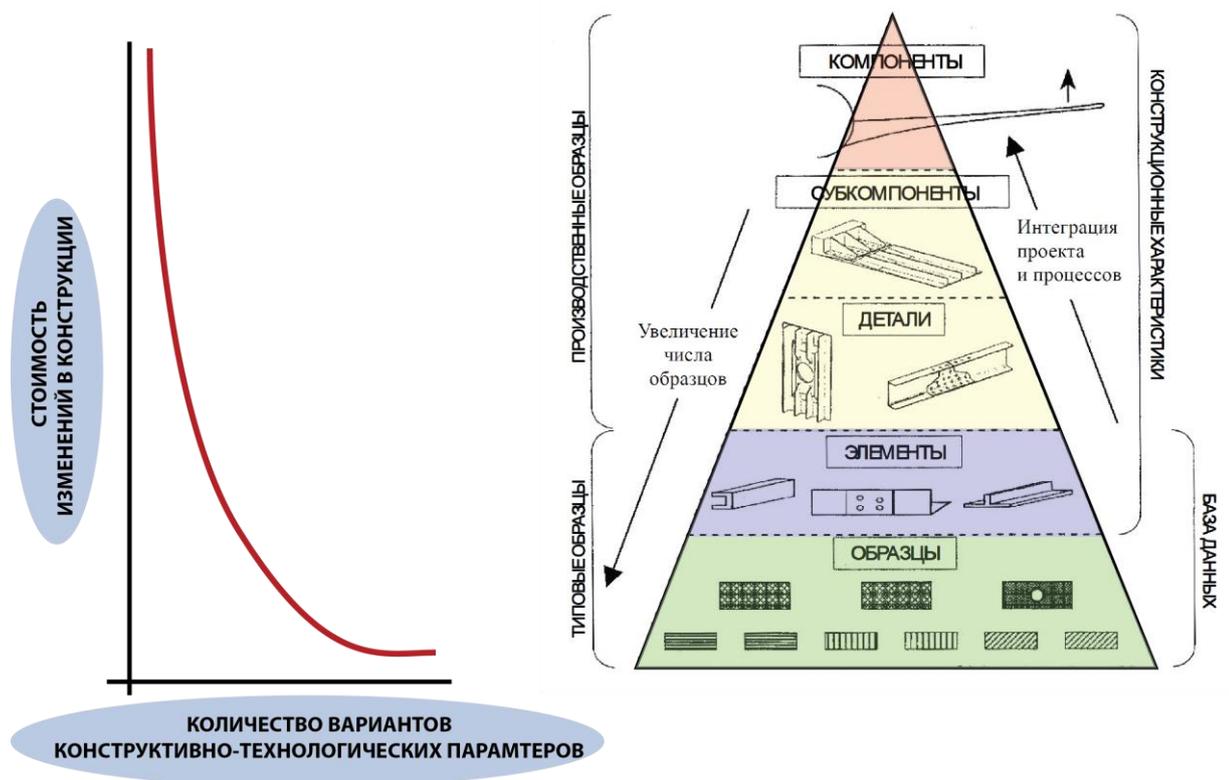


Рис. 8. Схематичная диаграмма построения испытаний для консоли крыла [1]

Количество образцов на начальном уровне испытаний может доходить до нескольких тысяч для одного типа материала и варианта технологического процесса, что связано со следующими факторами:

- Недетерминированность свойств ПКМ, основанная на сильном воздействии концентраторов на поведение конструкции, необходимости создания материала одновременно с конструкцией и многообразием укладок. Свойства конечной конструкции сильно зависят от габаритных размеров (особенно толщины) детали и носят ярко выраженную анизотропию в различных направлениях.

- Сильным воздействием технологии изготовления (параметров технологического процесса, их постоянства и возможность контроля) на характеристики выходной конструкции. Это требует постоянного промежуточного контроля качества и оценки прочностных характеристик с целью подтверждения качества процесса изготовления. Многообразие технологий и большая вариативность параметров процесса изготовления требуют тщательной и длительной процедуры отработки технологии, что приводит к значительным затратам при испытаниях элементарных образцов.

- Большое различие между прочностными характеристиками компонентов материала (армирующих волокон и матрицы), приводящее к низкому сопротивлению воздействию сжимающих нагрузок, межслоевому сдвигу и отрыву перпендикулярно слоям и волокнам.

- Воздействие на конструкцию внешних факторов – климатических и ударных, которые приводят к деградации прочностных характеристик и требуют оценки на этапах выбора типа материала и определении его характеристик, для уточнения прочностных моделей.

Процесс получения базовых характеристик материала (начальной квалификации) описывается в [12], [8], [104], который включает в себя рекомендации по методам подготовки исходных панелей, по формированию образцов и описание методик и процедур формирования статистически

обоснованного объема испытаний, необходимого для сертификации композиционных материалов, применяемых в авиационных конструкциях. Для статистически достоверного результата подготовка образцов ведется на разных партиях материала с использованием двух панелей, выполненных по выбранной технологии (в том числе фиксированными технологическими параметрами) [12]. Количество образцов задается для каждого варианта климатических условий, представленных в таблице 1.

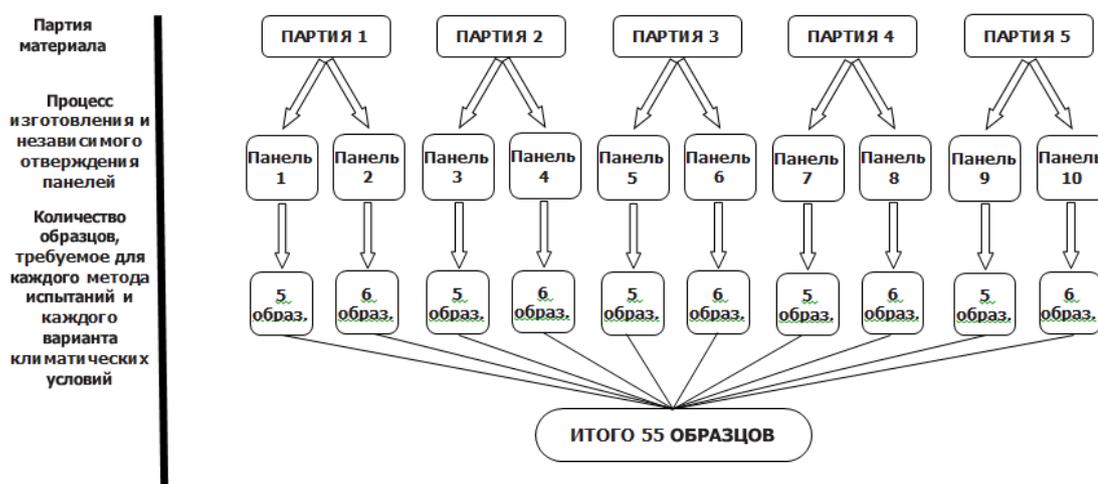


Рис. 8. Полная матрица испытаний для каждого параметра [12, 69]

Таблица 1. Перечень типовых испытаний.

№	Метод испытаний	Метод определения	
		Россия	Зарубежный аналог
1	Прочность и модуль упругости при растяжении	ГОСТ 25.601-80 ГОСТ 11262-80	ASTM D 3039/D3039M, ASTM D 4018, CEN EN 2561, JIS K7073, SACMA SRM 9

2	Прочность и модуль упругости при сжатии	ГОСТ 25.602-80, ГОСТ 9550-81	SACRMA SRM 1
3	Прочность и модуль упругости при сдвиге	ГОСТ Р 50578-93 ГОСТ 24778-81	ASTM D 5379
4	Плотность		ASTM D 792
5	Температура стеклования		SACMA SRM 18
6	Объемное содержание		ASTM D 3171
7	Объемное содержание пор		ASTM D 2734
8	Прочность при межслоевом сдвиге методом короткой балки.		ASTM D 2344 SACRMA SRM 8

Испытания проводят для следующих режимов внешней среды:

- STD – минимальная температура -54°C , влажность образцов в состоянии поставки;
- RTD – температура лаборатории, влажность образцов в состоянии поставки;
- ETD – максимальная температура $+82^{\circ}\text{C}$, влажность образцов в состоянии поставки;
- ETW – максимальная температура $+82^{\circ}\text{C}$, равновесным содержанием влаги при относительной влажности окружающей среды 85%.

На первый уровень испытаний (элементарные образцы) приходится подтверждение максимально возможного объема конструктивно-технологических характеристик материала и укладки с целью снижения дальнейших рисков. Для конструкций из ПКМ свойственен достаточно большой разброс свойств (порядка 15-20%), что приводит к значительному росту количества образцов для формирования статистически достоверной

картины. Последующие испытания (субкомпонентов, деталей и компонентов) проводятся на более поздних этапах проектирования и увеличение их количества при учете выше перечисленных факторов значительно влияют на стоимость программы разработки.

1.3. Анализ внутренних дефектов и методов контроля структуры композиционного материала

Дефекты в конструкциях из ПКМ можно разделить на производственные (связанные с изготовлением изделия) и эксплуатационные (появившиеся в процессе эксплуатации). Процесс возникновения дефектов может сопровождать весь цикл производства изделий из ПКМ, что приводит к значительным затратам на дефектоскопию и контроль всех этапов жизненного цикла изделия. В общем виде дефекты можно разделить на поверхностные и внутренние. Для ПКМ наиболее характерными и опасными, в связи с трудностью их выявления, являются внутренние дефекты конструкции (рис. 9), к которым относятся дефекты следующих уровней [63, 67, 47]:

- Микродефекты, статистически распределенные по объему материала и сопоставимые с размером армирующих волокон (микротрещины, разориентация микрофибрилл, микропоры и т.д.). Данные дефекты в основном относятся к характеристикам компонентов композиционного материала. Для армирующих материалов к этим дефектам относится прорыв отдельных волокон, наличие трещин на поверхности волокна, постоянство диаметра волокон. Параметры связующего могут приводить к различным по уровню дефектам, при этом на процесс влияют такие физические свойства как содержание влаги, вязкость смолы, наличие посторонних включений и т.д.

- Минидефекты – размеры сопоставимы с толщиной элементарного слоя и связаны с технологическими процессами изготовления конструкции и характеристиками материалов (нарушение адгезионного взаимодействия, неравномерное распределение связующего, обрывы волокон, поры и т.д.), которые могут выступать в качестве концентраторов напряжений и приводить к появлению макродефектов. К основным параметрам, которые влияют на качество конструкции при формовании изделия относятся температура формования, давление, состав и свойства связующего, температура и время охлаждения. Так же уровень технологических дефектов в виде пористости зависит от подготовки и типа связующего, наличия дренажа во время пропитки и т.д.. Для каждого типа технологического процесса могут быть свойственны конкретные типы дефектов, которые можно в том числе характеризовать как свойство данного технологического процесса, влияющего на выходные характеристики конструкции, и в данном случае отработка может сводиться исключительно к минимизации их количества [33]. Механообработка, применяемая после изготовления изделия, может приводить к появлению микротрещин, локальному выдергиванию волокон и выкрашиванию связующего, что формирует дополнительные концентраторы напряжений в местах обработки. Параметры технологического процесса отрабатываются на этапе выборе материала и технологического процесса и значительно влияют на уровень дефектов и прочностные характеристики итоговой конструкции.

- Макродефекты – к ним относятся дефекты типа отслоений, непроклеев и трещин, значительно влияющих на прочностные свойства конструкции и в общем не допустимых для конструкции. Этот тип дефектов может возникать на различных этапах жизненного цикла изделия и проявляться как на этапе производства конструкции, так и на этапе эксплуатации. На этапе производства их возникновение может свидетельствовать о несовершенстве или значительных отклонениях в

технологическом процессе. К значительным дефектам может приводить ударные воздействия, воздействие влаги, УФ-излучения, значительные температурные или силовые воздействия. Эти факторы приводят к деградации свойств матрицы, развитию или образованию трещин в поверхностном и приповерхностном слое или внутри ПКМ.

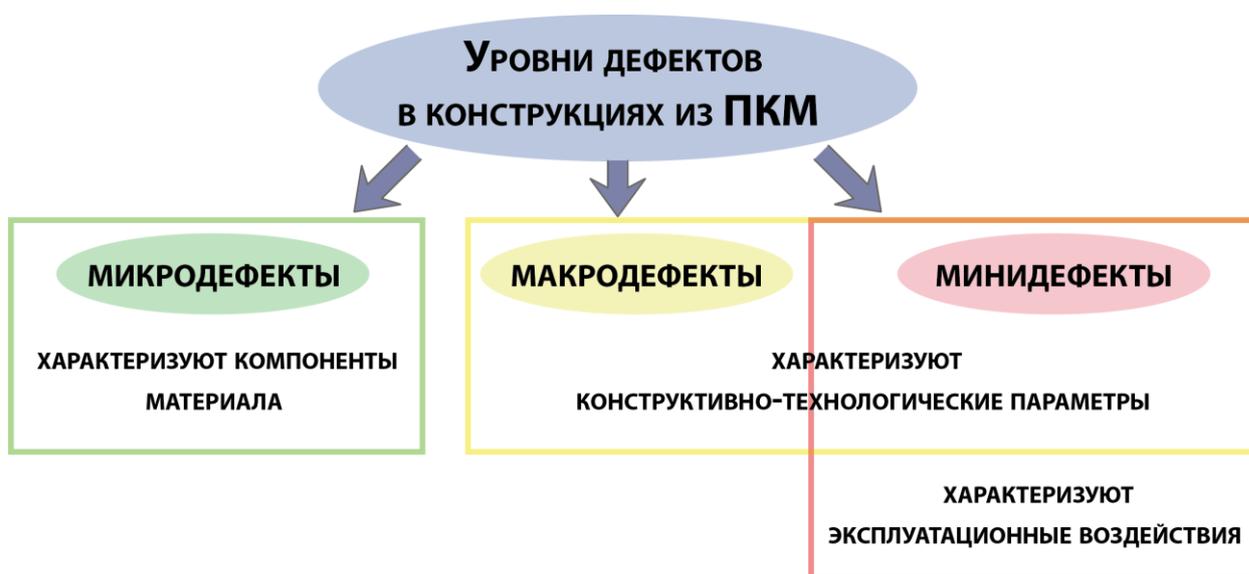


Рис.9. Уровни дефектов в конструкциях их ПКМ

Большинство работ в области механики ПКМ посвящено исследованию дефекта типа расслоение, относящийся к макродефектам и имеющим значительное влияние на прочность конечного изделия. Исследованиями в данном направлении занимались Болотин В.В. [103], Тарнопольский Ю.М. [102,104], Трошин Н.Ф. [107], Фудзии Т. [110] и др. В их работах приведены результаты поиска критической энергии роста расслоения, которая в том числе может служить мерой разрушения конструкции (если критическая нагрузка мала, то возможен рост расслоения, определяемый трещиностойкостью материала).

Большинство дефектов в композиционных конструкциях носят внутренний характер и не определяются путем визуального осмотра. Полноценный контроль конструкций из ПКМ возможно осуществить только

с применением неразрушающих методов контроля (НК). Необходимость применения неразрушающих методов контроля в том числе при лабораторной обработке и испытаниях элементарных образцов обусловлена невозможностью определить момент начала разрушения визуально, так как в отличие от металлов процесс разрушения может начаться внутри материала (для металлов характерно развитие поверхностных трещин). Вопросы особенности применения и развития методов неразрушающего контроля для композиционных материалов рассматриваются в трудах Воробья В.В. [63], Барынин В. А [42], Ларина А.А. [80, 40], Выборнова Б.И. [65] и др.

На рисунке 10 представлены этапы промежуточного контроля качества при производстве изделия из ПКМ. Выполнение всех элементов контроля позволяет выявлять отклонения от серийного процесса изготовления и своевременно реагировать на возможные отклонения и оперативно устранять возможные отклонения. Такой подход значительно усложняет процедуру изготовления детали, но при этом позволяет значительно снизить объем бракованных деталей.

На стадии научно-исследовательской и опытно-конструкторских работ по созданию новых изделий методы НК применяются для решения следующих основных задач:

- 1) для получения необходимых данных, подтверждающих правильность выбранных решений;
- 2) для сокращения времени и объемов, необходимых для исследований;
- 3) для отбора материалов и оборудования, обеспечивающих получение продукции необходимого качества с минимальными затратами.

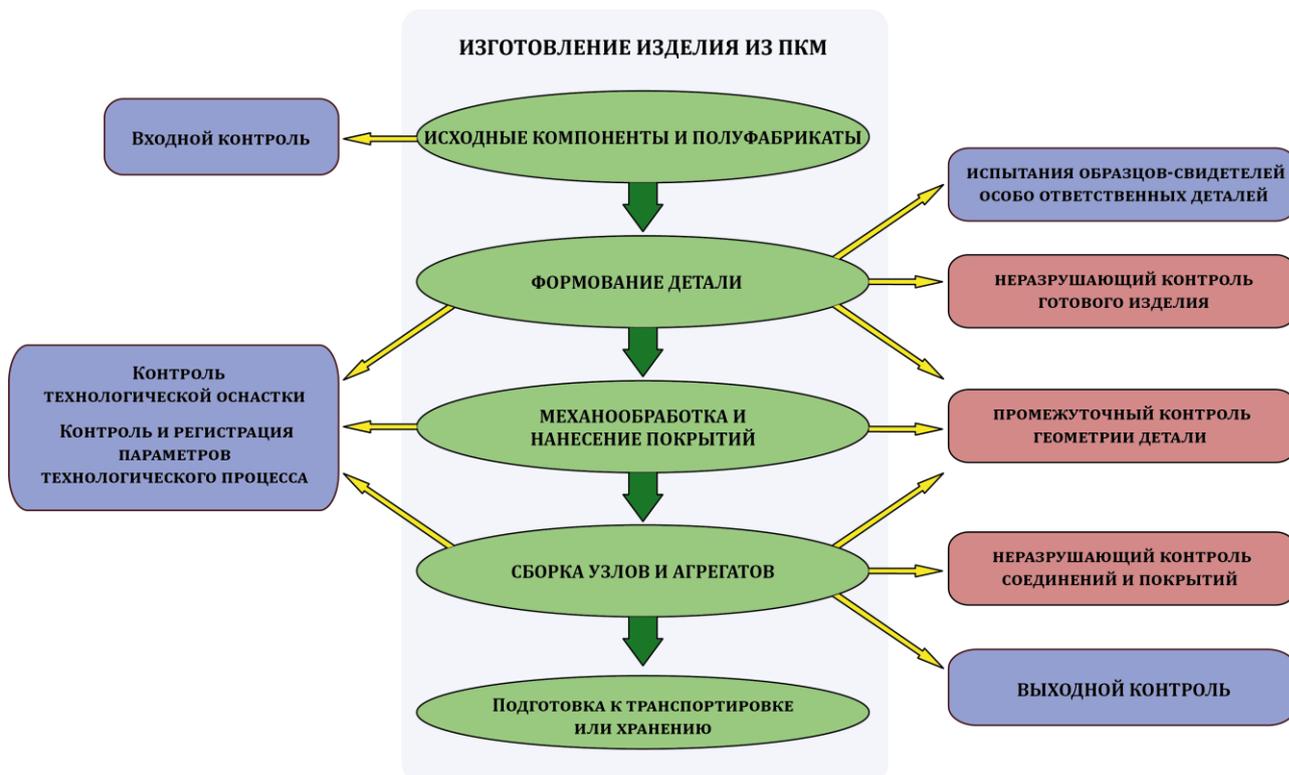


Рис. 10. Контроль качества изготовления на различных этапах технологического процесса

Наиболее распространенными методами контроля, применяемыми для исследования и контроля ПКМ, являются визуальный контроль, спектральная интерферометрия, акустические методы контроля, акустическая эмиссия и методы вычислительной рентгеновской томографии [85, 24, 21, 2]. При этом используемые методы контроля могут применяться как по отдельности, так и в комплексе, но увеличение количества применяемых методов контроля приводит к снижению производительности и повышению стоимости итогового изделия. Многие методы контроля, применяемые для традиционных материалов, не применяются или ограниченно применяются для ПКМ в связи со значительными отличиями в структуре и превалированием внутренних дефектов.

На базе традиционных требований к неразрушающим методам контроля, изложенным в [101, 63, 68], были сформированы следующие критерии на базе которых определялся применяемый метод дефектоскопии:

1. Высокая точность определения состояния структуры материала и изделия.
2. Возможность повторного однозначного определения контролируемого сечения.
3. Наличие количественной информации, на основе которой можно провести анализ.
4. Возможность контроля композиционного материала с учетом 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.

Несмотря на значительное распространение **визуальных методов контроля**, они позволяют определять только поверхностные дефекты конструкции, что позволяет их применять только для значительных повреждений. Наибольшее распространение данные методы получили на этапах эксплуатации авиационной техники, как наименее затратные по времени и необходимому оборудованию [92, 74].

Акустические методы контроля, благодаря удобству использования и мобильности составляют порядка 60% по отношению к другим методам НК, применяемым в аэрокосмической отрасли для изделий из ПКМ. Данный метод базируется на прохождении звуковых волн высокой частоты внутри материала. Для ПКМ, из-за значительного затухания колебаний используется частота колебаний не ниже 1 МГц, при этом снижение частоты уменьшает разрешающую способность и чувствительность контроля, а повышение частоты ограничивает глубину прохождения излучения, что может быть

критично для особоответственных конструкций, где толщина материала может составлять десятки миллиметров [75, 20].

Одним из преимуществ данного метода является его универсальность - он может применяться на различных этапах жизненного цикла. Возможно различное исполнение ультразвуковых дефектоскопов – мобильные (Рис 11), на автоматизированной платформе или лабораторные. Автоматизированные системы обладают достаточно высокой скоростью исследования с возможностью автоматического определения недопустимых дефектов. Лабораторные ультразвуковые установки обладают низкой скоростью исследования, одновременно с этим обеспечивая высокое разрешение итогового изображения [49].



Рис. 11. Мобильный ультразвуковой дефектоскоп

Принцип проведения контроля при помощи ультразвукового эхо-импульсного метода основан на том, что излучатель посылает в изделие ультразвуковые импульсы. При встрече с преградой, например, с дефектом или обратной (донной) поверхностью, часть энергии ультразвуковой волны отражается и возвращается обратно к излучателю. Приёмник ультразвуковых колебаний преобразует прошедшие через изделие ультразвуковые колебания в электрические, которые поступают на экран – основной индикатор дефектоскопа. В результате сканирования выводится информация о прохождении сигнала (А-скан) и цветные изображения о состоянии структуры в различных плоскостях (В, С и D-сканы) (рис. 12) [79]

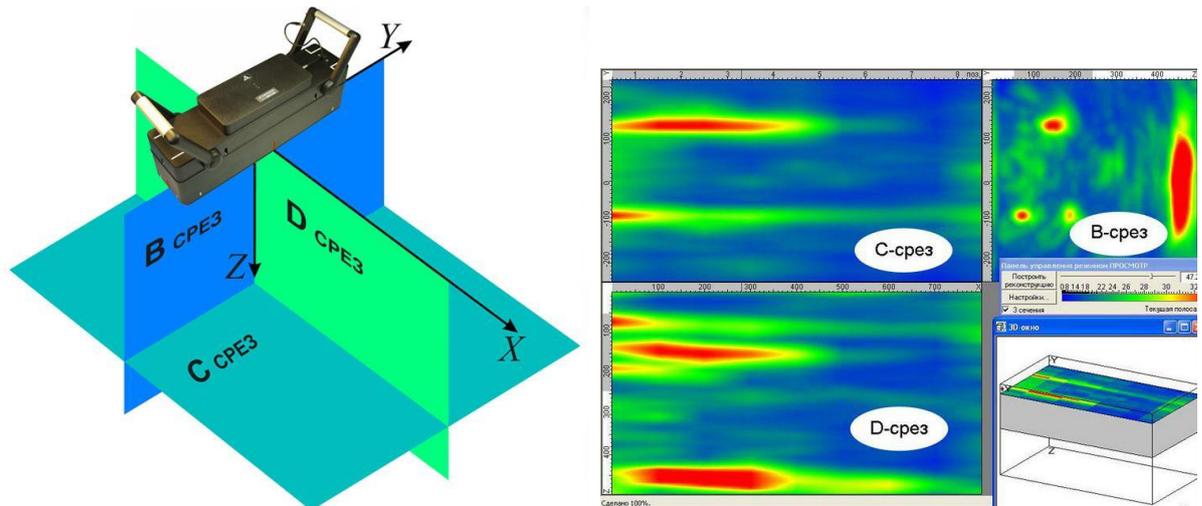


Рис. 12. Результаты ультразвукового контроля пластины

Недостатком ультразвукового метода исследования является быстрое затухание сигнала и не проходимость излучения через воздушные включения.

Методы спектральной интерферометрии (рис. 13) построены на основе измерения и анализа поверхностных деформаций. Типичными видами нагружения являются тепловое или вакуумное нагружение. После воздействия нагрузки и создания НДС поверхность объекта засвечивают излучением, отражающимся на CCD-камеру, оснащенной «сдвигающей оптикой», которая проецирует изображение на камеру дважды. Такая система позволяет проводить поиск подповерхностных дефектов, если они влияют на деформационное поведение. За счет применения нагрузки небольшой интенсивности данный метод не меняет структуру материала и позволяет контролировать определённую зону объекта. Подбор типа и длительности нагружения производят экспериментально, с последующей оптимизацией для конкретной конструкции. Как и для большинства методов НК предварительными работами при серийной эксплуатации данной системы является формирование базы данных с типовыми дефектами, что значительно повышает эффективность определения конкретного дефекта.

Данная база может быть сформирована на образцах с заложенными дефектами. К недостаткам данного метода стоит отнести невысокую глубину исследования материала, при этом метод может выполняться как в ручном (мобильном) варианте, так и использоваться для автоматизированного контроля [15, 42].

Аналогичный принцип работы у термографии, при которой производится измерение и анализ равномерности нагрева конструкции [86].

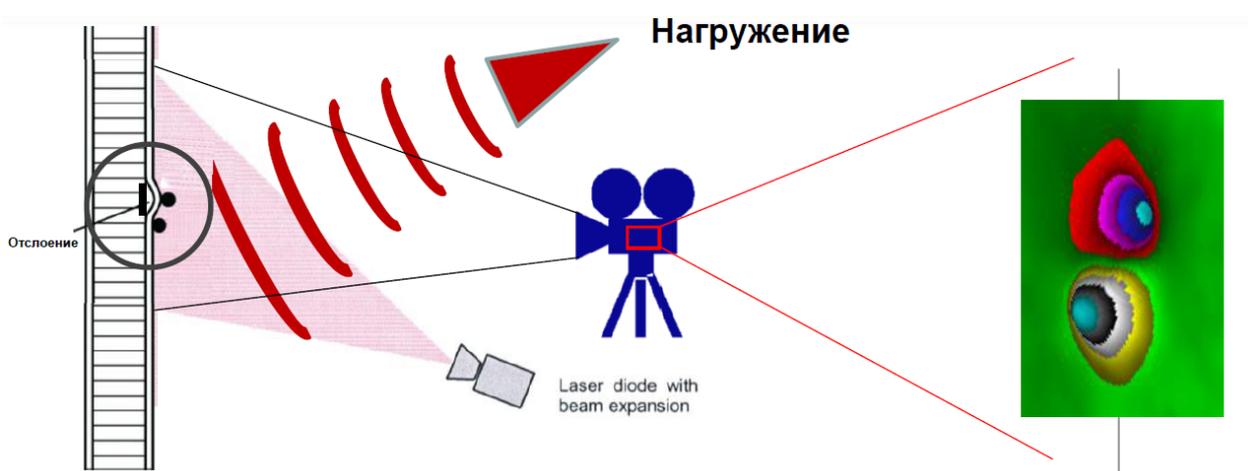


Рис. 13. Принцип работы интерферометрических методов контроля

Наибольший интерес в области дефектоскопии композиционных конструкций лежит в области конструкционного (встроенного) контроля. Диагностический контроль состояния конструкционных элементов (structural health monitoring, SHM) [16] — данная технология позволяет контролировать весь жизненный цикл изделия из ПКМ, начиная с процесса отверждения. Процедура постоянного контроля состояния материала конструкции входит в состав «интеллектуальных конструкций», которые должны в перспективе уметь распознавать возникшую ситуацию и сформировать ответную реакцию на нее. Система SHM выполняет сенсорную функцию (рис. 14), т.е. должна определить воздействие и его последствия на конструкцию. Одним из вариантов построения такой системы является использование

оптоволоконных линий и датчиков, снимающих информацию о внешних воздействиях и действующих нагрузках. Реализация данной технологии находится на стадии научно-исследовательских работ, поэтому в данной работе не рассматривается.



