

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ АКАДЕМИКА С. П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

На правах рукописи

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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель:
Дмитриев Александр Яковлевич,
кандидат технических наук, доцент

Самара – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 Анализ работ по обеспечению качеством проектирования и изготовления деталей и узлов аэрокосмических конструкций в условиях аддитивного производства.....	10
1.1 Применение FDM технологии в производстве аэрокосмических конструкций.....	10
1.2 Материалы для FDM 3D-печати.....	18
1.3 Источники дефектов на этапах проектирования, предпечатной подготовки и FDM 3D-печати	21
1.4 Особенности обеспечения качества проектирования и изготовления деталей и узлов аэрокосмических конструкций в условиях аддитивного производства	22
1.5 Робастные подходы к проектированию и изготовлению деталей и узлов аэрокосмических конструкций в условиях аддитивного производства.....	46
1.6 Выводы по главе 1. Постановка цели и задач исследования.....	53
2 Теоретические аспекты обеспечения качества проектирования и изготовления деталей и узлов аэрокосмических конструкций в условиях аддитивного производства.....	56
2.1 Планирование качества изделий авиакосмической техники в условиях аддитивного производства	56
2.2 Требования к деталям и узлам аэрокосмических конструкций в условиях аддитивного производства, полученных методом аддитивных технологических процессов.....	60
2.3 Разработка структурной модели аддитивного производства аэрокосмических конструкций	62
2.4 Разработка функциональной модели обеспечения качества деталей и узлов аэрокосмических конструкций в условиях аддитивного производства.....	64
2.5 Разработка методики анализа видов и потенциальных несоответствий 3D-печати (Additive Failure Mode and Effects Analysis, AFMEA)	69
2.6 Выводы по главе 2.....	76

3	Разработка методики нивелирования («компенсации») высокого уровня вариабельности диаметра прутка филамента для обеспечения качества деталей и узлов аэрокосмических конструкций из ПКМ.....	79
3.1	Статистическая обработка замеров диаметра прутка полимерных композиционных материалов для FDM 3D-печати	79
3.2	Экспериментальный поиск технологических параметров FDM печати для нивелирования вариабельности диаметра прутка филамента.....	86
3.3	Испытания напечатанных образцов на растяжение	88
3.3	Выводы по главе 3.....	89
4	Разработка методики проектирования и изготовления деталей и узлов аэрокосмических конструкций из полимерных композиционных материалов в условиях аддитивного производства.....	90
4.1	Выбор объекта для демонстрации и отработки методики.....	90
4.2	Выбор полимерного композиционного материала для изготовления типового соединительного узла изделий авиационно-космической техники	92
4.3	Выбор FDM 3D-принтера для изготовления типового соединительного узла из полимерных композиционных материалов для изделий авиационно- космической техники	98
4.4	Реализация функции развертывания качества QFD I и II уровня.....	106
4.5	Расчетная схема конструкции кронштейна СУ	111
4.6	Определение робастной комбинации технологических параметров FDM 3D- печати деталей и узлов аэрокосмических конструкций из ПКМ.....	112
4.6.1	Выбор технологических параметров FDM 3D-печати.....	112
4.6.2	FDM 3D-печать образцов для испытания.....	117
4.6.3	Испытания напечатанных образцов на прочность при растяжении.....	126
4.7	Моделирование конструкции СУ	128
4.8	AFMEA-анализ конструкции соединительного узла	132
4.9	Предпечатная подготовка 3D-модели соединительного узла	132
4.10	Реализации функции развертывания качества QFD III и IV уровня	134
4.11	Расчет экономической эффективности	136
4.11.1	Расчет экономического эффекта.....	136

4.11.2 Расчет затрат на выполнение исследования.....	139
4.12 Выводы по главе 4.....	142
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	144
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	147
ПРИЛОЖЕНИЕ А Функциональная модель обеспечения качества деталей и узлов аэрокосмических конструкций в условиях аддитивного производства	172
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Дерево отказов процесса FDM 3D-печати деталей и узлов ...	173
ПРИЛОЖЕНИЕ В Протокол AFMEA-анализа соединительного узла	174

ВВЕДЕНИЕ

На предприятиях авиакосмической отрасли ускорилось внедрение аддитивных технологий, что обусловлено достижениями в области производства металлических и полимерных композиционных материалов (ПКМ). 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 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 в условиях аддитивного производства и, соответственно, новые 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 изделий из ПКМ, 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.

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

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

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

В соответствии с вышепоставленной целью поставлены следующие **задачи исследования**:

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

2) Разработать функциональную модель обеспечения качества деталей и узлов аэрокосмических конструкций из ПКМ, 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 вариабельности диаметра прутка филамента для обеспечения качества деталей и узлов аэрокосмических конструкций из ПКМ, основанная на применении статистических методов и экспериментальных исследований.

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

6) Провести комплексную апробацию предложенных решений на базе Самарского национального университета имени академика С.П. Королева (Самарский университет) и АО «Ракетно-космический центр «Прогресс».

Научная новизна диссертационного исследования заключается в разработке подходов и инструментария повышения качества деталей и узлов аэрокосмических конструкций из ПКМ, получаемых с использованием аддитивных технологий, и состоит в следующем:

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

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

3) Методика нивелирования («компенсации») высокого уровня variability диаметра прутка филамента для обеспечения качества деталей и узлов аэрокосмических конструкций из ПКМ.

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

Теоретическая значимость заключается в том, что разработанные функциональная модель обеспечения качества и методики обеспечивают выполнение требований потребителей к деталям и узлам аэрокосмических конструкций из ПКМ, получаемых с использованием аддитивных технологий, и снижает возможные риски появления несоответствий, как в конструкции, так и в процессе 3D-печати.

Практическая значимость заключается в обеспечении сквозного развертывания требований и качества системы проектирования, предпечатной подготовки и 3D-печати деталей и узлов аэрокосмических конструкций из ПКМ, получаемых с использованием аддитивных технологий, на основе робастных подходов: QFD, AFMEA, планирования экспериментов по методу Г. Тагути и методов математического моделирования.

Предложенные функциональная модель обеспечения качества, методика нивелирования диаметра прутка филамента обеспечения качества, методика проектирования и изготовления деталей и узлов аэрокосмических конструкций из ПКМ, получаемых с использованием аддитивных технологий, основанные на применении робастных методов и подходов: QFD, AFMEA, планирования экспериментов по методу Г. Тагути в совокупности с системами трехмерного проектирования и инженерного анализа апробированы и внедрены в производство АО «Ракетно-космический центр «Прогресс».

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, методов математического моделирования, а также на основе экспериментальных исследований с целью проверки адекватности теоретических положений.

Положения, выносимые на защиту:

1) Функциональная модель обеспечения качества деталей и узлов аэрокосмических конструкций из ПКМ, получаемых с использованием аддитивных технологий, основанную на применении робастных методов и подходов.

2) Усовершенствованная 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 для обеспечения качества деталей и узлов аэрокосмических конструкций из ПКМ.

4) Методика проектирования и изготовления деталей и узлов аэрокосмических конструкций из ПКМ в условиях аддитивного производства, основанную на применении робастных методов и 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.

Достоверность научных положений, выводов и результатов исследования обеспечивается анализом существующих подходов к обеспечению качества деталей и узлов аэрокосмических конструкций из ПКМ, экспериментальными исследованиями, а также практикой их применения в АО «Ракетно-космический центр «Прогресс».

1 Анализ работ по обеспечению качеством проектирования и изготовления деталей и узлов аэрокосмических конструкций в условиях аддитивного производства

1.1 Применение FDM технологии в производстве аэрокосмических конструкций

Аддитивные технологии порождают смену парадигмы, заменяя традиционные «вычитающие» (субтрактивные) и формообразующие технологии производства на «добавляющие» (additive). Такие известные зарубежные и отечественные компании-производители авиационно-космической техники, как Boeing, Airbus, SpaceX, Blue Origin, Rocket Lab, ПАО «Корпорация «Иркут», ПАО «Ил», АО «Вертолёты России» и другие, с каждым годом в конструкциях своих изделий наращивают количество деталей и узлов, изготовленных с использованием 3D-печати.

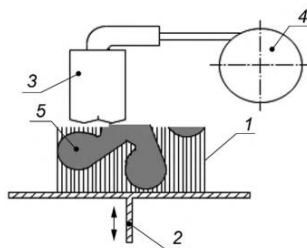
Согласно ГОСТ Р 57558-2017/ISO/ASTM 52900:2015 аддитивное производство (additive manufacturing) – это «процесс изготовления деталей, который основан на создании физического объекта по электронной геометрической модели путем добавления материала, как правило, слой за слоем, в отличие от вычитающего (субтрактивного) производства (механической обработки) и традиционного формообразующего производства (литья, штамповки)» [1].

Аддитивные технологии имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными технологиями [2-8]:

- возможность изготовления деталей и узлов сложной геометрической формы;
- возможность изготовления деталей и узлов с сетчатой и ячеистой структурой (соты, решетки, пенообразующие структуры);
- возможность объединения деталей в сборку и его изготовления как единой детали;

- сокращение производственного цикла изделия;
- исключение разработки и изготовления технологической оснастки и инструмента;
- сокращение производственных отходов, т.е. обеспечение экологичности;
- низкая себестоимость изготовления единичных изделий и малых партий изделий;
- низкие ресурсные и энергетические затраты;
- возможность создания функционально-градиентного распределения свойств материала (комбинации материалов) за счет изменения параметров процессов аддитивных технологий с целью получения необходимых функциональных показателей изделия;
- уменьшения влияния «человеческого фактора» при производстве изделия;
- гибкая перестройка производства на новое изделие.

В настоящее время наиболее распространенной и недорогой разновидностью аддитивных технологий является технология послойного наплавления (fused deposition modeling, или FDM) [9]. Технология FDM 3D-печати заключается в построении физического объекта по электронной геометрической модели путем экструзии материала. Экструзия материала (material extrusion) – это процесс аддитивного производства, в котором материал выборочно подается через сопло или жиклер [1]. Схема FDM 3D-печати продемонстрирована на рисунке 1.



- 1 – поддерживающая структура
- 2 – строительная платформа и подъемник
- 3 – подогреваемое сопло
- 4 – поставка сырья
- 5 – получаемый продукт

Рисунок 1 – Схема FDM 3D-печати [10]

С появлением и расширением ассортимента высокотемпературных полимерных и композиционных материалов для 3D-печати FDM технология находит широкое распространение в производстве деталей и узлов изделий авиационно-космической техники.

Группа инженеров из университета Шеффилда, Великобритания, спроектировала, изготовила с помощью FDM 3D-печати и успешно провела летные испытания планера беспилотного летательного аппарата (БПЛА) самолетного типа [11]. БПЛА университета Шеффилда продемонстрирован на рисунке 2.



Рисунок 2 – БПЛА университета Шеффилда [11]

Другим ярким примером использования FDM 3D-печати для создания планера БПЛА служит аппарат Aurora Flight Sciences [12]. На рисунке 3 продемонстрирован БПЛА Aurora Flight Sciences и его корпусные детали, изготовленные с помощью FDM 3D-печати.



Рисунок 3 – БПЛА Aurora Flight Sciences и его корпусные детали, изготовленные с помощью FDM 3D-печати [12]

FDM 3D-печать нашла широкое применение для изготовления воздухопроводов самолетов, а также вертолетов. Узлы и детали воздухопроводов, полученные с помощью FDM 3D-печати, используются в лайнерах Boeing 787, истребителях F/A-18, F-35 и вертолетах Bell 429 [13, 14]. На рисунке 4 изображены детали и узлы воздухопроводов указанных самолетов и вертолетов.



Рисунок 4 – Детали и узлы воздухопроводов, получаемые технологией FDM 3D-принтеров [13]

Компания United Launch Alliance с помощью FDM 3D-печати изготавливает воздухопроводы системы кондиционирования для усовершенствованной конструкции ракет-носителей Atlas V и Delta IV (рисунок 5).



Рисунок 5 – Элемент системы кондиционирования воздуха усовершенствованной конструкции ракет-носителей Atlas V и Delta IV [12].

Для самолетов Boeing 787 Dreamliner и Airbus A350 XWB с помощью FDM 3D-печати изготавливают патрубки авиадвигателя (рисунок 6).



Рисунок 6 – Патрубок авиадвигателя, изготовленный с помощью FDM 3D-печати [12]

Для самолета Airbus A320 с помощью с помощью FDM 3D-печати изготавливают распорные панели (рисунок 7).



Рисунок 7 – Распорная панель, изготовленная с помощью FDM 3D-печати [15]

В работе [16] сотрудники Калифорнийского государственного университета, США, продемонстрировали проектирование и изготовление уникальной конструкции трансформирующего крыла БПЛА, изготовленного с помощью FDM 3D-печати (рисунок 8).

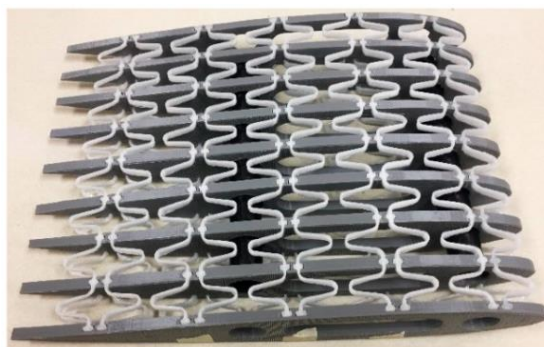


Рисунок 8 – Крыло БПЛА, изготовленное с помощью FDM 3D-печати [16]

В работе [17] продемонстрировано проектирование, изготовление и летные испытания винтов БПЛА, изготовленные с помощью FDM 3D-печати, и их (рисунок 9).

