

ЗАГИДУЛЛИН РАДМИР САЛИМЬЯНОВИЧ

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МОДЕЛИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ И УЗЛОВ  
АЭРОКОСМИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ  
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ АДДИТИВНОГО  
ПРОИЗВОДСТВА

2.5.22. Управление качеством продукции.  
Стандартизация. Организация производства

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева».

**Научный руководитель:**

**Дмитриев Александр Яковлевич**, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», кафедра производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении, доцент.

**Официальные оппоненты:**

**Панюков Дмитрий Иванович**, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет», кафедра транспортных процессов и технологических комплексов, заведующий кафедрой;

**Чабаненко Александр Валерьевич**, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», кафедра инноватики и интегрированных систем качества, доцент.

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск.

Защита состоится 19 декабря 2023 года в 12.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.379.05, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, д. 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» и на сайте [https://ssau.ru/files/resources/dis\\_protection/Zagidullin\\_R\\_S\\_Sovershenstvovanie\\_modeli\\_obespecheniya.pdf](https://ssau.ru/files/resources/dis_protection/Zagidullin_R_S_Sovershenstvovanie_modeli_obespecheniya.pdf).

Автореферат разослан «\_\_» октября 2023 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.2.379.05  
доктор технических наук, доцент

Я.А. Ерисов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования**

На предприятиях авиакосмической отрасли ускорилось внедрение аддитивных технологий, что обусловлено достижениями в области производства металлических и полимерных композиционных материалов. Такие известные компании-производители авиационно-космической техники, как Boeing, Airbus, SpaceX, Blue Origin, Rocket Lab и другие, с каждым годом в конструкциях своих изделий наращивают количество деталей и узлов, изготовленных с использованием 3D-печати.

Аддитивные технологии по сравнению с традиционными технологиями изготовления обладают рядом преимуществ: возможность изготавливать детали и узлы практически любой геометрической формы, исключение технологической оснастки, минимизация трудовых ресурсов и человеческого воздействия в процесс изготовления, минимизация доводочных операций и так далее. Вместе с тем, предприятия еще на этапе внедрения аддитивного оборудования в производство сталкиваются с различного рода дефектами деталей и узлов или неудовлетворительными геометрическими параметрами. Инженерно-практический опыт показал, что дефекты напечатанных деталей и узлов могут быть вызваны ошибками как на этапе проектирования, так и на этапах предпечатной подготовки и изготовления – 3D-печати. Для решения проблемы снижения уровня дефектности и повышения качества возникла необходимость разработать новую функциональную модель обеспечения качества деталей и узлов аэрокосмических конструкций из полимерных композиционных материалов в условиях аддитивного производства и, соответственно, новые в рамках указанной модели методики ее реализации. Разработанные модель и методики должны обеспечить выполнение сквозного развертывания требований и качества системы проектирования, предпечатной подготовки и 3D-печати деталей и узлов.

Таким образом, **актуальность** диссертационной работы определяется тем, что повышение качества аэрокосмических конструкций из полимерных композиционных материалов, получаемых с использованием аддитивных технологий, связано с разработкой функциональной модели и методик обеспечения качества, которые обеспечат выполнение сквозного развертывания требований и качества системы проектирования, предпечатной подготовки и 3D-печати деталей и узлов.

### **Степень разработанности темы.**

Значительный вклад в решение теоретических и практических вопросов управления качеством внесли российские и зарубежные ученые: Ю.П. Адлер, В.Н. Азаров, Д.В. Антипов, В.А. Барвинок, В.Я. Белобрагин, В.В. Бойцов, В.А. Васильев, В.Г. Версан, Г.П. Воронин, Э. Деминг, Дж. Джуран, А.Я. Дмитриев, К. Исикава, В.Н. Козловский, Ф. Кросби, В.А. Лapidус, Б.С. Мигачев, Д.И. Панюков, Г. Тагути, А. Фейгенбаум, У. Шухарт и др.

Вопросами, связанными с проектированием аэрокосмических конструкций, технологическими процессами 3D-печати и ПКМ, занимались такие российские и зарубежные ученые как: Е.Т. Амитов, А.В. Болдырев, М. Бембенек, Д.В. Гусев, Л. Ифань, В.А. Комаров, А.А. Осколков, А. Панджич, Б. Ранкуи, В.Г. Смелов, С.А. Фрейлехман, А.И. Хаймович, Д.М. Хакулова, А.А. Хаширов, А.В. Чабаненко, Д. Шпиль, П. Шубхам, Ях Юн Ау.

**Целью исследования** является повышение качества деталей и узлов аэрокосмических конструкций из полимерных композиционных материалов, получаемых с использованием аддитивных технологий, за счет совершенствования модели обеспечения качества.

### **Задачи исследования**

1 Провести анализ работ по обеспечению качества и снижению рисков на стадиях проектирования и изготовления деталей и узлов аэрокосмических конструкций из полимерных композиционных материалов в условиях аддитивного производства.

2 Разработать функциональную модель обеспечения качества деталей и узлов аэрокосмических конструкций из полимерных композиционных материалов, получаемых с использованием аддитивных технологий, основанную на применении робастных методов и

подходов в совокупности с программными системами трехмерного проектирования и инженерного анализа.

3 Разработать методику анализа видов и последствий потенциальных несоответствий процесса 3D-печати (Additive Failure Mode and Effects Analysis, AFMEA).

4 Разработать методику нивелирования («компенсации») высокого уровня варибельности диаметра прутка филамента для обеспечения качества деталей и узлов аэрокосмических конструкций из полимерных композиционных материалов, основанную на применении статистических методов и экспериментальных исследований.

5 Разработать методику проектирования и изготовления деталей и узлов аэрокосмических конструкций из полимерных композиционных материалов в условиях аддитивного производства, основанную на применении робастных методов и подходов QFD, AFMEA, планирования экспериментов по методу Г. Тагути и методики нивелирования («компенсации») варибельности диаметра прутка филамента в совокупности с программными системами трехмерного проектирования и инженерного анализа.

6 Провести комплексную апробацию предложенных решений на базе Самарского университета и АО «РКЦ «Прогресс».