Рис. 14. Принцип работы системы непрерывного мониторинга состояния конструкции [111]

Промышленная вычислительная рентгеновская томография – высокоэффективный метод радиационного контроля, сочетающий возможности рентгеновского излучения и цифровой техники, позволяющий с высокой точностью получать плоские сечения и объемные изображения контролируемых изделий [78].

В зависимости от мощности источника излучения томографы могут устанавливаться в отдельном помещении с защитными стенами (максимальная энергия источника 5 МэВ) или располагаться в общей производственной зоне в виде бокса со свинцовыми стенками (рис. 15).

Принцип работы томографа (рис. 16) основан на реконструкции и визуализации внутренней структуры поперечных сечении объекта контроля

(томограмм) в результате совместной вычислительной обработки теневых проекций, полученных при рентгеновском просвечивании объекта контроля в различных направлениях. Послойный характер исследования и визуализации объемной структуры исследуемого объекта связан с используемым упрощающим приемом, сводящим трехмерную задачу неразрушающего контроля к серии двумерных томограмм (сечений). Более детально порядок обработки данных рассмотрен в главе 2.

В состав томографа входит ряд ключевых блоков - рабочий стол (обеспечивает фиксацию объекта контроля и его перемещение между источником и приемником излучения), источник излучения (в промышленных томографах в большинстве случаев применяются источники рентгеновского излучения), блок сбора проекционных данных, блок обработки данных и блок визуализации и управления работой томографа. Структурно томограф можно разделить на сканирующую систему, включающую источник излучения, рабочий стол, блок сбора проекционных данных и вычислительный комплекс, отвечающий за управление, обработку и предоставление конечных данных пользователю [57].

Недостатком метода ВРТ является ограниченные зоны исследования, определяемые рабочей зоной томографа, невысокая скорость сканирования, возможность использования томографа только как стационарной установки, что значительно сужает область его применения. Разрешающая способность при этом зависит от геометрических размеров объекта контроля, плотности контролируемого материала и плотности исследуемого материала. В зависимости от типа разрешение может составлять 10-100 нанометров.



А

Б

Рис.15. Общий вид вычислительного рентгеновского томографа:

А) томограф BT-600XA ООО «Проминтро»,

Б) X-50 North Star Imaging, Inc

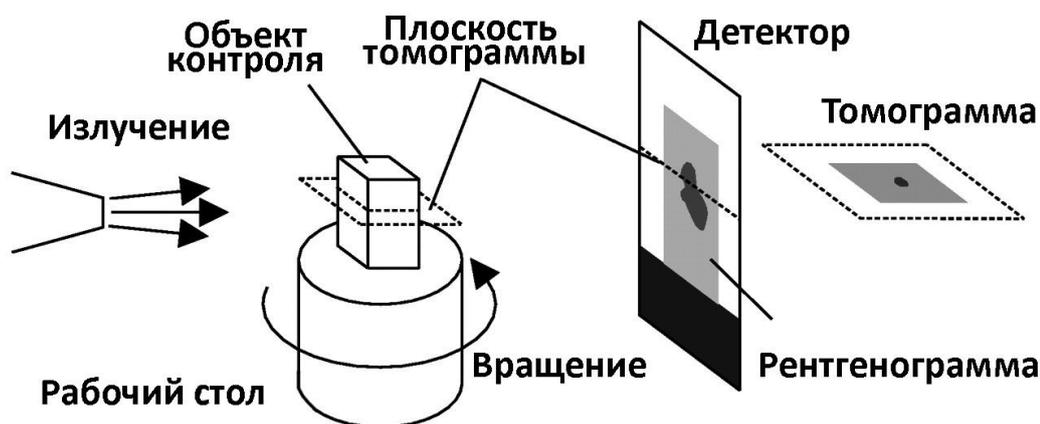


Рис.16. Принцип работы томографа

В общем виде метод ВРТ сводится к реконструкции пространственного распределения линейного коэффициента ослабления $\mu(x,y)$ (ЛКО) (рис. 17) рентгеновского излучения при прохождении через объект исследования. Определение уровней ЛКО производится на основе вычислительной обработки теневых проекций, полученных при просвечивании объекта под разными углами. Выходными данными при анализе методом ВРТ является цифровой массив, имеющий вид матрицы значений, накладываемой при послойном сканировании на томограмму. Т.е. при получении плоских томограмм, значения ЛКО характеризуют структурную плотность материала

[78]. После обработки эта информация, распределенная по томограмме в виде матрицы значений, пересчитывается в яркостное изображение, которое выводится на рабочий экран оператора. В дальнейшем, при достаточном шаге сканирования, яркостные изображения могут объединяться в трехмерное изображение, которое можно использовать как непосредственно для оценки состояния структуры, так и для реверс-инжиниринга или сравнения с CAD моделью. (рис. 18)

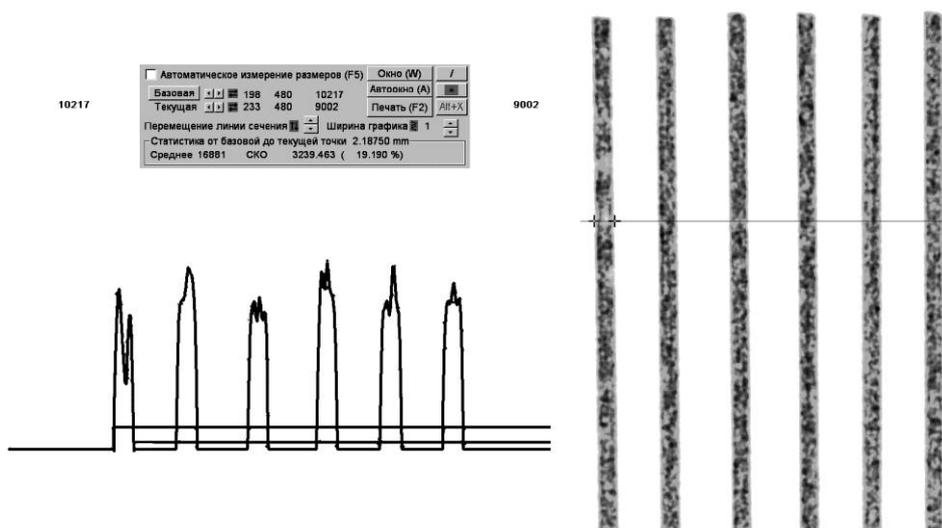


Рис. 17. График распределения линейного коэффициента ослабления

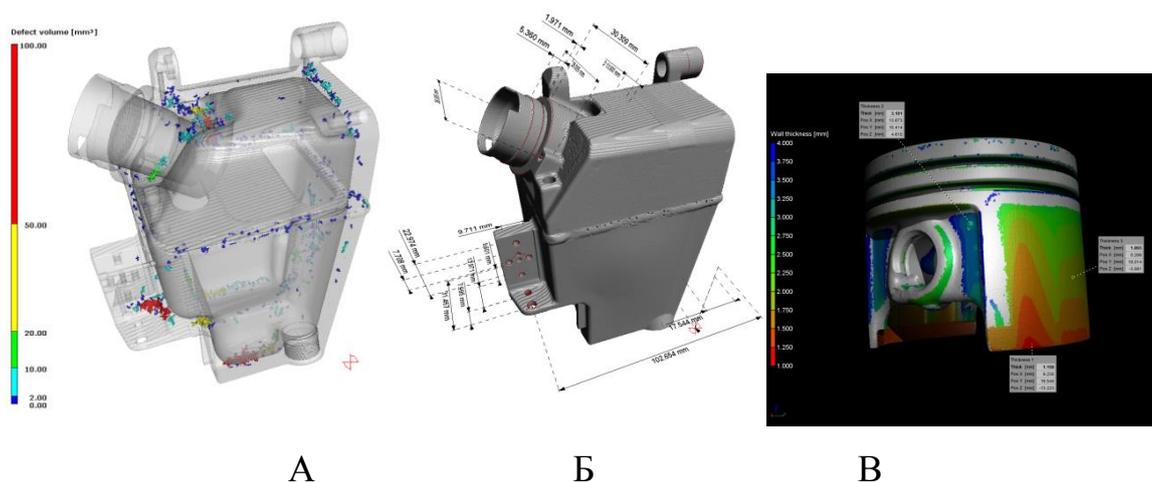


Рис. 18. Анализ изделия методом ВРТ

А – анализ дефектов структуры, Б – получение геометрических размеров, В – определение отклонений геометрии по сравнению с CAD моделью [72]

Термин «структурная плотность» рассматривается в [91] как плотность материала без пор, в тоже время в [73] структурная плотность рассматривается как число структурных узлов в единице пространства кристаллической решетки. В данной работе термин структурная плотность будет характеризовать структуру материала с учетом внутренних дефектов различного уровня и локальных уплотнений материала. Структурная плотность в отличие от традиционного понимания плотности не связана с объемом материала, а характеризует распределение материала в сечении объекта контроля.

Преимуществом метода ВРТ является высокая чувствительность к внутренним дефектам различного рода, возможность исследовать объект с большим объемом материала, высокая разрешающая способность.

На основе рассмотрения данных методов наиболее предпочтительным для проведения анализа внутренней структуры является вычислительная рентгеновская томография, позволяющая с высокой точностью проводить анализ внутренней структуры изделия, получая при этом не только качественные, но и количественные результаты.

1.4. Выводы по Главе 1

Процедура проектирования конструкций из ПКМ носит итерационный характер, связанный с совместным определением прочностных характеристик, выбором конструктивно-технологических решений и компонентов итогового материала. Одновременно с этим для ПКМ характерно развитие внутренних повреждений структуры материала на различных этапах жизненного цикла. Их выявление требует большого объема затрат на проведение контроля и значительного количества испытаний на всех этапах разработки новой конструкции. Наиболее остро данная проблема проявляется при переходе к созданию из ПКМ особоответственных конструкций, к которым предъявляются повышенные

требования. В связи с этим возникает необходимость разрабатывать усовершенствованные методы контроля и испытаний изделий из ПКМ, обеспечивающие необходимый объем информации о эксплуатационных и прочностных характеристиках разрабатываемой конструкции на ранних этапах проектирования.

Наибольшее количество испытаний для подтверждения решений, влияющих на несущую способность, приходится на элементарные образцы. Полученная на данном этапе информация влияет на весь процесс разработки нового изделия и является основой для определения конструктивно-технологических параметров и прогнозирования несущей способности планера самолета, а также определения процедур технического обслуживания, влияющих на экономическую эффективность самолета в целом. Это определило выбор элементарных образцов в качестве объекта исследования в данной работе.

Среди существующих методов контроля внутренней структуры ПКМ можно отметить ультразвуковой контроль, конструкционный и метод вычислительной рентгеновской томографии. Анализ, с учетом выбранных качественных критериев, позволил выделить в качестве базового метода для начальных этапов проектирования и оценки конструктивно-технологических решений метод вычислительной рентгеновской томографии, позволяющий исследовать внутреннюю структуру авиационной конструкции с использованием количественных критериев оценки структурной плотности материала, под которой, в данной работе, понимается структура материала с учетом внутренних дефектов различного уровня и локальных уплотнений материала в плоскости сканирования.

ГЛАВА 2. ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ КРИТЕРИЕВ ОЦЕНКИ

2.1. Типовые методы исследования композиционных материалов методом ВРТ

В работах Вайнберга Э.И. [57, 58], Ларина А.А. [80, 81], Makeev A. [31,25], Richard H. [10] и др. рассматривается подход к исследованию композиционного материала на основе анализа томограммы, как качественного изображения, позволяющего проводить геометрическое измерение дефекта. Для этих работ характерно исследование внутренней структуры путем измерения локальных дефектов и оценка фактического состояния материала.

На основе анализа открытых данных 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-элементарных моделей и их дополнение информацией о внутренних дефектах.

Прямое применение томографии позволяет проводить исследования внутренней структуры и оценивать фактическое состояние материала [30, 10]. Основное приложение — это измерение локальных дефектов внутренней структуры и оценка разброса плотности по визуальным (графическим) изображениям. В качестве результирующей информации выступает томограмма внутренней структуры изделия (в виде трехмерной модели или набора плоских сечений).

В работе [10] приведены результаты анализа высокосортных ударов по образцам из ПАН волокна. Удар проводился стальным шариком двумя скоростями 194 м/с и 354 м/с. После воздействия проводилось сканирование повреждённого материала на базе 35 мм и проведен послойный анализ

разрушения в случае высокоскоростного удара. Выходные томограммы приставлены на рисунках 19-20.

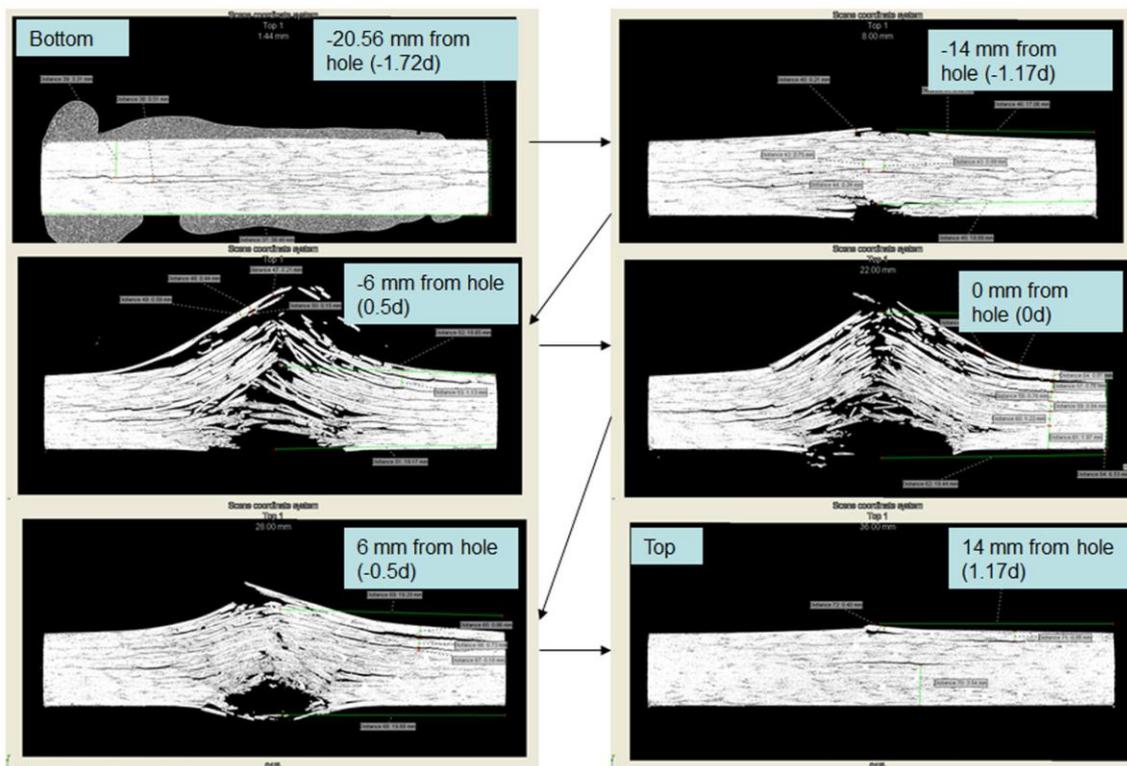


Рис.19. Томограммы композиционного материала после удара со скоростью 194 м/с

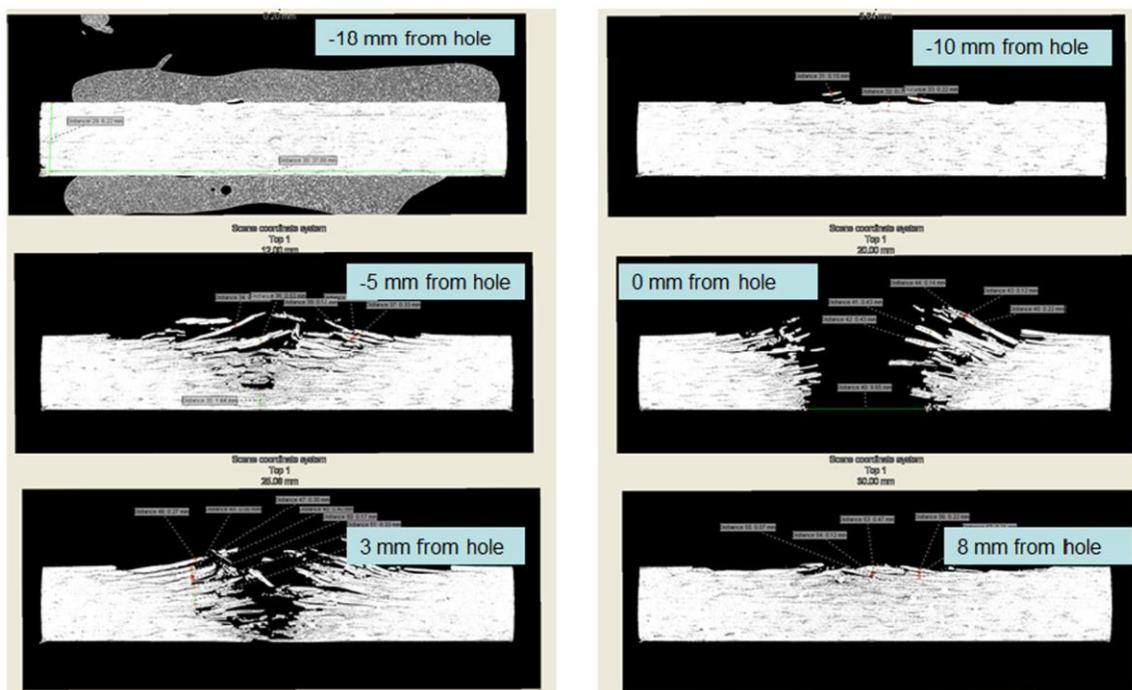


Рис.20. Томограммы композиционного материала после удара со скоростью 354 м/с

В работе [4] приведены результаты совместного применения системы корреляции цифровых изображений и метода ВРТ при анализе композиционного материала под нагрузкой. При этом проводилась совместная верификация метода корреляции цифровых изображений и расчетов конечно-элементарной модели. Силовое воздействие создавалось трёхточечным изгибом с возможным перемещением до 50 мм и максимальной нагрузкой до 6 кН. Измерение перемещений методом ВРТ проводилось по частицам меди внесенным в образец. На рисунке 21 представлена выходное трехмерное изображение контролируемого образца, полученное методом ВРТ.

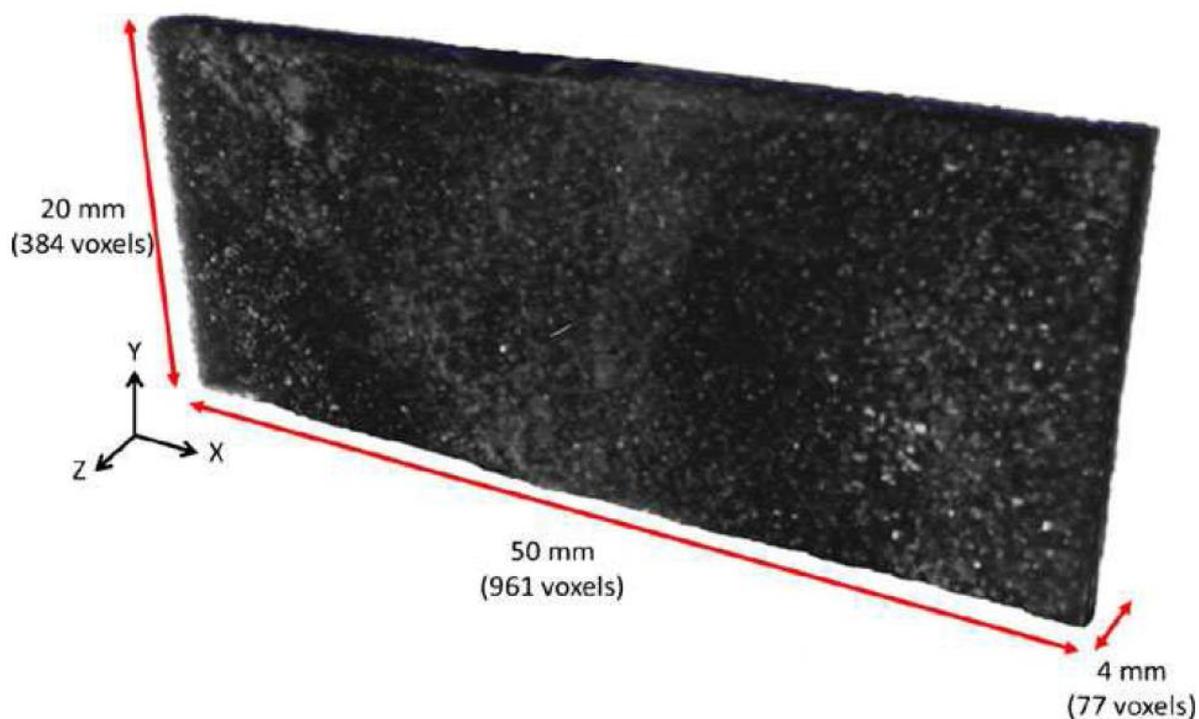


Рис. 21. Трехмерная томограмма исследуемого образца с медными частицами

В работах [31, 25] метод ВРТ применяется для поиска и измерения расслоений при силовом воздействии на композиционный образец с заложенным дефектом. На томограммах проводится измерение пористости

внутри образца и дефектов, возникающих при проведении испытания. Обнаруженные дефекты использовались для корректировки расчетной конечно-элементной модели и оценки влияния обнаруженных дефектов на ресурсные характеристики исследуемого образца. На рисунке 22 представлены расслоения, образовавшиеся после силового воздействия, и трехмерная модель для конечно-элементного анализа (рис. 23.). В данном случае проводится оценка развития конкретного дефекта с анализом его геометрических параметров.

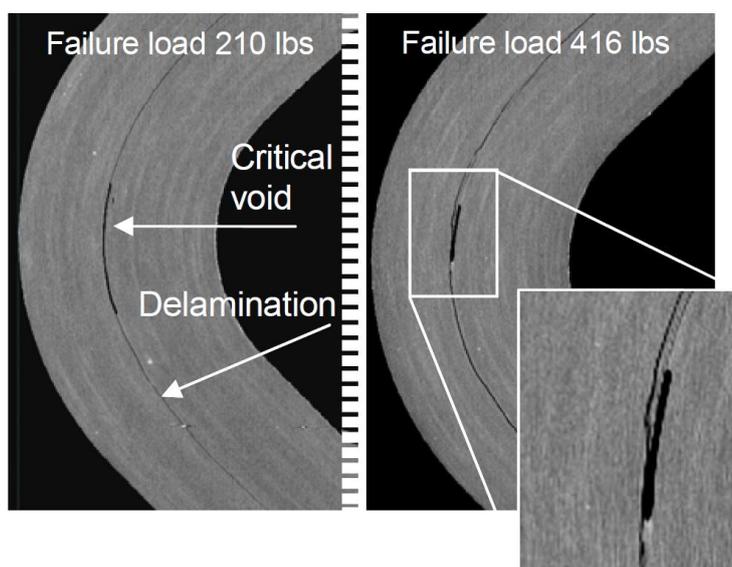


Рис. 22. Томограммы исследуемого образца

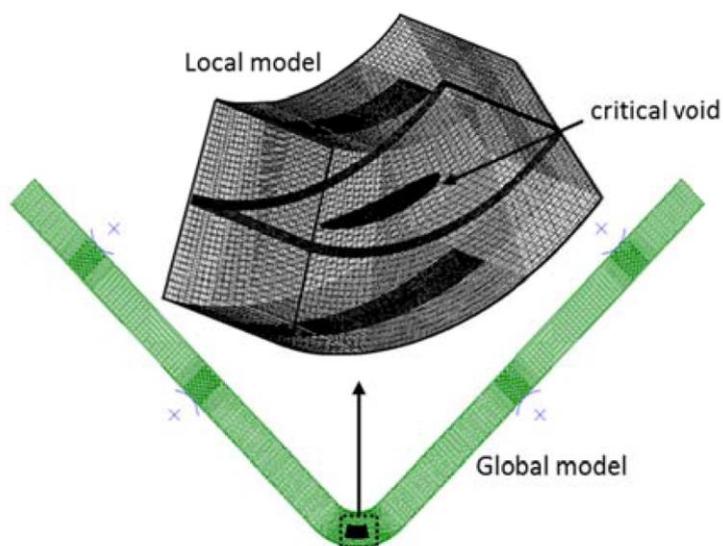


Рис. 23. Трехмерная модель исследуемой зоны

2.2. Контролируемые критерии и их взаимосвязь со структурными изменениями в ПКМ

2.2.1. Процедура обработки сигнала при использовании ВРТ

Описание принципа работы рентгеновского томографа представлена в Главе 1. В данной работе применяется томограф ВТ-600ХА, разработанный фирмой ООО «Промышленная интроскопия». Математический аппарат, применяемый в данном приборе, изложен в [78, 56], ниже приведены основные соотношения, раскрывающие порядок обработки информации и определяющие точность проведения расчета значений ЛКО. Математический аппарат заложен в блоке сбора и обработки информации томографа.

Основное функциональное назначение системы сбора проекционных данных томографа сводится к сбору совокупности экспериментальных данных, необходимых для оценки проекций $p(m\Delta r, n\Delta\varphi)$ (рис.24), и передаче этих данных в вычислительный комплекс, где Δr и $\Delta\varphi$ – линейный и угловой интервалы дискретизации пространства проекций.

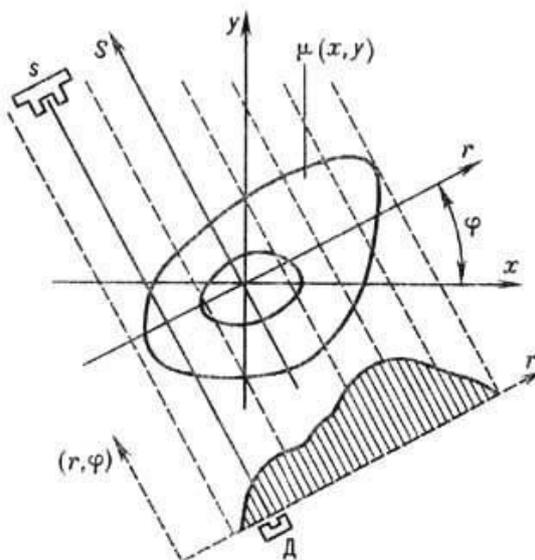


Рис. 24 Система координат реконструкции двумерного распределения ЛКО

Основой математического описания процесса сбора проекционных данных является уравнение интенсивности рентгеновского излучения (формула (1)) между источником (точка А) и приемником (точка В) представляется в виде:

$$I(B) = I_0(B) \exp \left[- \int_A^B \mu(x, y, z) dl \right] \quad (1)$$

где $\mu(x, y, z)$ – ограничение по распределению ЛКО вдоль объекта, а $I_0(B)$ – интенсивность излучения без объекта контроля, измеренная детектором.

В приближении экспоненциального закона ослабления моноэнергетического коллимированного рентгеновского излучения материалом объекта контроля величины интегральных линейных проекций линейного коэффициента ослабления $p(r, \varphi)$ оцениваются по измеряемым значениям интенсивности излучения:

$$\ln [I_0(r, \varphi) / I(r, \varphi)] = p(r, \varphi) = \iint \mu(x, y) a(r - x \cos \varphi - y \sin \varphi) dx dy . \quad (2)$$

Здесь $I_0(r, \varphi)$ и $I(r, \varphi)$ – интенсивности прошедшего излучения, измеренные детекторами в отсутствие и при наличии объекта контроля; $a(r)$ – проецирующая функция, пространственный спектр которой вследствие конечных размеров фокусного пятна рентгеновского источника, конечной апертуры детекторов и других факторов достаточно быстро убывает в области высоких пространственных частот, а r и φ в системе координат томограммы (рис. 25) задают пространственное положение проецирующей прямой, уравнение которой может быть записано в виде:

$$r = x \cos \varphi + y \sin \varphi \quad (3)$$

Так как при расчете ЛКО производится измерение прошедшего излучения по поглощению внутри объекта контроля, выходные данные напрямую зависят от плотности объекта контроля, что позволяет использовать выходную информация для контроля геометрической

структуры и формировать распределение плотности в зависимости от структуры материала.