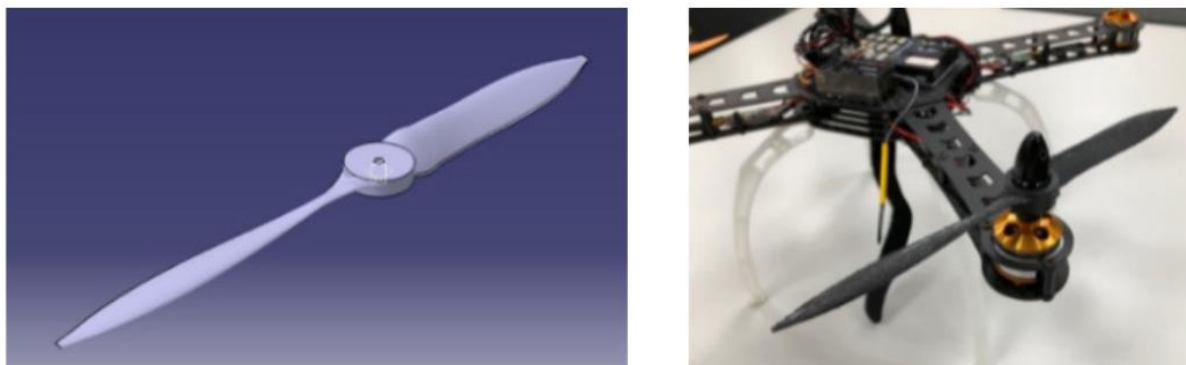


Рисунок 9 – Винты БПЛА, изготовленные с помощью FDM 3D-печати [17]

В работе [18] сотрудники Индийского института технологий продемонстрировали проектирование и изготовление планера БПЛА мульти-роторного типа, изготовленного с помощью FDM 3D-печати (рисунок 10).



Рисунок 10 – Планер БПЛА мульти-роторного типа, изготовленный с помощью FDM 3D-печати [18]

В работе [19] продемонстрировано возможность изготовления изделий для ракетно-космической техники с использованием FDM 3D-печати. Авторы исследования спроектировали, изготовили и провели успешные рабочие испытания заглушки сопла «мембранного» типа (рисунок 11).



Рисунок 11 – Заглушка сопла «мембранного» типа, изготовленная с помощью FDM 3D-печати [19]

В работе [20] сотрудники Центра космических исследований Польской академии наук изготовили и успешно провели огневые испытания малогабаритного гибридного ракетного двигателя многоступенчатой суборбитальной ракеты ILR-33 «Amber». Составной частью ракетного двигателя и объектом исследования является так называемое «топливное зерно», изготовленное с помощью FDM 3D-печати (рисунок 12).



Рисунок 12 – Топливные зерна ракетного двигателя, изготовленные с помощью FDM 3D-печати [20]

В работе [21] представлено изготовление и результаты успешно проведенных динамических испытаний первого российского космического аппарата «Томск-ТПУ-120», корпус которого был изготовлен с помощью FDM 3D-печати (рисунок 13).

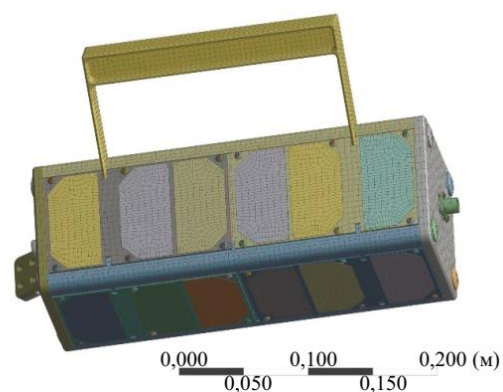
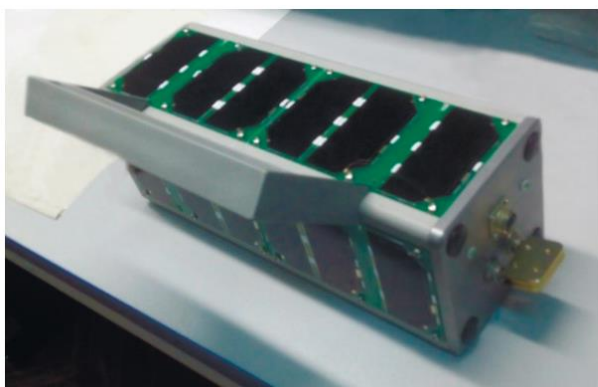


Рисунок 13 – Российский космический аппарат «Томск-ТПУ-120» [21]

17 августа 2016 г. состоялся запуск с борта Международной космической станции спутника «ТомскТПУ-120».

В работе [22] продемонстрировано изготовление и результаты успешно проведенных испытаний на термические и абляционные свойства опытных образцов теплоизоляционных экранов космических аппаратов, изготовленных из высокотемпературных полимеров с помощью FDM 3D-печати.

В работе [23] представлено изготовление и результаты успешно проведенных испытаний на волнопоглощающие и механические свойства поглотителя электромагнитных волн космических кораблей, изготовленного с помощью FDM 3D-печати (рисунок 14).

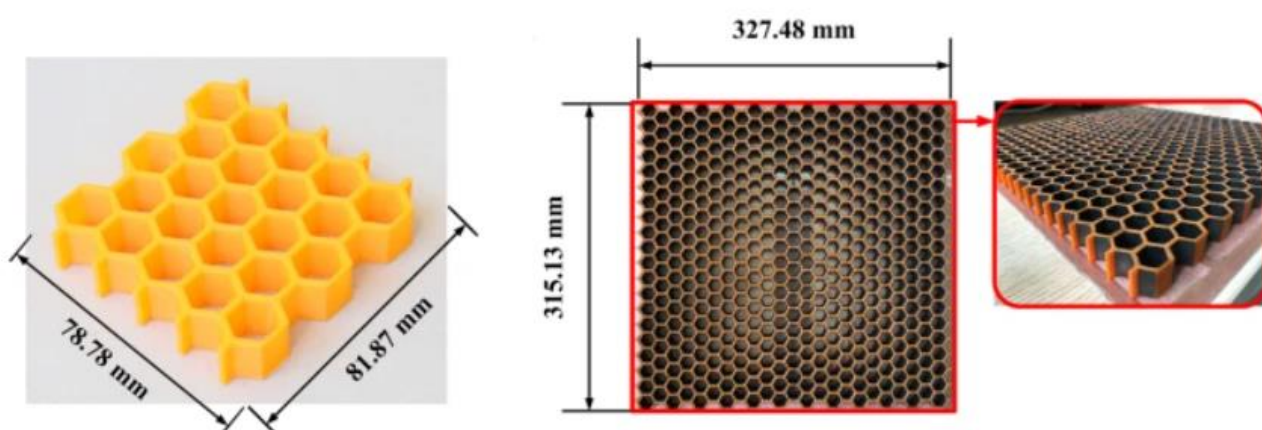


Рисунок 14 – Поглотитель электромагнитных волн космических кораблей, изготовленного с помощью FDM 3D-печати [23]

С помощью FDM 3D-печати изготовлены и установлены на космическом аппарате FORMOSAT-7 (США) 30 опор антенных решеток для метеорологических систем наблюдения (рисунок 15).

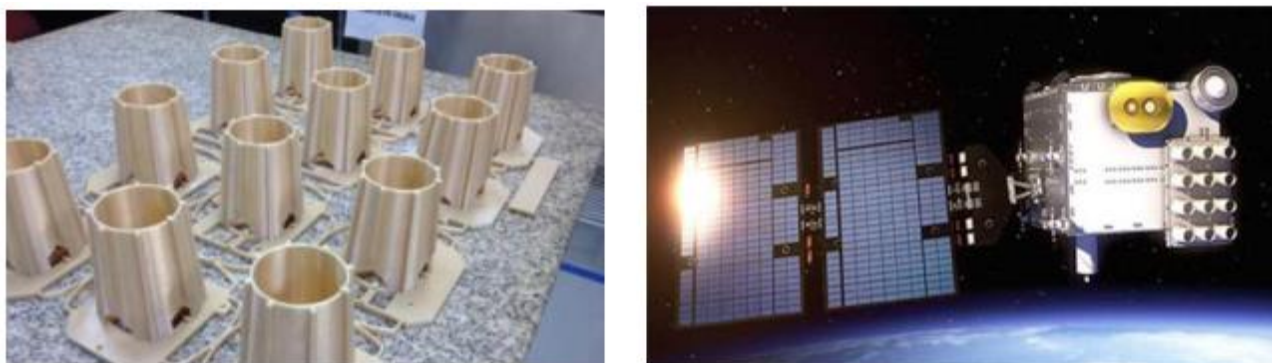


Рисунок 15 – Опоры антенных решеток на космическом аппарате FORMOSAT-7, изготовленных с помощью FDM 3D-печати [12]

Таким образом, как показывает теоретический анализ [3-23], FDM технология находит широкое применение в производстве деталей и узлов перспективных изделий авиационно-космической техники.

1.2 Материалы для FDM 3D-печати

На этапе проектирования деталей и узлов авиационно-космической техники для FDM 3D-печати крайне важно учесть физико-механические и химические свойства материалов. Материал, используемый для FDM 3D-печати, называют филаментом. Согласно ГОСТ 59100–2020 филамент это «нить калиброванного диаметра, получаемая непрерывным экструдированием пластмассы и композиций на ее основе, обычно наматываемая на катушку» [24]. Филамент изготавливают диаметрами 1,75; 2,85 и 3,00 мм или другими диаметрами по согласованию между изготовителем и потребителем. Предельное отклонение по диаметру $\pm 0,03$ мм. Филамент изготавливают из наполненных и ненаполненных пластмасс, таких как ударопрочный полистирол, полиэтилентерефталат, полипропилен, поликарбонат, полиэфирэфиркетон, акрилонитрилбутадиенстирол, полисульфон, полимолочная кислота, полиэфиримид, полиамид, стекло - и углеродонаполненные композиции

и другие пластмассы [25-32]. Филаменты обозначают в соответствии с ГОСТ 33366.1 [33].

Классификация филаментов, применяемых для FDM 3D-печати, представлена на рисунке 16.

В производстве авиационно-космической техники применяют главным образом инженерные и специальные филаменты. Инженерные, или конструкционные филаменты – это износостойкие, химически стойкие, ударопрочные полимеры, обладающие отличными электроизоляционными свойствами, антиадгезионными и теплоизоляционными характеристиками, способны воспринимать значительные механические нагрузки и функционировать в качестве готового изделия [34, 35].

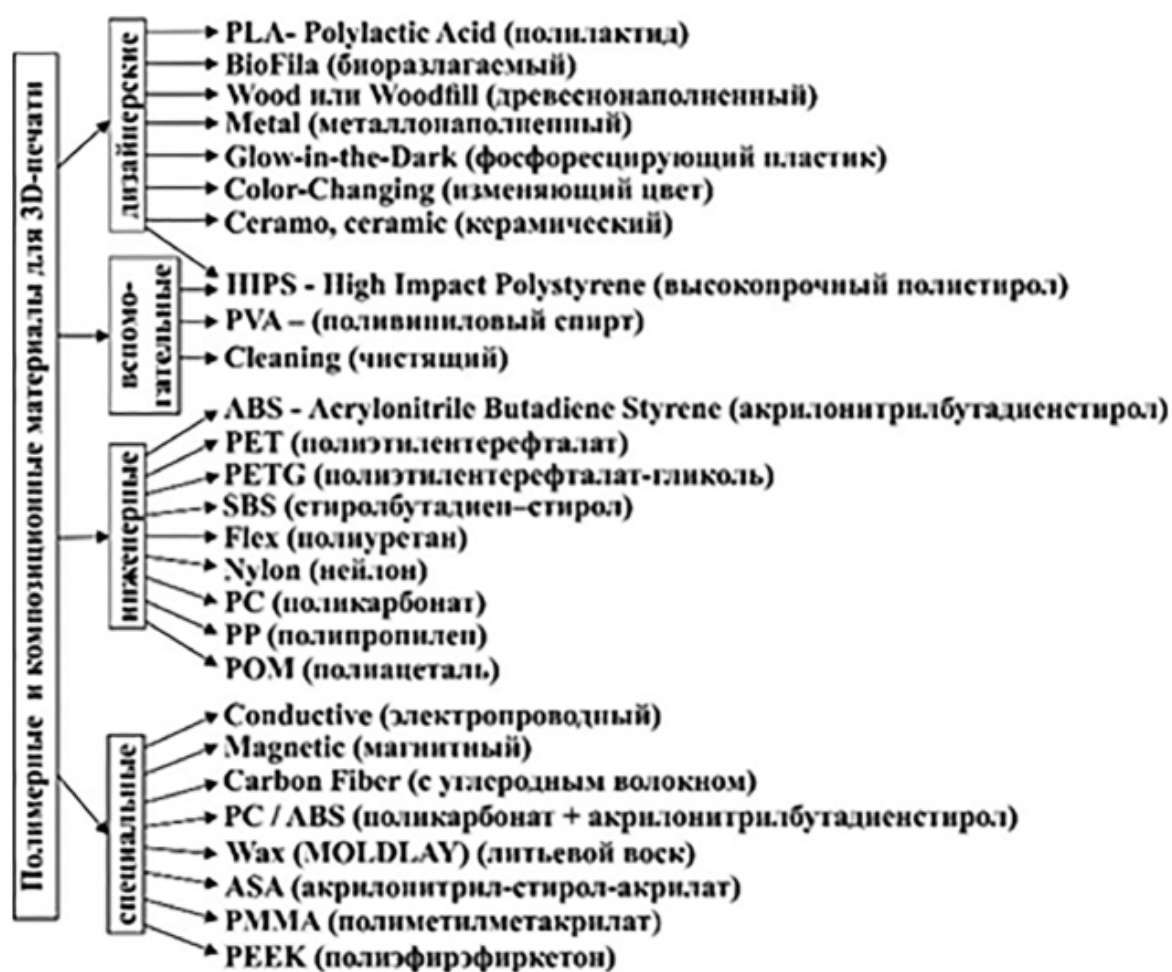


Рисунок 16 – Классификация филаментов, применяемых для FDM 3D-печати [34]

Наиболее распространенными инженерными филаментами являются акрилонитрилбутадиенстирол (ABS), полиэтиленгликольтерефталат-гликоль (PETG), нейлон (Nylon) и стиролбутадиен-стирол (SBS) [26, 35-38]. Указанные филаменты активно используются для изготовления (FDM 3D-печати) деталей и узлов гражданских БПЛА и малых космических аппаратов [11, 12, 16, 21, 38, 39].