**Область исследования** соответствует п.1 «Методы анализа, синтеза и оптимизации, математические и информационные модели состояния и динамики процессов управления качеством и организации производства», п.3 «Научные основы и совершенствование методов стандартизации и менеджмента качества (контроль, управление, обеспечение, повышение, планирование качества) объектов и услуг на различных стадиях жизненного цикла продукции», п.7 «Научные основы управления рисками и предотвращения несоответствий в технических и организационных системах» направлений исследования паспорта научной специальности 2.5.22. Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства.

**Объектом исследования** являются детали и узлы аэрокосмических конструкций из полимерных композиционных материалов, получаемых с использованием аддитивных технологий.

**Предметом исследования** являются методы и модели обеспечения качества детали и узлы аэрокосмических конструкций из полимерных композиционных материалов, получаемых с использованием аддитивных технологий.

**Методы исследования.** Решение поставленных задач проведено на основе методологии Всеобщего управления качеством (TQM), процессного и системного подходов, метода развертывания функции качества (QFD), анализа видов и последствий потенциальных несоответствий (FMEA), планирования экспериментов по методу Г. Тагути, статистических методов управления качеством, методы квалиметрии, методов математического моделирования, а также на основе экспериментальных исследований с целью проверки адекватности теоретических положений.

**Научная новизна** диссертации заключается в разработке подходов и инструментария повышения качества деталей и узлов аэрокосмических конструкций из полимерных композиционных материалов, получаемых с использованием аддитивных технологий, и состоит в следующем:

1 Функциональная модель обеспечения качества деталей и узлов аэрокосмических конструкций из полимерных композиционных материалов, получаемых с использованием аддитивных технологий, основанная на применении робастных методов и подходов: QFD, FMEA, планирования экспериментов по методу Г. Тагути, отличающаяся одновременным применением экспертного параметрического проектирования характеристик деталей и узлов и процесса FDM 3D-печати и аналитического моделирования, позволяющего валидировать результаты проектирования.

2 Усовершенствованная методика анализа видов и последствий потенциальных несоответствий процесса 3D-печати (Additive Failure Mode and Effects Analysis, AFMEA), позволяющая комплексно анализировать 3 взаимосвязанных этапа: этапы проектирования, предпечатной подготовки, 3D-печати и учитывающая особенности аддитивного производства.

3 Методика нивелирования («компенсации») высокого уровня вариабельности диаметра прутка филамента для обеспечения качества деталей и узлов аэрокосмических конструкций из полимерных композиционных материалов, основанная на применении статистических методов и экспериментальных исследований.

4 Методика проектирования и изготовления деталей и узлов аэрокосмических конструкций из полимерных композиционных материалов в условиях аддитивного производства, основанная на применении робастных подходов: QFD, AFMEA, планирования экспериментов по методу Г. Тагути, методики нивелирования («компенсации») высокого уровня вариабельности диаметра прутка филамента в совокупности с программными системами трехмерного проектирования и инженерного анализа.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Разработанные функциональная модель и методики обеспечения качества обеспечивают выполнение требований потребителей к деталям и узлам аэрокосмических конструкций из полимерных композиционных материалов, получаемых с использованием аддитивных технологий, и снижает возможные риски появления несоответствий, как в конструкции, так и в процессах предпечатной подготовки и изготовления.

Практическая значимость заключается в обеспечении сквозного развертывания требований и качества системы проектирования, предпечатной подготовки и 3D-печати деталей и узлов аэрокосмических конструкций из полимерных композиционных материалов, получаемых с использованием аддитивных технологий. Предложенные функциональная модель и методики обеспечения качества используются в производстве АО «РКЦ «Прогресс».

#### **Положения, выносимые на защиту**

1 Функциональная модель обеспечения качества деталей и узлов аэрокосмических конструкций из полимерных композиционных материалов, получаемых с использованием аддитивных технологий.

2 Методика анализа видов и последствий потенциальных несоответствий процесса 3D-печати (Additive Failure Mode and Effects Analysis, AFMEA).

3 Методика нивелирования («компенсации») высокого уровня вариабельности диаметра прутка филамента.

4 Методика проектирования и изготовления деталей и узлов аэрокосмических конструкций из полимерных композиционных материалов в условиях аддитивного производства.

#### **Степень достоверности**

Достоверность научных положений, выводов и результатов исследования обеспечивается анализом существующих подходов к обеспечению качества деталей и узлов аэрокосмических конструкций из полимерных композиционных материалов, получаемых с использованием аддитивных технологий, валидацией предложенных моделей и методов, экспериментальными исследованиями, а также практикой их применения в АО «РКЦ «Прогресс».

#### **Апробация работы**

Основные результаты исследований диссертационной работы докладывались на конференциях: Всероссийская научно-техническая конференция «Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении» (ТулГУ, 2019 г., 2020 г., 2021 г., 2022 г., 2023 г.), Конкурс молодых ученых и конструкторов, работающих в Самарской области (2020 г., 2021 г., 2022 г., 2023 г.), IV Международная молодежная конференция «Новые материалы, подходы и технологии проектирования, производства и эксплуатации ракетно-космической техники» (МАИ, 2020 г.); Двдцатая международная научно-практическая конференция «Управление качеством» (МАИ, 2021 г.); II-я Международная конференция «Композитные материалы и конструкции» (МАИ, 2021 г.); 21-я Международная конференция «Авиация и космонавтика» (МАИ, 2022 г.).

## Публикации

Содержание диссертационной работы отражено в 16 работах, в том числе в 7 статьях, опубликованных в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК России, в 4 статьях Scopus и Web of Science.

## Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 185 наименований, трех приложений. Текст диссертации изложен на 174 страницах, содержит 89 рисунков и 22 таблицы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность выбранной темы исследования, сформулированы цель и задачи исследования, определены объект и предмет исследования, отражены научная новизна и практическая значимость, сведения об апробации и внедрении результатов исследования.