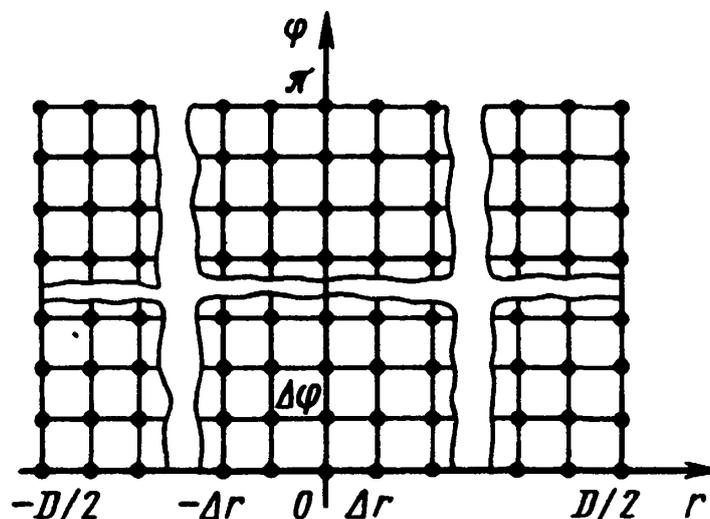


Рис. 25 Система координат реконструированной томограммы при параллельном просвечивании

При ряде упрощающих допущений, связанных с физическим процессом сбора данных об объекте контроля, математическая задача реконструкции томограммы сводится к решению интегрального уравнения (2) с восстановлением ограниченного по протяженности распределения $\mu(x,y)$ по экспериментально оцененным линейным проекциям $p(r, \varphi)$, которые описывают лучевые суммы при просвечивании объекта. Уравнение (2) представляет дискретную реконструкцию более обобщенного решения, что позволяет решать двумерную задачу реконструкции.

На практике используются дискретные отсчеты проекций через равные интервалы координат $p(m\Delta r, n\Delta\varphi)$ (формула (4)). Например, в томографе ВТ-600ХА, для формата томограмм 1024x1024, число используемых отсчетов в каждой проекции лежит в интервале от 1200 до 6000, а число ракурсов просвечивания равно 480 (в угловом интервале 180°) или 960 (в угловом интервале 360°). Аналогичным образом конечно и число рассчитываемых

элементов цифровой томограммы $\mu(mx\Delta l, my\Delta l)$. В томографе ВТ-600ХА рассчитываемая томограмма содержит от 1024×1024 до 2048×2048 элементов.

Искомое распределение $\mu(x,y)$ восстанавливается с использованием алгоритма обратного проецирования с фильтрацией свертки, которому свойственны точность и быстрота обработки данных и который сводится к двум преобразованиям:

- Одномерная свертка

$$\hat{p}(r, \varphi) = \int_{-\infty}^{+\infty} p(\xi, \varphi) h(r - \xi) d\xi; \quad (4)$$

- Обратное суммирование и проецирование фильтрованных проекций, которое формирует итоговое распределение

$$\hat{\mu}(x, y) = \int_0^{\pi} \hat{p}(x \cos \varphi + y \sin \varphi, \varphi) d\varphi \quad (5)$$

В дальнейшем вводится ограничение пространственного спектра, которое позволяет перейти от непрерывных преобразований (4) и (5) к дискретному, позволяющему ограничить объем вычислений и сформировать квадратную решетку дискретных значений при $x=m_x\Delta l$ и $y=m_y\Delta l$, а соотношения (4) и (5) привести к конечным суммам:

$$\hat{p}(m\Delta r, n\Delta\varphi) = \Delta r \sum_{q=0}^{N-1} p(q\Delta r, n\Delta\varphi) h((m-q)\Delta r) \quad (6)$$

$$\hat{\mu}(m_x\Delta l, m_y\Delta l) = \Delta\varphi \sum_{n=0}^{M-1} \hat{p}(m_x\Delta l \cos n\Delta\varphi + m_y\Delta l \sin n\Delta\varphi, n\Delta\varphi) \quad (7)$$

где N – число эквидистантных отсчетов в каждой угловой проекции контролируемого сечения, Δl – интервал дискретизации, M – число угловых проекций.

За счет наличия предварительной фильтрации исходных проекций $p(r, \varphi)$, достигается высокая точность качества реконструкции с помощью

рассматриваемого алгоритма. В дальнейшем проводятся дополнительные фильтрации, зависящие от конкретного типа и построения оборудования, позволяющие минимизировать влияние немонотонности и искажений в зависимости от диаметра контроля, погрешности задания геометрии проекций и т.д.

2.2.2. Элементы теории математической статистики для обработки экспериментальных результатов

В соответствии с приведенным выше алгоритмом обработки данных при томографическом контроле выходная информация представляет собой цифровой массив данных. При получении плоских проекций данный массив характеризует структурную плотность материала в каждом сечении, что позволяет совместить процесс анализа линейного коэффициента ослабления и анализа структурной плотности материала.

Для анализа этого массива рационально использовать методы статистической обработки данных в каждом выбранном сечении. Такой подход имеет несколько стадий:

- Получение исходной томограммы.
- Выделение информации, относящейся к исследуемому материалу.
- Определение закона распределения μ внутри объекта.
- Выделение параметров, характеризующих данное распределение.

В первом приближении считаем, что структурная плотность материала в конструкциях из ПКМ имеет нормальное распределение (рис. 26) во всех сечениях. Такой подход основывается на наличии в материале зон как с повышенной плотностью (локальное уплотнение слоев), так и дефектных зон.

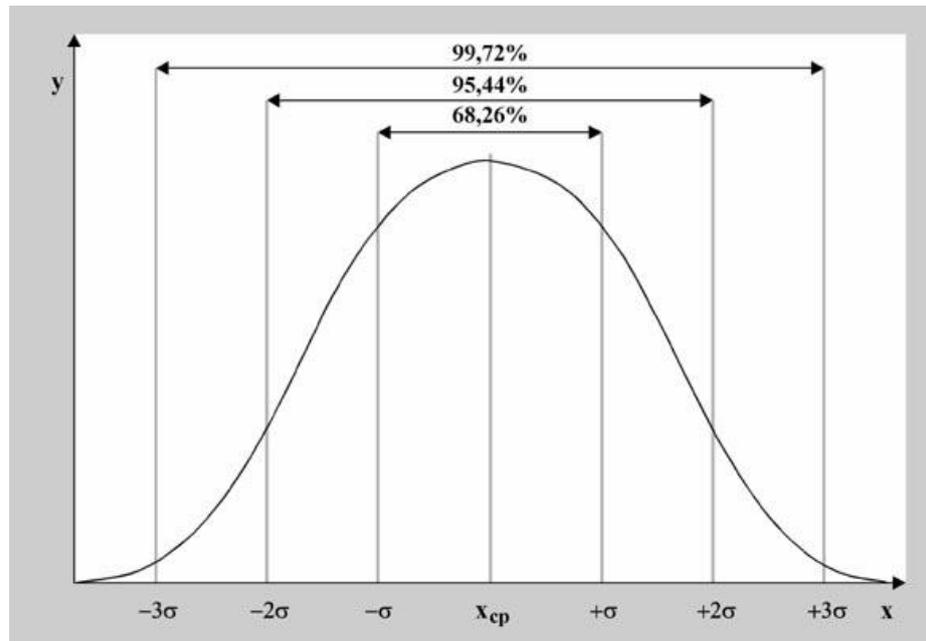


Рис.26. График плотности нормального распределения

Данное распределение характеризуется средним значением (формула 8) и среднеквадратичным отклонением (формула (9)), где n – число измерений [109, 62]. Среднеквадратичное отклонения показывает рассеивание значений исследуемой величины от ее среднего значения и для нормального распределения 99% всех значений принадлежат интервалу $(\bar{x} - 3\sigma; \bar{x} + 3\sigma)$. Для оценки относительного разброса измеренных значений от наиболее ожидаемого используется понятие вариация (формула (10)), которая показывает какую долю от среднего значения занимает среднеквадратичное отклонение этой величины. При достаточной выборке для нормального распределения $V < 33\%$.

$$\mu_c = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \mu_i, \quad (8)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \left(\sum_{i=1}^n \mu_i^2 - n(\mu_c)^2 \right)}, \quad (9)$$

$$V = \frac{S}{\bar{x}}, \quad \bar{x} \neq 0 \quad (10)$$

При значительном накоплении повреждений предпочтительно переходить на распределение Вейбулла [8], которое позволяет учитывать несимметричность распределения случайной величины относительно среднего значения.

2.2.3. Обоснование и взаимосвязь количественных критериев и структурной плотности материала

При анализе изделий с известной плотностью ЛКО может быть пересчитан в количественное значение плотности через переводной коэффициент (определение которого возможно с использованием образца свидетеля с известной плотностью, помещенным в зону сканирования), определяемый экспериментально для выбранных параметров сканирования. Это возможно, так как ЛКО прямо пропорционально плотности и атомному номеру материала объекта контроля.

Метод ВРТ имеет ряд характерных для него артефактов сканирования (рис. 27) – эффект «чашки», появляющийся при просвечивании большого объема или высокоплотного материала, и наличие краевого эффекта при переходе между разными материалами или средами. Наличие данного эффекта позволяет по раскрытию трещины анализировать ее глубину в плоскости сканирования. Другие артефакты сканирования связаны с неверно настроенными параметрами или недостаточностью энергии для получения качественного изображения. Наиболее явно артефакты, связанные с неверно настроенными параметрами, проявляются при просвечивании разнотолщинных объектов, которые в разных направлениях необходимы различные уровни энергии.

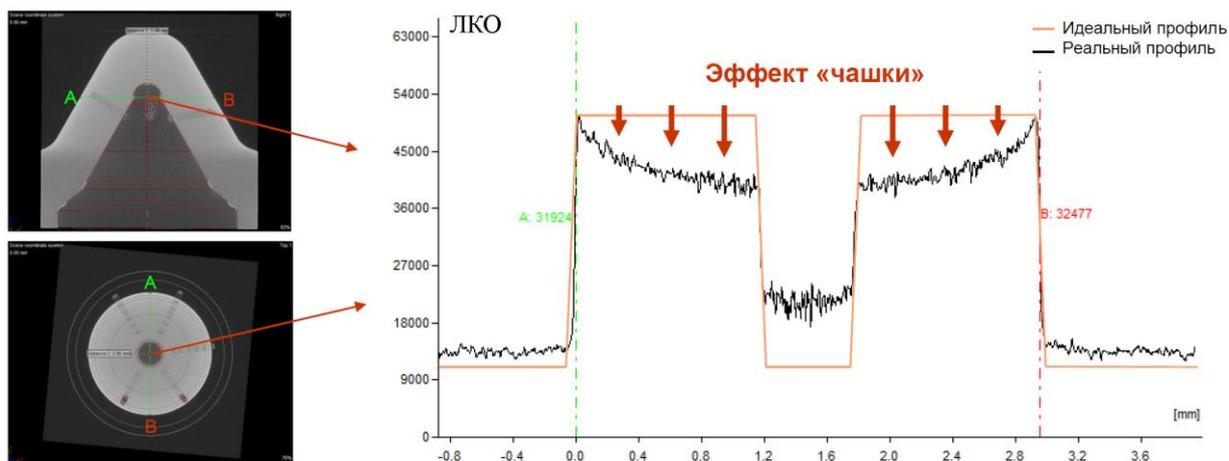


Рис.27. Артефакты, характерные для метода ВРТ

Оценка точности измерения плотностных характеристик была проверена на образцах представленных на рис. 28. Образцы цилиндрической формы с диаметром цилиндра 25 мм и высотой 80 мм изготовлены из пенополиуритана со средней плотностью 1,5-1,6 г/см³. Методом ВРТ плотность вычислялась на базе методики оценки по осредненным характеристикам (в сечениях, расположенных с шагом 5 мм друг от друга вычислялись средние значения ЛКО и вычислялось среднее по объему значение, которое через переводной коэффициент пересчитывалось в плотность через введенный в эксперимент образец-свидетель с заданной плотностью).

В табл. 2 представлены результаты измерения плотности методом ВРТ и их сравнение с радиометрическим методом, основанном на зависимости степени ослабления ионизирующего излучения, прошедшего через участок детали, от толщины и плотности изделия [62].

Отклонение значений, полученных через переводной коэффициент, составило всего $\pm 0,4\%$, что может быть связано с попаданием в зону сканирования локальных неплотностей, которые даже на равномерном материале образца могут дать локальные изменения значений ЛКО. При

радиометрическом методе локальные неплотности могут быть скрыты из-за осреднения значения поглощения по всей толщине исследуемого участка детали.

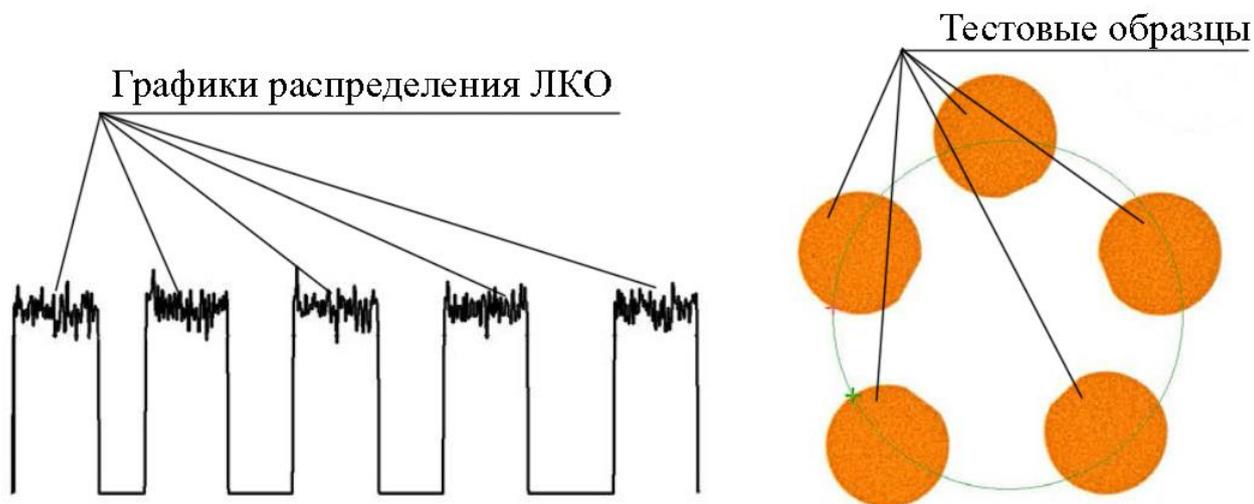


Рис. 28. Томограмма и график распределения ЛКО образцов, примененных для оценки точности определения плотностных характеристик

Таблица 2. Результаты измерения плотности двумя методами неразрушающего контроля

Номер образца	Плотность, определенная сторонним методом, г/см ³	Значение ЛКО, определённое методом ВРТ	Расчетное значение плотности, г/см ³	Отклонение, %
1	1,599	17932	1,603	0,25
2	1,592	17798	1,591	-0,06
3	1,594	17802	1,592	-0,12
4	1,593	17754	1,588	-0,31
5	1,599	17811	1,593	-0,37

Информация по распределению ЛКО внутри объекта позволяет вводить различные параметры, позволяющие качественно или количественно оценивать состояние структуры материала. Томографические параметры могут быть определены двумя основными способами:

1. Вдоль линии на томограмме с определением среднего значения ЛКО и вариацией ЛКО (рис. 29)

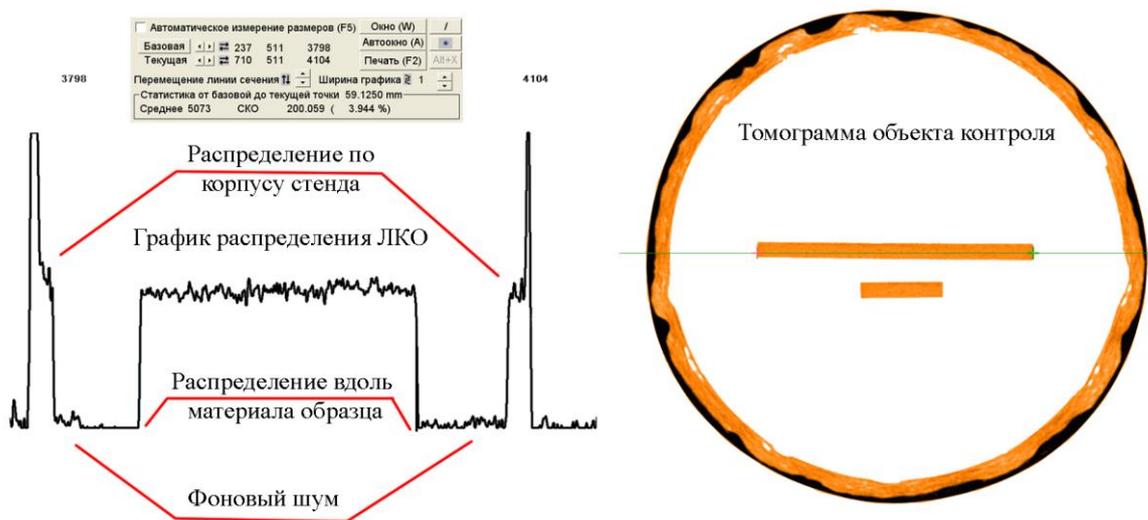


Рис. 29 Распределение ЛКО вдоль линии на томограмме [83]

2. В определённой зоне на томограмме изделия (рис. 30). В данном случае идет определение по 90-95% процентам площади объекта контроля.

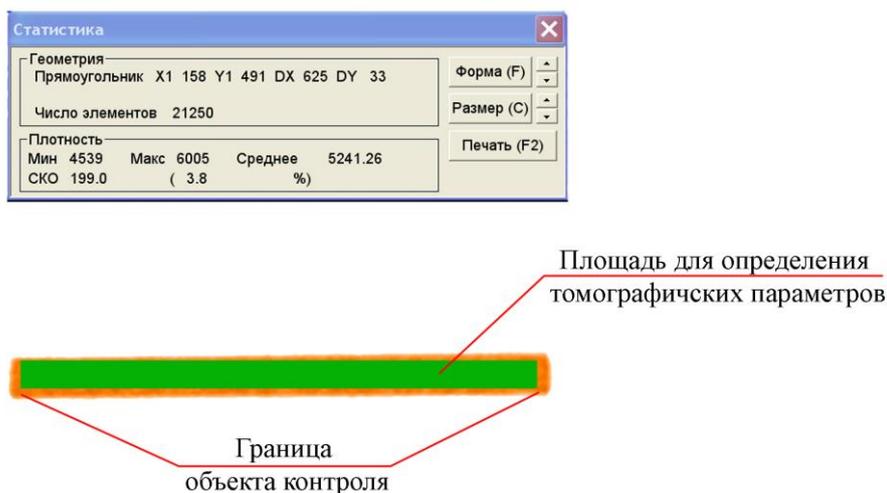


Рис. 30 Определение томографических параметров по выбранной зоне внутри образца

В данной работе используется второй подход, который позволяет получить значения ЛКО, однозначно описывающее структурную плотность ПКМ с учетом дефектов различного уровня. Его преимуществом является снижение влияния переходного участка между двумя средами со свойственными этому месту артефактами. На рис. 31 представлено типовое распределение плотности в ПКМ.

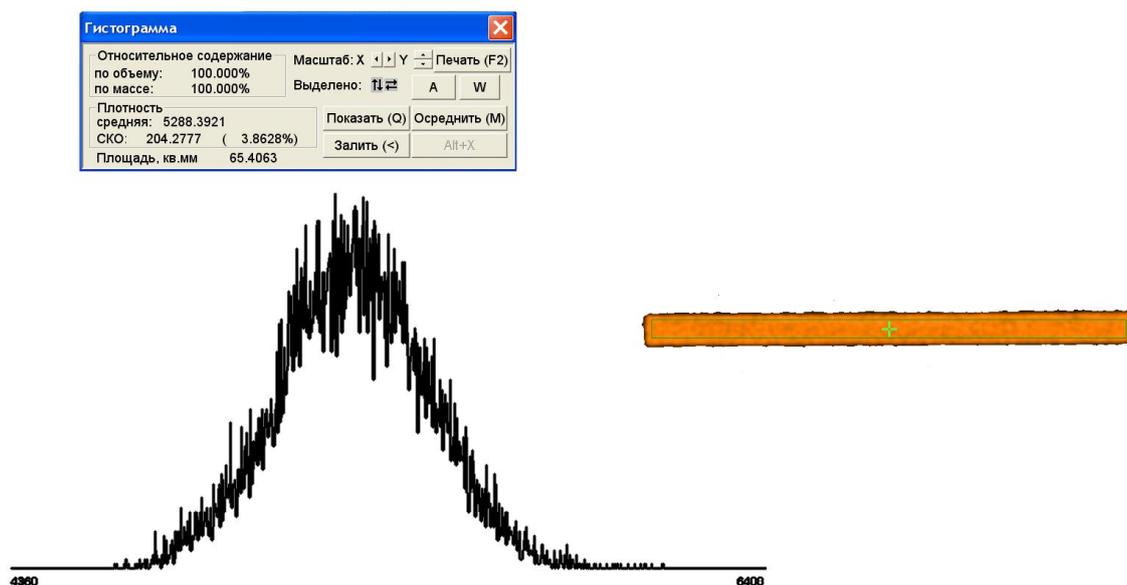


Рис. 31. Гистограмма ЛКО, снятая по области образца

Для анализа распределения плотности по выбранной зоне используются параметры математической статистики, описанные в разделе 2.2.2. К ним относятся:

1. Среднее значение линейного коэффициента ослабления (μ_c) – исходные данные, полученные методом ВРТ. Анализ среднего значения позволяет оценить структурную плотность внутри конкретного сечения с учетом всех дефектов в выделенной области и определить значение структурной плотности материала, которую можно пересчитать в объемную плотность по образцу свидетелю.

2. Минимальное значение ЛКО (μ_{min}) характеризует минимальное значение плотности внутри плотности. Данный параметр меняется в зависимости от роста дефекта. Это связано с наличием наклона графика распределения ЛКО при переходе между средами, что с одной стороны не позволяет точно определить размер дефекта без специального алгоритма обработки, с другой стороны позволяет по минимальному значению оценивать раскрытие дефекта, т.е. его рост в плоскости сканирования.
3. Максимальное значение ЛКО (μ_{max}) характеризует процессы уплотнения материала, которые влияют на среднюю структурную плотность материала в данном сечении.
4. Среднеквадратичное отклонение ЛКО (S) – параметр определяющий рыхлость материала и учитывающий уровень отклонений от среднего значения ЛКО и определяющий разнородность структуры материала.

Данные критерии в каждом слое оценивают распределение структурной плотности и позволяют оценить уровень дефектности структуры. После определения данных параметров для каждого плоского сечения, определяются их средние значения для конструкции, что позволяет оценить качество конструкции без привязки к конкретному сечению или дефекту.

Такой подход может рассматриваться как недостаточно точный в связи с наличием в конструкции локальных дефектов, которые будут влиять на распределение плотности (дефектности) и как следствие контролируемых критериев. Для оценки возможности исследования и анализа состояния материала по осредненным характеристикам, взятым по всей высоте изделия, была проведена оценка предложенных параметров в отдельных сечениях по сравнению со средним значением. Исходные данные были получены с учетом методики рассмотренной ниже.

Для оценки точности было проведено сканирование образцов из углепластика, полученные методом формования под двойным вакуумным пакетом, в 50 сечениях с шагом 3 мм, что позволило получить информацию по всей высоте рабочей зоны, составляющей 150 мм. Всего было получено шесть серий сечений – исходное состояние материала, при приложении нагрузки (5%, 10%, 20% и 40% от разрушающей нагрузки) и в разгруженном состоянии. В каждом сечении были определены предлагаемые критерии и рассчитано среднеквадратичное отклонение. Оценка проводилась по среднеквадратичной погрешности измерений, рассчитанной по формуле 9 и значению в процентах (\bar{S}) относительно среднего по формуле (11). В результате было получено значение отклонений, указанное в таблице 3. Графики распределения критериев оценки представлены на рисунке 32.

$$\bar{S} = \frac{S}{\bar{X}} \cdot 100\% . \quad (11)$$

На рисунке 33 представлено распределение ЛКО в отдельных сечениях, по которым видно значительное различие базовых сечений между собой (красным выделены зоны с пониженной плотностью, характеризующей наличие дефекта в структуре материала).

В результате анализа получено что значение отклонений по высоте при значительном количестве технологических дефектов и с учетом силового воздействия не превышает 1%, это позволяет однозначно говорить достаточно высокой точности для сравнение различных материалов по осредненным характеристикам по всему объему материала для образцов без концентраторов.

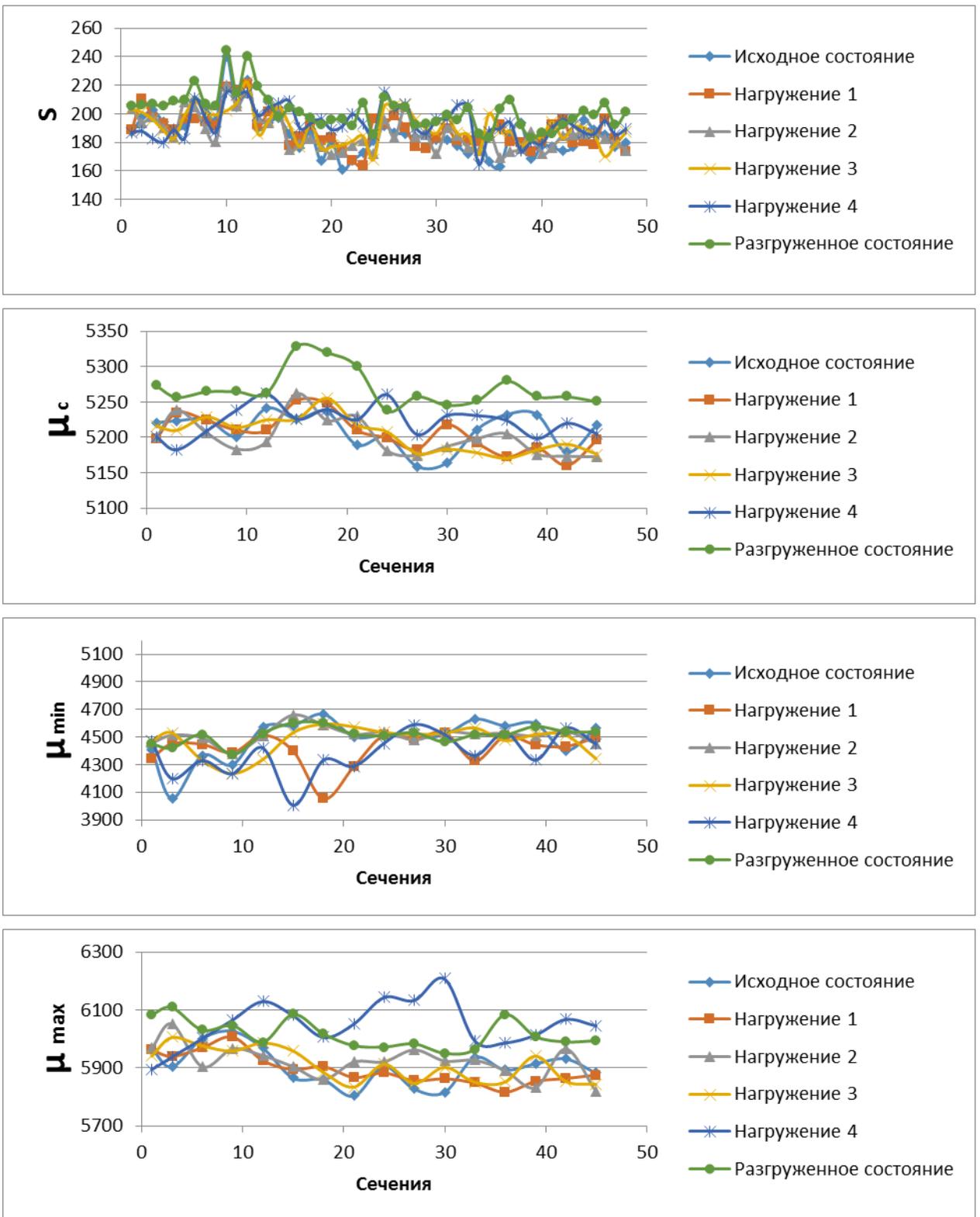


Рис. 32. Распределение критериев по сечениям

Таблица 3. Расчет отклонений по высоте.