Специальные филаменты применяются при повышенных физико-механических и химических требованиях к готовому изделию или обладающие специальными (уникальными) свойствами [34, 35]. Наиболее распространенными специальными филаментами являются поликарбонат/акрилонитрил-бутадиенстирол (PC/ABS), акрилонитрил стирол акрилат (ASA) полиэфирэфиркетон (PEEK), полиэфиримид (ULTEM 9085, ULTEM 1010) и полимерные материалы, упрочненные углеродом, углеродными нанотрубками или графеновыми наночастицами (Carbon Fiber) – полимерные композиционные материалы (ПКМ) [26-28, 40-43]. Для ПКМ в качестве полимерных связующих (матриц) преимущественно выступают ABS, PLA, Nylon, PETG и PEEK [44-51]. Специальные филаменты используются для FDM 3D-печати деталей и узлов гражданских и военных БПЛА и самолетов, а также ракет-носителей космического назначения и космических аппаратов [12, 17, 19, 52].

Среди специальных филаментов отдельно стоит отметить функциональные ПКМ, обладающие специальными (уникальными) свойствами: электропроводящие ПКМ, магнитпласты, теплопроводящие ПКМ и т.д. [24]. Для функциональных ПКМ в качестве матриц преимущественно выступают ABS, PLA и Nylon [53-55]. В качестве наполнителя для функциональных ПКМ, в зависимости какие уникальные свойства нужно получить, используются:

– многослойные углеродные нано трубки, графен, электропроводящая сажа, микрочастицы никеля, серебряные чешуйки для получения электропроводящих свойств [53, 55-58];

– частицы железа, состав MnAlC, NdPrFeCoTiZrB для получения магнитных свойств [59-61];

– частицы железа, меди, нитрид бора, наноалмазы для получения теплопроводящих свойств [62-64].

Функциональные ПКМ применяют для изготовления сенсоров для мониторинга перемещений, ускорения, емкости, температуры, а также элементы гибкой электроники, корпуса для защиты радиоэлектронных приборов от воздействия электромагнитного излучения, кронштейнов космических аппаратов для установки приборов [24]

Таким образом, как показывает теоретический анализ [24-31, 34-64], благодаря научным исследованиям и разработкам новых высокотемпературных полимерных и композиционных материалов для FDM 3D-печати, с каждым годом будет наблюдаться рост количества деталей и узлов, полученных с помощью FDM технологии, в конструкциях изделий авиационно-космической техники.

1.3 Источники дефектов на этапах проектирования, предпечатной подготовки и FDM 3D-печати

Вместе с тем, важно заметить, что конструктора, технологи и операторы аддитивного оборудования еще на этапе внедрения FDM 3D-печати в производство сталкиваются с различного рода дефектами или неудовлетворительными геометрическими параметрами напечатанных деталей и узлов [65-68]. Дефекты напечатанных деталей и узлов могут быть вызваны как на этапе проектирования, так и на этапах предпечатной подготовки и изготовления – 3D-печати деталей и узлов [69, 70].

На этапе проектирования дефекты напечатанных деталей и узлов могут вызвано неудовлетворительными геометрическими параметрами 3D-модели в соответствии технологическими требования изготовления – 3D-печати: минимальная толщина стенки, сглаживание углов, минимальный угол свеса для FDM 3D-печати и т.д. [71]. Кроме того, при проектировании деталей и узлов для FDM 3D-печати крайне важно учесть механические и физико-химические свойства материалов.

На этапе предпечатной подготовки дефекты могут быть вызваны неудовлетворительной калибровкой FDM 3D-принтера и выбранными параметрами в специализированном программном обеспечении: ориентация 3D-модели, генерация поддерживающих конструкций, высота слоя 3D-печати, угол для разброса старта пути и т.д. [72, 73].

На этапе изготовления – 3D-печати дефекты напечатанных деталей и узлов могут вызваны несовершенствами конструкции и ошибками в программном обеспечении FDM 3D-принтера, неудовлетворительными выбранными технологическими параметрами FDM 3D-печати: температура экструдера, температура платформы, скорость 3D-печати (скорость движения сопла экструдера), скорость вращения вентилятора охлаждения и т.д. [73-75].

На основании вышеизложенного следует, что дефекты деталей и узлов, полученных с помощью FDM аддитивных технологий, могут быть вызваны как на этапе проектирования, так и на этапах предпечатной подготовки и изготовления – 3D-печати. Следовательно, возникает необходимость обеспечить сквозное развертывание требований и качества системы проектирования, предпечатной подготовки и FDM 3D-печати.

В разделе 1.4 представлены Особенности обеспечения качества проектирования и изготовления изделий авиационно-космической техники в условиях аддитивного производства FDM 3D-печати.

1.4 Особенности обеспечения качества проектирования и изготовления деталей и узлов аэрокосмических конструкций в условиях аддитивного производства

Согласно ГОСТ Р 57586 – 2017 к изделиям, полученным методом аддитивных технологических процессов, устанавливаются следующие основные виды требований [76]:

- внешний вид;
- геометрические размеры;

- химический и фазовый составы;
- механические свойства;
- предел текучести или временное сопротивление;
- относительное удлинение и ударная вязкость;
- пористость.

Кроме основных требований, перечисленных выше, к изделиям, полученных методом аддитивных технологических процессов, могут устанавливаться дополнительные требования [76]:

- износостойкость;
- твердость;
- механические свойства для изделий со стенкой толщиной свыше 0,2 мм;
- механические свойства при пониженных и повышенных температурах;
- герметичность;
- микроструктура;
- плотность;
- жаростойкость;
- содержание газовых примесей и другие.

Специальные требования к изделиям, полученным методом аддитивных технологических процессов, устанавливают в конструкторской документации, в техническом условии, в техническом задании на изготовление изделий.

Несоответствие требований к изделиям могут привести различного рода дефекты или неудовлетворительные геометрические параметры [65-68]. Дефекты напечатанных деталей или узлов, как было указано в разделе 1.1, могут быть вызваны как на этапе проектирования, так и на этапах предпечатной подготовки и изготовления – FDM 3D-печати деталей и узлов. Следовательно, управление качеством изделий необходимо начинать и производить еще на этапе проектирования.

В работе [77] авторы рассмотрели особенности проектирования конструкций с применением генеративного дизайна для снижения массы изделий

авиационно-космической техники; произвели анализ программного обеспечения с учетом различной производственной технологичности итогов проектирования; сформулировали технологические рекомендации для заготовительного производства, а также для последующей механической обработки. В заключении своей работы авторы для проведения необходимых расчетов и разработки твердотельных моделей предложили использовать программное обеспечение Autodesk Fusion 360. Настройки способа изготовления в среде Fusion 360 позволяют повысить технологичность конструкции изделий для производства выбранным способом. Установочные поверхности заготовок, полученных 3D-печатью, авторы предложили дорабатывать фрезерованием.

В работе [78] авторы подробно рассмотрели методы обработки и преобразования 3D-модели сверхлегкого узла аэрокосмического назначения, полученного в результате топологической оптимизации (рисунок 17).

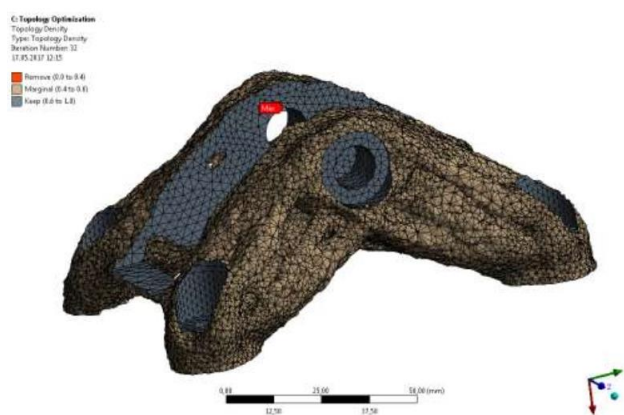


Рисунок 17 – Результаты топологической оптимизации крыла [78]

Результатом работы стала отработка технологии изготовления крыла навески с помощью FDM 3D-печати и разработка методики обработки результатов топологической оптимизации с учетом технологических ограничений, накладываемых методом изготовления.

В работе [79] авторы рассмотрели вопросы снижения массы панелей солнечных батарей с помощью метода топологической оптимизации с реализацией выбранной схемы методом FDM 3D-печати из композитных материалов, армированных непрерывным волокном. Результатом работы стала

разработка математической модели и расчёт конструкции каркаса с уменьшенной массой и повышенными физико-механическими характеристиками (рисунок 18).

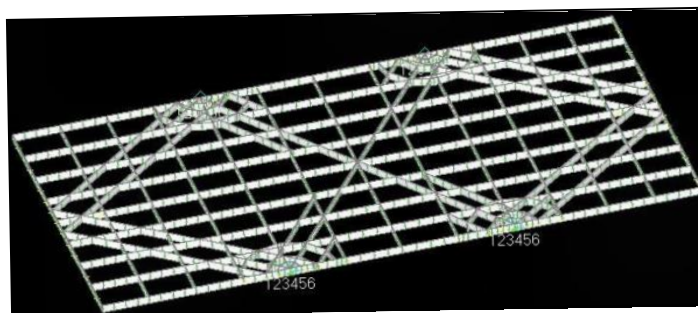


Рисунок 18 – Модель каркаса панелей солнечных батарей, созданная в среде Femap with NX Nastran [79]

В работе [80] авторы продемонстрировали расчетное и экспериментальное исследования изменения жесткости кронштейна трубопровода авиационного газотурбинного двигателя вследствие уменьшения его массы на 30 % с помощью топологической оптимизации. Для экспериментальной верификации результатов расчета перемещений под нагрузкой исходной и оптимизированной геометрии с помощью FDM 3D-печати были изготовлены две натурные модели кронштейна из полимерного материала ABS (рисунок 19).

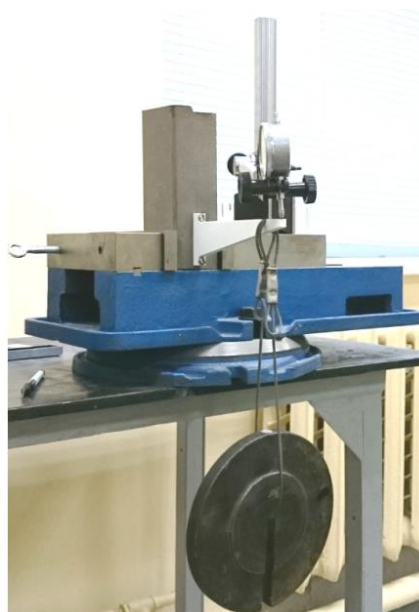


Рисунок 19 – Испытания топологически оптимизированного кронштейна трубопровода авиационного газотурбинного двигателя [80]

В работе [80] показана хорошая сходимость расчетного и экспериментального определения перемещений. Полученные в работе [80] расчетные и экспериментальные данные авторы рекомендуют использовать для верификации более сложных математических моделей, использующихся для решения задач статического нагружения деталей, изготовленных с помощью метода 3D-печати.

В работе [81] авторы рассмотрели теорию топологической оптимизации и произвели оптимизацию детали «Серьга» с последующим изготовлением на FDM 3D-принтере из полимерного материала полиамид PA12L 1600 (рисунок 20).

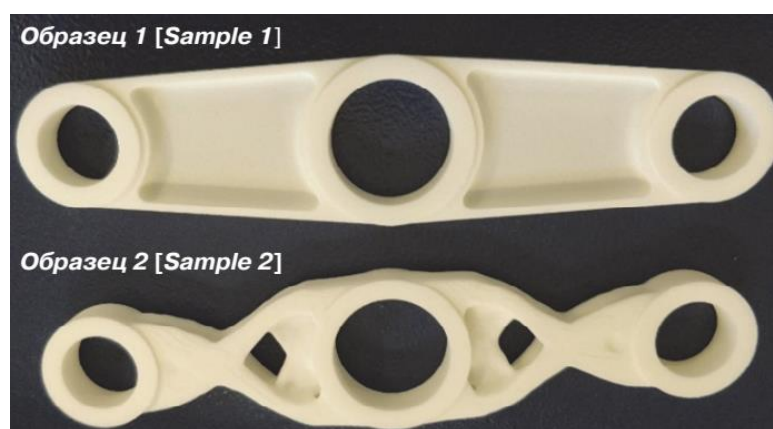


Рисунок 20 – Оптимизация детали «Серьга» с последующим изготовлением на FDM 3D-принтере [81]

Анализ полученных результатов в работе [81] показал пригодность применения топологической оптимизации при проектировании детали «Серьга»; более того, методика помогла существенно повысить характеристики детали.