**В первой главе** проанализированы отечественный и зарубежный опыт применения FDM (Fused Deposition Modeling) 3D-печати в производстве деталей и узлов аэрокосмических конструкций, материалы (филаменты) для FDM 3D-печати, источники дефектов на этапах проектирования, предпечатной подготовки и FDM 3D-печати. Установлено, что:

а) FDM технология находит широкое применение в производстве деталей и узлов перспективных аэрокосмических конструкций благодаря разработкам новых полимерных материалов, упрочненного стекла и углеволокном;

б) дефекты деталей и узлов, полученных с помощью FDM технологии, могут быть вызваны как на этапе проектирования, так и на этапах предпечатной подготовки и изготовления – FDM 3D-печати.

Проведен теоретический анализ работ по обеспечению качества проектирования и изготовления деталей и узлов аэрокосмических конструкций в условиях аддитивного производства. Анализ показал, что преобладающее большинство отечественных и зарубежных исследований в области обеспечения качества деталей и узлов в условиях аддитивного производства посвящены:

– отдельным его этапам: проектированию, предпечатной подготовки и изготовлению, то есть не обеспечено сквозное развертывание требований и качества;

– конструкторским и технологическим методам и подходам обеспечения качества без применения современных методов и подходов обеспечения качества.

Таким образом, не обеспечено сквозное развертывание требований и качества и применение современных методов и подходов обеспечения качества, что приводит к увеличению сроков разработки и изготовления деталей и узлов аэрокосмических конструкций.

**Во второй главе** определены основные, дополнительные и уточнены специальные требования к деталям и узлам аэрокосмических конструкций, полученных методом аддитивных технологических процессов (таблица 1).

Таблица 1 – Требования к деталям и узлам аэрокосмических конструкций, полученных методом аддитивных технологических процессов

Основные требования	Дополнительные требования	Специальные требования
1	2	3
Внешний вид	Износостойкость	Радиационная стойкость
Геометрические размеры	Твердость	Стойкость к воздействию солнечных и галактических космических лучей
Химический и фазовые составы	Механические свойства для изделий со стенкой толщиной свыше 0,2 мм	Стойкость к электрофизическим воздействиям космического пространства

Продолжение таблицы 1

1	2	3
Предел текучести	Механические свойства при пониженных и повышенных температурах	Электропроводность
Относительное удлинение	Герметичность	Стойкость к воздействию статического электричества
Ударная вязкость	Микроструктура	Стойкость к термоциклированию
Пористость	Плотность	Вибрационная прочность
Эргономические свойства	Жаростойкость	Теплопередача
	Содержание газовых примесей	
	Коррозионная стойкость	

Разработана функциональная модель обеспечения качества деталей и узлов аэрокосмических конструкций из полимерных композиционных материалов в условиях аддитивного производства (рисунок 1). Новизна разработанной функциональной модели обеспечения качества заключается:

а) в комплексном подходе, основанной на применении робастных методов и подходов QFD, FMEA, планирование экспериментов по методу Г. Тагути в совокупности с программными системами трехмерного проектирования и инженерного анализа;

б) на этапе проектирования (моделирования) конструкции введены 3D-печать и испытания напечатанных образцов для получения робастного технологического режима 3D-печати на основе планирования экспериментов по методу Г. Тагути, позволяющий получить оптимальные механические свойства напечатанных деталей и узлов.

в) в обеспечении сквозного развертывания требований и качества аэрокосмических конструкций из полимерных композиционных материалов, получаемых с использованием аддитивных технологий.

Разработана методика анализа видов и последствий потенциальных несоответствий процесса 3D-печати (Additive Failure Mode and Effects Analysis, AFMEA) (рисунок 2). Новизна разработанной методики состоит:

а) в комплексном анализе 3 взаимосвязанных последовательных этапов: этап проектирования, этап предпечатной подготовки и этап 3D-печати. Одновременное проведение указанных трех этапов обусловлено прямым влиянием результатов проведения этапов друг на друга;

б) на этапе предпечатной подготовки введен новый элемент функционирования этапа процесса – структура 3D-модели, которая позволяет учитывать причины появления несоответствий построения «архитектуры» деталей и узлов;

в) разработана типовая шкала баллов значимости несоответствия с учетом особенностей аддитивного производства (таблица 2):

Таблица 2 – Типовая шкала баллов значимости несоответствия при AFMEA (фрагмент)

Последствие	Критерий значимости	Балл
Опасное без предупреждением	Очень высокий ранг значимости, когда напечатанная деталь/узел не соответствует требованиям технического задания	10
Опасное с предупреждением	Весьма высокий ранг значимости, когда напечатанные детали/узлы снижают безопасность работы изделия	9
Очень важное	Напечатанные детали/узлы работоспособны с высокой вероятности выхода из строя	8