Среднеквадратичное отклонение ЛКО S_{μ}						
	Базовое состояние	Нагружение 1	Нагружение 2	Нагружение 3	Нагружение 4	Разгруженное состояние
Среднее значение	186	188	186	191	194	202
Среднеквадратичная погрешность	2,15	1,79	1,75	1,65	1,63	1,82
Среднеквадратичная погрешность, %	1,15	0,95	0,94	0,86	0,84	0,90
Среднее значение линейного коэффициента ослабления μ_c						
Среднее значение	5209	5205	5200	5203	5222	5269
Среднеквадратичная погрешность	4,97	4,92	5,17	5,05	5,10	5,40
Среднеквадратичная погрешность, %	0,10	0,09	0,10	0,10	0,10	0,10
Максимальное значение ЛКО μ_{\max}						
Среднее значение	5905	5895	5923	5909	6048	6017
Среднеквадратичная погрешность	13,18	11,38	12,28	11,15	16,57	10,63
Среднеквадратичная погрешность, %	0,22	0,19	0,21	0,19	0,27	0,18
Минимальное значение ЛКО μ_{\min}						
Среднее значение	4483	4412	4514	4475	4380	4511
Среднеквадратичная погрешность	23,70	19,95	12,87	20,57	24,25	13,60
Среднеквадратичная погрешность, %	0,53	0,45	0,28	0,46	0,55	0,30

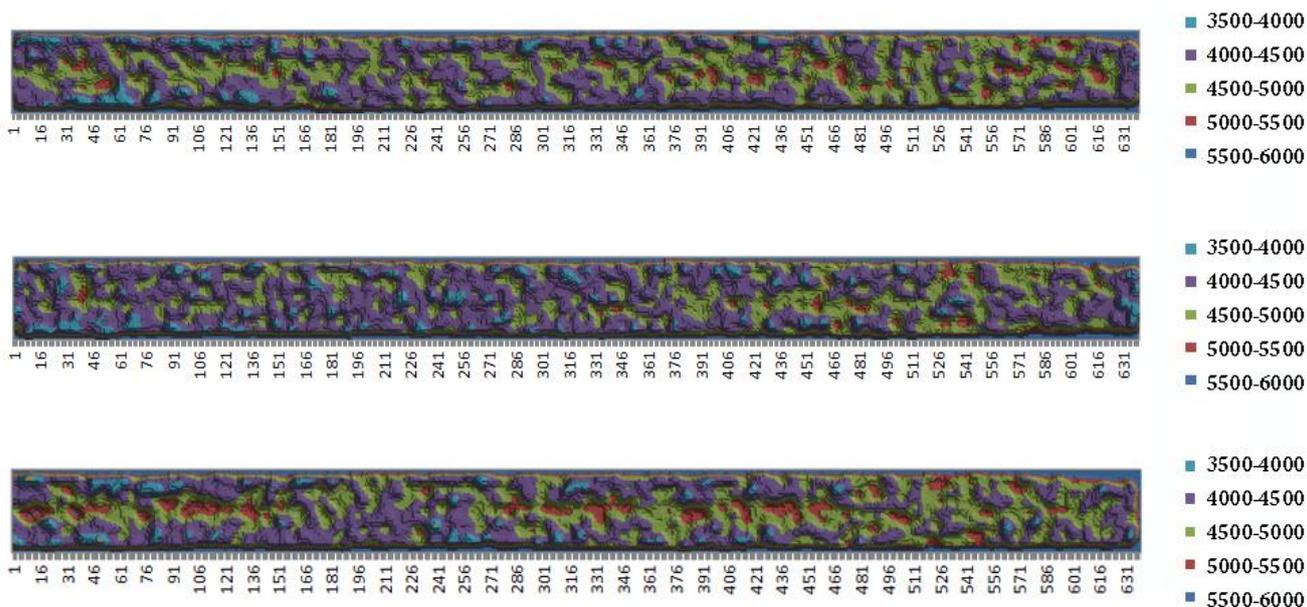


Рис. 33. Распределение ЛКО в отдельных сечениях

В дальнейшем в качестве контролируемых критериев принимаются осреднённые значения, которые рассчитываются как среднее по всем сечениям конструкции (формулы (12) - (15)). Исходя из расчета погрешности, приведенного выше в дальнейшем можно проводить сканирование по минимальному количеству сечений с увеличением количества сечений в местах концентраторов напряжений, где прогнозируется значительный рост дефектов.

$$S = \frac{\sum_{j=1}^n S_j}{n}; \quad (12)$$

$$\mu_c = \frac{\sum_{j=1}^n \mu_{c_j}}{n}; \quad (13)$$

$$\mu_{\min} = \frac{\sum_{j=1}^n \mu_{\min j}}{n} ; \quad (14)$$

$$\mu_{\max} = \frac{\sum_{j=1}^n \mu_{\max j}}{n} . \quad (15)$$

При проведении исследования с нагружением исходного материала или наличием других внешних воздействий результирующие значения рассчитываются относительно базового состояния материала или образца (формулы (16)-(19)), с которым проводится сравнение, где i – номер нагружения, а B – значение в базовом сечении.

$$\Delta S = \frac{S_i - S_B}{S_B} \cdot 100\% ; \quad (16)$$

$$\Delta \mu_C = \frac{\mu_{Ci} - \mu_{CB}}{\mu_{CB}} \cdot 100\% ; \quad (17)$$

$$\Delta \mu_{\max} = \frac{\mu_{\max i} - \mu_{\max B}}{\mu_{\max B}} \cdot 100\% ; \quad (18)$$

$$\Delta \mu_{\min} = \frac{\mu_{\min i} - \mu_{\min B}}{\mu_{\min B}} \cdot 100\% . \quad (19)$$

Данные критерии можно рассматривать в привязке к целевой функции проектирования, характеризующееся формулой (20). Которая описывает максимизацию функции проектирования, основной на прочностных параметрах и минимизации функции, характеризующей технологический

процесс изготовления, т.е. уровень внутренних дефектов, на фоне введенных критериев.

$$X = \max F(x; u; Y) \min G(f; r; Y) \quad (20)$$

где, x и f – функции целевых параметров:

$x = X(E, \sigma^+, \sigma^-, G, \tau, \mu)$ - функция отдельных прочностных характеристик (E – модуль упругости, σ^+ – напряжения при растяжении, σ^- – напряжения при сжатии, G – модуль сдвига, τ – касательные напряжения, μ – коэффициент Пуассона);

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

u и r – функции ограничений:

$u = U(U_1, U_2, U_3)$ (U_1 – стоимость конструкции, U_2 – внешние условия, U_3 – характеристики компонентов материала);

$r = R(R_1, R_2, R_3)$ (R_1 – технологические дефекты, R_2 – параметры технологического процесса, R_3 – стоимость оборудования).

Функция Y (формула (21)) в данном случае выступает критерием оценки структурной плотности и является дополнительным критерием оценки целевой функции.

$$Y = f(\rho) = F(\mu_c, S, \mu_{\min}, \mu_{\max}). \quad (21)$$

Для материала с хрупким разрушением поведение параметров данной функции представлено в формуле 22 и характеризуется их незначительным изменением (в пределах погрешности). Для материалов с накоплением повреждений – критерии меняются в соответствии с формулой 23.

$$Y(P) = \begin{pmatrix} \Delta\mu_C = const \\ \Delta S = const \\ \Delta\mu_{\min} = const \\ \Delta\mu_{\max} = const \end{pmatrix}; \quad (22)$$

$$Y(P) = \begin{pmatrix} \Delta\mu_C \rightarrow \min \\ \Delta S \rightarrow \max \\ \Delta\mu_{\min} \rightarrow \min \\ \Delta\mu_{\max} \rightarrow \min \end{pmatrix}. \quad (23)$$

2.3. Выводы по Главе 2

При получении плоских сечений методом ВРТ выходными данными является массив значений линейного коэффициента ослабления, характеризующего структурную плотность материала, определяемую как плотность в заданной плоскости. В первом приближении принимается, что значения ЛКО представляются в виде нормального распределения, которое характеризуется средним значением μ_C и среднеквадратичным отклонением μ . В дополнение к критериям, принятым в математической статистике, для оценки материала определяются минимальное и максимальное значение ЛКО, которые в комплексе полностью описывает график распределения по выбранной зоне.

Приведена оценка точности определения плотности материала по данным метода ВРТ по сравнению с радиографическим методом, при этом расхождение значений составило $\pm 0,4\%$, что может объясняться в том числе учетом отдельных неоднородностей в структуре материала.

При переходе от анализа конкретного сечения к анализу осредненных характеристик по всему объему материала получена погрешность измерений менее 1%, что показывает высокую точность такого подхода, несмотря на

наличие явных различий между отдельными сечениями по характеру и уровню дефектов. При приложении к исходной конструкции различных воздействий, предложен переход от рассмотрения осредненных значений контролируемых критериев, к анализу их приращений, что позволяет по относительным величинам проводить сравнение структурной плотности конструкции с различными конструктивно-технологическими решениями.

ГЛАВА 3. ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

3.1. Основные положения, лежащие в основе предлагаемой методики

Методика строится на предположении, что конструкция из ПКМ в процессе внешнего воздействия накапливает дефекты, что влияет на распределение структурной плотности внутри образца. Данные изменения в свою очередь фиксируются на основе метода ВРТ, определенного в качестве базового в первой главе.

В работе [60] предлагается процесс разрушения композиционного материала, представленный на рис. 34. При таком подходе предполагается что в исходном материале имеются начальные дефекты, а после приложения нагрузки начинаются процессы либо хрупкого разрушения, либо накопления повреждений. Во втором случае возможно накопление критического уровня дефектов в материале или развитие конгломерата повреждений в окрестности нескольких дефектов, которые приведут к развитию макродефекта в конструкции. Так же процесс накопления может спровоцировать рост магистральной трещины.

В работе [112] исследуют кинетику разрушения методом акустической эмиссии. При проведении механических испытаний проводилась регистрация сигналов акустической эмиссии (амплитуды и энергетического параметра сигнала) и строились графики зависимости параметров акустической эмиссии от перемещения, по которым делалось заключение об этапах разрушения материала.

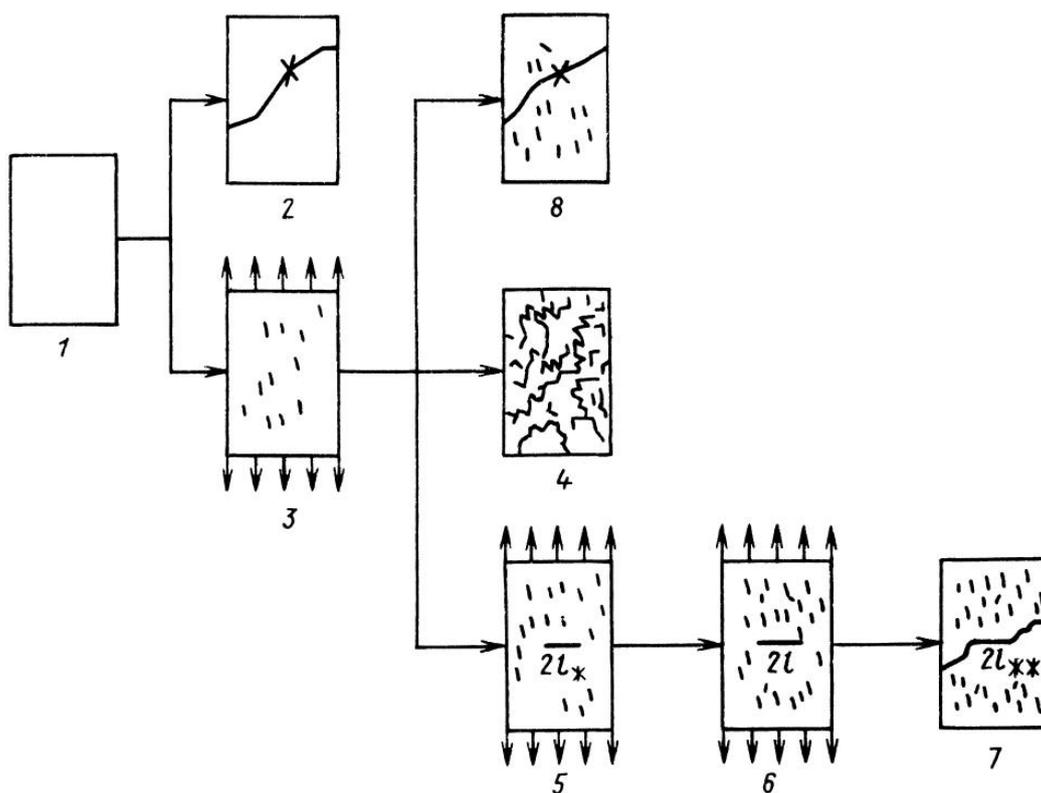


Рис. 34. Схема этапов разрушения композитов:

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

На рис. 35 и 36 представлены результаты испытаний на растяжение и сжатие двух материалов из углепластиков, по которым авторы сделали заключение о наличии трех этапов разрушения в материале – на первом этапе развитие дефектов отсутствует, на втором происходит накопление повреждений, в том числе косвенно предполагалось разрушение отдельных волокон и разрыве адгезионных связей, на третьем этапе предполагается развитие лавинообразного накопления повреждений и рост магистральной трещины.

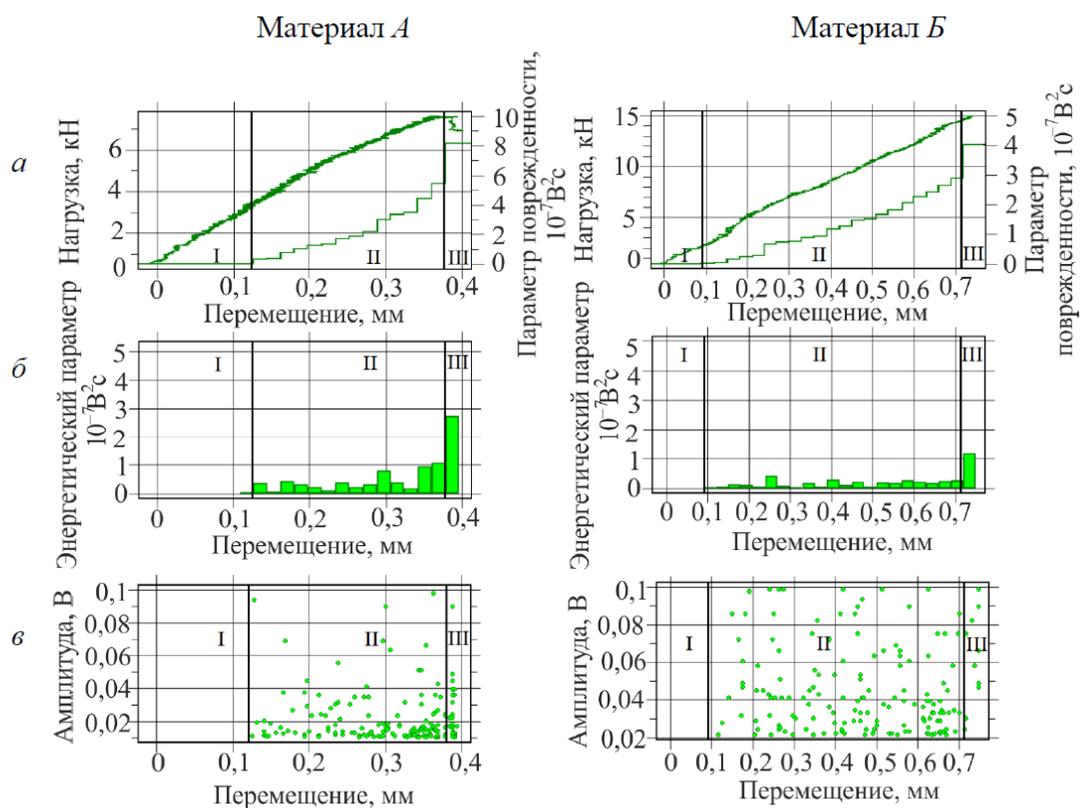


Рис. 35. Результаты испытаний образцов на растяжение с фиксацией сигналов акустической эмиссии

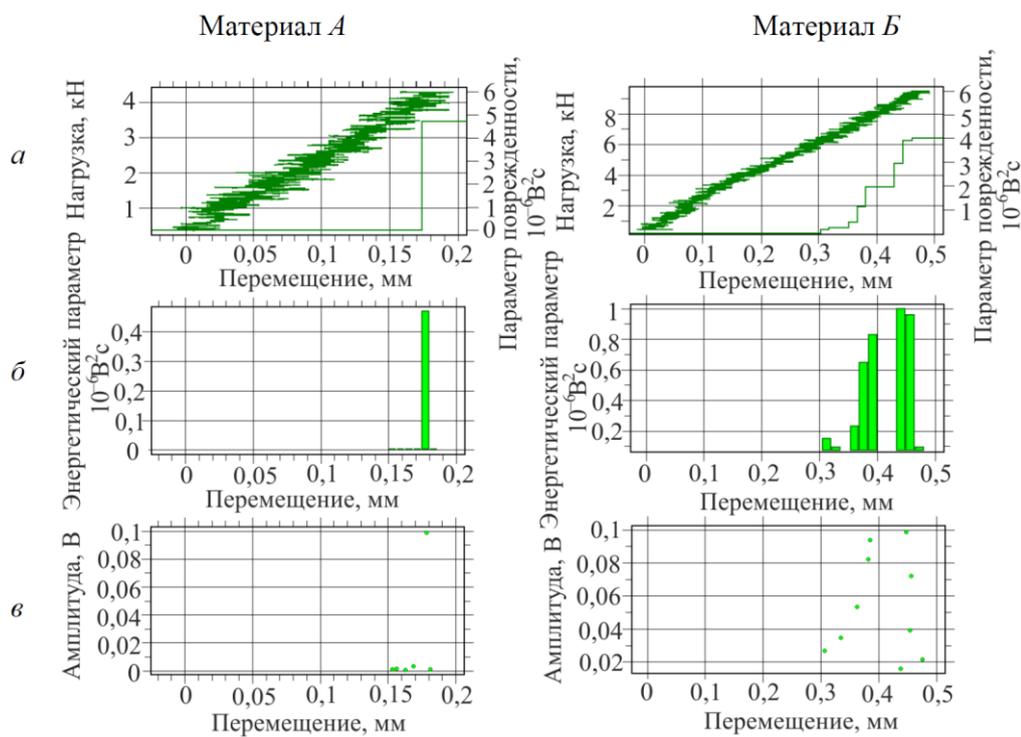


Рис. 36. Результаты испытаний образцов на сжатие с фиксацией сигналов акустической эмиссии

Аналогичные процессы разрушения предполагаются в других работах по исследованию механики разрушения, в которых вводится критерий начала развития повреждения и рассматривается поэтапное разрушение отдельных элементов материала конструкции [94]. Основные положения механики и прочностного расчета ПКМ изложены в работах Бартенева Г.М.[53], Васильева В.В.[59], Дудченко А.А.[72], Лурье С.А.[71, 44], Михайлина Ю.А.[83], Победри Б.Е.[94, 93] и др.

Одним из наиболее распространенных методов моделирования процессов разрушения является метод конечного элемента (КЭ) [55, 3, 11, 41], особенно для нерегулярных мест конструкций. Одной из проблем при построении конечно-элементной модели является учет первоначальных (технологических) дефектов и определение критериев разрушения первого слоя. На рис. 37 представлена типовая методика анализа прогрессирующего разрушения.

Критерии отказов условно можно разделить на три группы [13]:

- Предельные критерии разрушения – производится прогнозирование разрушающей нагрузки и моды, путем сравнения компонентов напряжений σ_{11} , σ_{22} , σ_{33} или деформаций ϵ_{11} , ϵ_{22} , ϵ_{33} . Недостатком данных критериев является отсутствие взаимодействия между различными тензорами напряжений, несмотря на это они являются наиболее распространенными методами (рис. 38) применяемыми на сегодняшний день, т.к. они просты для понимания и легко встраиваются в процедуру анализа материала.



Рис. 37. Метод анализа прогрессирующего разрушения

Критерий максимальных напряжений [96]:

$$\frac{\sigma_{11}}{X} = 1$$

- разрушение волокна;

$$\frac{\sigma_{22}}{Y} = 1$$

- поперечное разрушение матрицы;

$$\frac{\tau_{12}}{S} = 1$$

- сдвиговое разрушение матрицы.

Критерии максимальных деформаций:

$$\frac{\varepsilon_{11}}{X_\varepsilon} = 1 \quad - \text{разрушение волокна};$$

$$\frac{\varepsilon_{22}}{Y_\varepsilon} = 1 \quad - \text{поперечное разрушение матрицы};$$

$$\frac{\gamma_{12}}{S_\varepsilon} = 1 \quad - \text{сдвиговое разрушение матрицы}.$$

где X, Y, S – предельные напряжения по волокну и связующему для растяжения, сжатия или сдвига.

- Интерактивные критерии [19] – критерии прогнозирования разрушения на основе полиномиального уравнения с учетом всех компонентов напряжений

Критерий Хилла-Цая:

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{22}}{Y}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_{11}}{X}\right)\left(\frac{\sigma_{22}}{X}\right) + \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 = 1$$

- Критерии отдельно рассматривающие разрушение волокна и матрицы, при этом уравнения могут зависеть от одного или нескольких составляющих напряжений.

Критерий Хашина [18]:

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 = 1 \quad - \text{разрушение волокна (растяжение)};$$

$$\frac{\sigma_{11}}{X'} = 1 \quad - \text{разрушение волокна (сжатие)};$$

$$\left(\frac{\sigma_{22}}{Y}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 = 1 \quad - \text{разрушение матрицы}.$$

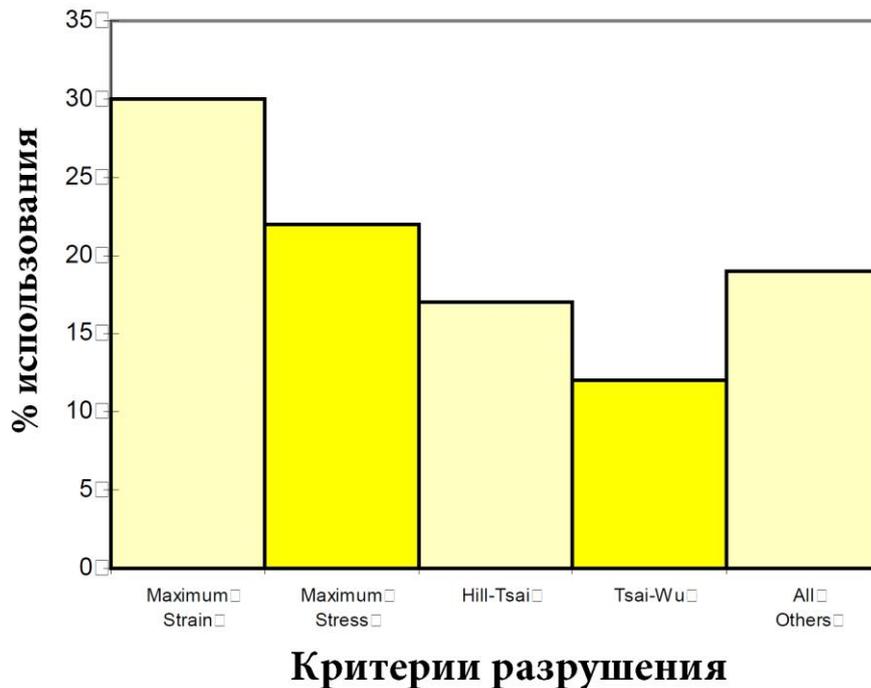


Рис. 38. Использование критериев разрушения в статьях AIAA[96]

Методы определения деградации свойств основываются на механизмах, аналогичных описанным в работе [112] и включает в себя три типа – мгновенная, постепенная деградация и деградация на основе переменных состояния (до некоторого конечного уровня), при этом модель постепенной деградации строится на основе экспериментальных данных. Все эти модели заключаются в постепенном выводе из работы отдельных связей в материале, определяемых адгезией между отдельными элементами или разрушением отдельных элементов [5, 23, 7].

Методология определения прогрессирующего разрушения в зависимости от действия внешних факторов на КМ предлагается формировать по следующему плану:

- Рассмотрение результатов тестов для однонаправленных слоёв при воздействии внешних факторов.

- Рассмотрение результатов тестов для стандартных укладок (однонаправленная, квазиизотропная, сдвиговая) при воздействии внешних факторов.
- Вычленение зависимостей деградации свойств при переходе от слоёв к многослойной пластине.

Алгоритмы анализа прогрессирующего развития разрушения включают в себя 4 стадии:

- 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 [32].

Для повышения точности данного сравнения необходимо проведение томографии непосредственно под силовым воздействием. Для проведения сравнения результатов можно использовать следующие подходы:

- Построение плоской картины распределения дефектов:

В данном случае производится осреднение каждого столбца значений ЛКО на плоскость и вывод изображения с распределением осредненных данных в точке. Закрашивание производится исходя из присвоения каждому коридору значений определенной цветовой гаммы. Между сечениями проводится линейная интерполяция с добавлением 3 промежуточных точек (рис. 39)

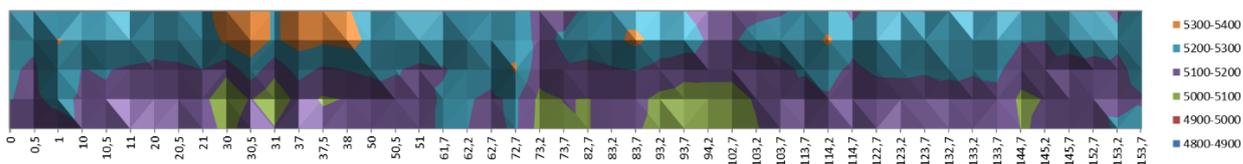


Рис. 39. Плоское представление распределения дефектов в образце

- Построение объемной картины распределения дефектов.

Проводится на основе послойного анализа графика распределения ЛКО и построение диаграмм распределения дефектов вдоль монослоя [48].

- Проведение анализа по осреднённым характеристикам, которое может позволить ввести поправочные коэффициенты в зависимости от конструктивно-технологических параметров и учесть накопление повреждений.

3.2. Описание специального стенда для проведения исследования

Экспериментальные исследования проводились на вычислительном томографе ВТ-600ХА производства фирмы ООО "Промышленная интроскопия".

Процесс исследования структуры материала с применением ВРТ состоит из следующих основных этапов:

- выбор режимов сканирования для исследуемых образцов и определение сетки сечений сканирования (выбор сечений может проводиться как вручную, так и по рентгеновскому изображению контролируемого изделия);
- сканирование выбранных сечений и измерение линейного коэффициента ослабления рентгеновского излучения;
- реконструкция полученных результатов сканирования, определение соотношения низко- и высокочастотных данных, получение диаграмм

распределения коэффициента ослабления и геометрических параметров сечений:

- обработка полученных данных реконструкции сечений при помощи выбранных критериев;

- построение визуальной картины, отображающей состояние структуры исследуемого образца по нагрузке и/или габаритным размерам.

При построении методики приняты следующие допущения:

- При проведении сканирования образца под нагрузкой считается что нагрузка не меняется. Минимизация этого эффекта достигается конструктивным исполнением 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.

На рисунке 40 представлена схема расположения стендового приспособления на рабочем столе томографа. Для снижения влияния нагрузателя на результаты исследования в зоне сканирования располагается только элемент корпуса и исследуемый элемент конструкции, все остальные элементы стенда должны быть вынесены за пределы рабочей зоны, сам корпус должен иметь круглую форму, что связано с процессом получения информации при сканировании методом ВРТ,

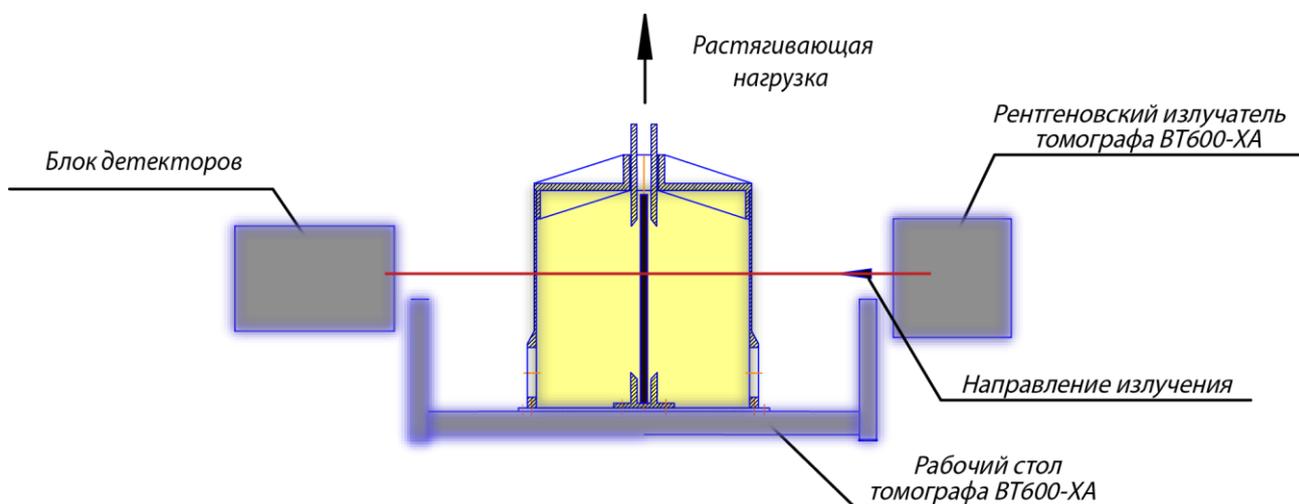


Рис. 40. Расположение исследовательского стенда на рабочем столе томографа

Разработанный стенд служит для создания одноосной растягивающей силы на контролируемый образец с одновременным проведением неразрушающего контроля методом ВРТ. Формирование конструкции и функционала стенда основывалось на следующих принципах, определенных на основе анализа приведенного выше:

- Конструкция должна создавать и фиксировать определенный уровень нагрузки на протяжении длительного времени.
- Элементы стенда должны обеспечивать возможность определения приложенной нагрузки и деформации исследуемого образца.
- Рабочая зона должна составлять не менее 100 мм.
- Стенд не должен создавать дополнительные артефакты сканирования.
- Изменение параметров сканирования после включения в схему сканирования стендового приспособления должны быть минимальными.
- Стенд должен надежно фиксировать образец в процессе испытания, компенсировать возможную не параллельность 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 стенда или томографа)

Общий вид стенда представлен на рисунке 41. 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.