В работе [82] авторы продемонстрировали разработку с помощью топологической оптимизации трех новых ауксетических структур, которые были изготовлены с помощью FDM 3D-печати из акрилонитрил-бутадиен-стирола – ABS. Изготовленные новые ауксетические структуры подверглись испытанию на сжимающие нагрузки. По результатам испытаний авторами было установлено, что все новые ауксетические структуры обладали превосходными свойствами по сравнению с обычной реентерабельной структурой (рисунок 21).

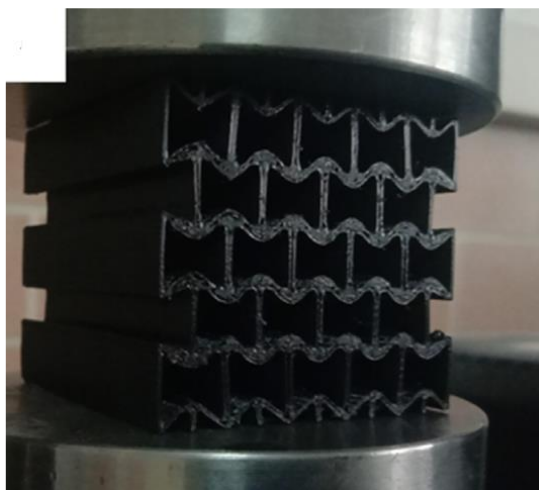


Рисунок 21 – Испытания новой ауксетической структуры, изготовленной с помощью FDM 3D-печати [82]

В работе [83] авторы представили алгоритм топологической оптимизации законцовки крыла электрического БПЛА на аналитической платформе ANSYS Workbench. Законцовки крыла БПЛА изготавливают с помощью FDM 3D-печати (рисунок 22).



Рисунок 22 – Законцовки крыла электрического БПЛА [83]

Авторы работы [83] установили, что с увеличением количества сеток увеличивается доля материала, который может быть удален в результате оптимизации. При размере ячеек 0,3 мм оптимизированный весовой процент составил 50,26%; то есть было удалено 49,74% материала по сравнению с исходного весом компонента (рисунок 23).

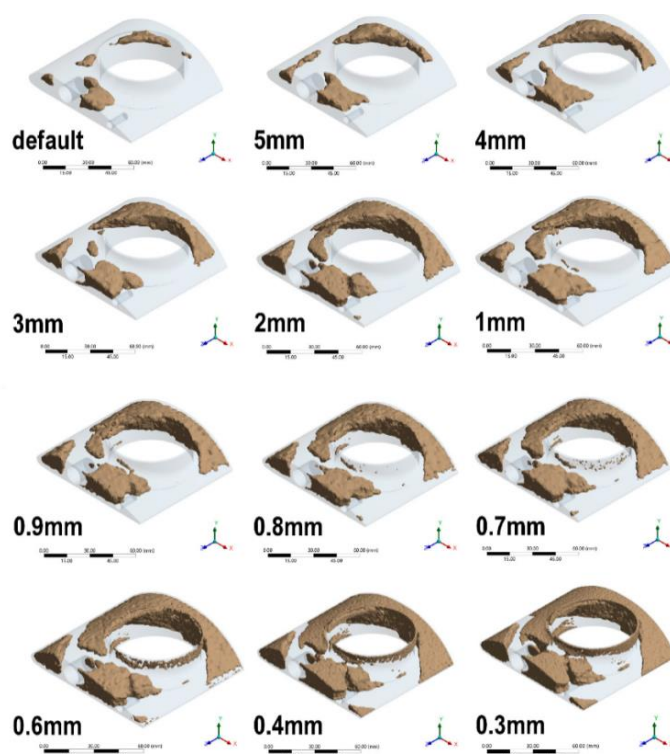


Рисунок 23 – Результаты оптимизации топологии с различными размерами глобальной сетки [83]

Дополнительно, авторы работы [83] провели испытания на растяжение тестовых образцов, изготовленных на FDM 3D-принтере из полилактида – PLA, из которого печатают вышеупомянутые законцовки крыла БПЛА. Использовались пять типов наполнителей, в частности сплошные, полые, косопоперечные, крестообразные и наклонно-наклонные. Установлено, что решетчатый способ заполнения обеспечивает более высокую прочность по сравнению с пустотелой конструкцией на 97,86%.

В работе [84] автор продемонстрировал алгоритм топологической оптимизации кронштейна авиационного двигателя с последующим его изготовлением на FDM 3D-принтере из ПКМ Опух – нейлона, армированного микроуглеродным волокном. Масса изготовленного на FDM 3D-принтере топологически оптимизированного кронштейна (рисунок 24) меньше на 80% оригинального кронштейна из титанового сплава Ti-6Al-4V.

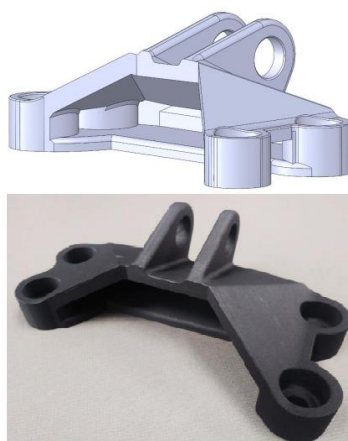


Рисунок 24 – Кронштейн авиационного двигателя, изготовленный с помощью FDM 3D-принтера из ПКМ Onyx [84]

В работе [85] представлен алгоритм оптимизации внутренней структуры изделия. В основе алгоритма оптимизации лежит использование изоповерхностей эквивалентных напряжений, полученных на предварительно рассчитанном напряженно-деформированном состоянии образца в упругой изотропной постановке. Работоспособность оптимизированной конструкции авторы работы [85] продемонстрировали численным моделированием в программной системе инженерного анализа ANSYS Workbench на примере задачи трехточечного изгиба. Дополнительно, авторами работы [85] приведено сравнение результатов численного моделирования, оптимизированного и монолитного образцов в упругой изотропной постановке (рисунок 25).

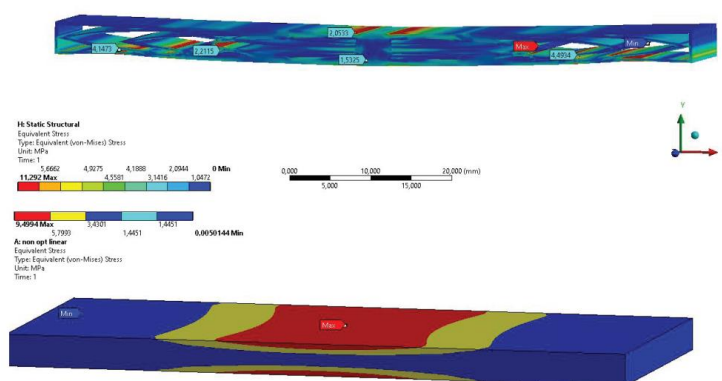


Рисунок 25 – Эпюра эквивалентных напряжений образца с оптимизированной внутренней структурой (сверху) и монолитного образца (снизу) [85]

Указанный алгоритм оптимизации внутренней структур позволяют проектировать изделия авиационной техники с пониженной массой при сохранении значений показателей прочности и жёсткости. Авторы работы [85] предлагают использовать свой алгоритм оптимизации для проектирования изделий, получаемый методом FDM 3D-печати.

В работе [86] авторы рассмотрели вопросы проектирования деталей с учетом трехмерной технологии их изготовления. В частности, проведен анализ процесса выбора параметров конструкции и технологических параметров FDM 3D-печати для получения готового изделия необходимых размеров и прочности. Авторами разработаны следующие рекомендации для проектирования изделий, полученных с использованием FDM 3D-печати:

- избегать использования технологических элементов;
- для нависающих конструкций применять переходы форм под углом нависания более 45° ;
- основная рабочая нагрузка детали должна быть параллельна технологической базе изделия;
- в эстетических целях фронтальную поверхность детали совместить с технологической базой;
- размеры отверстий, нормальных к технологической базе, конструировать с поправкой от $+0,2$ мм (натяг) до $+0,6$ мм (переходная) на линейный размер выемки (рисунок 26);
- толщина минимального элемента два диаметра сопла $+0,01$ мм;
- на стыках плоскостей целесообразно добавлять фаски или скругления.

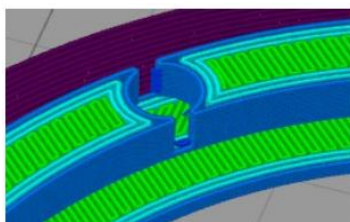


Рисунок 26 – Проблемные участки с неверно выбранной толщиной стенки элемента [86]

Авторы работы [86] утверждают, что разработанные ими рекомендации позволят избежать типичных ошибок и издержек при производстве качественных и надёжных изделий с применением FDM технологий.

В работе [87] авторы разработали и продемонстрировали новый подход к топологической оптимизации изделий, получаемых с помощью FDM 3D-печати из ПКМ, армированных углеродным волокном. Сущность нового подхода заключается в учете ориентации углеродного волокна в ПКМ и использования функции Matlab `fmincon`. Испытания опытных образцов на статическую нагрузку показали, что конструкции, полученные с использованием указанного подхода, работали лучше, чем те, которые были получены при традиционной топологической оптимизации изделий.

В работе [88] авторы представили численное и экспериментальное исследование топологической оптимизации с ограничениями по напряжению для FDM 3D-печати. Авторы использовали метод QR, чтобы избежать проблемы сингулярности при оптимизации топологии с ограничениями по напряжению. Кроме того, авторы исследовали влияние параметров FDM 3D-печати, таких как направление движения экструдера, ориентация 3D-модели на рабочем столе 3D-принтера и высота слоя печати, на прочность получаемых конструкций (рисунок 27).

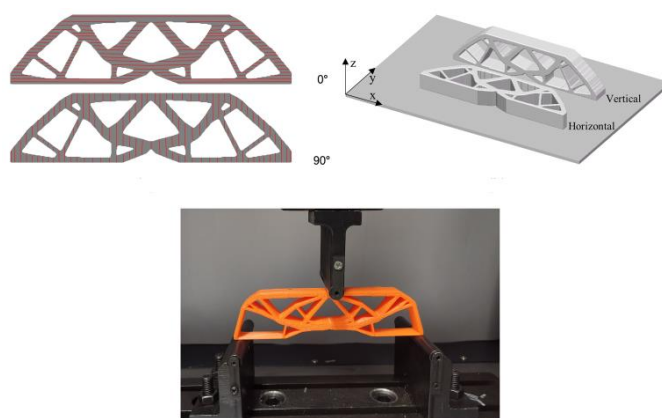


Рисунок 27 – Исследование влияния параметров FDM 3D-печати на прочность конструкции [88]

Установлено, что наибольшее влияние на прочность конструкций имеют направление движения экструдера и ориентация 3D-модели. Дополнительно, авторы работы [88] провели испытания на прочность напечатанных опытных образцов, полученных (сконструированных) с помощью топологической оптимизации с добавлением проекции Хевисайда. При этом наблюдалось лишь ограниченное улучшение прочности конструкции за счет увеличения сложности алгоритма оптимизации.

Таким образом, как показывает теоретический анализ отечественных и зарубежных научных работ [77-88], преобладающее большинство исследований в области обеспечения качества проектирования деталей и узлов в условиях аддитивного производства (FDM 3D-печати) посвящено конструкторским методам и подходам обеспечения качества, в частности качеству проведению (алгоритму) топологической оптимизации или его подходам.

В работе [89] на основе понятий проектного базирования авторы представили для аддитивного производства систему поддержки принятия решений для ориентации моделей деталей машин в рабочей зоне 3D-принтера, которая включает последовательное определение и идентификацию возможных составов баз ориентации поверхностей, определение параметров геометрической точности 3D-принтера, формирование базовой системы координат и ее привязке к системе координат 3D-принтера (рисунок 28).

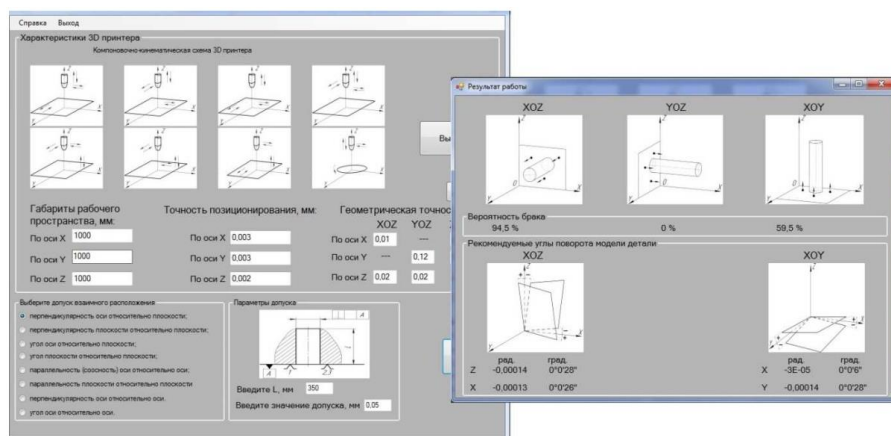


Рисунок 28 – Интерфейсы программного обеспечения системы поддержки принятия решений [89]

Автоматизированную систему поддержки принятия решений позволяет прогнозировать обеспечение точности допусков взаимного расположения поверхностей при FDM 3D-печати, рекомендовать варианты базирования моделей деталей в рабочей зоне 3D-принтера на основе анализа его геометрической точности для обеспечения допусков взаимного расположения и, как следствие, снизить вероятность печати деталей с дефектами.