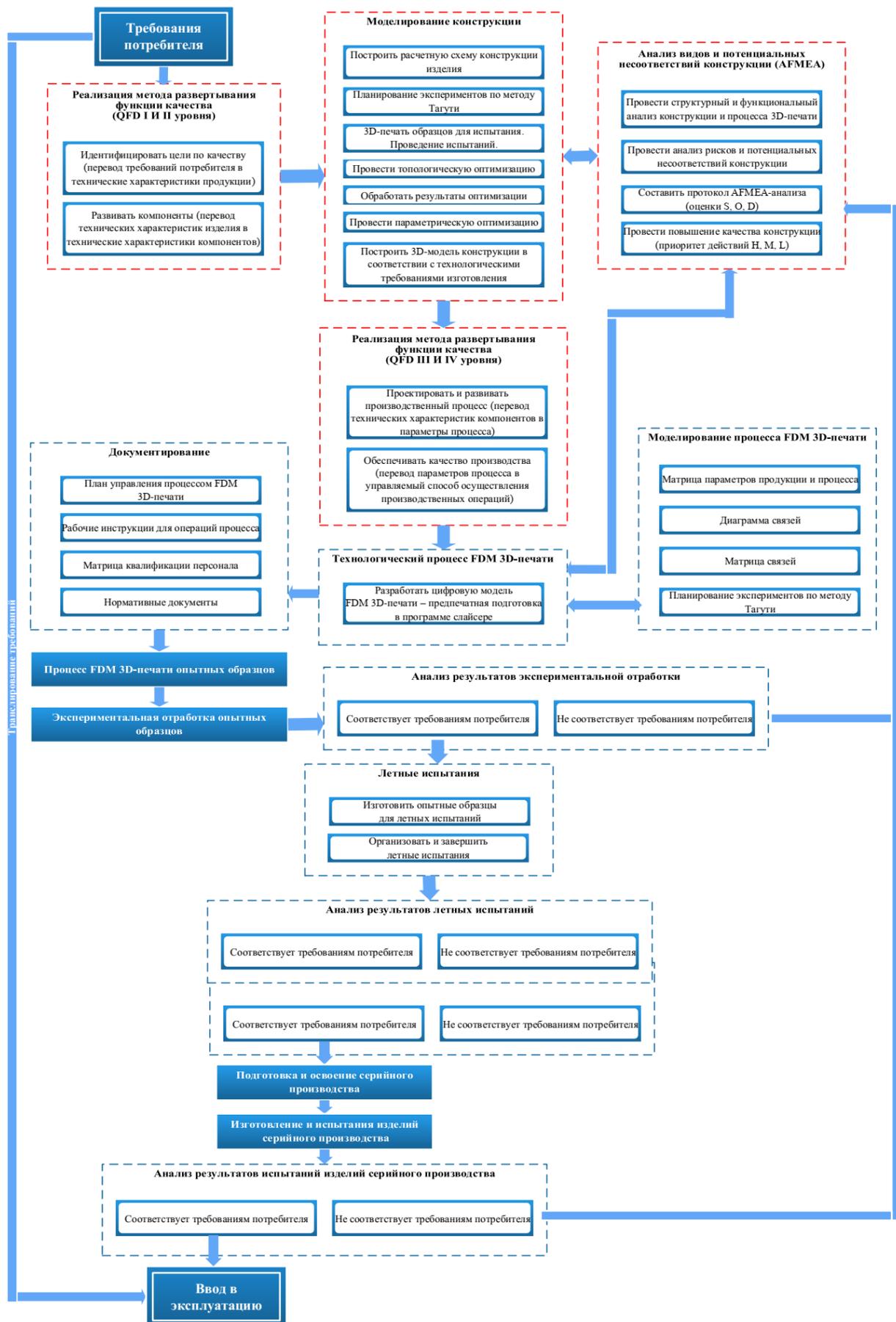


Рисунок 1 – Функциональная модель обеспечения качества деталей и узлов аэрокосмических конструкций из полимерных композиционных материалов в условиях аддитивного производства

г) разработана типовая шкала баллов возникновения несоответствия с учетом особенностей аддитивного производства (таблица 3).

Таблица 3 – Типовая шкала баллов возникновения несоответствия при AFMEA (фрагмент)

Вероятность несоответствия	Возможная частота несоответствия		Балл
Очень высокая: Несоответствие почти неизбежно	$\geq 40\%$	$\geq 40$ на 100 деталей	10
	$\geq 30\%$	$\geq 30$ на 100 деталей	9
Высокая: Повторяющиеся несоответствия	$\geq 25\%$	$\geq 25$ на 100 деталей	8
	$\geq 20\%$	$\geq 20$ на 100 деталей	7
Умеренная: случайные несоответствия	$\geq 15\%$	$\geq 15$ на 100 деталей	6
	$\geq 10\%$	$\geq 10$ на 100 деталей	5
	$\geq 5\%$	$\geq 5$ на 100 деталей	4

д) применена обобщенная количественная характеристика риска несоответствия – приоритетное число рисков совместно с показателями определения приоритета действий.

На рисунке 2 продемонстрирована выдержка из протокола AFMEA-анализа соединительного узла для монтажа датчика давления ракет-носителей.

Протокол AFMEA (Additive Failure Mode and Effects Analysis)				
Протокол анализа видов и потенциальных несоответствий 3D-печати				
Планирование и подготовка (Стадия 1)				
	Название организации	Самарский университет		
	Инженерная площадка	Кафедра ПЛА и УКМ		
	Потребитель	Отдел эксплуатации РКН АО "РКЦ "Прогресс"		
	Изделие	РН СК "Союз-5"		
	Объект	Соединительный узел для монтажа датчика		
	Постоянное улучшение	Структурный анализ (Стадия 2)		
№	История изменений, если приемлемо	1. Процесс создания детали, узла или изделия в условиях аддитивного производства	2. Этап процесса	3. Элемент функционирования этапа процесса (персонал, оборудование, структура 3D-модели, филамент, окружающая среда)
1		Проектирование, предпечатная подготовка и FDM 3D-печать соединительного узла для монтажа датчика давления в МБО РН СК "Союз-5" в условиях аддитивного производства	Проектирование соединительного узла для монтажа датчика давления в МБО РН	Персонал: 1.1 Инженер-конструктор

Рисунок 2 – Выдержка из протокола анализа видов AFMEA-анализа соединительного узла

В третьей главе разработана методика нивелирования («компенсации») высокого уровня вариабельности диаметра прутка филамента для обеспечения качества деталей и узлов аэрокосмических конструкций из полимерных композиционных материалов. Методика состоит из четырёх последовательных этапов.

На первом этапе проведена статистическая обработка замеров диаметра прутка филамента. Проведено 100 замеров диаметра прутка филамента с интервалом 10-15 мм. После отмотки 3000 мм прутка филамента проведено повторные 100 замеров с аналогичным интервалом. На основе проведенных замеров построены гистограммы частот появления значений замеров диаметра прутка филамента (рисунок 3, а) и график плотности нормального распределения Гаусса-Лапласа (рисунок 3, б).



Рисунок 3 – Результаты статистической обработки проведенных замеров: а) гистограммы частот появления значений замеров диаметра прутка филамента; б) график Гаусса-Лапласа

Среднее арифметическое значение первых 100 замеров диаметра прутка филамента составило 1,6713 мм, для вторых 100 замеров – 1,6811 мм. Согласно ГОСТ Р 59100-2020 предельное отклонение по диаметру 1,75 мм должно составлять  $\pm 0,03$  мм.