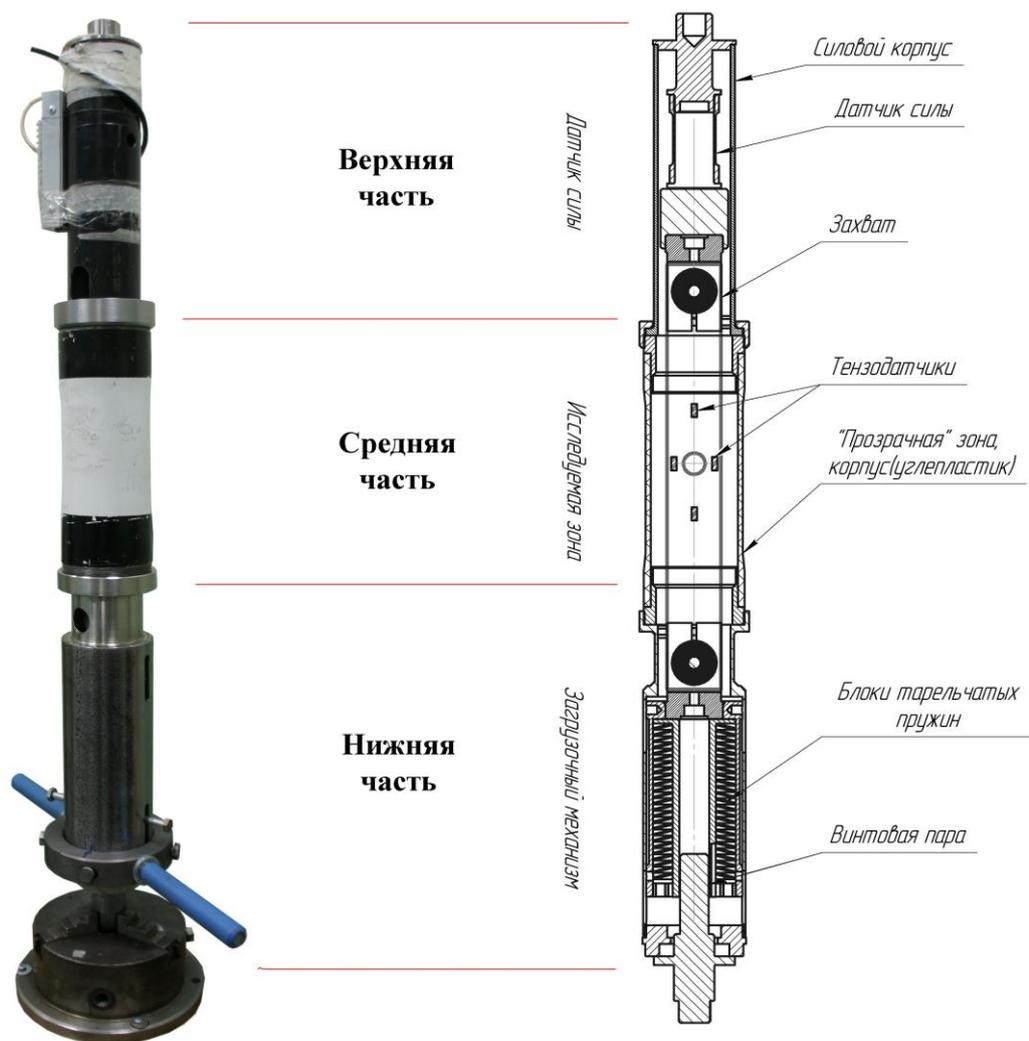


Рис.41. Общий вид и функциональные элементы стенда для нарушения

Стенд включает в себя три конструктивные части – верхнюю, среднюю и нижнюю. Верхняя часть состоит из силового корпуса, который закрывается крышкой. К крышке на шарнирном креплении крепится стакан навески динамометра (силового стакана с расположенными на нем тензодатчиками), в нижней части которого расположен патрон для закрепления образца. Соединение динамометра и патрона осуществляется так же через шарнирное соединение, что позволяет реализовать позиционирование образца внутри стенда и формировать одноосное силовое нагружение.

Средняя часть состоит из силового стакана цилиндрической формы, выполненного из низкоплотного полимерного композиционного материала, что позволяет избежать применения повышенного рентгеновского излучения и получения в процессе сканирования дополнительных артефактов от корпуса, так называемая «прозрачная зона». В тело стакана вставляются металлические втулки, которые через резьбовое соединение обеспечивают силовую замкнутость стенда. В средней зоне расположена рабочая часть, в которой производится исследование структуры материала. Установка образца осуществляется так, что рабочая зона образца совпадает с «прозрачной зоной» стенда, что позволяет минимизировать уровень применяемой энергии и уменьшить количество артефактов сканирования.

Нижняя часть состоит из нижнего патрона крепления образца, соединенного с механизмом загрузки. Механизм загрузки состоит из двух стаканов – внутреннего и внешнего, между которыми расположены тарельчатые пружины, обеспечивающие плавное увеличение нагрузки. Также тарельчатые пружины обеспечивают поддержание нагрузки на заданном уровне при проведении сканирования. Внутренний стакан через резьбовое соединение соединен с винтом, через который проводится нагружение. Для уменьшения трения между неподвижным винтом (закрепленным на рабочем столе) и силовым корпусом нижней части стенда располагается подшипник.

Для осуществления вращения используются ручки, жестко закреплённые на силовом корпусе нижней части.

Полный перечень элементов стенда представлен на рис. 42.

В блок сбора информации входит тензостанция, позволяющая снимать параметры деформаций с тензодатчиков на образце и определять уровень силового воздействия через электронный динамометр или тензодатчики, установленные на силовый стакан. Соединение тензодатчиков и тензостанции осуществляется через кабель, выходящий через верхнюю крышку и не попадающий в зону сканирования. Со стенда снимается информация о уровне силового воздействия и информация с тензодатчиков на образце. Информация о НДС в исходном виде представляет собой разницу напряжений в мВ, которая потом пересчитывается в силу и деформацию с помощью переводных коэффициентов.

Датчик силы служит для определения нагрузки, созданной при помощи винтового механизма. Тарировка датчика проводилась на испытательной машине Zwick/Roell Z250 на растягивающую и сжимающую нагрузки.

Датчик силы состоит из металлического цилиндра с прикрепленными к нему тензодатчиками. Информация о напряженно-деформированном состоянии с датчиков снимается при помощи микровольтметра. Датчик силы, закрепленный на испытательной машине, при испытании на растягивающую нагрузку представлен на рис.43.

При тарировке на испытательной машине датчика силы фиксировались значения прикладываемой нагрузки и соответствующие им показания тензодатчиков в милливольтгах. По результатам получен график зависимости усилия от изменения показаний микровольтметра, то есть показаний тензодатчиков. Графики этих зависимостей представлены на рис.44.

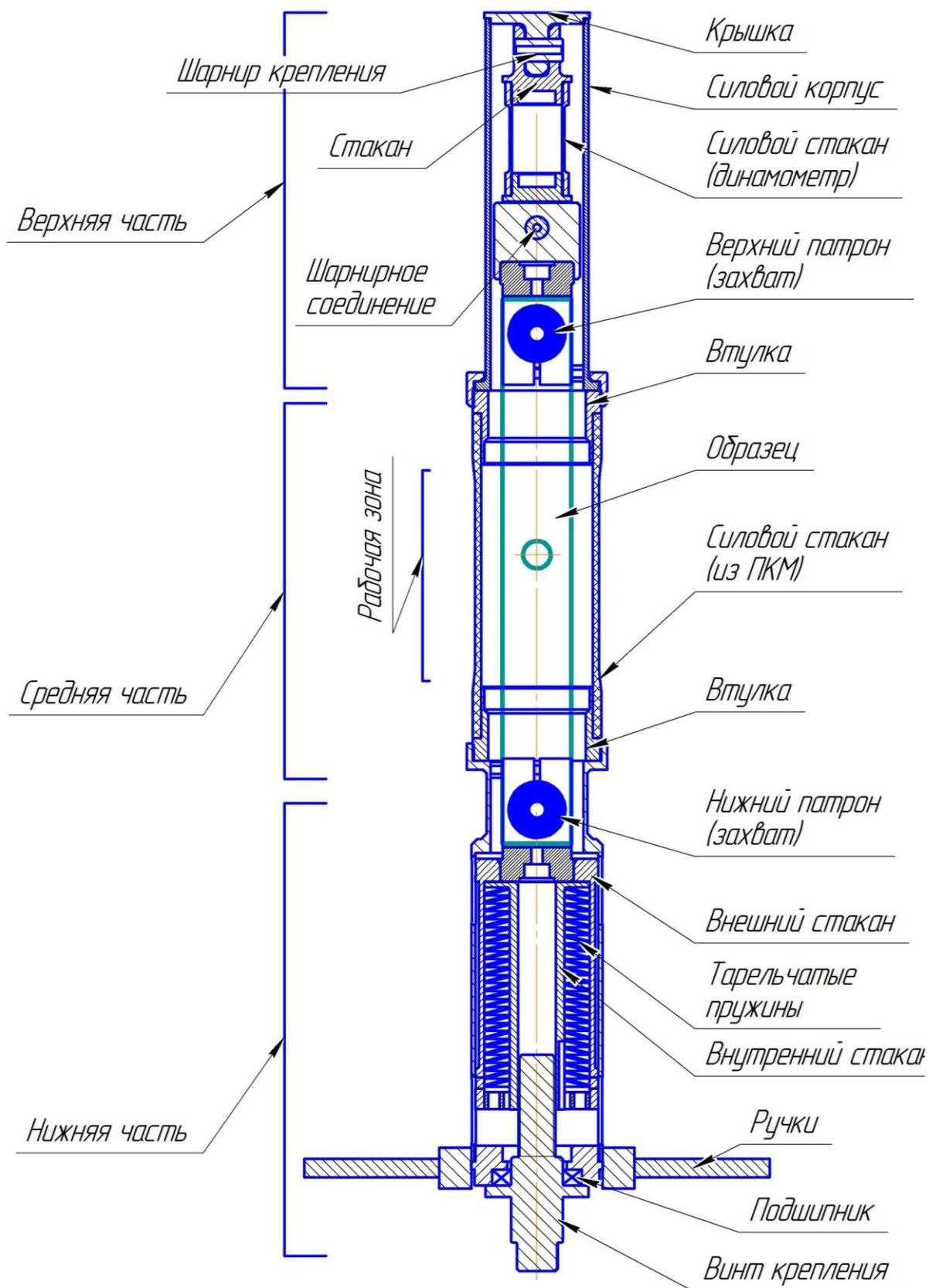


Рис. 42. Функциональные элементы станда

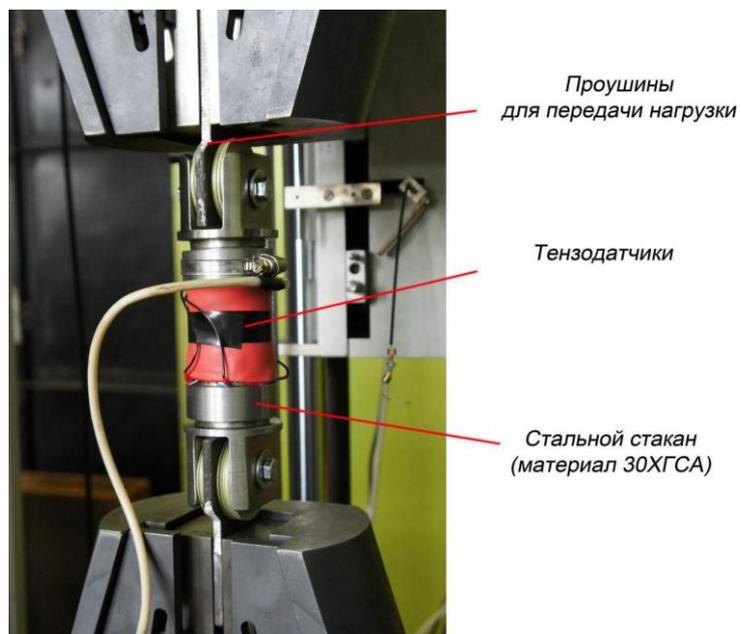


Рис.43 Датчик силы на испытательной машине. Тарировка на растяжение

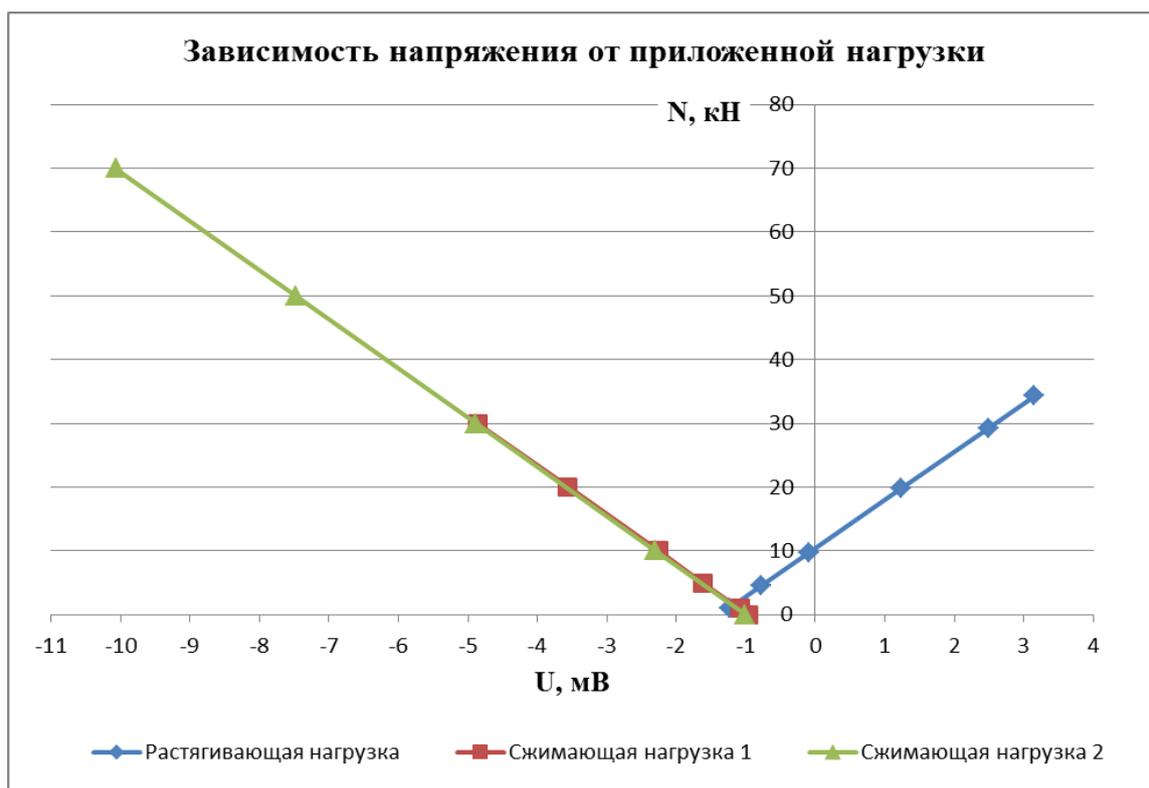


Рис. 44. Завсимость напряжения от приложенной к датчику силы нагрузки

N – значения приложенной силы,

U – напряжение с тензодатчиков.

По графику вида явная линейная зависимость данных параметров, что позволяет использовать на всех участках нагружения один коэффициент перевода значений напряжения в приложенную силу - k_p .

В дальнейшем данный коэффициент применяется для пересчета параметров НДС с индикатора нагрузки, получаемые в милливольтгах, в единицы силы (кН).

Коэффициент перевода для растягивающей нагрузки:

$$k_p = \frac{N}{U} = 7,58 \frac{\text{кН}}{\text{мВ}}.$$

Коэффициент перевода для сжимающей нагрузки:

$$k_{сж} = \frac{N_{сж}}{U} = 7,72 \frac{\text{кН}}{\text{мВ}}.$$

Средний коэффициент перевода:

$$k_{cp} = \frac{N_{cp}}{U} = 7,65 \frac{\text{кН}}{\text{мВ}}.$$

Тензостанция, состоит из генератора стабилизированного тока, блока из 8-ми «Т-мостов» балластных сопротивлений, переключателя каналов и индикатора разности напряжений на плечах Т-моста. Для тарировки были вырезаны образцы-свидетели уменьшенной ширины, на которые были наклеены тензорезисторы, применяемые при испытаниях. Образцы вырезались из аналогичной пластины, что и в последующих исследуемых образцах. Идентификация деформаций, замеряемая тензорезистором на образце, производилась по экстензометру испытательной машины, установленному на данный образец. Установленный на испытательную машину образец с приклеенным тензорезистором для тарировки тензостанции представлен на рис. 45. Щупы экстензометра испытательной машины «перекрывают» зону для замера деформации на образце с

наклеенным тензорезистором. После тарировки тензостанции образцы-свидетели доводились до разрушения с целью определения максимальной нагрузки на исследуемые образцы, изготовленные по выбранной технологии и с заданной схемой армирования. Полученные упруго-прочностные характеристики образцов в дальнейшем используются для предварительной оценки разрушающей нагрузки, необходимой для выбора шага нагружения. Полученные значения разрушающей нагрузки и предельных деформаций представлены в таблице 4.

Таблица 4

Результаты испытаний образцов -свидетелей

вид нагружения	геометр. р-ры сечения	модуль упругости	разруш. сила	пред. напряж.	пред. деформ.
	мм	ГПа	кН	МПа	%
растяжение	18.5 x 3	69.2	35.2	634	0.81
	20.1 x 3	71.7	34.7	575	0.77

Получена зависимость, снимаемой тензостанцией разницей потенциалов и приложенной нагрузки от деформации образца. На рис. 46 и 47 представлены графики, построенные по полученным значениям, при разных напряжениях. «Истинное» значение относительной деформации на образце зарегистрирована «штатным» экстензометром испытательной машины (нижняя шкала по оси абсцисс).



Рис. 45. Образец для тарировки тензостанции

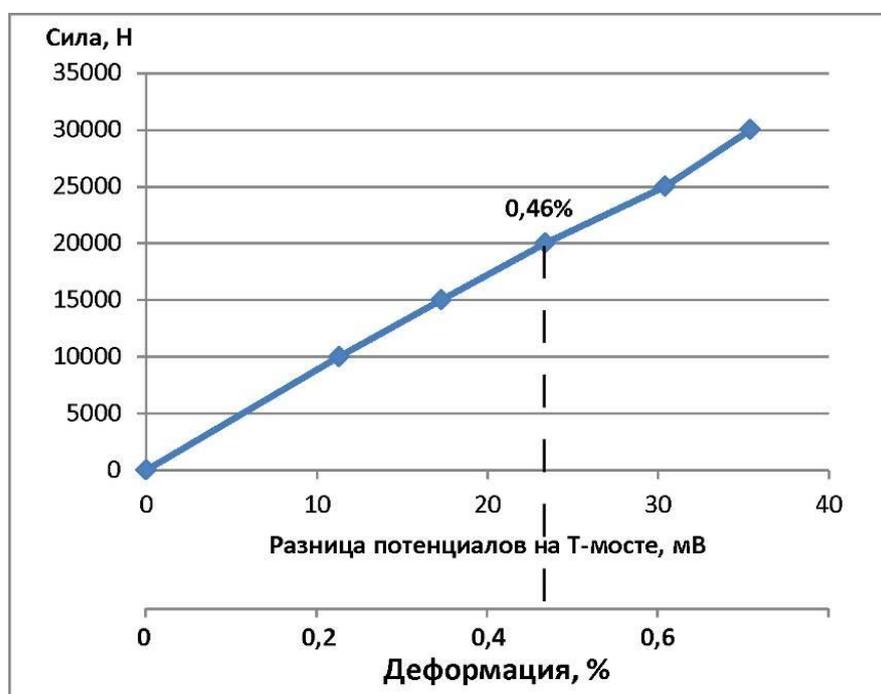


Рис. 46. Зависимость нагрузки от напряжения и деформаций
(напряжение 10В)

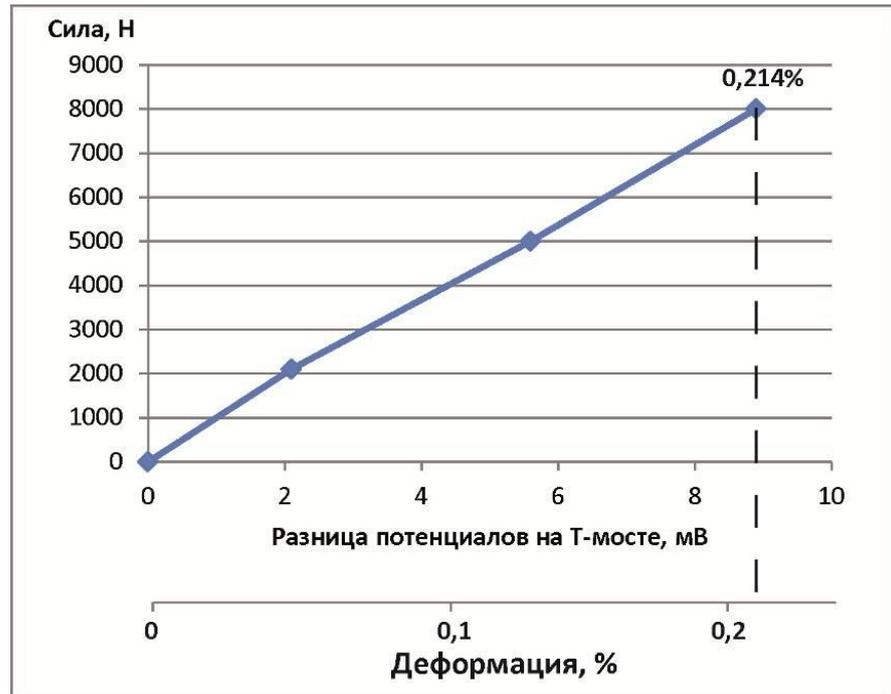


Рис. 47. Зависимость нагрузки от напряжения и деформаций (напряжение 20В)

В результате был получен переводной коэффициент между снимаемой разницей потенциалов при различной нагрузке и значениями деформаций, представленный в Таблице 5, что близко к значению, указанному в паспорте на тензодатчик.

Таблица 5.

Значения переводного коэффициента

Напряжение, В	Деформации, %	Разница потенциалов, мВ	Коэффициент
10	0,46	8,9	2,4
20	0,214	23,4	1,96
Среднее значение			2,18

Для комплексной проверки работоспособности всей системы создания НДС в образце, текущего замера относительных деформации и стабильности параметров томографии был исследован образец из сплава Д16Т. Результаты испытаний металлического образца и тензометрия при увеличивающейся растягивающей нагрузке представлены в таблице 6.

Таблица 6.

Значения тензометрии.

Этап нагружения	Уровень нагрузки		Датчик продольный	Деформация	Датчик поперечный	Деформация
	мВ	кН	мВ	%	мВ	%
0	12,6	0	0	0	0	0
1	13,1	3,79	0,003	0,070	0,002	0,037
2	13,3	5,68	0,006	0,140	0,004	0,076
3	14,2	12,35	0,011	0,244	0,004	0,089
4	14,5	15,00	0,012	0,262	0,005	0,100
5	14,9	17,13	0,015	0,320	0,006	0,126
6	15,1	18,95	0,016	0,349	0,007	0,153

Получены данные по изменению контролируемого сечения (в частности изменения площади) и достижения разрушающей нагрузки. Для подтверждения правильности снятия нагрузки были сопоставлены расчетный предел пропорциональности и данные тензометрии на алюминиевом образце. При испытании второго алюминиевого образца контролировались параметры деформации (рис. 48). При повторном испытании произошло

преждевременное разрушение образца в зоне захвата, вследствие недостаточного усилия зажима губок. Губки захвата были доработаны.

Сканирование проводилось по 10 сечениям с фиксацией параметров, изложенных в разделе 2.



Рис.48. Образец, установленный в патрон и после нагружения

При увеличении растягивающей нагрузки и соответствующего ей деформированного состояния в металлическом образце изменения параметров структуры материала (ЛКО и СКО) находятся в рамках погрешности всей системы измерений, также наблюдается уменьшение площади исследуемого сечения, что подтверждает достоверность получаемых результатов исследований. Полученные значения представлены в Таблице 7.

Таблица 7

Результаты испытаний алюминиевого образца

Этап нагружения	Уровень нагрузки		μс	S	Площадь, кв. мм.
	мВ	кгс			
0	12,6	0	11278	302	65,14
1	13,1	379	11233	304	64,81
2	13,35	568,5	11300	290	62,92
3	14,23	1235,54	11289	298	63,82
4	14,58	1500,84	11217	314	63,87
5	14,86	1713,08	11257	293	62,5
6	15,1	1895	11333	300	60,5

На основе полученных данных можно сделать вывод о стабильности работы оборудования и необходимой точности получения и сбора информации.

При проведении исследований на композиционных образцах было определено:

1. влияние корпуса приспособления на конечные параметры сканирования – данного влияния не обнаружено на зонах диаметром 125 мм. При диаметре контролируемого сечения 100 мм выявлено значительное влияние корпуса на результат сканирования.
2. выбран угол первоначальной установки – при изменении данного параметра, из-за переотражений, возникающих в конструкции, происходит постепенное изменение конечных томографических

параметров. Для предотвращения данного разброса был введен элемент контроля угла поворота.

В рамках предварительных исследований были выявлено:

- 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;
- в связи с деформацией образца подтверждение повторяемости сечений по образцу свидетелю не является целесообразным.

Для контроля изменения положения образца при приложении нагрузки были выбраны маркеры, обеспечивающие фиксацию изменения положения высоты контролируемого сечения. Маркеры выполняются из высокоплотного материала (плотность выше 10 г/см^3) и располагаются на торцах образца. В данной работе были использованы маркеры из медной проволоки диаметром 0,1 мм. При использовании проволоки возможно обеспечивать повторяемость маркеров, а при расположении их на торце образца перпендикулярно поверхности образца получать четкое изображение на рентгенограмме. Точность позиционирования по таким меткам составляет $\pm 0,05 \text{ мм}$, что позволяет достаточно точно определять уходы, связанные с деформациями образца и выборкой зазоров в приспособлении.