В работе [90] авторы рассмотрели технологию FDM 3D-печати в рамках проблем, возникающих в процессе задания толщины слоя и контура внутреннего заполнения модели на этапе предпечатной подготовки. В процессе выполнения исследования, авторами проанализированы основные типы заполнения, применяемые в стандартных программах-слайсерах для FDM 3D-печати деталей и узлов сложных форм. Авторы утверждают, что детали и узлы с моделями заполнения Honeycomb, 3D Honeycomb, Cubic, Stars и Triangles представлены предельно прочными, однако плотность моделей заполнения Cubic, Stars и Triangles изображена сравнительно ниже, чем у заполнителей Honeycomb и 3D Honeycomb. При технических требованиях более плотной сетки (15–20%), длительность процесса FDM 3D-печати пропорционально увеличивается. С точки зрения качества итогового продукта FDM производства при скорости 70 мм/с, и времени печати лидирует модель заполнения Honeycomb.

Аналогичную работе [90] провели авторы работы [91], которые установили, что использование внутриконтурного заполнения в виде шестиугольных сот позволяет получить 15%-ный выигрыш по прочности (по сравнению с прямоугольными или ромбовидными сотами) при плотности заполнения 50%. Кроме того, авторы работ [91, 92] отметили нелинейный характер уменьшения прочности при уменьшении степени заполнения внутриконтурного пространства, что позволяет существенно снизить потребление филаментов и продолжительность 3D-печати.

В работе [93] авторы произвели изучение твердости изделий из филамента ABS пластика, напечатанных на 3D принтере PrismPro. В программе-слайсере для изделий задавались разная степень заполнения и высотой слоя печати:

- 1) 100 % плотность заполнения, высота слоя печати 0,1 мм;
- 2) 50 % плотность заполнения, высота слоя печати 0,1 мм;
- 3) 100 % плотность заполнения, высота слоя печати 0,4 мм;

Другие технологические параметры печати в программе-слайсере задавались для всех образцов одинаковые. Исследование твердости методом вдавливания шарика производилось на твердомере Бринелля ТШ-2. Результаты исследований показали, что образец №1 показал наиболее высокое значение твердости НВ 13,57. Образец №3 показал значение твердости НВ 11,16. Образец №2 в результате вдавливания шарика значительно деформировался и дальнейшее исследование его не производилось.

В работе [94] авторы с помощью 3D-принтера Ultimaker 3, регулируя настройки печати, получали стандартные лопатки из филамента ABS для испытаний при одноосном растяжении для установления технологических условий достижения максимальных значений деформационно-прочностных характеристик полимерных изделий, полученных методом FDM-печати. Авторы установили, что максимальная прочность отмечается в образцах со 100 %-й ориентированной структурой, которая превышает предел прочности филамента исходного ABS и соответствует прочности деталей, изготовленных методом литья под давлением. По мнению авторов, указанный упрочняющий эффект обусловлен проявлением ориентационного эффекта FDM-печати. Кроме того, авторами установлено увеличение относительного удлинения образцов с увеличением доли (0°) ориентированной структуры филамента, при этом деформационный показатель (около 5 %) образцов, полученных послойным наплавлением, уступает показателю относительного удлинения материала исходного филамента (более 9 %).

В работе [95] авторы представили программное обеспечение для предпечатной подготовки – программу-слайсер, который позволяет дополнительно проводить инженерный анализ для увеличения прочностных характеристик выводимой на печать модели через изменение структуры внешнего

контура модели и внутреннего заполнения с использованием алгоритмов для моделирования сетки Вороного (рисунок 29).

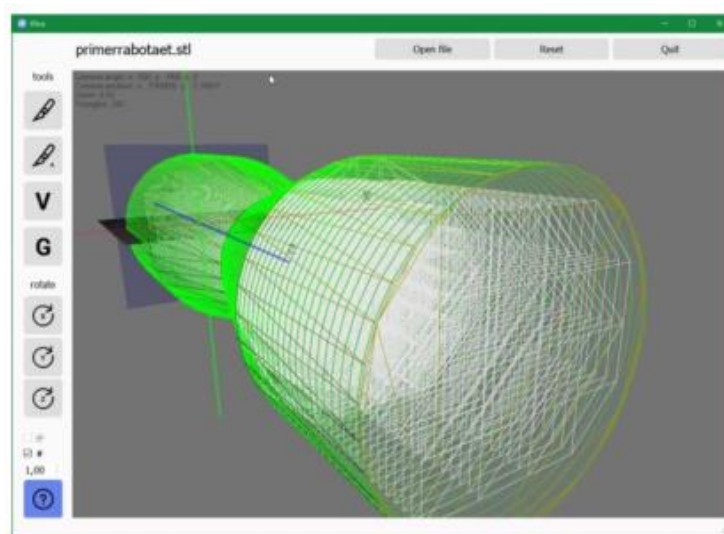


Рисунок 29 – Функционал приложения [95]

Разработанное авторами программное обеспечение позволяет сократить время печати посредством увеличения толщины слоя в структурных элементах с одинаковым значением контура при переходе со слоя на слой при 3D-печати деталей и узлов [95].

В работе [96] авторы рассмотрели проблему FDM 3D-печати «навесных» элементов форм без поддержки. Для компенсации этого недостатка приходится затрачивать существенные объемы растворимого филамента (обычно это поливиниловый спирт (PVA)). Авторы работы [96] предложили для решения указанной проблемы новый способ заполнения слоев печати филаментов, который заключается в том, что наращивание слоев печати осуществляется методом построения эквидистантных контуров. При таком подходе к уже напечатанному контуру будет присоединяться новый контур, проходящий лишь на некотором расстоянии от заданного. Последовательное наращивание подобных контуров позволяет сформировать плоскую область либо без необходимости поддержки, либо с поддержкой, но с существенно сокращенным количеством требуемого на такую поддержку материала. Авторами разработан оригинальный алгоритм формирования эквидистантных контуров на основе конструктивного

геометрического моделирования, обеспечивающий адекватное заполнение любых плоских замкнутых областей. Пример построения эквидистантного контура, выполненный в системе Симплекс представлен на рисунке 30.



Рисунок 30 – Построение эквидистантных контуров в системе Симплекс [96]

Конструктивная геометрическая модель позволяет динамически рассчитывать формы промежуточных контуров и сразу же на лету генерировать G-код для управления позиционирующими механизмами 3D-печати [96].

Авторы работы [97] А.С. Фарниев и П.А. Новиков описали математическую модель точности FDM 3D-печати профиля внутренней резьбы в зависимости от параметров деления 3D-модели на этапе предпечатной подготовки. Авторами описан дефект ступенчатости при FDM 3D-печати профиля внутренней резьбы и выведены формулы для расчета отклонений, вызванных данным дефектом. Математическая модель также описывает отклонения размеров выступов и впадин профиля резьбы, которые возникают в случае прилегания по середине выступа или впадины профиля резьбы двух соседних слоев, толщина которых превышает ширину выступа или впадины номинального профиля внутренней резьбы. Авторы установили, что наиболее рационально формировать детали с внутренними резьбами при помощи FDM 3D-печати, в том случае, когда толщина слоя печати меньше либо равна ширине впадины резьбы. Уже в следующей своей работе [98] А.С. Фарниев и П.А. Новиков для экспериментального подтверждения своей математической модели напечатали образцы из филаментов ABS, PLA и PETG, содержащие внутренние резьбы M14, M8 и M3. Профиль резьбы в

разрезанных образцах (рисунок 31) исследовались при помощи микроскопа БМИ-1.



Рисунок 31 – Опытный образец в разрезе [97]

Авторы работы [98] А.С. Фарниев и П.А. Новиков установили, что полученные с помощью FDM 3D-печати внутренние резьбы с толщиной слоя 150 мкм могут достигать 9-ой степени точности по среднему диаметру резьбы. Формирование с такой же толщиной слоя резьб МЗ приводит к значительным отклонениям, поскольку толщина слоя печати превышает ширину выступа и впадины профиля данной резьбы. Исходя из геометрических параметров резьбы МЗ для формирования ее профиля близким к номинальному толщина слоя печати не должна превышать 50 мкм. Точность внутренних резьб, получаемых с помощью FDM 3D-печати, А.С. Фарниев и П.А. Новиков в своей следующей работе [99] предлагают повысить при калибровке метчиками. При этом часть материала, вызывающая дефект ступенчатости профиля, срезается метчиками, и получаемый профиль приближается к номинальному.

В работе [100] авторами Зубрилинным А.В. и Тагильцевым М.В. рассмотрены основные этапы предпечатной подготовки для FDM 3D-печати и соответствующее программное обеспечение – программу-слайсер. Среди программ-слайсеров был выбрана оптимальная программа KISSlicer и на его примере проведена подготовка и нарезка модели для печати на FDM 3D принтере.

В работе [101] авторы рассмотрели математические и алгоритмические аспекты деления 3D-модели изделия в формате STL на слои на этапе предпечатной подготовки FDM 3D-печати и ошибки, возникающие при этом и способы их устранения. Авторы предложили для оптимизации традиционного подхода нарезания 3D-модели на слои, который заключается в построении по

принципу поиска пересечений фасетов изделия с секущими плоскостями, предварительное определение группы фасетов, пересекаемых плоскостью. Для этого необходимо из всех фасетов найти только те, у которых одна из вершин находится ниже секущей плоскости, а другая – выше (рисунок 32).



Рисунок 32 – Выделение отдельных фасетов для обработки [101]

В работе [102] авторы Янжи Сун, Чжоуван Ян, Юань Лю и Цзяньсун Дэн представили программный код слайсера для FDM 3D-печати, написанный ими для моделей представления функций (F-per). Программный код авторов реализует схему прямого среза для моделей F-per, которая позволяет избежать затратных с точки зрения оперативной памяти этапов создания промежуточных треугольных сеток. Интервальная арифметика в программном коде обеспечивает адаптивный механизм выборки, который является ключевой стратегией повышения эффективности за счет уменьшения количества точек выборки. Кроме того, авторы утверждают, что заложенные ими в программной коде алгоритм «движущиеся квадраты» и метод деления пополам гарантируют, что извлеченный контур является функциональным, что гарантирует точность и топологическую правильность.

В работах [103, 104] авторы для повышения качества деталей и узлов, получаемых с помощью FDM 3D-печати, предложили автоматизировать процесс выбора технологических параметров FDM 3D-печати на этапе предпечатной подготовки. Так в работе [103] авторы для подтверждения влияния температуры печати на сцепление слоев и достижение точности размеров провели теоретическое моделирование FDM 3D-печати с последующей

экспериментальной проверкой. Результаты своего исследования авторы работы [103] предложили адаптировать в программу-слайсер, так чтобы программа автоматически выбирала некоторые параметры печати для достижения желаемой точности размеров и сцепления слоев. В работе [104] авторы представили алгоритм выбора управляющих параметров технологии FDM 3D-печати для открытого программного кода FDM оборудования. Предлагаемый алгоритм состоит из выбора оптимальной плотности сетки 3D-, диаметра отверстия сопла экструдера, скорости подачи филамента и процента охлаждения (скорости работы вентилятора охлаждения). Авторы предложили свой алгоритм использовать для автоматизации программы-слайсера для выбора параметров печати.

Таким образом, как показывает теоретический анализ отечественных и зарубежных научных работ [89-104], преобладающее большинство исследований в области обеспечения качества предпечатной подготовки 3D-модели деталей и узлов для FDM 3D-печати посвящено технологическим методам и подходам обеспечения качества, в частности качеству проведения (алгоритма) подготовки 3D-модели к FDM 3D-печати в программе-слайсере или совершенствованию указанного программного обеспечения.

В работе [105] авторы представили исследование влияния технологических параметров FDM 3D-печати (температура сопла экструдера, толщина слоя, скорость перемещения экструдера) на прочность изделий в разных направлениях печати:

- 1) продольное направление;
- 2) поперечное направление;
- 3) направление синтеза.

В качестве филамента авторами выбран ABS отечественного производителя Res. Авторы сделали вывод, что при повышении температуры сопла экструдера, уменьшении скорости экструдера и увеличении толщины слоя прочность напечатанного материала увеличивается для всех трех направлений печати. По сравнению с исходным материалом, прочность напечатанных образцов

для продольного направления составляет 87-98%, для поперечного направления – 38-53% и для направления синтеза – 18-37%.

Аналогичная работе [105] проведена работа [106], где авторы изучили влияние технологических режимов (температура, скорость и ориентация печати: горизонтальная, вертикальная и боковая) и на изменение упруго-прочностных показателей FDM-печатных образцов. В качестве филамента для FDM 3D-печати авторами был выбран PETG. Авторы установили, что наиболее высокие упруго-прочностные показатели достигнуты при боковой ориентации печати. Предел прочности при растяжении для экспериментальных образцов, изготовленных по данной ориентации печати, превышает аналогичные показатели для горизонтальной печати на 14–59%; модуль упругости – на 14–26%. 3D-печать образцов при вертикальной ориентации приводит к существенному снижению предела прочности при растяжении, достигающему 20 – 45%. При этом изменение модуля упругости по сравнению с образцами, изготовленными при горизонтальной ориентации печати, не превышает 7%. В зависимости от ориентации, а также температуры и скорости печати наблюдается существенное варьирование свойств напечатанных образцов, достигающее для предела прочности, модуля упругости при растяжении, относительного удлинения при разрыве и максимальной растягивающей нагрузки (отношение максимального значения к минимальному), соответственно, 2,4; 1,3; 3,3 и 2,8 раз.