Продемонстрировано, что высокий уровень вариабельности диаметра прутка филамента обусловлен введением в матрицу филамента наполнителя из стекловолокна (рисунок 4).

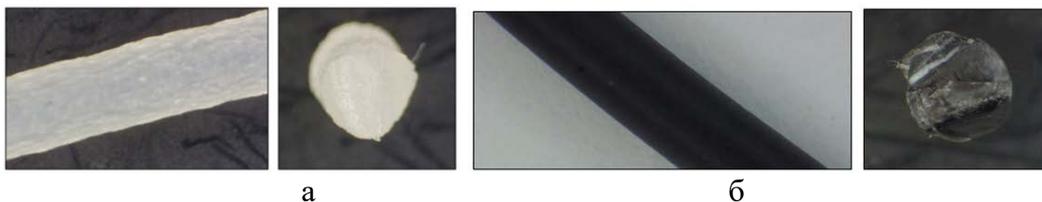


Рисунок 4 – Фотоизображения филаментов с микроскопа: а) полимерный композиционный материал (PA12 + GF12); б) акрилонитрил бутадиен стирол (ABS)

Высокие значения частоты появления интервалов размеров 1,63-1,66 мм и 1,65-1,68 мм приводят к недоэкструзии филамента (рисунок 5, а), которая в свою очередь приводит к понижению прочности напечатанных деталей. Как показала статистическая обработка (рисунок 3), недоэкструзия филамента достигает 40-50%.



Рисунок 5 – Фотоизображение первого слоя FDM печати образцов с микроскопа: а) первый слой FDM печати образца со стандартными настройками; б) первый слой FDM печати образца с коэффициентом потока  $K_F = 115\%$

На втором этапе проведен экспериментальный поиск технологических параметров FDM печати для нивелирования вариабельности диаметра прутка филамента.

Установлено, что наиболее эффективным способом нивелирования вариабельности диаметра прутка филамента является изменение в программе-слайсере параметра «Поток» во вкладке «Параметры печати» (рисунок 5, б). С увеличением коэффициента потока  $K_F$  значения параллельных  $Z_{\text{рmax}}$  и угловых  $Z_{\text{сmax}}$  зазоров и уменьшаются, вплоть до нулевого значения на 120-125% коэффициента потока  $K_F$  (рисунок 6).

На третьем этапе, используя найденные экспериментальным путем технологические параметры 3D-печати, напечатаны образцы для испытания на растяжение типа 1B в соответствии с ГОСТ 32656-2017 (ISO 527-4:1997, ISO 527-5:2009). Проведены испытания напечатанных образцов на растяжение.

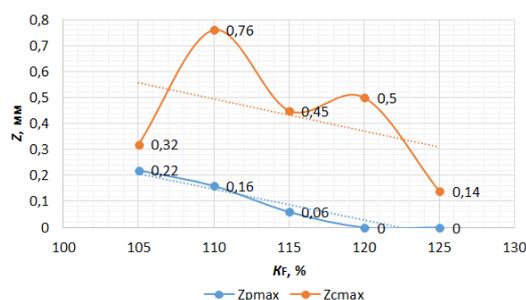


Рисунок 6 – Диаграмма зависимости зазоров  $Z_{pmax}$  и  $Z_{cmax}$  от коэффициента потока  $K_F$

Выявлено, что с увеличением коэффициента потока  $K_F$  средние значения площади прямоугольного сечения  $S_{mid}$  и массы  $m_{mid}$  увеличиваются и достигают максимальной величины при 125% значения коэффициента потока  $K_F$  (рисунок 7, а, б).

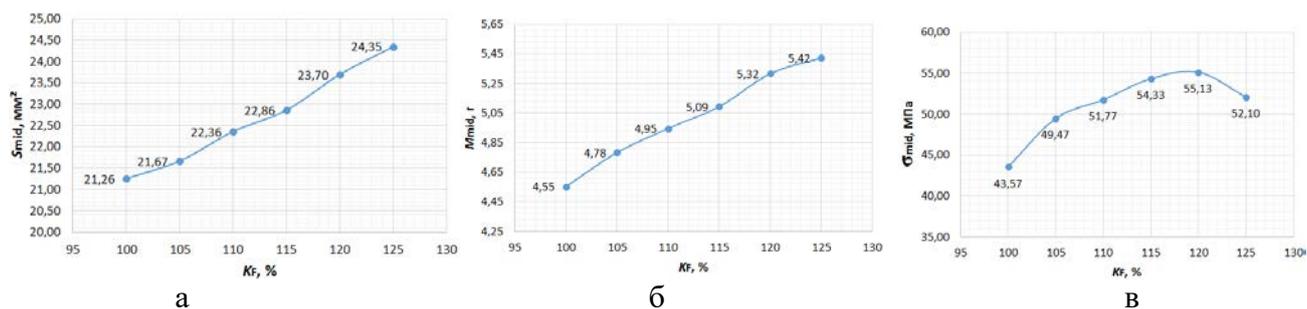


Рисунок 7 – Диаграммы зависимостей среднего значения площади прямоугольного сечения  $S_{mid}$  (а), среднего значения массы  $m_{mid}$  (б), среднего значения предела прочности  $\sigma_{mid}$  (в) от коэффициента потока  $K_F$

Выявлено, что среднего значения предела прочности  $\sigma_{mid}$  достигают максимальной величины при 115-120% значения коэффициента потока  $K_F$ , а при 125% идет понижение величины предела прочности  $\sigma_{mid}$  (рисунок 7, в).

На четвертом этапе даны рекомендации по выбору технологического режима. Наиболее оптимальный технологический режим FDM 3D-печати при вариабельности диаметра прутка филамента с 1,60 до 1,75 мм достигается при коэффициенте потока  $K_F$  равном 115%. При данном значении коэффициента потока  $K_F$  достигается оптимальное сочетание геометрических размеров образцов, массы и значения предела прочности  $\sigma_{mid}$ .

Новизна разработанной методики состоит в комплексном подходе, основанного на применении статистических подходов и выявленных закономерностях в результате экспериментальных исследований.