Полученная при отработке маркеров рентгенограмма представлены на рис. 49

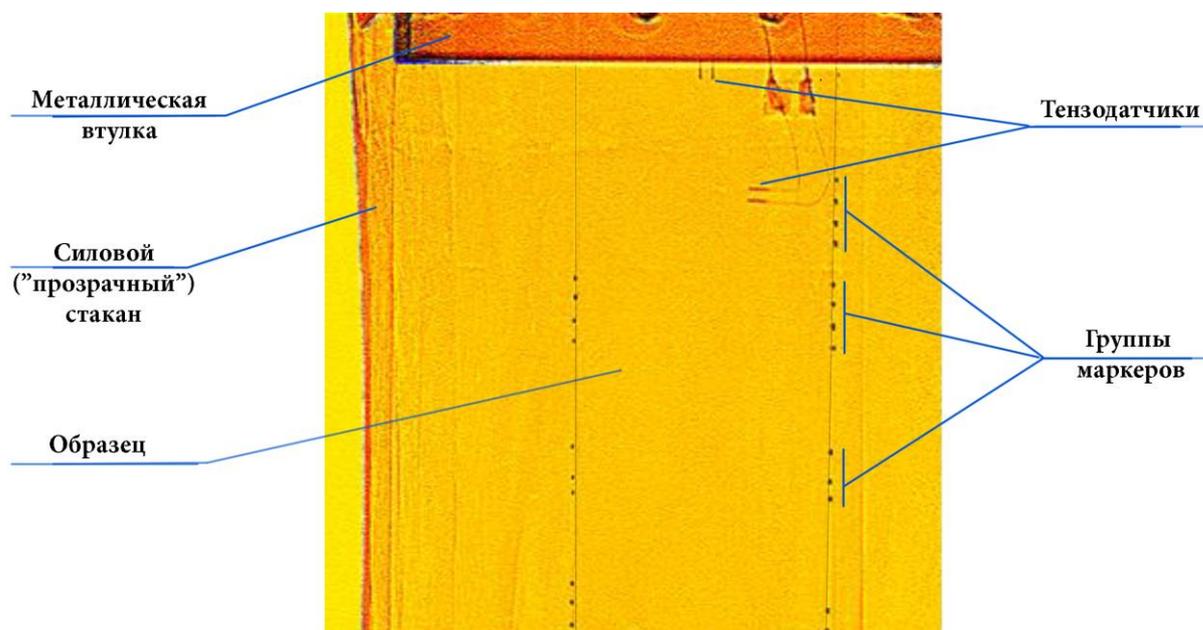


Рис. 49 Рентгенограмма, установленного в стенде образца с наклеенными маркерами

3.3. Описание методики исследования

Методика включает в себя три составных части – применение метода ВРТ, количественных критериев оценки и стендовое приспособление (рис. 50). Результатом исследования с применением данной методики являются графические модели контролируемых характеристик структуры материала в зависимости от силового воздействия. Количественные критерии (основанные на применении метода ВРТ и статистической обработке информации) и стендовое приспособление разработаны в рамках данной работы.

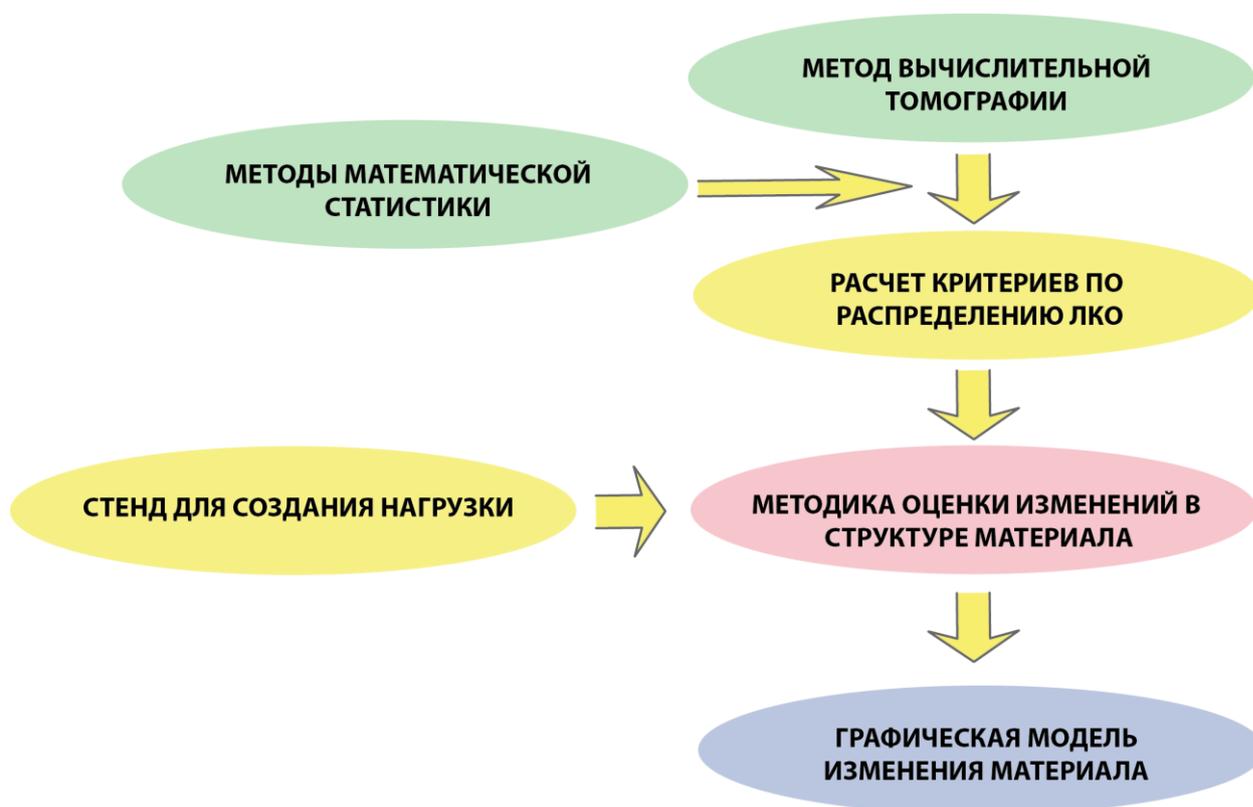


Рис. 50. Компоненты методики

Предлагаемая методика включает следующие этапы:

- Подготовка образца
- Формирование матрицы нагружения и сетки сканирования
- Установка образца в испытательный стенд
- Предварительное нагружение на нагрузку 200-300 кгс, для выборки зазоров и обеспечение жесткости стенда, в противном случае, из-за колебания отдельных элементов приспособления возникают нежелательные артефакты сканирования.
- Проведение сканирования в соответствии с матрицей исследования – сканирование проводится, начиная с фиксации базового (исходного) состояния образца.
- Фиксация ЛКО через программное обеспечение томографа.

- Обработка результатов и формирование заключения о поведении контролируемых критериев в зависимости от приложенной нагрузки.

На рис. 51 представлена функциональная схема работы системы и порядок обмена информации при проведении исследования.

В качестве выходной информации используются данные о распределении структурной плотности и характеристики НДС – деформация и уровень нагрузки.

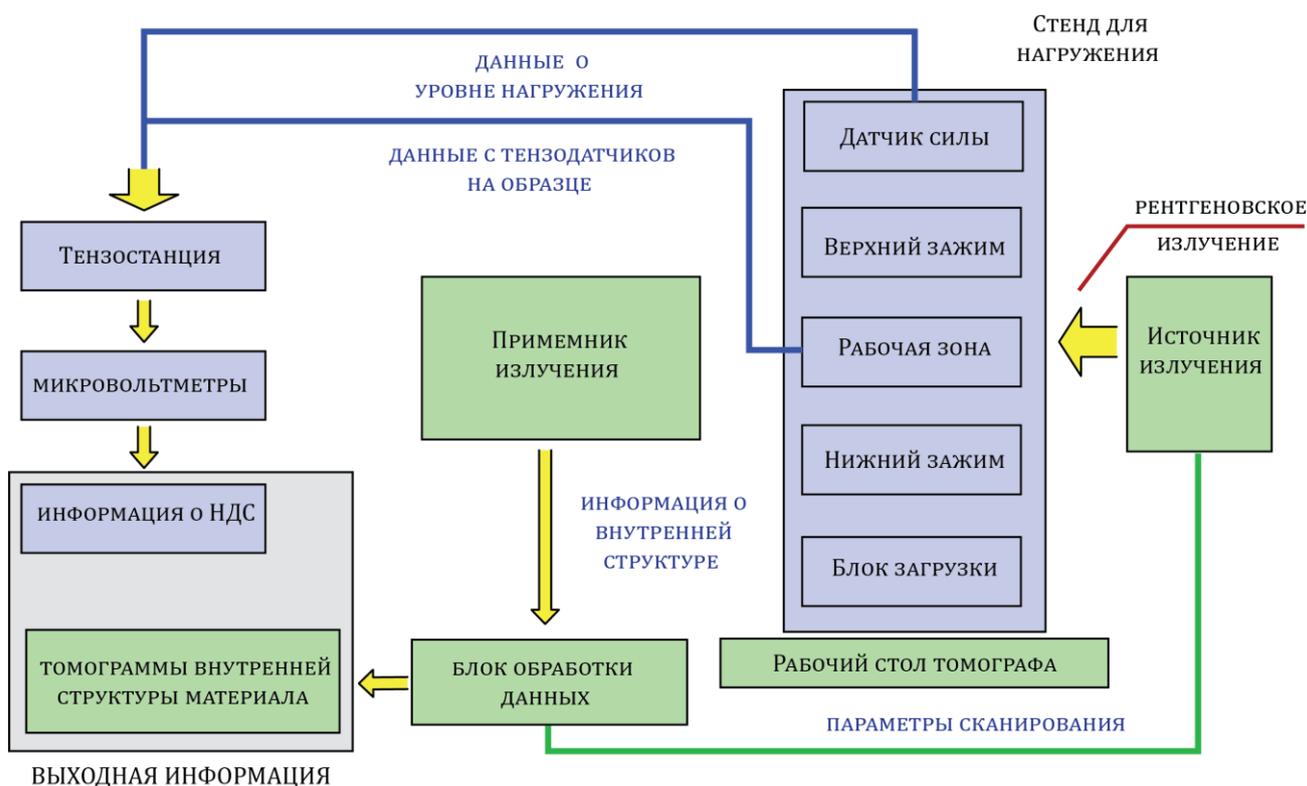


Рис.51. Принципиальная схема лабораторного оборудования

В подготовку образца входит наклеивание тензодатчиков и маркеров (рис.52), при этом должно быть обеспечено несовпадение сетки сканирования и расположения маркеров. Аналогичное требование распространяется на тензодатчики и провода, идущие к тензостанции. Сетка сканирования выбирается исходя из задач исследования и геометрических особенностей конструкции (наличие конструктивных концентраторов,

ударных повреждений и т.д.). В общем случае сечения сканирования должны быть с равным шагом расположены вдоль всей высоты рабочей зоны образца.

При установке образца не должно возникать предварительных деформаций в теле образца. Угловые деформации будут ликвидироваться шарнирным механизмом в верхней части образца, параллельность свободным расположением патронов в резьбовых соединениях.

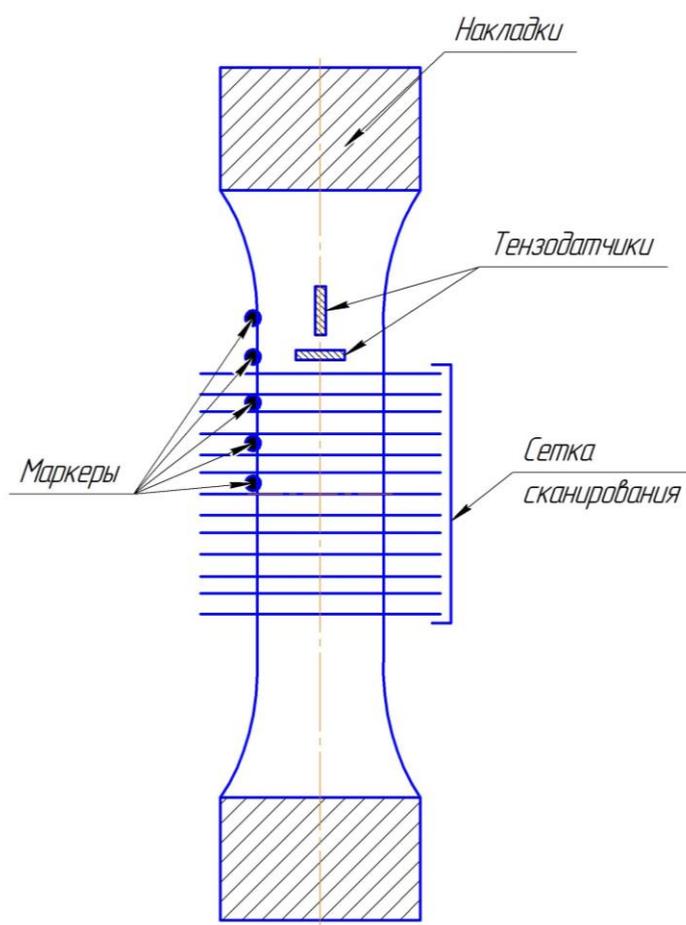


Рис. 52. Схема образца для проведения исследования

Матрица сканирования формируется исходя из предварительного расчета укладки образца с определением разрушающей нагрузки. В связи с возможным наличием ползучести в образце, в качестве контролируемого параметра выбирается не деформация, а нагрузка. Пример матрицы нагружения представлена на рисунке 53. В общем виде она должна включать

в себя последовательное нагружение и снятие нагрузки с образца с поэтапным увеличением нагрузки, вплоть до разрушающей.

Подбор режимов сканирования выполняется на начальном этапе и сохраняется неизменным в процессе исследования. При необходимости перерасчета средних значений ЛКО в плотность необходимо использовать образец свидетель с известной плотностью.

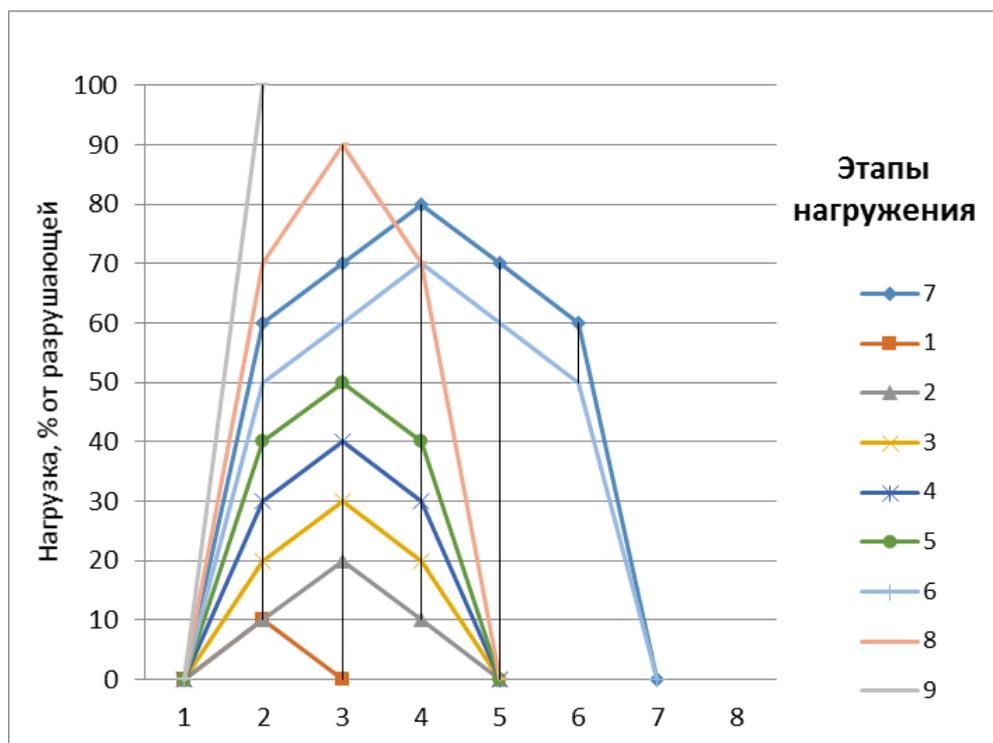


Рис. 53. Матрица проведения исследования

После проведения сканирования снимаются осредненные данные в каждом сечении и производится расчет выходных критериев по формулам 16-19.

3.4. Выводы по Главе 3

Основой разрабатываемой методики является возможность поэтапного развития дефектов в авиационных конструкциях из ПКМ. В соответствии с существующими теориями механики композиционного материала в нем

возможно несколько вариантов развития и распространения повреждений. Т.к. на поведение материала влияют различные конструктивно-технологические и эксплуатационные факторы, определение механики поведения конкретного варианта ПКМ с использованием математического аппарата в зависимости от них становится достаточно трудоемкой задачей. Одним из методов является верификация предлагаемой модели разрушения и деградации свойств на основе анализа внутренней структуры конструкции неразрушающими методами контроля. Существующие методы анализа процессов, проходящих внутри материала, могут констатировать наличие повреждений, но также требуют подтверждения, в связи с оценкой состояния материала через косвенные параметры.

Существующие расчетные методы тяжело подтвердить традиционными методами исследования внутренней структуры, что затрудняет их верификацию. При расчете с учетом критериев разрушения рассматривается поэтапное разрушение слоев или матрицы, что подразумевает рассмотрение нагруженного состояния. В связи с такой постановкой задачи возникает необходимость проведения контроля непосредственно под нагрузкой.

Для решения данной задачи с использованием предлагаемого метода необходимо разработать специальный стенд, позволяющий совмещать создание НДС и исследование внутренней структуры образца. Разработанный стенд позволяет создавать нагрузку с погрешностью ± 25 кгс, при этом предусмотрено удержание нагрузки с помощью блока тарельчатых пружин, что так же позволяет обеспечивать плавность приложения нагрузки. Применение маркеров из высокопрочного материала позволяет учитывать выборку зазоров в резьбовых соединениях и деформации образца при приложении нагрузки. Комплекс решений позволяет обеспечить повторяемость выполнения сканирования и минимизировать влияние артефактов, свойственных методу ВРТ при проведении исследования.

ГЛАВА 4. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАЗЦОВ ИЗ ПКМ

4.1. Описание исследуемых образцов и параметров сканирования

Для исследований топологии и изменений в структуре слоистых полимерных композиционных материалов (ПКМ) при растяжении были изготовлены плоские образцы двух серий:

1. Серия 1 - углеродная лента УОЛ-300-1 (ТУ 1916-167-05763346-96 производство ООО «Аргон») и связующего ЭПС-И-108 (ТУ 2225-047-17411121-2012 производство ООО «Суперпласт»)
2. Серия 2 - углеродная лента ЛУП-0,1Б ГОСТ 28006-98 и связующего ЭДТ-10П ПИ 1.2.029-77.

Общий вид образцов представлен на рис. 54. Для снижения концентрации напряжений в зоне отверстия под затяжной болт использовалась втулка из 30ХГСА-2.

Общая высота рабочей зоны составляет 200 мм, часть из которой занята тензодатчиками продольной деформации. Ширина рабочей зоны образца 40 мм, толщина 3 мм.

Образцы изготовлены методом пропитки и формования под двойным вакуумным пакетом (технология DBVI) [41]. Схема армирования представлены на рис. 55, укладка $(0,+45,-45,90,-45,+45,0)^4$. Заготовка в виде плоской пластины формовалась согласно представленному на рис. 56 графику зависимостей параметров технологического процесса от времени, затем на пластину наклеивались накладки из стеклопластика для установки образцов в зажимных захватах стенда для создания НДС в исследуемом образце. 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. Собранный вакуумный пакет, процесс пропитки и разборка вакуумного пакета представлены на фотографиях (рис.57). Из этой же пластины вырезались образцы свидетели для определения прочностных характеристик на растяжение.

Для снижения вариативности рассматриваемых параметров, проводилось исследование только при изменении компонентов материала, без внедрения концентраторов или воздействия эксплуатационных факторов, что позволяет рассмотреть один из конструктивно-технологических факторов при применении выбранной методики и подтвердить ее работоспособность.

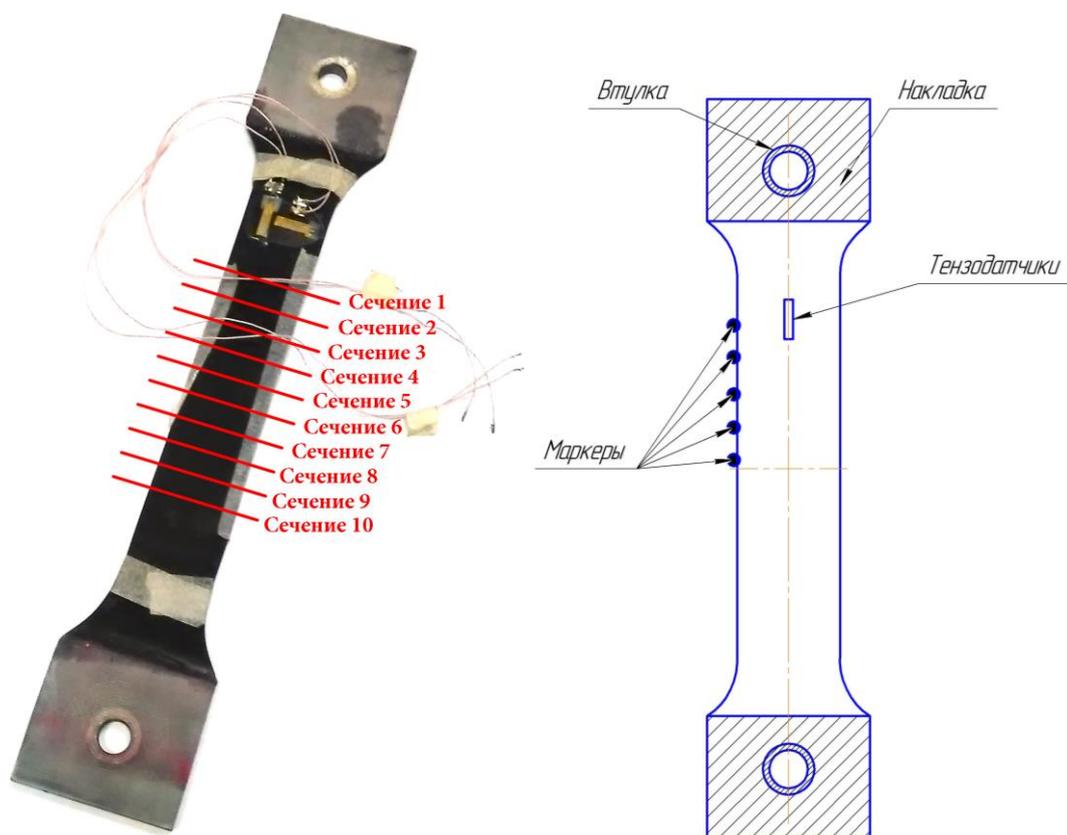


Рис. 54. Общий вид исследуемых образцов

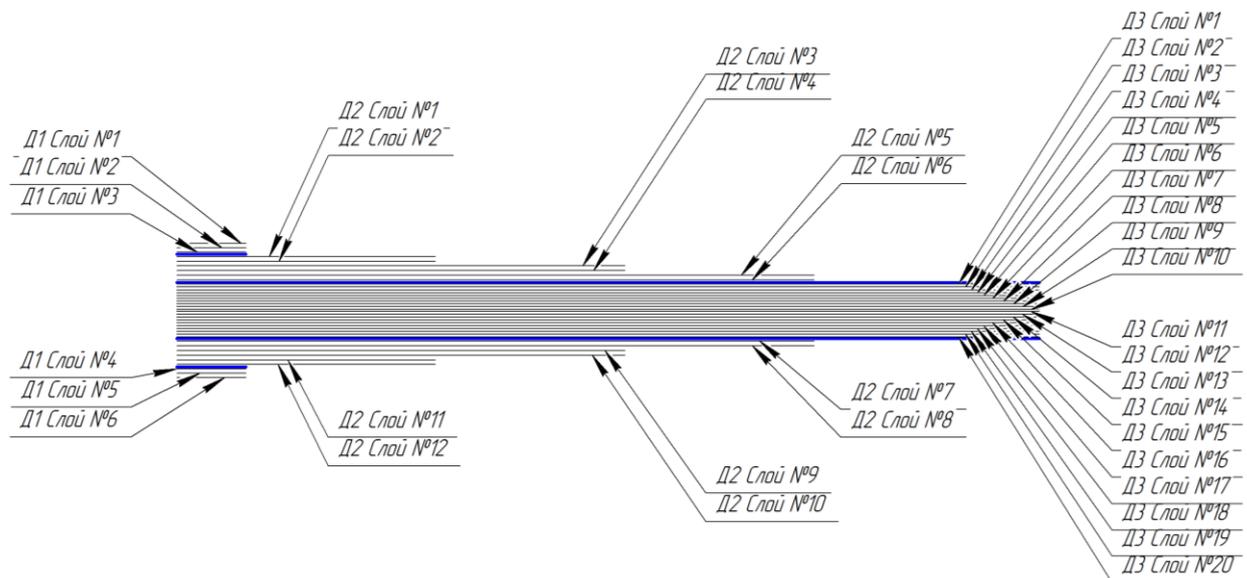


Рис. 55 Схема армирования исследуемых образцов

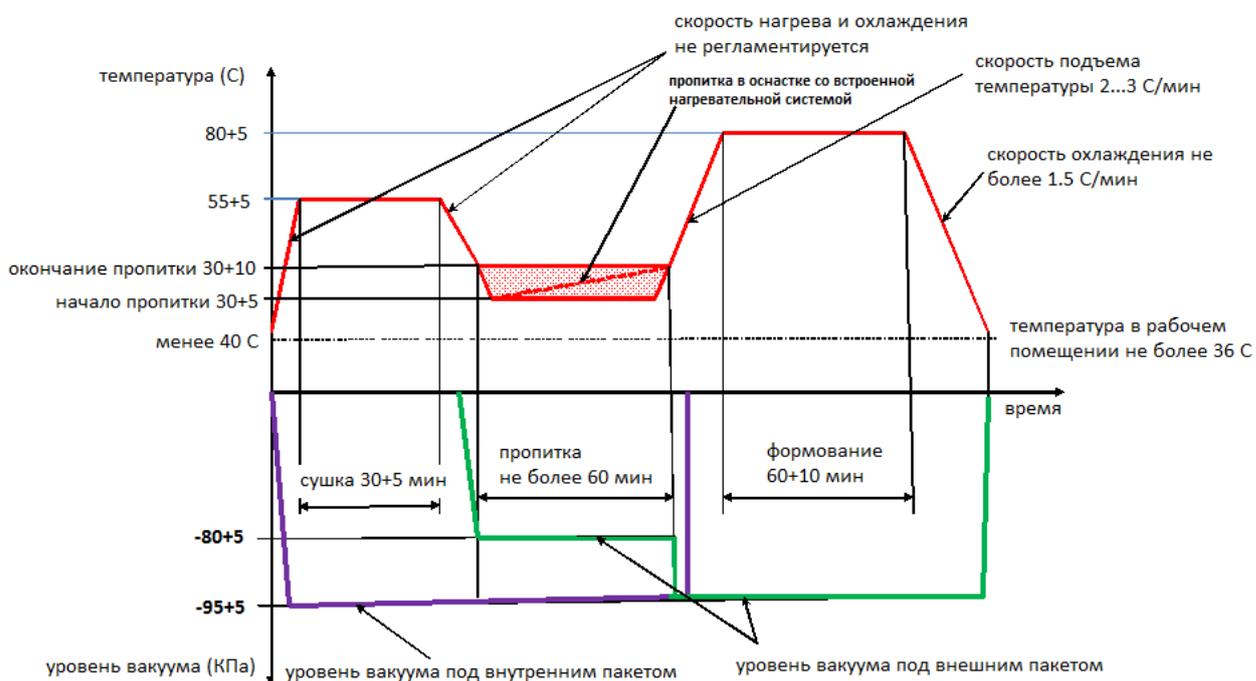
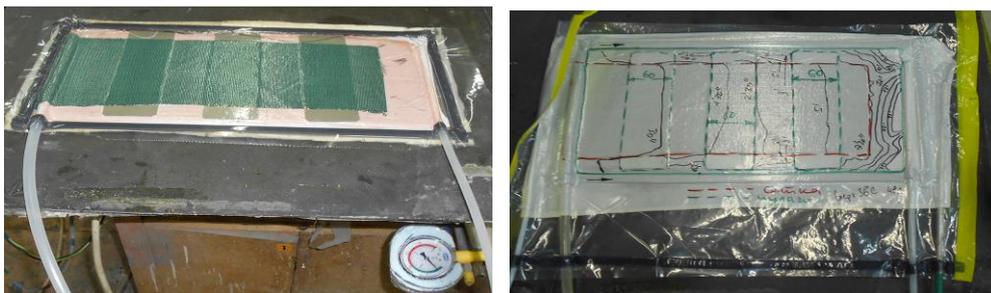
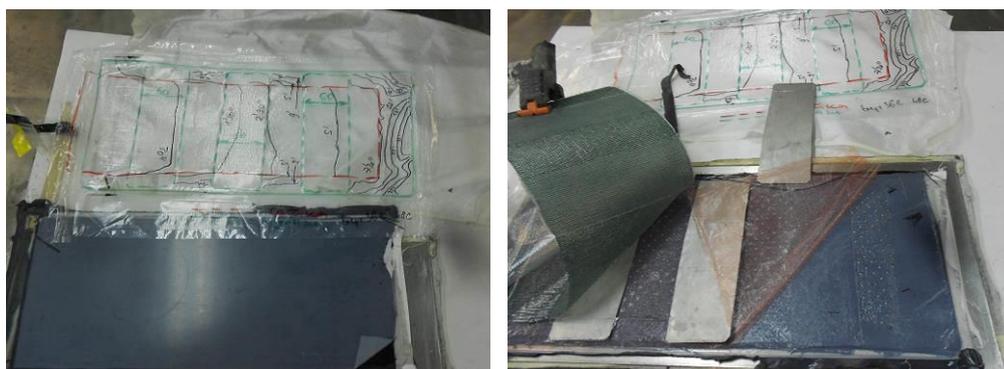


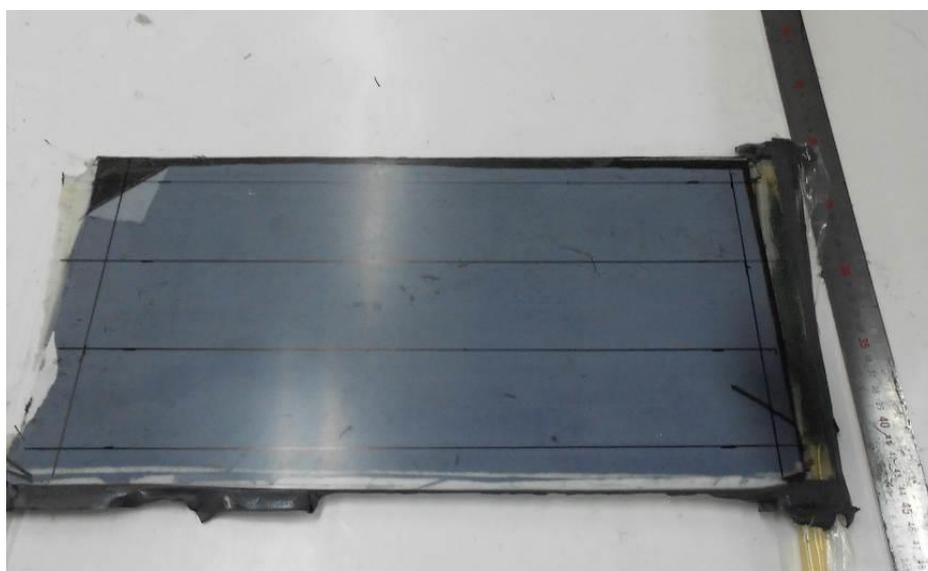
Рис. 56 Параметры технологического процесса изготовления исследуемых образцов



Сборка вакуумного пакета с проводящей сеткой для пропитки и процесс пропитки



Разборка вакуумного пакета и его структура



Пластина для вырезки образцов после формования

Рис. 57 Последовательность изготовления исследуемых образцов

Матрица проведения нагружения представлена на рис. 58. В процессе исследования проводилось поэтапное нагружение и разгрузка образца. Сканирование проводилось по 10 сечениям с шагом сканирования 10 мм. Томограмма образца представлена на рис. 59.