В работе [107] авторами описаны проблемы FDM 3D-печати, связанные с поведением расплава пластика в горячей части экструдера и скоростью печати. Авторы разработали для FDM 3D-печати экструдер нового типа, принцип работы которого основан на индукционном методе нагрева. Преимущества индукционного нагрева перед косвенным резистивным методом нагрева:

- 1) высокая удельная и пиковая мощность индуктора позволяют осуществлять высокоскоростной нагрев до высоких температур;
- 2) благодаря маленькой тепловой массе сопла (1,1 г) обеспечивается его быстрое охлаждение.

Авторы утверждают, что возможность высокоскоростного нагрева и охлаждения сопла позволяют обеспечить FDM 3D-печать с высокой скоростью при сохранении стабильности качества печати.

В работе [108] авторы Кудрявцев А.Р. и Журавлёв Д.А. изучали зависимость диаметров отверстия и наружного диаметра деталей типа «Кница» от температуры и сорта используемого филамента. Выявлена зависимость геометрических размеров деталей от изменения входных параметров. Авторы исследования выяснили, что на внутренние и внешние размеры деталей влияют разные факторы. На диаметр отверстия воздействует в большей степени вид филамента, а на внешний диаметр – температура сопла. Таким образом, для обеспечения размерной точности изготавливаемых деталей необходимо выбирать подходящий тип филамента и температуру сопла экструдера. Лучшие результаты показал филамент PETG при температуре сопла 235 °С.

Авторы работ [109, 110] исследовали влияние параметров технологического процесса FDM 3D-печати на механические характеристики деталей из специального филамента – полифениленсульфон (PPSU). В результате авторам удалось получить напечатанные образцы, характеристики которых (прочность при растяжении 64,5 МПа, модуль упругости 1725 МПа) практически совпадают с характеристиками материала, полученного способом литья под давлением.

Авторы работы [111] провели экспериментальные исследования влияния параметров технологического процесса FDM 3D-печати (температура сопла экструдера, скорость печати) и количества одновременно печатаемых деталей на механические характеристики филамента – полиамид PA6. Экспериментальные исследования авторов работы [111] показали, что повышение температуры сопла экструдера в пределах 240-265 °С ведет к повышению предела прочности при растяжении. Авторы утверждают, что оптимальной температурой FDM 3D-печати для филамента PA6 является 260 °С, дальнейшее повышение температуры приводит к повышению уровня внутренних напряжений. Наиболее оптимальные значения скорости FDM 3D-печати для филамента PA6 являются 30-40 мм/сек, дальнейшее повышение скорости печати ведет к понижению предела прочности при

растяжении. Кроме того, авторы работы [111] выявили, что увеличение количества одновременно печатаемых деталей до 5 единиц ведет к понижению предела прочности при растяжении (рисунок 33).

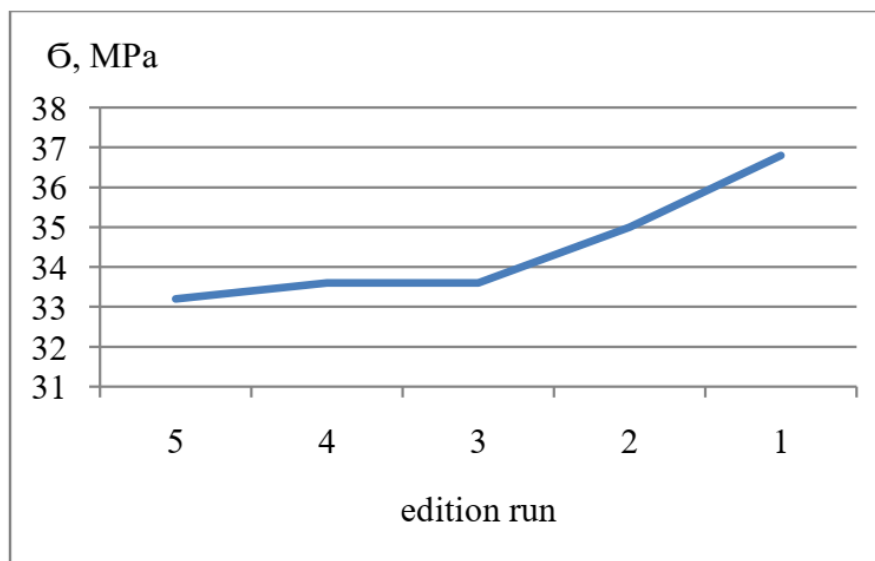


Рисунок 33 – Зависимость прочности на одноосное растяжение образцов из филамента РА6 от количества одновременно печатаемых деталей [111]

Авторы работы [111] пришли к выводу, что необходимо более детально изучить выявленную зависимость в своих будущих исследованиях (рисунок 33).

Авторы работы [112] исследовали влияние таких параметров FDM 3D-печати, как диаметр сопла, температура экструдера, высота слоя печати, количество внешних линий (линий контура детали), ширина и угол печати, на объем дефектов, относящихся к наличию пустот в напечатанных деталях. Авторы работы [112] выявили, что увеличение количество внешних линий (линий контура детали) при постоянной температуре, толщине, ширине, высоте, угла печати равной 45° и диаметре сопла 0,4 мм приводит к увеличению объема дефектов. При увеличении ширины печати при постоянных значениях вышеперечисленных параметров можно уменьшить общий объем дефектов, но увеличение ширины печати ограничено двумя факторами: диаметром плоской части сопла и плотностью экструдированного волокна (филамента), которая зависит от температуры экструдера. При одновременном увеличении диаметра сопла и высота слоя печати наблюдается уменьшение объема дефектов. Авторы работы

[112] дополнительно провели исследования влияния площади сечения геометрии заготовки на объем дефектов. Увеличение площади сечения заготовки при высоте слоя печати равной 0,15 мм, диаметре сопла и ширине 0,4 мм, угла печати равной 45° приводит к увеличению общего объема дефектов. Указанная зависимость начинает претерпевать серьезные изменения, когда значение площади сечения геометрии заготовки уменьшается до очень малых размеров (2 мм), где обнаружен пик объема дефектов (рисунок 34).

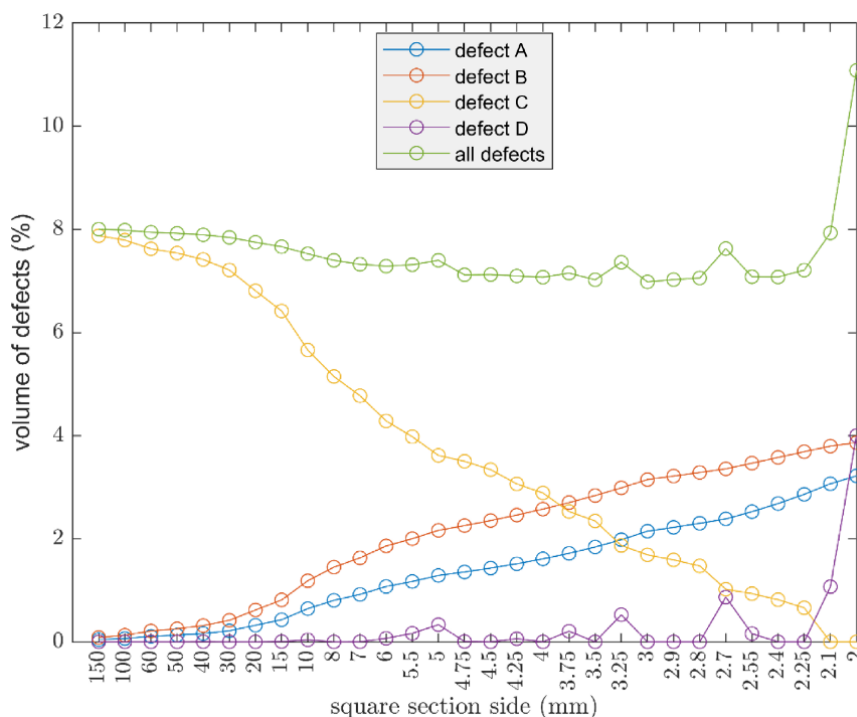


Рисунок 34 – Зависимость площади сечения геометрии заготовки и объема дефектов [112]

Авторы работы [113] провели экспериментальное исследование влияния таких технологических параметров FDM 3D-печати, как температура экструдера, температура рабочего стола и скорость печати на прочность сцепления (адгезионная сила) филаментов и синтетических тканей. С помощью FDM 3D-печати было произведено нанесение с филамента Nylon на ткани из полиамида 66 (PA66), PLA на ткани PA66, PLA на ткани из PLA, наноразмерная углеродная сажа/PLA (CB/PLA) и многослойные углеродные нанотрубки/PLA (CNT/PLA) на ткани из PLA. Авторы работы [113] выявили значительное линейное влияние

температуры экструдера и значительное влияние скорости печати на прочность сцепления филамента Nylon с тканью из PA66. Температура платформы не оказывает существенного влияния на силу адгезии, если она ниже температуры стеклования ткани. Эти явления можно объяснить с помощью теории диффузии. Филамент PLA, нанесенный на ткань из PA66, не обладает высокой силой сцепления, так как два полимера несовместимы. Адгезионная сила нанесенных филаментов PLA, CNT/PLA и CB/PLA на ткани из PLA имеет высокое значение во всех испытываемых образцах, что также можно объяснить с помощью теории диффузии. Адгезионная сила филамента CNT/PLA и ткани из PLA имеет более высокое значение, чем адгезионная сила филамента CB/PLA и ткани из PLA, которое вызвано большей величиной хрупкости.

Авторы работы [114] произвели исследование влияние таких технологических параметров FDM 3D-печати, как температура сопла, температура рабочего, скорость печати и толщина слоя, на механические свойства (прочность на растяжение, прочность на изгиб и ударную вязкость) и микроструктуру филамента PEEK, упрочненного углеродом (CF/PEEK) и стекловолокном (GF/PEEK) с процентным массовым содержанием 5%. Авторы [114] выявили, что значения прочности на растяжение и на изгиб филаментов CF/PEEK и GF/PEEK растут с увеличением температуры сопла и рабочего стола, соответственно. Однако на ударные характеристики филаментов температура сопла и рабочего стола влияет незначительно. Температура сопла и рабочего стола равная 440 °C и 280 °C, соответственно, обеспечивает самые высокие комплексные механические свойства напечатанных филаментов CF/PEEK и GF/PEEK. Увеличение скорости печати и толщины слоя отрицательно сказывается на всех механических свойствах филаментов CF/PEEK и GF/PEEK. Оптимальные механические свойства достигаются при скорости печати и толщине слоя 5 мм/с и 0,1 мм, соответственно.

Авторы работы [115] исследовали механические свойства напечатанных деталей из филамента PLA, армированного древесным волокном, при различных скоростях печати в диапазоне 30-70 мм/с. Результаты исследования показали, что

плотность напечатанных детали увеличивалась по мере снижения скорости печати, а цвет поверхности становился темнее, чем у деталей, напечатанных с высокой скоростью. На прочность при растяжении и изгибе напечатанных деталей скорость печати не оказала значительного влияния, в то время как значение прочности при сжатии значительно уменьшилась на 34,3% при увеличении скорости печати с от 30 до 70 мм/с. Кроме того, авторы работы [115] установили, что время печати уменьшалось с увеличением скорости печати, однако разница в проценте экономии времени при заданной скорости печати была сравнительно небольшой независимо от размера печатаемой детали.

Как показывает теоретический анализ отечественных и зарубежных научных работ [105-115], преобладающее большинство отечественных и зарубежных исследований в области управления качеством изготовления деталей и узлов в условиях аддитивного производства (FDM 3D-печати) посвящено технологическим методам и подходам обеспечения качества, в частности, качеству проведению исследований влияния технологических параметров печати (скорость печати, температура сопла, температура рабочего стола и т.д.) на характеристики качества напечатанных деталей и узлов (прочность, плотность, шероховатость, пористость и т.д.).

Таким образом, преобладающее большинство отечественных и зарубежных исследований [77-115] в области обеспечения качества деталей и узлов в условиях аддитивного производства (FDM 3D-печати) посвящены отдельным его этапам:

- 1) конструкторским методам и подходам обеспечения качества на этапе проектирования;
- 2) качеству проведения (алгоритма) подготовки 3D-модели к FDM 3D-печати в программе-слайсере на этапе предпечатной подготовки;
- 3) технологическим методам и подходам обеспечения качества на этапе изготовления – 3D-печати.

Практически отсутствуют исследования в области обеспечения качества деталей и узлов в условиях аддитивного производства (FDM 3D-печати), которые посвящены сквозному развертыванию требований и качества системы

проектирования, предпечатной подготовки и изготовления (3D-печати) на основе таких современных методов и подходов менеджмента качества, как робастные подходы.

В разделе 1.5 представлены результаты теоретического анализа исследований, посвященных робастным подходам к проектированию и изготовлению деталей и узлов изделий авиационно-космической техники в условиях аддитивного производства.