**В четвертой главе** разработана методика проектирования и изготовления деталей и узлов аэрокосмических конструкций из полимерных композиционных материалов в условиях аддитивного производства, основанная на применении робастных подходов: QFD, AFMEA, планирования экспериментов по методу Г. Тагути, методики нивелирования («компенсации») высокого уровня вариабельности диаметра прутка филамента в совокупности с программными системами трехмерного проектирования и инженерного анализа. Методика состоит из семи последовательных этапов.

В качестве объекта для демонстрации и отработки методики выбран соединительный узел межбакового отсека ракет-носителей серии «Союз», представляющий собой конструкцию, составными частями которой являются кронштейн, 2 хомута и монтируемый на них датчик давления. В качестве полимерного композиционного материала для изготовления кронштейна и хомутов, исходя из прочностных, эксплуатационных, технологических и стоимостных характеристик, выбран филамент, состоящий из нейлона PA12 и стекловолокна 12% GF. В

качестве аддитивного оборудования выбран FDM 3D-принтер картезианского типа – Flyingbear Tornado 2 PRO.

На первом этапе реализованы QFD I и II уровня для конструкции соединительного узла (рисунок 8).

Row#	Max Relationship Value in Row	Relative Weight	Weight / Importance	Quality Characteristics (a.k.a. "Functional Requirements" or "Hows")				
				Demanded Quality (a.k.a. "Customer Requirements" or "Whats")	Материал	Тип (традиционная или оптимизированная) конструкции	Уровень унификации материала для изготовления СЧ конструкции СУ	Уровень стандартизации и унификации деталей
1	3	11,5	10,0	Требования назначения	○	▲		
2	9	11,5	10,0	Прочность конструкции	○	○		
3	9	11,5	10,0	Жесткость конструкции	○	○		
4	9	10,3	9,0	Требования минимальной массы конструкции	○	○		
5	9	11,5	10,0	Требования живучести и стойкости к внешним воздействиям	○	▲		
6	9	9,2	8,0	Требования к технологичности	○	○	○	○
7	9	8,0	7,0	Требования к материалам	○	▲	○	○
8	3	5,7	5,0	Требования к транспортированию	○			
9	3	10,3	9,0	Экономические требования	○	○	○	○
10	3	10,3	9,0	Требования безопасности	○		▲	▲

Рисунок 8 – Матрица дома качества QFD I уровня (выдержка)

В результате проведения QFD I уровня выявлены наиболее важные характеристики конструкции соединительного узла, в наибольшей степени влияющие на прочность и жесткость конструкции, а также на выполнение других требований технического задания: материал конструкции и тип конструкции (оптимизированная или традиционная).

Для реализации (воплощения) характеристик качества соединительного узла (QFD I уровня) идентифицированы наиболее важные характеристики компонентов (составных частей соединительного узла) в результате проведения QFD II уровня: оптимизированная конструкция кронштейна соединительного узла и применение полимерных композиционных материалов.

На втором этапе построена расчетная схема конструкции соединительного узла и определена робастная комбинация технологических параметров FDM 3D-печати, полученная с помощью планирования экспериментов по Г. Тагути в соответствии с ГОСТ Р ИСО 16336-2020.

В качестве управляемых факторов приняты основные технологические параметры FDM 3D-печати:

- высота слоя печати (A): 0,1 мм, 0,2 мм, 0,3 мм и 0,4 мм;
- скорость печати (B): 40 мм/с, 50 мм/с, 60 мм/с и 70 мм/с;
- температура сопла экструдера (C): 250 С°, 255 С°, 260 С° и 270 С°;
- диаметр сопла экструдера (D): 0,5 мм, 0,6 мм, 0,8 мм и 1,0 мм;
- ориентация образца на рабочем столе (E): XY, YX, C + 45° от X, ZX.

В качестве дестабилизирующих факторов приняты:

- колебание температуры сопла экструдера (F): -3 С°, 0, +3 С°;
- колебание температуры рабочего стола (G): -3 С°, 0 С°, +3 С°;
- натяжение ремня передачи по оси X: недотяг, натяг, перетяг.

В качестве внутренней таблицы (плана) принята ортогональная матрица L16 (4<sup>5</sup>), а в качестве внешней таблицы L9 (3<sup>3</sup>). В качестве показателя механических свойств, и,

соответственно, отклика, принято значение предела прочности при растяжении, который является одним из ключевых требований к типовым соединительным узлам. В качестве объекта для FDM 3D-печати и последующих испытаний на растяжении принят образец для испытаний типа 1В в соответствии с ГОСТ 32656-2017 (ISO 527-4:1997, ISO 527-5:2009).

В таблице 2 представлена ортогональная матрица для планирования и проведения экспериментов с выходными экспериментальными данными и отклика.

Таблица 2 – Ортогональная матрица для планирования и проведения экспериментов

Внешняя матрица						F	1	1	1	2	2	2	3	3	3	Отклик	
						G	1	2	3	1	2	3	1	2	3		
Внутренняя матрица						Отклик, $y$ , $\sigma$ , МПа									Среднее квадр. откл. отклика $y$ , МПа	Сигнал / шум S/N, $\eta$ , дБ	
						Прогон	A	B	C	D	E	1	2	3			4
1	1	1	1	1	1	47,4	49,6	46,5	51,7	51,9	53,3	49,7	51,0	50,2	0,000599	32,22	
2	1	2	2	2	2	45,7	51,0	47,6	51,0	48,5	53,3	54,4	48,0	49,2	0,000608	32,15	
3	1	3	3	3	3	49,9	48,5	46,1	42,0	48,3	55,5	46,4	48,1	54,8	0,000641	31,93	
4	1	4	4	4	4	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	
5	2	1	2	3	4	18,4	19,1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	
6	2	2	1	4	3	58,3	53,8	53,6	60,7	54,8	56,8	54,0	59,5	55,7	0,000474	33,23	
7	2	3	4	1	2	51,8	48,8	46,5	48,6	52,1	53,7	48,7	49,2	49,0	0,000607	32,16	
8	2	4	3	2	1	49,3	48,7	47,8	49,9	43,3	50,7	42,8	51,1	45,3	0,000668	31,74	
9	3	1	3	4	2	52,0	56,9	53,5	51,0	53,4	52,4	54,1	51,5	53,6	0,000532	32,73	
10	3	2	4	3	1	48,4	51,0	48,8	51,7	51,6	51,1	47,8	51,5	51,4	0,000592	32,27	
11	3	3	1	2	4	19,6	19,6	19,9	21,8	–	–	–	–	–	–	–	
12	3	4	2	1	3	37,7	38,6	40,6	41,1	38,6	40,4	40,3	42,1	41,2	0,000937	32,27	
13	4	1	4	2	3	49,6	42,2	42,0	47,2	41,6	48,5	44,2	47,2	49,1	0,000727	31,38	
14	4	2	3	1	4	19,3	17,2	20,7	17,1	16,3	18,2	16,3	19,3	14,9	0,004925	23,07	
15	4	3	2	4	1	37,8	32,4	30,5	26,8	27,3	30,7	26,4	26,3	27,3	0,001790	27,46	
16	4	4	1	3	2	28,8	26,4	31,3	31,6	29,6	32,0	29,2	26,1	28,4	0,001776	27,50	