Рис. 58. Матрица проведения исследования

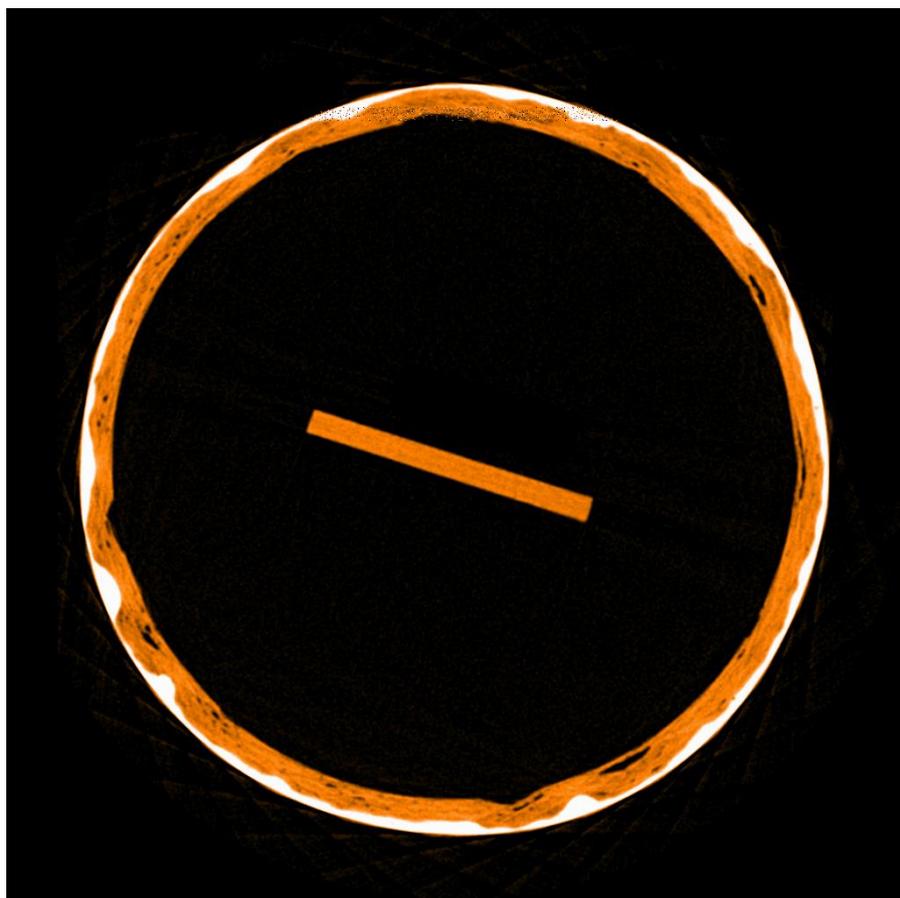


Рис. 59. Томограмма образца в стенде

4.2. Обработка и анализ результатов

В результате проведения сканирования получена матрица значений распределения ЛКО в сечениях образца в зависимости от нагрузки. На графиках (рис. 60-61) представлено поведение осредненных значений ЛКО и СКО в контролируемых сечениях. Стоит отметить сходное поведение в различных сечениях при приложении нагрузки, а также наличие отклонений в ряде сечений, свидетельствующих о наличии отдельных технологических дефектов. При дальнейшем нагружении эти значения также имеют определенные отклонения, что говорит о развитии отдельных повреждений, что может быть использовано при построении прочностной модели.

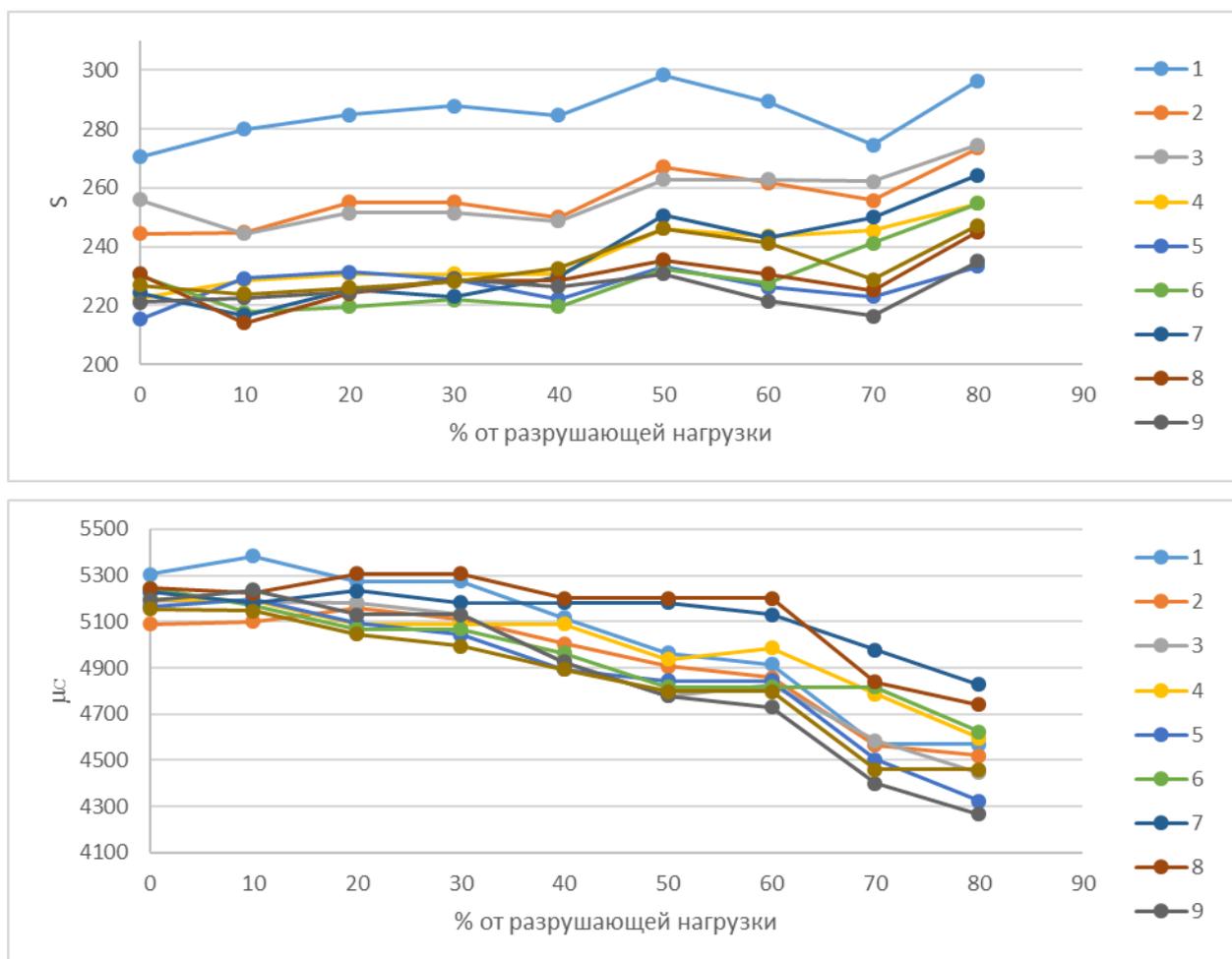


Рис. 60. Значения осредненных значений по сечениям в зависимости от приложенной нагрузки. Для образцов Серии 1

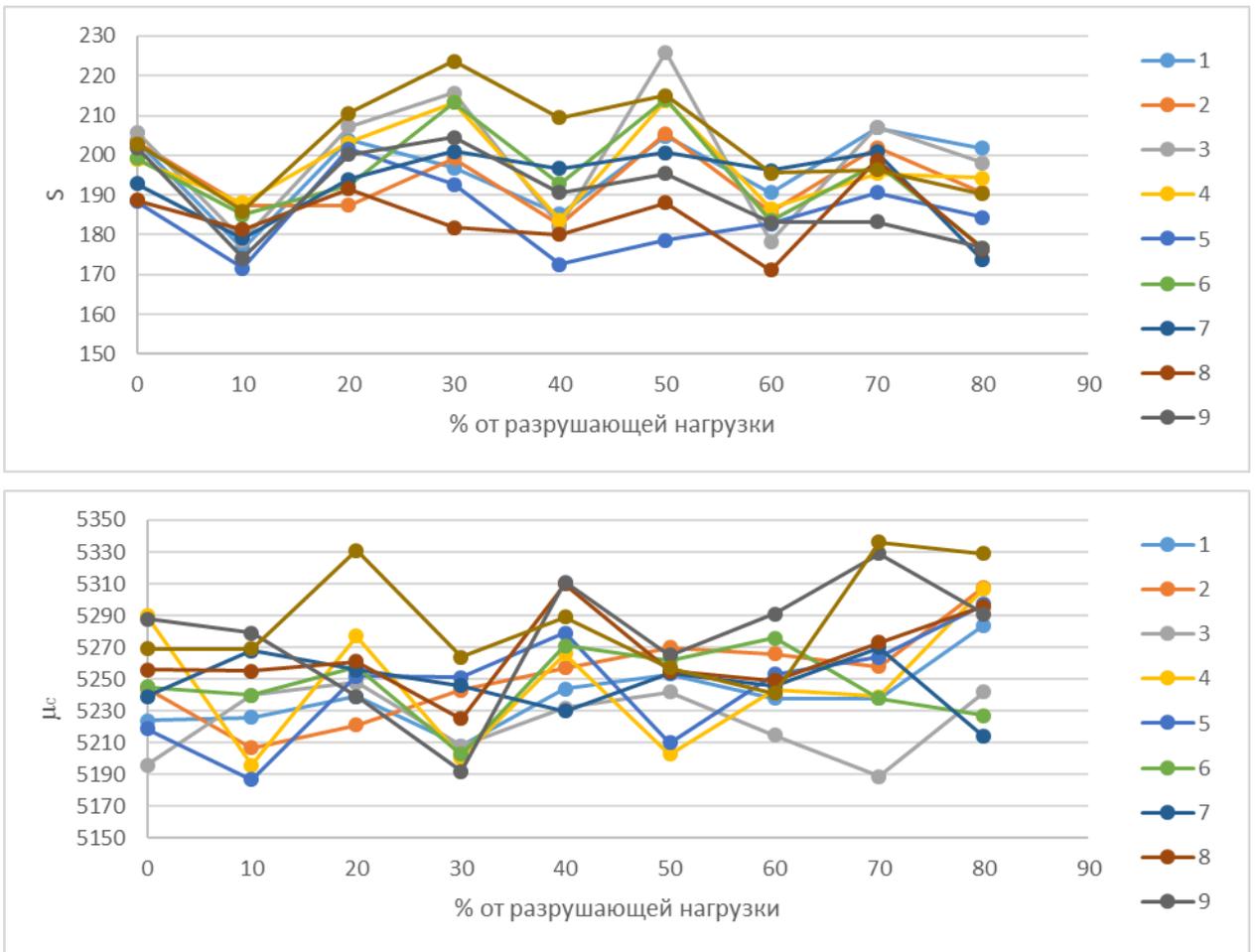


Рис. 61. Значения осредненных значений по сечениям в зависимости от приложенной нагрузки. Для образцов Серии 2

На рис. 62 представлены графики деформирования. Можно отметить определённую нелинейность для образцов Серии 1, что характеризует накопление повреждений в материале и наличие определённого уровня пластической деформации.

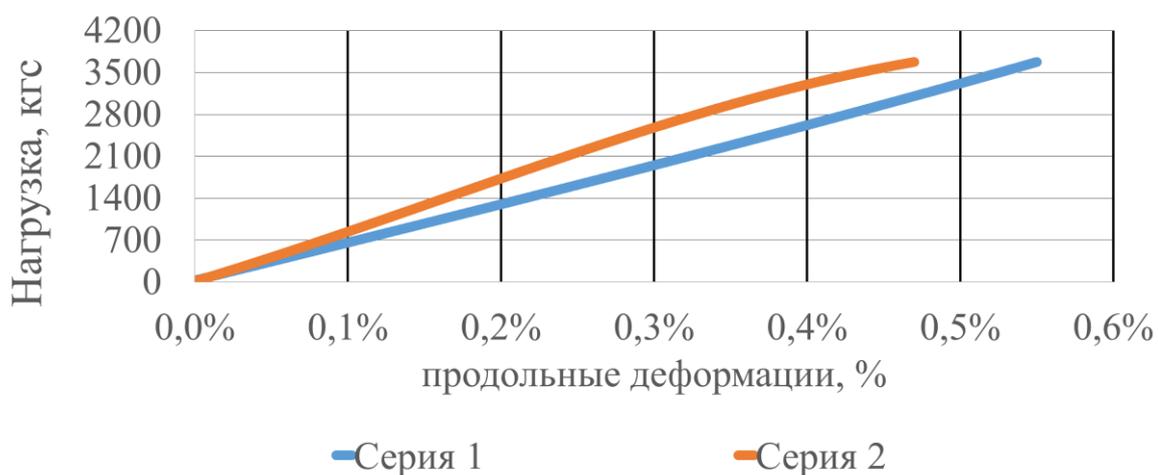


Рис. 62. Типовая диаграмма деформирования для образцов Серия 1 и 2

При обработке данных проводилась оценка предложенных критериев в нагруженном и разгруженном состоянии относительно исходного сечения. Результирующие данные представлены на графиках рис. 63-64. Для всех графиков построены линии тренда, которые отмечают тенденции изменения структурной плотности материала в зависимости от нагрузки.

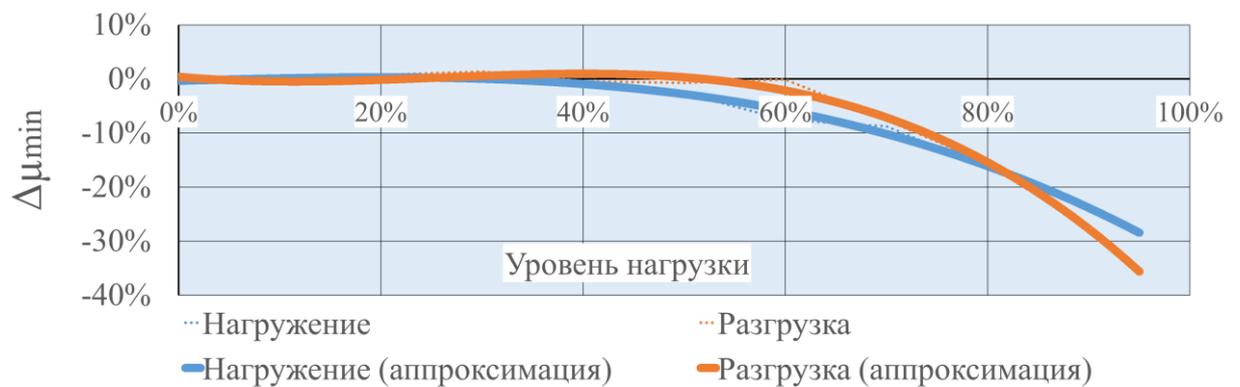
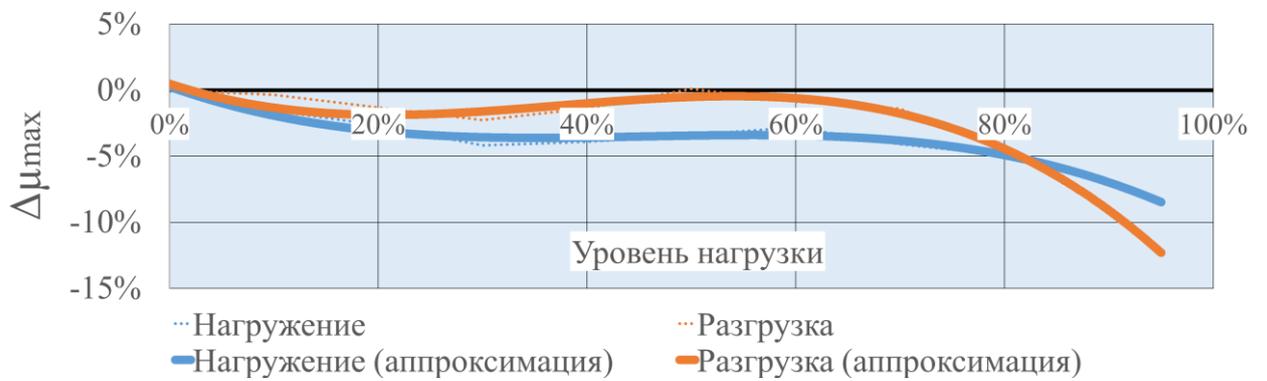
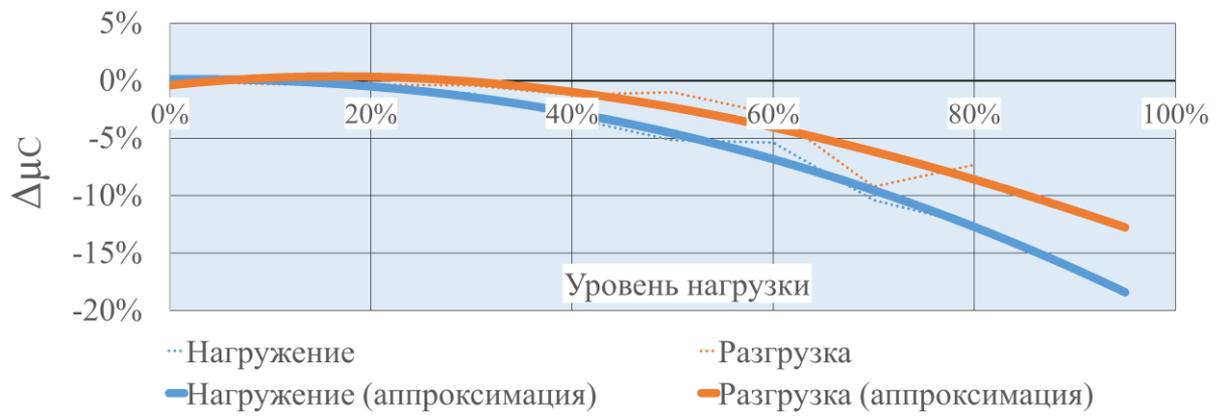
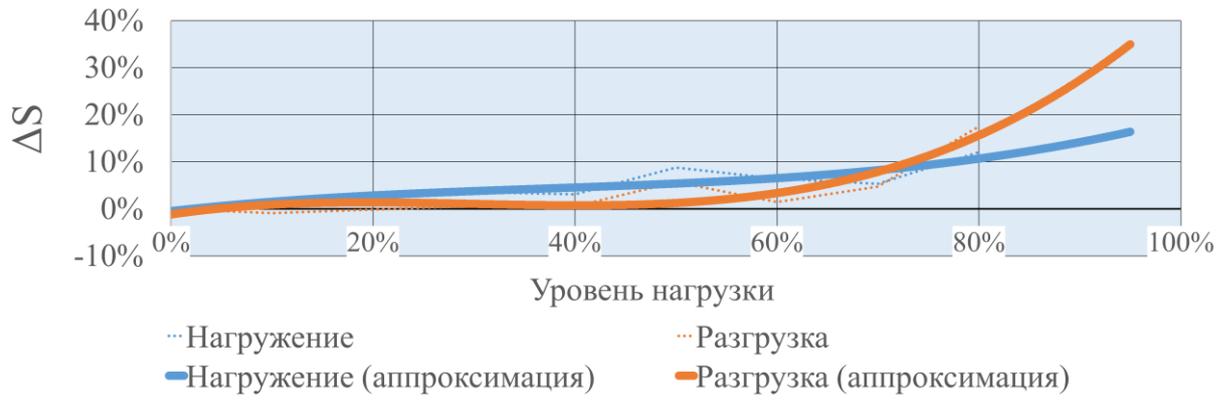


Рис. 63. Графики изменения контролируемых параметров для образцов
Серии 1.

По представленным графикам поведения контролируемых критериев для Серии 1 можно сделать следующие выводы:

- Общее поведение характеризует данный материал, как склонный к накоплению дефектов в материале, при этом изменение структуры наблюдается с начального момента приложения нагрузки, что позволяет говорить 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 5%, по ΔS – до 8%.
- Развитие магистрального дефекта (значительного роста отдельного дефекта) в материале отсутствует до нагрузки 60%, что видно по графику изменения $\Delta \mu_{\min}$, после чего начинается рост магистрального дефекта.
- С начальной нагрузки происходит разуплотнение материала (график $\Delta \mu_{\max}$), что может свидетельствовать о разрыхлении в наиболее плотных зонах материала, т.к. при этом отсутствует рост значений $\Delta \mu_{\min}$.

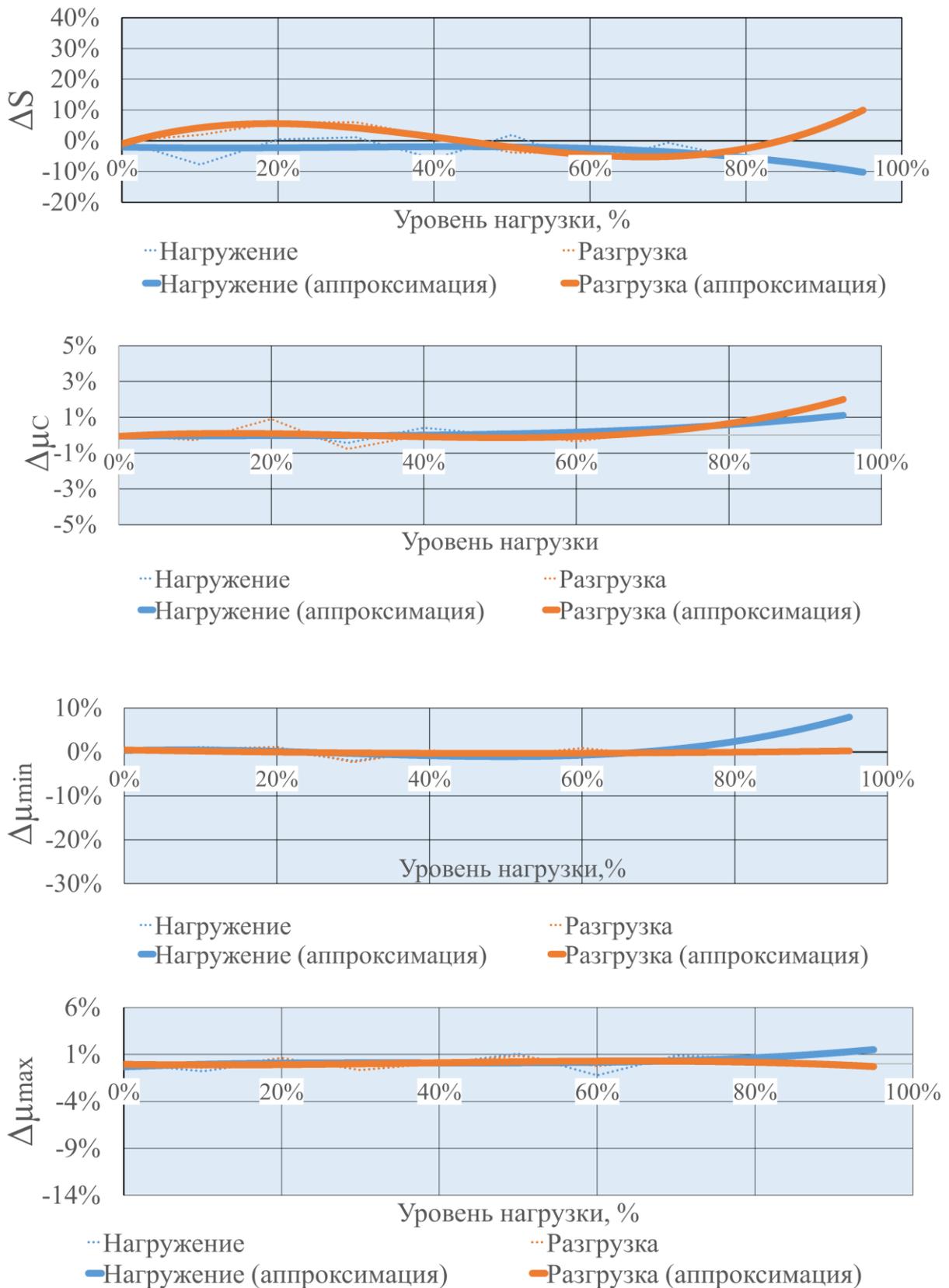


Рис. 64. Графики изменения контролируемых параметров для образцов

Серии 2.

По представленным графикам поведения контролируемых критериев для Серии 2 можно сделать следующие выводы:

- Общее поведение характеризует данный материал, как склонный 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 $\Delta\mu_c$ свидетельствует о незначительном изменении структурной плотности, что свидетельствует о перераспределении дефектов, без их существенного накопления.
- Изменение ΔS свидетельствует о процессе перераспределении структуры, при этом разница между нагруженным и разгруженным состоянием по данному критерию достаточно большое (до 6% при приложении нагрузки до 10% от разрушающей)
- Общее изменение структуры по параметрам $\Delta\mu_c$, $\Delta\mu_{\min}$, $\Delta\mu_{\max}$ меняются в незначительных пределах 1-2%, что достаточно близко к статистической погрешности исследования, на основе этого можно сделать заключение об отсутствии процессов накопления в образце и в данном случае ΔS может характеризовать только перераспределение отдельных дефектов.

4.3. Выводы по Главе 4

Предложенная методика позволяет оценивать изменение структуры материала под нагрузкой в зависимости от конструктивно-технологических характеристик, в данном случае уровня максимально приложенной нагрузки и типа применяемых компонентов материала при неизменной технологии изготовления и укладки.