1.5 Робастные подходы к проектированию и изготовлению деталей и узлов аэрокосмических конструкций в условиях аддитивного производства

Согласно ГОСТ Р ИСО 16336-2020 Статистические методы. Применение к новым технологиям и процессу разработки продукции. Робастное параметрическое проектирование (RPD) слово «робастный» означает минимальную вариабельность функции продукции при вариации факторов шума, то есть нечувствительность функции продукции к изменениям уровней факторов шума [116].

Отношение сигнал/шум является количественной мерой робастности.

Сигнал – это входной фактор (входная переменная) системы, который пользователь намеренно изменяет для получения ожидаемого отклика в отношении вход-выход [116].

Шум – это фактор, который нарушает функцию системы [116].

Функция – это действия, которые выполняет система для достижения своей цели [116].

Методология робастного параметрического проектирования заключается в использовании эффективных методов достижения робастности: развертывания (структурирование) функции качества (QFD), анализа видов и последствий потенциальных несоответствий (FMEA), планирования экспериментов по методу Гэньити Тагути [116-120].

QFD (Quality Function Deployment) – метод, целью которого является преобразование голоса потребителя (требований и ожиданий) в технические характеристики продукции и рабочие инструкции, визуализация и документирование планирования качества продукции [117].

FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) – метод, целью которого является улучшение на основе анализа потенциальных несоответствий с количественным анализом последствий и причин несоответствий [117].

Проводят FMEA-анализ как конструкции изделия – DFMEA-анализ (анализ видов и последствий потенциальных несоответствий конструкции), так и технологического процесса – PFMEA-анализ (анализ видов и последствий потенциальных несоответствий технологических процессов).

PFMEA (Process Failure Mode and Effects Analysis) – метод, целью которого является улучшение процесса на основе анализа потенциальных несоответствий процесса с количественным анализом последствий и причин несоответствий [117].

DFMEA (Design Failure Mode and Effects Analysis) – метод, целью которого является улучшение конструкции на основе анализа потенциальных несоответствий конструкции с количественным анализом последствий и причин несоответствий [117].

Особенности планирования экспериментов по методу Гэнъити Тагути заключаются в ограничении только ортогональными планами, по возможности без эффектов взаимодействия. Метод Гэнъити Тагути использует насыщенные или близкие к насыщенным планы, а при обработке результатов эксперимента предпочтение отдается графическим методам или дисперсионному анализу. Гэнъити Тагути предлагает разделить факторы на группы так, чтобы в одной из них оказались факторы, ответственные за основной отклик («номинал»), а в другой – ответственные за разброс. Исходная задача разбивается на две независимые оптимизационные процедуры: одну для номинала, а вторую для разброса. А поскольку они осуществляются в разных пространствах, результаты их просто «склеиваются», что и дает искомый робастный режим. Аналогичным

образом предлагается разрабатывать и само изделие, и технологическое оборудование и технологический процесс изготовления [116, 117].

Применение робастных методов на этапах проектирования и изготовления продукции позволяет выбрать оптимальную конструкцию и значения технических характеристик, которые обеспечат робастность продукции. Улучшение проектирования изделия и процесса его изготовления позволяет уменьшить затраты на производство и эксплуатацию изделия [117, 121-132].

В настоящее время наблюдается тенденция к увеличению количества зарубежных научных публикаций, посвященных применению робастных методов для изготовления изделий авиационно-космической техники в условиях аддитивного производства. Но, важно заметить, что количество отечественных публикаций в этой области остается крайне скудным.

В работе [133] авторами экспериментально и статистически изучено влияние различных параметров FDM 3D-печати, в частности ориентации образца, ориентации растра, диаметра сопла, температуры экструдера, плотности заполнения, количества оболочки и скорости экструзии на прочность при растяжении образцов из филамента PLA. На основе метода Гэньити Тагути было поставлено восемнадцать экспериментов, напечатаны образцы на FDM 3D-принтере и испытаны на прочность при растяжении с помощью универсальной испытательной машины. После этого была выбрана оптимальная комбинация параметров FDM 3D-печати с использованием отношения сигнал/шум, а дисперсионный анализ ANOVA использован для указания значимых параметров и их влияния на прочность при растяжении. Эксперименты показали, что статистически значимы и сильно влияют на прочность при растяжении следующие параметры FDM 3D-печати: ориентация сборки (на ребро), диаметр сопла ($\varnothing 0,5$ мм) и плотность заполнения (100%).

Аналогичную работе [133] провели авторы работы [134], которые с помощью метода Гэньити Тагути установили, что оптимальными технологическими параметрами для модуля упругости и предела прочности при растяжении образцов из филамента PLA являются: плотность заполнения 80 %,

скорость печати 40 мм/с и высота слоя 0,1 мм, а для деформации при разрушении – плотность заполнения 80 %, скорость печати 40 мм/с и высота слоя 0,2 мм.

В работе [135] авторы изучили влияние технологических параметров процесса FDM 3D-печати на такие механические свойства, как прочность при растяжении и ударная вязкость, образцов из филамента полиамида12 (PA12) с помощью метода Гэньити Тагути. Для экспериментов выбраны следующие параметры печати: высота слоя (0,1 мм, 0,15 мм, 0,2 мм и 0,25 мм), температура экструдера (250 и 260 °С), структура (прямолинейная и полная сота) и плотность заполнения (25 и 50%). Эксперименты показали, что высота слоя печати является наиболее эффективным фактором для улучшения механических свойств. Оптимальные значения прочности при растяжении и ударной вязкости составили для следующих технологических параметров: высота слоя – 0,25 мм, плотность заполнения – 50%, структура заполнения – прямолинейная и температура экструдера – 250 °С.

В работе [136] авторами проведена оптимизация технологических параметров процесса FDM 3D-печати, таких как плотность заполнения, высота слоя и стиль поддержки с помощью метода Гэньити Тагути. В качестве откликов продукции (напечатанных образцов из филамента ABS) были выбраны скорость печати и шероховатость. Исследования показали, что высота слоя является наиболее значимой входной переменной для обоих откликов. Оптимальная комбинация технологических параметров процесса FDM 3D-печати для скорости печати следующая: высота слоя – 0,3302 мм, плотность заполнения – «разреженная» низкая плотность заполнения и стиль поддержки – «умный». Оптимальная комбинация технологических параметров процесса FDM 3D-печати для шероховатости следующая: высота слоя – 0,254 мм, плотность заполнения – «разреженная» низкая плотность заполнения и стиль поддержки – «умный».

Аналогичную работе [136] провели авторы работы [137], которые с помощью метода Гэньити Тагути установили, что на качество поверхности (шероховатость) и геометрическую точность напечатанных деталей из филамента ABS в значительной степени влияет высота слоя, а скорость печати контура и

температура экструдера мало влияют несомненно. Оптимальная комбинация технологических параметров процесса FDM 3D-печати для качества поверхности следующая: высота слоя – 0,10 мм, скорость печати контура – 45 мм/сек и температура экструдера – 230 °С.

В работе [138] авторы с помощью метода Гэнъити Тагути изучили влияние технологических параметров процесса FDM 3D-печати на такие механические свойства, как твердость, прочность при растяжении и изгибе, образцов из филамента полиэтилентерефталат-гликоль (PETG), армированного углеродным волокном. В качестве управляемых факторов выбраны скорость печати, плотность заполнения и высота слоя. Оптимальная прочность на растяжение, изгиб и твердость, полученные авторами, составляют 31,567 МПа, 35,045 МПа и 67,0011 ВНН, соответственно. Наиболее оптимальными технологическими параметрами FDM 3D-печати, которые были выявлены авторами, являются следующие: скорость печати – 60 мм/сек, плотность заполнения 80% и высота слоя 0,2 мм.

В работе [139] авторы провели устранение термо-индуцированной неэффективности 3D-печати на основе FMEA-анализа. В частности, авторы работы провели модернизацию FDM 3D-принтера Ender 3: спроектировали, изготовили и успешно испытали термокамеру, которая снизила деформации напечатанных деталей на 72,932% (снижение коробления).

В работе [140] авторы с помощью FMEA-анализа произвели оценку рисков безопасности, возникающих в результате использования аддитивного оборудования, в частности FDM 3D-принтера. FMEA-анализ показал, что наиболее значимым риском является несоблюдения правил профессионального и безопасного обращения с аддитивным оборудованием и связанных с ним легковоспламеняющимися и токсичными материалами. Так, например, выбросы наночастиц во время печати, которые могут попасть в кровоток, отнесены к рискам для здоровья, связанных с использованием аддитивного производства. Как утверждают авторы работы, что это связано с неправильным расположением оборудования в помещении, которое препятствует недостаточной вентиляции в процессе печати. На основе FMEA-анализа авторы разработали ряд мероприятий,

которые способствуют повышению безопасности использования аддитивного оборудования: использование фильтров и масок, перчаток и защитных очков, проветриваемое помещение, профессиональное обращение и соблюдение инструкции по эксплуатации и т.д.

В работе [141] авторы разработали конструкцию шредера для измельчения отработанного филамента с последующим изготовлением из него новой нити, которую можно использовать в FDM 3D-принтерах и тем самым снизить потребность в покупке новой нити. В работе авторы использовали метод FMEA-анализ для устранения или минимизации рисков, которые могут привести к повреждению оборудования или причинить вред пользователю.

В работе [142] авторы представили исследование технической возможности и функциональной конструкции экструдера со сменной мини-головкой на основе шнека с переменным сечением для использования в FDM 3D-принтерах с открытым исходным кодом. Матрица QFD использовалась во время планирования проекта, где были установлены требования некоммерческих пользователей. Итогом работы стал изготовленный авторами экструдер с мини-головкой, демонстрирующий свою функциональность для получения нитей диаметром 0,7 мм из порошкового сырья.

В работе [143] авторами представлен концептуальный дизайн линейного дельта-параллельного робота для аддитивного производства. В новой конструкции используется инновационная концепция треугольного механизма с одинарными опорами и поворотными шарнирами, который состоит из 12 звеньев трех призматических шарниров и 11 поворотных шарниров. Особенностью предлагаемого механизма является то, что вместо подвижной платформы он содержит общий для всех кинематических цепей шарнир. Метод QFD в работе [143] используется в качестве методологии концептуального проектирования.

В работе [144] авторы с помощью метода QFD разработали, изготовили и успешно испытали FDM 3D-принтер (рисунок 35).

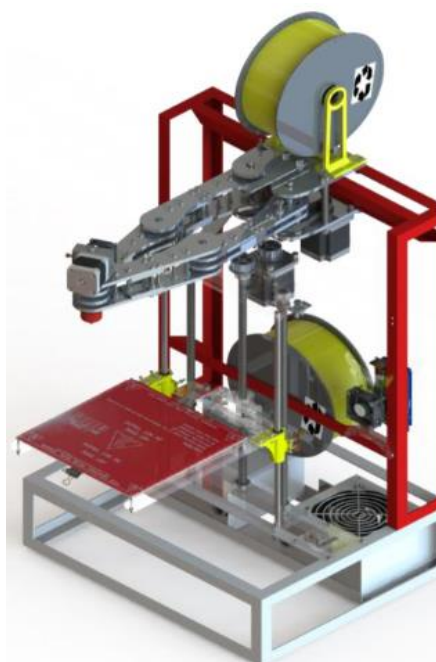


Рисунок 35 – FDM 3D-принтер [144]

Особенностью разработанного авторами 3D-принтера является параллельная роботизированная платформа с 3 степенями свободы: 2 степени свободы для оси XY относятся к механизму 5R, а третья степень свободы связана с механизмом винт-гайка, в котором предполагается использование экструдера типа «боуден» и нагревательной платформы – рабочего стола.

В работе [145] авторы с помощью метода QFD разработали FDM 3D-принтер «OSALSPolar». Конструкция разработанного 3D-принтера относится к типу «polar». FDM 3D-принтер OSALSPolar может успешно работать по осям R и Z с точностью до 1 мм и по тета-оси (сферическая система координат) с точностью до 1°. Используемое в 3D-принтере программное обеспечение «Franklin» эффективно регулирует температуру экструдера на требуемом уровне равном 210° C с погрешностью $\pm 2^\circ$.

Таким образом, как показывает теоретический анализ [133-145], в настоящее время наблюдается тенденция к увеличению количества научных публикаций, главным образом зарубежных, посвященных применению планированию экспериментов по методу Гэньити Тагути для оптимизации технологических параметров процесса FDM 3D-печати. Научных публикаций

посвященных применению методов QFD и FMEA в области аддитивного производства крайне мало и преимущественно ориентированы для проектирования или усовершенствования конструкции FDM 3D-принтеров.

1.6 Выводы по главе 1. Постановка цели и задач исследования

В данной главе рассмотрены:

- области применения FDM технологии в производстве изделий авиационно-космической техники;
- классификация филаментов, применяемых для FDM 3D-печати;
- источники дефектов на этапах проектирования, предпечатной подготовки и FDM 3D-печати;
- существующие подходы к обеспечению качества проектирования, предпечатной подготовки и FDM 3D-печати деталей и узлов изделий авиационно-космической техники;
- применение робастных подходов: QFD, FMEA, планирования экспериментов по методу Гэнъити Тагути на стадиях проектирования и изготовления изделий авиационно-космической техники в условиях аддитивного производства.