В таблице 4 необходимо отметить, что прогоны № 5 и 11 проведены частично, а прогон №4 не проведен в связи с деформациями образца.

Отношение сигнал/шум S/N,  $\eta$ , вычислено по следующей формуле:

$$\eta = -10 \log \hat{\sigma}^2 = 10 \log \frac{1}{\hat{\sigma}^2},$$

где  $\hat{\sigma}$  – среднее квадратичное отклонение обратной величины отклика  $y$ , которое вычисляется по формуле:

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n} \left( \frac{1}{y_1^2} + \frac{1}{y_2^2} + \dots + \frac{1}{y_n^2} \right),$$

где  $n$  – число уровней фактора шума.

Результаты проведения планирования экспериментов по методу Г. Тагути показали, что наиболее высокий уровень робастности и значения показателя прочности обладает прогон № 6.

На третьем этапе проведено моделирование соединительного узла с помощью метода топологической оптимизации в САПР КОМПАС-3D v12 (рисунок 9).



Рисунок 9 – Моделирование соединительного узла в САПР КОМПАС-3D v12

На четвертом этапе проведен AFMEA-анализ конструкции соединительного узла (рисунок 2). За счет введения предупреждающих мероприятий удалось значительно снизить значения приоритетного числа риска возникновения потенциальных несоответствий:

а) разработка методики нивелирования («компенсации») высокого уровня вариабельности диаметра прутка филамента позволила снизить значение приоритетного числа риска с 240 баллов до 48;

б) разработка методики проектирования и изготовления деталей и узлов аэрокосмических конструкций из полимерных композиционных материалов в условиях аддитивного производства снизила значение приоритетного числа риска с 560 баллов до 40 и т.д.

На пятом этапе проведена предпечатная подготовка 3D-модели соединительного узла и хомутов в программе-слайсере UltiMaker CURA 5.2.1. На данном этапе определена структура (заполнение, линии стенки и дна и т.д.) и способ построения соединительного узла. Технологические параметры FDM 3D-печати выбраны по результатам планирования экспериментов по методу Г. Тагути.

На шестом этапе реализованы QFD III и IV уровня. В результате проведения QFD III уровня для реализации изготовления оптимизированной конструкции кронштейна соединительного узла из полимерных композиционных материалов выявлена необходимость применения 3D-печати.

В результате проведения QFD IV уровня для обеспечения качества FDM 3D-печати кронштейна соединительного узла выявлена необходимость использования:

– методики нивелирования («компенсации») высокого уровня вариабельности диаметра прутка филамента;

– AFMEA-анализа.

На заключительном седьмом этапе, предварительно просушив филамент, проведена FDM 3D-печать соединительного узла (рисунок 10).



Рисунок 10 – FDM 3D-печать кронштейна и хомутов соединительного узла

Спроектированная и изготовленная конструкция соединительного узла обладает меньшей массой (на 30%) по сравнению с используемыми в настоящее время соединительными узлами на ракетах-носителях серии «Союз».

Новизна разработанной методики проектирования и изготовления состоит:

а) в применении AFMEA-анализа;

б) на этапе проектирования конструкции введены 3D-печать и испытания напечатанных образцов для получения оптимальных механических свойств на основе планирования экспериментов по методу Г. Тагути.

в) в применении методики нивелирования («компенсации») высокого уровня вариабельности диаметра прутка филамента.

**В заключении** приведены основные результаты и выводы исследования, подтверждающие положения, выносимые на защиту, определены перспективы дальнейшего изучения проблемы.

### **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

Решена важная научно-практическая задача в области повышения качества аэрокосмической техники и достигнута цель исследования по повышению качества деталей и узлов аэрокосмических конструкций из полимерных композиционных материалов в условиях аддитивного производства. Решены следующие задачи:

1 Проведен теоретический анализ работ по обеспечению качества проектирования и изготовления деталей и узлов аэрокосмических конструкций из полимерных композиционных материалов в условиях аддитивного производства.

2 Разработана функциональная модель обеспечения качества деталей и узлов аэрокосмических конструкций из полимерных композиционных материалов, получаемых с использованием аддитивных технологий, которая, как показали результаты апробации в АО «РКЦ «Прогресс», позволила сократить сроки разработки и изготовления деталей и узлов в условиях аддитивного производства на 20-30% за счет сквозного развертывания требований и качества.

3 Разработана методика анализа видов и последствий потенциальных несоответствий процесса 3D-печати (Additive Failure Mode and Effects Analysis, AFMEA), позволяющая комплексно анализировать 3 взаимосвязанных этапа: этапы проектирования, предпечатной подготовки, 3D-печати. На этапе предпечатной подготовки введен новый элемент функционирования этапа процесса – структура 3D-модели, позволяющая анализировать построение «архитектуры» детали или узла. Разработаны новые шкалы баллов значимости и возникновения несоответствия с учетом особенностей аддитивного производства. Снижено среднее значение приоритетного числа риска возникновения потенциальных несоответствий с 281 до 44 баллов.