На основе предложенной методики можно сделать заключение о поведении конструкции с использованием данного материала при нагружении, что может быть применено:

- при выборе конструктивно-технологических решений на начальных этапах проектирования, т.к. выходная информация позволяет оценить нагруженное состояние, рассматриваемое при прочностном анализе, и описать процессы накопления и развития повреждений, которые позволят более точно планировать процедуру неразрушающего контроля в процессе изготовления и технического обслуживания при эксплуатации.
- На основе предложенных критериев возможно провести сравнение различных конструктивно-технологических решений, т.к. используются относительные параметры исследования, которые возможно применять для различных конструкций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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. При этом характерной особенностью ПКМ, по сравнению с металлическими материалами, является наличие широкого спектра внутренних дефектов, что требует применения неразрушающих методов контроля на большинстве этапов изготовления конструкции и значительных затрат на дефектоскопию конструкции в процессе эксплуатации. В тоже время для ПКМ свойственно наличие высокого разброса свойств при изготовлении (порядка 15-20%), значительное влияние типа технологического процесса и его параметров на выходные характеристики конструкции. Поэтому для подтверждения прочностных и эксплуатационных характеристик используется большой объем испытаний элементарных и конструктивно-подобных образцов, что увеличивает стоимость разработки.

На этап исследования элементарных образцов приходится наибольшее количество вариантов применяемых компонентов материалов, типов укладок и отработка технологического процесса, что значительно увеличивает их количество по сравнению с другими уровнями испытаний.

Для снижения объема испытаний необходимо использование моделей математического и конечно-элементного моделирования, которые требуют верификации и уточнения в зависимости от типов применяемых материалов.

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 с применением метода ВРТ. Стенд включает датчик определения приложенной силы, «прозрачную» рабочую зону, выполненную из ПКМ, механизм загрузки, блок поддержания постоянства нагрузки (уход нагрузки составляет $\pm 0,25$ 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 обработки 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.

Полученные результаты, позволяют повысить эффективность верификации прочностных моделей прогрессирующего разрушения конструкций из ПКМ при оптимизации различных конструктивно технологических параметров.

Предложенная методика позволяет проводить оценку различных конструктивно-технологических параметров и может применяться на различных этапах жизненного цикла изделия. Решения для исследования элементарных образцов, предложенное в данной работе, наиболее актуально на начальных этапах разработки новой конструкции, в качестве одного из критериев выбора материала и оценки его эксплуатационных характеристик на ранних этапах исследования, для которого характерна большая вариативность конструктивно-технологических параметров.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ВРТ – вычислительная рентгеновская томография

МКЭ – метод конечных элементов

ПКМ – полимерный композиционный материал

ЛКО – линейный коэффициент ослабления

СКО – среднеквадратичное отклонение

НДС – напряженно деформированное состояние

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Advisory Circular № 20-107B Composite aircraft structure. – USA: FAA, 2009.
2. Aviation maintenance technical handbook – Airframe Volume 1– USA: FAA, 2012.
3. Banks-Sills L. Application of the finite element method to linear elastic fracture mechanics/ Banks-Sills L.// Applied Mechanics Reviews. – 1991. - Vol. 44. - pp. 447-461.
4. Brault R. In-situ Analysis of Laminated Composite Materials by X-ray Micro-Computed Tomography and Digital Volume Correlation / Brault R., Germaneau A., J. C. Dupré, P. Doumalin, S. Mistou, M. Fazzini // Experimental Mechanics. – 2013. - Volume 53, Issue 7. - pp 1143-1151
5. Camanho P.P. Stress analysis and strength prediction of mechanically fastened joints in FRP: a review/ Camanho P.P., Matthews F.L.// Composites Part A. – 1997 - 28A. – pp. 529-547.
6. Shama Rao N. Carbon Composites Are Becoming Competitive And Cost Effective/ Shama Rao N., Simha T. G. A., Rao K. P. and Ravi Kumar G. V. V. - External Document Infosys Limited, 2016.
7. Chang F.K. Post-failure analysis of bolted composite joints in tension or shear-out mode failure/ Chang F.K., Chang K.Y. // Journal of Composite Materials. – 1987. – v. 21. – pp. 809-833.
8. Composite materials handbook: Polymer matrix composites materials usage, design, and analysis. Volume 3. - Department of defense handbook MIL-HDBK-17-3F. – 2002. - 693 p. Volume 3 of 5.
9. Composites and Their Applications/ Edited by Ning Hu. - Croatia, InTech. – 2012. - 424 p.
10. D. Penumadu Damage of Composite Materials Subjected to Projectile Penetration Using High Resolution X-Ray Micro Computed Tomography / D. Penumadu, F. Kim, J. Bunn // Experimental Mechanics. – 2015. - pp 1-10.

11. Daniel, I.M. Failure of Composite Materials, Strain/ Daniel, I.M.// Experimental Mechanics. – v 43(1). – pp. 4–12.
12. DOT/FAA/AR-03/19 Material Qualification and Equivalency for Polymer Matrix Composite Material Systems: Updated Procedure. - USA, FAA. – 2003.
13. DOT/FAA/AR-95/109 Comparative Evaluation of Failure Analysis Methods for Composite Laminates. - U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration. – 1996.
14. Dr. Darrel R. Tenney NASA Composite Materials Development: Lessons Learned and Future Challenges/ Dr. Darrel R. Tenney// NATO Research and Technology Agency (RTA). – 2009.
15. Gerhard H. Two new techniques to improve interferometric deformation-measurement: Lockin and Ultrasound excited Speckle-Interferometry / Gerhard H., Busse G. – Berlin: Springer-Verlag, 2005. - pp.530-538.
16. Green A.K. Infrastructure development for incorporating fibre-optic sensors in composite materials/ Green A.K., Zaidman M., E Shafir, M Tur and S Gali// Smart Mater. Struct. – 2000.- v 9. –pp. 316–321.
17. Handbook of Adhesives and Sealants/ Edited by Philippe Cognard. - Netherlands, Amsterdam: Elsevier Science Ltd., 2006.
18. Hashin Z. Failure criteria for unidirectional fiber composites/ Hashin Z.// Journal of Applied Mechanics.- 1980.- vol. 47.- pp. 329-334.
19. Hill R. Elastic properties of reinforced solids: Some theoretical principles/ Hill R.// Journal of the Mechanics and Physics of Solids.- 1963.- vol. 11.- pp. 357-372.
20. I. Yu. Solodov New advances in air-coupled ultrasonic NDT using acoustic mode conversion/ I. Yu. Solodov, G. Busse. – Berlin: Proc. EC NDT, 2006.

21. Jaap H. Heida Evaluation of Non-Destructive Inspection Methods for Composite Aerospace Structures/ Jaap H. Heida, Derk J. Platenkamp.- Prague: International Workshop of NDT Experts, 2011.
22. Kassapoglou Ch. Design and Analysis of Composite Structures: With Applications to Aerospace Structures/ Kassapoglou Ch.- Chichester: Wiley, 2010. - 300 p.
23. Lessard L.B. Two-dimensional modeling of composite pinned-joint failure/ Lessard L.B. and Shokrieh M.M.// Journal of Composite Materials. – 1995. – v 29. – pp. 671-697.
24. Liang Cheng Comparison of Nondestructive Testing Methods on Detection of Delaminations in Composites / Liang Cheng, Gui Yun Tian // Journal of Sensors. – 2012.- Volume 12. – 2012.
25. Nikishkov Y. Measurement of voids in composites by x-ray computed tomography/ Nikishkov Y., Airoidi L., Makeev A. // Comp. Sci. Technol. - 2013. - V. 89. - p. 89-97.
26. Pardoe Alan The future of Air Transport/ France: Airbus, 2012.
27. Pat. US 7,186,367 B2. Double vacuum bag process for resin matrix composite manufacturing/ Hung Hou Tan, Jensen B. J.; publ. 06.03.2007.
28. Philippe Benhamou From Air Transport System 2050 Vision to Planning for Research and Innovation Association of European Research Establishments in Aeronautics. – German, 2012.
29. Plastic progress/ Bruyne M.A.// Flight. – London. – 1939. - Vol XXXV.
30. Richard H. The application of X-ray computed tomography to materials development/ Richard H., Bossi Ph.D., Gary E. Georgeson Ph.D. // JOM. - 1991. - Volume 43, Issue 9. - pp 8-15.
31. Seon G. Effects of defects on interlaminar tensile fatigue behavior of carbon/epoxy composites/ Seon G., Makeev A., Nikishkov Y., Lee E. // Comp. Sci. Technol. - 2013. - V. 89. - pp. 194-201.

32. Shigang Ai Finite Element Modeling of 3D Orthogonal Woven C/C Composite Based on Micro-Computed Tomography Experiment/ Shigang Ai, Zhu Xiaolei, Mao Yiqi, Pei Yongmao, Fang Daining// Application Composite Materials. – 2014. - V21.- pp. 603–614.
33. Suong V. Hoa Principles of the Manufacturing of Composite Materials/ Suong V. Hoa// USA: DEStech Publications, Inc., 2009. - 337 p.
34. The possibilities of CT and VG Studio MAX/ USA: Volume Graphics GmbH, 2009.
35. Tsai S.W., (1971). A General Theory of Strength for Anisotropic Materials/ Tsai S.W., Wu E.M. // Journal of Composite Materials. -1971. - v 5(1). – pp. 58–80.
36. Vasiliev V.V. Mechanics and Analysis of Composite Materials/ Vasiliev V.V., Morozov E.V. – USA: Elsevier, 2001. - 412 p.
37. Аверко-Антонович И.Ю. Методы исследования структуры и свойств полимеров: учеб. пособие/ Аверко-Антонович И.Ю., Бикмуллин Р.Т. Казань: КГТУ, 2002. - 604 с.
38. Алентьев А.Ю. Связующие для полимерных композиционных материалов/ Алентьев А.Ю., Яблокова М.Ю. - М.: МГУ, 2010.
39. Бакулин В.Н. Методы повышения качества изготовления изделий из полимерных композиционных материалов на основе применения компьютерной томографии как метода неразрушающего контроля/ Бакулин В.Н., Ларин А.А., Резниченко В.И. // Инженерно-физический журнал. - 2015. - Т. 88, № 2. - с.534-538.
40. Бакулин В.Н. Методы повышения качества изготовления изделий из полимерных композиционных материалов на основе применения компьютерной томографии как метода неразрушающего контроля / Бакулин В.Н., Ларин А.А., Резниченко В.И. // Инженерно-физический журнал. - 2015. - Т. 88, № 2. - с.534-538.

41. Бакулин В.Н. Метод конечных элементов и голографическая интерферометрия в механике композитов/ Бакулин В.Н., Рассоха А.А. - М. Машиностроение, 1987. - 312 с.
42. Барынин В. А. Современные технологии неразрушающего контроля конструкций из полимерных композиционных материалов/ Барынин В. А., Будадин О. Н., Кульков А. А. – М.: Спектр, 2013. – 242 с.
43. Батаев А.А. Композиционные материалы: строение, получение, применение/ Батаев А.А., Батаев В.А. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. — 384 с.
44. Белов П.А. Общая теория дефектов сплошных сред/ Белов П.А., Лурье С.А. // Механика композиционных материалов и конструкций - 2003 - Том 9 - №4-471-485.
45. Берлин Ал.Ал. Принципы создания композиционных материалов/ Берлин Ал.Ал., Вольфсон С.А, Ошмян В.Г., Ениколопян Н.С. - М.: Химия, 1990.
46. Бойцов Б.В. 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.
47. 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.
48. 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.

49. 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.

50. 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.

51. Болотин В.В. Дефекты типа расслоений в конструкциях из композиционных материалов/ Болотин В.В. // Механика композиционных материалов. - 1984. - № 2. - с. 239-256.

52. Братухин А.Г. Технология производства изделий из композиционных материалов в машиностроении/ Братухин А.Г., Сироткин О.С., Боголюбов В.С. - М.: Готика, 2003. - 516 с.

53. Бретенев Г.М. Физика и механика полимеров: учебное пособие для втузов/ Бретенев Г.М., Зеленев Ю.В. – М.: Высш. школа, 1983 г. – 391 с.

54. Брызгалин Г.И. Проектирование деталей из композиционных материалов волновой структуры/ Брызгалин Г.И. - М.: Машиностроение, 1982.

55. Бураго Н.Г. Численное решение упруго-пластических задач методом конечных элементов/ Бураго Н.Г., Кукуджанов В.Н. // Препринт ИПМ АН СССР. – N. 236. – 1988. - 63 с.

56. В.В. Сухоруков, Э.И. Вайнберг и др. Неразрушающий контроль, / В.В. Сухоруков, Э.И. Вайнберг и др. - М. «Высшая школа», 1993. - кн. 5.

57. Вайнберг И.А. Универсальные компьютерные томографы для обработки и сертификации ответственных промышленных изделий. Критерии выбора/ Вайнберг И.А., Вайнберг Э.И. // М. - Двигатель. - №4 (76). - 2011.
58. Вайнберг Э.И. Компьютерные томографы для не-разрушающего контроля и количественной диагностики изделий аэрокосмической промышленности/ Вайнберг Э.И., Вайнберг И.А.// М. - Двигатель. - №2 (56). - 2008.
59. Васильев В.В. Механика конструкций из композиционных материалов/ Васильев В.В. // – М.: Машиностроение, 1988. - 272 с.
60. Васильев В.В. Композиционные материалы: Справочник/ Васильев В.В., Протасов В.Д., Болотин В.В. и др. - М.: Машиностроение, 1990. - 512 с.
61. Васильев С.Л. Контроль образцов методом вычислительной рентгеновской томографии под нагрузкой/ Васильев С.Л., Артемьев А.В., Бакулин В.Н., Юргенсон С.А.// М.: Дефектоскопия. – 20016. - №5.
62. Войтюк И.Н. Обзор радиометрических методов определения объемной плотности сыпучих материалов и причины их недостатков/ Войтюк И.Н. // М. - Современная техника и технологии. - 2014. - № 5.
63. Воробей В.В. Контроль качества изготовления и технология ремонта композитных конструкций/ Воробей В.В., Маркин В.Б. – Новосибирск: Наука, 2006.
64. Воробей В.В. Соединения конструкций из композиционных материалов/ Воробей В.В., Сироткин О.С. - Л.: Машиностроение, Ленингр. отделениями, 1985. — 168 с.
65. Выборнов Б.И. Методы неразрушающего контроля материалов и изделий авиационной техники/ Выборнов Б.И. - М.: Машиностроение, 1980 – 104с.

66. Гайдачук В.Е. Особенности создания авиационных конструкций из композиционных материалов. Учеб. пособие./ Гайдачук В.Е., Кива Д.С., Рябков В.И. - Х.: Харьк. авиац. ин-т, 1997-135с.
67. Гиммельфарб Ф. А. Современные методы контроля композиционных материалов/ Гиммельфарб Ф. А., Шварцман С. Л. - М., 1979. — 248 с.
68. ГОСТ 26656-85 Техническая диагностика Контролепригодность Общие требования. – М.: Стандарт-информ, 2009.
69. ГОСТ Р 50583-93 Материалы композиционные полимерные. Номенклатура показателей. – М.: Стандарт-информ, 2008.
70. Дудченко А.А. Оптимальное проектирование элементов авиационных конструкций из композиционных материалов, Учебное пособие/ Дудченко А.А. - Москва: МАИ, 2002. - 84 с.
71. Дудченко А.А. Об оценке трещиностойкости при межслойном разрушении слоистых панелей/ Дудченко А.А., Лурье С.А., Ле Ким Кыон // Механика композиционных материалов и конструкций. -2012. – Т.21. - №1. – С. 258-270.
72. Дудченко А.А. Рациональное проектирование конструкции отсека фюзеляжа гражданских самолетов из композиционных материалов/ Дудченко А.А., Кончая Рохас Р.А. // Конструкции из композиционных материалов - 2011. - № 2.- С.21-34.
73. Зуев В.В. Кристаллоэнергетика как основа оценки свойств твердотельных материалов (включая магнезиальные цементы)/ Зуев В.В., Поцелуева Л.Н., Гончаров Ю.Д. - СПб, 2006.
74. Каневский И.Н. Неразрушающие методы контроля/ Каневский И.Н., Сальникова Е.Н. - ДВГТУ, 2007. - 243 с.
75. Капранов Б.И. Акустические методы контроля и диагностики. Учебное пособие/ Капранов Б.И., Коротков М.М. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. — 186 с.

76. Карпов Я.С. Проектирование и конструктивно-технологические решения балок и лонжеронов из КМ. Учебное пособие/ Карпов Я.С., Гагауз Ф.М., Лялюхина И.В. - Украина Харьков ХАИ, 2010. - 124 стр.

77. Кива Д.С. Этапы становления и начала развернутого применения полимерных композиционных материалов в конструкциях пассажирских и транспортных самолетов (1970 – 1995 гг.)/ Кива Д.С. // Авиационно-космическая техника и технология. – 2014. – № 6 (113). – 114 с.

78. Ключев В.В. Неразрушающий контроль и диагностика. Издание 3/ Ключев В.В. - М.: Машиностроение, 2007.

79. Кольцова И.С. Распространение ультразвуковых волн в гетерогенных средах/ Кольцова И.С. // Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2007. - с.247.

80. Ларин А.А., Бакулин В.Н., Резниченко В.И. Повышение точности определения физико-механических характеристик полимерных композиционных материалов за счет применения компьютерной рентгеновской томографии./ Ларин А.А., Бакулин В.Н., Резниченко В.И. // XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: сборник трудов. - Казань: Издательство Казанского (Приволжского) федерального университета. – 2015. - с. 2247 - 2248.

81. Ларин А.А., Резниченко В.И. Применение рентгеновской томографии для контроля агрегатов летательных аппаратов из композиционных материалов/ Ларин А.А., Резниченко В.И. // Труды МАИ. - Выпуск № 52. - 2012 г.

82. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы/ Михайлин Ю. А. // - СПб, 2008. - 648 с.

83. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы, 2-е издание/ Михайлин Ю.А. // М.: Изд-во Научные основы и технологии, 2008. - 822 с.

84. Молодцов Г.А. Формостабильные и интеллектуальные конструкции из композиционных материалов/ Молодцов Г.А., Биткин В.Е., Симонов В.Ф., Урмансов Ф.Ф. - М.: Машиностроение, 2000. - 352 с.
85. Неразрушающий контроль. Сер. 28. Вып. 6. Государственные и международные стандарты в области неразрушающего контроля: сб. документов. Ч.3. Термины, определения, классификация радиационного магнитного, электрического, вихретокового, вибродиагностического, теплового, оптического-го контроля» - М.: Госгортехнадзор России, 2008 – 315с.
86. Нестерук Д.А. Тепловой контроль и диагностика. Учебное пособие для подготовки специалистов I, II, III уровня./ Нестерук Д.А., Вавилов В.П. – Томск:, 2007. – 104 с.
87. Никитин В.А. Методы и средства измерений, испытаний и контроля: Учебное пособие/ Никитин В.А., Бойко С.В. - 2-е изд. перераб. и доп.- Оренбург ГОУ ОГУ, 2004. - 462 с.
88. Новожилов Г.В. Проектирование гражданских самолетов. Теории и методы/ Новожилов Г.В. – М.: Машиностроение, 1991. – 382 с.
89. Нотон, Б. Композиционные материалы: в 8 т. – Т. 3. Применение композиционных материалов в технике [Текст] / Б. Нотон ; под. ред. Л. Браутмана, Р. Крока. – М. : Мир, 1978. – 512 с.
90. Образцов И.Ф. Оптимальное армирование оболочек вращения из композиционных материалов/ Образцов И.Ф. - М.: Машиностроение, 1977. — 144 с.
91. Окислительно-восстановительные полимеры/ Г. Дж. Кассиди, К.А. Кун. –М.: изд. Химия, 1966 г. - 272 с.
92. ОСТ 54 30054-88 «Система технического обслуживания и ремонта авиационной техники. Регламент технического обслуживания самолета (вертолета)»

93. Победря Б. Е. Численные методы в теории упругости и пластичности: 2-е изд./ Победря Б. Е. — М: Изд-во МГУ, 1995. —336 с.
94. Победря Б.Е. Механика композиционных материалов/ Победря Б.Е. — М.: изд-во Моск. ун-та, 1984. — 336 с.
95. Полимерные композиционные материалы в конструкциях летательных аппаратов / Г. М. Гуняев, В. В. Кривонос, А. Ф. Румянцев, Г. Ф. Железина // Конверсия в машиностроении. — 2004. — № 4. — С. 65 – 69.
96. Попов Ю.И., Резниченко В.И. Проектирование и изготовление узлов и деталей планера самолета из композиционных материалов Учебное пособие./ Попов Ю.И., Резниченко В.И. — М.: МАИ, 1994. — 68 с.
97. Резниченко В.И. Изготовление лопастей вертолетов из неметаллических материалов/ Резниченко В.И. - М.: Изд-во МАИ, 1977. — 61 с.: ил.
98. РЦ-АП25.571-1А Оценка допустимости повреждений и усталостной прочности конструкции. - АР МАК, 2008 г.
99. Сидоренко Ю.Н. Конструкционные и функциональные волокнистые композиционные материалы/ Сидоренко Ю.Н. - Томск, ТГУ, 2006. - 107 с
100. Сироткин О.С. Технология и механика соединений/ Сироткин О.С., Литвинов В.Б., Гришин В.И. - М.: Артика, 2000 – 314с.
101. Сударикова Е.В. Неразрушающий контроль в производстве: учеб. пособие. Ч. 1./ Сударикова Е.В. — СПб.: ГУАП, 2007. — 137 с.: ил
102. Тарнопольский Ю.М. (ред.) Прикладная механика композитов Сб. статей. — Серия: Механика. Новое в зарубежной науке. №44 — Пер. с англ. Н.П. Жмудя и В.Л. Кулакова. — М.: Мир, 1989.— 358 с.
103. Тарнопольский Ю.М. Расслоение сжимающих стержней из композитов/ Тарнопольский Ю.М. // Разрушение композитных материалов. — Рига. - 1979. - с. 160 – 166.

104. Тарнопольский Ю.М. Методы статических испытаний армированных пластиков 3-е изд. перераб. и доп./ Тарнопольский Ю.М., Кинцис Т.Я. — М.: Химия, 1981. — 272 с.
105. Технология производства изделий из композиционных материалов в машиностроении/ Научные редакторы А.Г. Братухин, В.С. Боголюбов, О.С. Сироткин. - М.: Готика, 2003. - 516 с.
106. Технология производства конструкций летательных аппаратов из композиционных материалов: Учеб. пособие/ В. Е. Гайдачук, В. Д. Гречка, В. Н. Кобрин, А. И. Рукавишников. - Харьков, 1985. — 105 с.
107. Трошин В.П. Влияние продольного расслоения в слоистой цилиндрической оболочке на величину критического внешнего давления/ Трошин В.П. // Механика композитных материалов. - 1982. - № 5. - с. 838 – 842.
108. Углеродные волокна и углекомпози́ты/ ред. Э. Фитцер. М. – М.: Мир, 1988.
109. Фастовец Н.О. Элементы теории вероятностей и математической статистики/ Фастовец Н.О. – М.: МИНХ и ГП им. И.М. Губкина, 1977.
110. Фудзии Т., Дзако М. Механика разрушения композиционных материалов/ Фудзии Т., Дзако М. - М.: Мир, 1982. – 232 с.
111. Шалин Р.Е. Адаптирующиеся («интеллектуальные») материалы и проблемы их создания/ Шалин Р.Е., Машинская Г.П., Железина Г.Ф. и др. // Конструкции из композиционных материалов»- 1995. - № 2.
112. Шилова А.И. Исследование механизмов разрушения углеродных композиционных материалов на основе механических испытаний с регистрацией сигналов акустической эмиссии/ Шилова А.И., Вильдеман В. Э., Лобанов Д. С., Лямин Ю.Б. // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. 2013. – Механика. - №4.

ПРИЛОЖЕНИЯ

П.1. КОПИИ АКТОВ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ



АКТ

о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы
Юргенсона Сергея Андреевича

Комиссия в составе:

- председатель комиссии: - главный технолог Слизов А.К.;
- члены комиссии: - и.о. зам. главного технолога Косолапов А.А.;
- зам. начальника отд.15 Напалков Д.А.;
- начальник бригады отд.15 Тупицын И.С.

Составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы «Изменение несущей способности авиационных конструкций из композиционных материалов в зависимости от силового воздействия», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в АО «Камов» при исследовании элементов конструкций вертолетов АО «Камов».

Задачи, решенные в процессе проведения рентгеновского томографического контроля:

- определение однородности структуры и отдельных компонентов в композиционных конструкциях;
- определение соответствия формы и расположения отдельных элементов в сложных полимерно-композиционных (ПКМ) и металло-полимерно-композиционных (МПКМ) конструкциях;
- контроль качества изготовления конструкций из ПКМ и МПКМ, а именно, определение в конструкциях пор, непроклеев, посторонних включений и других дефектов;
- оценка состояния (изменения) структуры и отдельных элементов конструкций из ПКМ и МПКП в процессе ресурсных испытаний на специальных стендах и в процессе эксплуатации вертолетов.

Использование результатов исследований позволило повысить качество проектирования авиационной техники и информативность исследований сложных конструкций из композиционных материалов, имеющих в своем составе различные композиции:

- эластомерные подшипники несущей системы:
титановый сплав + резина + алюминиевый сплав;
- фланец горловины мягкого топливного бака:
стальной сплав + резина + техническая ткань;
- тяги управления несущей системой:
стеклопластик + титановый сплав + углепластик;
- силовые элементы лопасти рулевого винта:
однонаправленный органопластик + резина + титановый сплав.

Методики описанные в диссертационной работе использованы при анализе результатов рентгеновской томографии элементов конструкций вертолетов Ка-62, Ка-52 и Ка-52К. Развитие указанных методов контроля и анализа является приоритетным направлением развития в области авиационных материалов и технологий и включено в перечень перспективных направлений развития АО «Камов».

Председатель комиссии:


А.К.Слизов

Члены комиссии


А.А. Косолапов


Д.А. Напалков


И.С.Тупицын



**ММП ИМЕНИ
В.В. ЧЕРНЫШЕВА
ОДК**



Акционерное Общество
«ММП имени В.В.Чернышева»

125362, Москва, ул. Вишневая, 7
e-mail: zavod@avia500.ru http://www.avia500.ru
Телеграфный адрес: «ЭЛИКА»

Тел.+7 (495) 491-57-44 Факс: +7(495)491-19-13
ОГРН 1027700283742 ПФР 08790300034
ИНН 7733018650 КПП 997850001

№ _____
На № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ



Зам.управляющего директора –
Технический директор

Громов А.Н.

2016 г.

АКТ

о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы
Юргенсона Сергея Андреевича

«16» июня 2016 г.

Комиссия в составе:

Председатель:	Зам.технического директора	<u>Стешенко И.Г.</u>
Члены	Главный металлург, к.т.н.	<u>Азизов Т.Н.</u>
комиссии:	Нач.отдела новой техники	<u>А.Д.Теряев</u>

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы «Изменение несущей способности авиационных конструкций из композиционных материалов в зависимости от силового воздействия», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в проектно-конструкторской деятельности акционерного общества «Московское машиностроительное предприятие имени В.В.Чернышева» в виде:

1. Методики проведения исследования состояния внутренней структуры конструкций при отработке технологических параметров.
2. Количественных критериев оценки внутренних дефектов для сравнения различных технологий изготовления.

Использование указанных результатов позволяет повысить качество проектирования элементов конструкции и информативность проведения исследований.

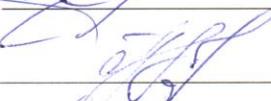
Результаты диссертационной работы были использованы при:
- отработке технологического процесса изготовления детали «Корпус 1 опоры» входящей в состав компрессора изделия ВК2500.

Председатель:



Стешенко И.Г.

Члены комиссии:



Азизов Т.Н.



Теряев А.Д.

П.2 КОПИЯ СВИДЕТЕЛЬСТВА О РЕГИСТРАЦИИ ПАТЕНТА НА
ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 157585

**УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТРУКТУРЫ
МАТЕРИАЛА ИЛИ ИЗДЕЛИЯ, ПРЕИМУЩЕСТВЕННО
ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА**

Патентообладатель(ли): *Юргенсон Сергей Андреевич (RU)*

Автор(ы): *Юргенсон Сергей Андреевич (RU)*

Заявка № 2014138148

Приоритет полезной модели **22 сентября 2014 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации **13 ноября 2015 г.**

Срок действия патента истекает **22 сентября 2024 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 **Г.П. Ивлиев**