4 Разработана методика нивелирования («компенсации») высокого уровня вариабельности диаметра прутка филамента для обеспечения качества деталей и узлов аэрокосмических конструкций из полимерных композиционных материалов, позволяющая сократить количество дефектных напечатанных деталей и узлов на 40%.

5 Разработана методика проектирования и изготовления деталей и узлов аэрокосмических конструкций из полимерных композиционных материалов в условиях аддитивного производства, позволяющая увеличить значение ключевого требования к деталям и узлам аэрокосмических конструкций из полимерных композиционных материалов – значения предела прочности при растяжении, на 30% от среднего значения.

6 Проведена комплексная апробация предложенных решений на базе Самарского университета и АО «РКЦ «Прогресс».

7 Суммарный годовой экономический эффект от внедрения и использования разработанных модели и методик составляет 208 330,20 руб.

## **СПИСОК НАУЧНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Публикации в изданиях, рекомендуемых ВАК России**

1. Загидуллин, Р.С. Разработка модели обеспечения качества при проектировании, изготовлении, испытании изделий авиационно-космической техники / Р.С. Загидуллин, Т.А. Митрошкина, О.Ф. Садыков, М.В. Высоцкая, И.О. Нагурный, А.В. Горшков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – Вып. 12. – С. 27-33.

2. Загидуллин, Р.С. Современные методы улучшения качества проектирования специальной технологической оснастки для испытаний сборочно-защитного блока научно-энергетического модуля / Р.С. Загидуллин, П.В. Баринев, В.А. Буркова, С.В. Глушков, Т.А. Митрошкина // Качество и жизнь. – 2019. – №2 (22). – С. 44-53.

3. Загидуллин, Р.С. Совершенствование процесса градуировки датчиков тепловых потоков для термовакуумных испытаний космических аппаратов / Р.С. Загидуллин, Т.А. Митрошкина, М.В. Высоцкая // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2019. – Т. 22. – № 4. – С. 88-96.

4. Загидуллин, Р.С. Инжиниринг качества сельскохозяйственного беспилотного летательного аппарата / Р.С. Загидуллин, Т.С. Филиппова, А.Я. Дмитриев, // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – Вып. 5. – С. 543-548.

5. Загидуллин, Р.С. Экспериментальное исследование вариабельности диаметра прутка специального филамента / Р.С. Загидуллин, В.Д. Жуков, Н.В. Родионов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – Вып. 5. – С 228-234.

6. Загидуллин, Р.С. Экспериментальное исследование и способ повышения качества FDM 3D-печати за счет нивелирования вариабельности диаметра прутка филамента / Р.С. Загидуллин, В.Д. Жуков, Н.В. Родионов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – Вып. 5. – С. 265-271.

7. Загидуллин, Р.С. Экспериментальное исследование влияния коэффициента потока на прочность напечатанных деталей и узлов из полимерных композиционных материалов / Р.С. Загидуллин, А.В. Косенкова, В.А. Матвеев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – Вып. 7. – С. 210-215.

**Статьи в рецензируемых журналах, входящих в системы цитирования Web of Science и Scopus**

8. Zagidullin, R.S. Special Aspects of Quality Assurance in the Design, Manufacture, Testing of Aerospace Engineering Products / R.S. Zagidullin, A.Ya. Dmitriev, T.A. Mitroshkina // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 714 012006. DOI:10.1088/1757-899X/714/1/012006.

9. Zagidullin, R.S. Quality Function Deployment and design risk analysis for the selection and improvement of FDM 3D printer / R.S. Zagidullin, T.A. Mitroshkina, A.Ya. Dmitriev // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – Vol. 666 062123. DOI:10.1088/1755-1315/666/6/062123.

10. Zagidullin, R.S. Improving the quality of FDM 3D printing of UAV and aircraft parts and assemblies by parametric software changes / R.S. Zagidullin, N.I. Zezin, N.V. Rodionov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1027 012031. DOI:10.1088/1757-899X/1027/1/012031.

11. Zagidullin, R.S. Development of a methodology for eliminating failures of an FDM 3D printer using a «failure tree» and FMEA analysis / R.S. Zagidullin, D.V. Antipov, A.Ya. Dmitriev, N.I. Zezin // Journal of Physics: Conference Series.– 2021. – Vol. 1925 012085. DOI:10.1088/1742-6596/1925/1/012085.

#### **Статьи и материалы конференций**

12. Загидуллин, Р.С. Робастный подход совершенствования системы проектирования, изготовления, испытания изделий авиационно-космической техники в условиях аддитивного производства / Р.С. Загидуллин, Т.А. Митрошкина // IV Международная молодежная конференция «Новые материалы, подходы и технологии проектирования, производства и эксплуатации ракетно-космической техники»: сборник докладов. М. – 2020. – С. 210-213.

13. Загидуллин, Р.С. Проектирование перспективных изделий авиационно-космической техники на основе робастных подходов в условиях аддитивного производства / Р.С. Загидуллин, Д.В. Антипов // Двадцатая международная научно-практическая конференция «Управление качеством». М. – 2021. – С. 143-146.

14. Загидуллин, Р.С. Робастное проектирование при FDM 3d-печати деталей и узлов самолетов и БПЛА из полимерных композитных материалов / Р.С. Загидуллин, А.Я. Дмитриев // II-я Международная конференция «Композитные материалы и конструкции». М. – 2021. – С. 76-77.

15. Загидуллин, Р.С. Функциональная модель управления качеством изделий авиационно-космической техники в условиях аддитивного производства / Р.С. Загидуллин, Н.В. Родионов // 21-я Международная конференция «Авиация и космонавтика». М. 2022. – С. 329-331.

16. Загидуллин, Р.С. Повышение качества деталей и узлов аэрокосмических конструкций из полимерных композиционных материалов в условиях аддитивного производства / Р.С. Загидуллин, Н.В. Родионов // IV Всероссийская научно-техническая конференция «Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении» 18-20 апреля 2023 г.: сборник докладов. Тула: Изд-во ТулГУ, 2023. – С. 104-106.