Теоретическое изучение работ [1-145] позволило сделать ряд выводов:

1) FDM технология находит широкое применение в производстве деталей и узлов перспективных изделий авиационно-космической техники. Согласно работе [146] рынок FDM 3D-печати в аэрокосмической отрасли в 2027 году достигнет 6,7 миллиардов долларов США, в том числе благодаря росту количества научных исследований и разработок новых высокотемпературных полимерных и композиционных материалов для FDM 3D-печати.

2) 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.

3) 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; качеству проведения (алгоритма) подготовки 3D-модели к FDM 3D-печати в программе-слайсере без применения современных методов и подходов управления качеством.

4) Наблюдается тенденция к увеличению количества научных публикаций, посвященных применению планированию экспериментов по методу Гэньити Тагути для оптимизации технологических параметров процесса FDM 3D-печати.

5) Научных публикаций посвященных применению методов QFD и FMEA в области аддитивного производства крайне мало и главным образом ориентированы для проектирования и усовершенствования конструкции FDM 3D-принтеров.

На основе вышеизложенных выводов поставлена цель диссертационного исследования – повышение качества деталей и узлов аэрокосмических конструкций из ПКМ, получаемых с использованием FDM 3D-печати, за счет совершенствования модели обеспечения качества на этапах проектирования, предпечатной подготовки и изготовления FDM 3D-печати.

В соответствии с вышеуказанной целью поставлены следующие задачи:

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

2) Разработать функциональную модель обеспечения качества деталей и узлов аэрокосмических конструкций из ПКМ, 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 вариабельности диаметра прутка филамента для обеспечения качества деталей и узлов аэрокосмических конструкций из ПКМ, основанная на применении статистических методов и экспериментальных исследований.

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

6) Провести комплексную апробацию предложенных решений на базе Самарского национального университета имени академика С.П. Королева (Самарский университет) и АО «Ракетно-космический центр «Прогресс», ГК «Роскосмос».

2 Теоретические аспекты обеспечения качества проектирования и изготовления деталей и узлов аэрокосмических конструкций в условиях аддитивного производства

2.1 Планирование качества изделий авиакосмической техники в условиях аддитивного производства

В настоящее время в аэрокосмической и оборонной промышленности Европейского Союза и Соединенных Штатов Америки широко распространен международный стандарт AS9145 Требования к передовому планированию качества продукции и процессу утверждения производственной части. Международный стандарт AS9145 установлен Международной аэрокосмической группой качества (International Aerospace Quality Group – IAQG) в 2016 году и применяется для разработки новых изделий авиационно-космической техники или совершенствования существующих. Стандарт AS9145 интегрируется с международными стандартами: AS9100 Системы менеджмента качества. Требования к авиационным, космическим и оборонным организациям, AS9102 Требования по контролю опытного образца в аэрокосмической отрасли, AS9103 Управление изменениями ключевых характеристик, AS9110 Системы менеджмента качества – Аэрокосмическая промышленность – Требования к организациям технического обслуживания.

В основу стандарта AS9145 заложены требования к выполнению и документированию методик APQP (Advanced Product Quality Planning) – перспективное планирование качества продукции и PPAR (Production Part Approval Process) – процесс согласования производства части.

APQP – методика планирования, проектирования, подготовки производства, производства изделий с упором на предупреждение рисков и ошибок, постоянное улучшение и совершенствование изделия (продукции), которая должна соответствовать требованиям и ожиданиям заказчика (потребителя) [117, 146, 147].

Методика APQP состоит из 5 этапов (таблица 1) [147, 148].

Таблица 1 – Этапы реализации методики APQP

№ п/п	Название этапа	Содержание этапа	Применяемые методы и подходы
1	Планирование и разработка концепции	Анализ «голоса» потребителя (заказчика), разработка технического задания (ТЗ), перевод требований потребителя в технические характеристики продукции, разработка проектной документации	Voice of the Customer (VoC), QFD 1 и 2 уровня
2	Проектирование и разработка продукции	Разработка рабочей конструкторской документации (РКД), выделение наиболее важных (ключевых) параметров, анализ отказов конструкции	DFMEA-анализ
3	Проектирование и разработка процессов	Разработка технологической документации, выделение наиболее важных (ключевых) технологических режимов, анализ возможных дефектов процесса, разработка плана управления	QFD 3 и 4 уровня, PFMEA-анализ, планирование экспериментов по методу Г. Тагути
4	Валидация продукта и процесса	Технологическая подготовка производства, оценка приемлемости измерительной системы, анализ отчетов испытаний опытных образцов и выпуска установочной серии	MSA-анализ
5	Текущее производство, использование, сервис	Мониторинг удовлетворенности потребителя, проведение корректирующих действий при низком уровне удовлетворенности потребителя	DFMEA / PFMEA-анализ

VOC (Voice of Customer), голос потребителя – информация, поступающая от потребителей в виде жалоб, пожеланий, результатов анкетирования и другим способом [117].

MSA (Measurement System Analysis), анализ измерительной системы – изучение влияния выбранных элементов измерительных процессов (т.е. пользователей, машин, инструментов, методов, материалов, окружающей среды) на точность, воспроизводимость и неопределенность измерений. [150, 151].

Этапы APQP «запаралелливают» для сокращения сроков выпуска изделия, при этом над разработкой изделия работает многофункциональная команда (инженеры-конструкторы, инженеры-технологи, инженеры по качеству, маркетологи и представители других служб предприятия) [117, 147]. Главная идея применения методики APQP состоит в предупреждении ошибок и отказов изделия и постоянном ее улучшении.

В качестве недостатка методики APQP можно отметить использование инструментов системы менеджмента качества без учета конструктивных и технологических подходов управления качеством изготавливаемой продукции и программных систем автоматизированного проектирования и инженерного анализа.

Методика PPAP устанавливает общие требования к одобрению производства деталей и сборочных единиц, включая как производство, так и нештучные материалы. Цель одобрения производства деталей и сборочных единиц – определить правильно ли поставщик понимает все записи потребителя в рамках инженерного проектирования и его технические требования; имеет ли производственный процесс поставщика потенциал [152].

В настоящее время Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии собирает сведения о практическом применении на российских предприятиях авиационной, космической и оборонной отраслях промышленности стандарта: ПНСТ 415-2020 Предварительный национальный стандарт Российской Федерации. Системы менеджмента качества предприятий авиационной, космической и оборонной отраслей промышленности. Перспективное планирование качества продукции. Процесс одобрения этапов производства. Указанный стандарт является аналогом международного стандарта AS9145 и устанавливает требования к структурированной форме для планирования и

выполнения стадий выпуска продукции, которые необходимы для того, что поставка качественной продукции была осуществлена своевременно с учетом показателей эффективности [151].

Для выпуска качественной продукции необходимо проводить управление стабильностью ключевыми характеристиками [153, 154]. Под ключевой характеристикой понимается свойство или особенность, изменение которых оказывает существенное влияние на пригодность, параметры, срок службы, технологичность продукции, а также на производительность, и которые требуют конкретных действий для решения задачи управления их стабильностью [151].

Ключевые характеристики детали, подсистемы или системы – выбранные геометрические характеристики, свойства материала, функциональные и/или косметические особенности, которые измеримы, контроль стабильности которых необходим для оценки соответствия требованиям Заказчика и с целью удовлетворения Заказчика [155].

Для обеспечения улучшения процесса изготовления за счет организации планирования и эффективного управления стабильностью ключевых характеристик разработан и утвержден стандарт: ГОСТ Р ЕН 9110-2011 Системы менеджмента качества организаций авиационной, космической и оборонных отраслей промышленности. Управление стабильностью ключевых характеристик. Особое внимание в указанном стандарте уделено ключевым характеристикам, нестабильность которых существенно влияет на геометрические размеры конечного продукта, его функциональные физические характеристики, технологичность, техническое обслуживание и т.д.

Таким образом, разработку функциональной модели обеспечения качества деталей и узлов изделий аэрокосмических конструкций ПКМ, получаемых с использованием FDM 3D-печати, необходимо вести в рамках перечисленных в настоящем разделе международных и отечественных стандартов [151, 153-155] и на основе применения робастных подходов: QFD, FMEA, планирования эксперимента по методу Гэньити Тагути в совокупности с программными системами трехмерного проектирования и инженерного анализа.

2.2 Требования к деталям и узлам аэрокосмических конструкций в условиях аддитивного производства, полученных методом аддитивных технологических процессов

Требования к деталям и узлам аэрокосмических конструкций устанавливаются в конструкторской документации, в техническом условии, техническом задании на изготовление изделия [76]. Основные требования к деталям и узлам изделий, полученного методом аддитивных технологических процессов, устанавливаются в зависимости от назначения изделия в эксплуатации. Согласно ГОСТ 57586-2017 Изделия, полученные методом аддитивных технологических процессов. Общие требования изделия в зависимости от назначения подразделяются на три группы:

1) Изделия общего назначения: изделия, конфигурация и размеры которых определяются только конструктивными и технологическими требованиями;

2) Изделия ответственного назначения: изделия, рассчитываемые на прочность и работающие при статических нагрузках;

3) Изделия особо ответственного назначения: изделия, рассчитываемые на прочность и работающие при циклических и динамических нагрузках.

Изделия авиационно-космической техники преимущественно относятся к изделиям 1 и 2 групп. В таблице 2 представлены основные, дополнительные и уточнены специальные требования к изделиям авиационно-космической техники, полученных методами аддитивных технологических процессов [156, 157].

Таблица 2 – Требования к изделиям авиационно-космической техники, полученных методами аддитивных технологических процессов

№ п/п	Основные требования	Дополнительные требования	Специальные требования
1	2	3	4
1	Внешний вид	Износостойкость	Радиационная стойкость

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4
2	Геометрические размеры	Твердость	Стойкость к воздействию солнечных и галактических космических лучей
3	Химический и фазовые составы	Механические свойства для изделий со стенкой толщиной свыше 0,2 мм	Стойкость к электрофизическим воздействиям космического пространства
4	Предел текучести	Механические свойства при пониженных и повышенных температурах	Электропроводность
5	Относительное удлинение	Герметичность	Стойкость к воздействию статического электричества
6	Ударная вязкость	Микроструктура	Стойкость к термоциклированию
7	Пористость	Плотность	Вибрационная прочность
8	Эргономические свойства	Жаростойкость	Теплопередача
9		Содержание газовых примесей	
10		Коррозионная стойкость	

Необходимо отметить, что специальные требования к изделиям авиационно-космической техники, полученных методом аддитивных технологических процессов, закладываются разработчиками изделия в технических требованиях конструкторской документации в зависимости от функционального назначения и условий эксплуатации изделия. Например, специальные требования, приведенные в таблице 2, могут быть отнесены к элементам бортовой аппаратуры космических аппаратов и ее базовым несущим конструкциям.

2.3 Разработка структурной модели аддитивного производства аэрокосмических конструкций

С учетом общих рекомендаций, изложенных в ГОСТ Р ИСО/АСТМ 52950-2022 [158], разработана структурная модель аддитивного производства (рисунок 36).

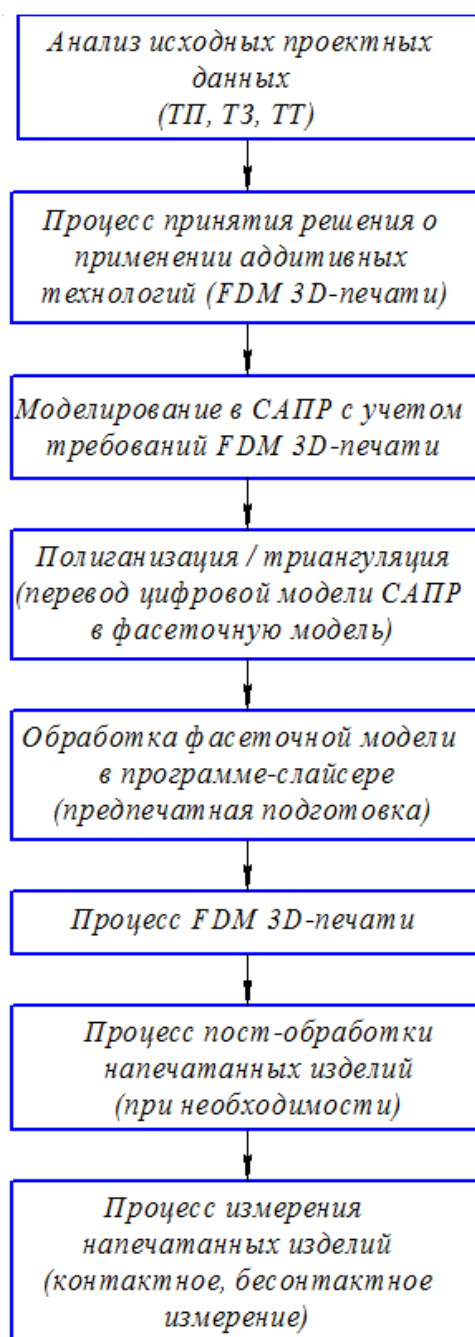


Рисунок 36 – Структурная модель аддитивного производства (FDM 3D-печати)

На первом этапе производится анализ исходных проектных данных, изложенных в техническом проекте (ТП), техническом задании (ТЗ) или технических требованиях (ТТ): анализ требований заказчика, функциональное назначение изделия, анализ нагрузок, условий эксплуатации и т.д.

На втором этапе принимается решение о целесообразности применения аддитивных технологий, в частности FDM 3D-печати. Рекомендуется за основу принятия указанного решения взять схему принятия решения, представленного в ГОСТ Р 59037-2020 [2]. Типовыми условиями применения FDM технологии для изготовления изделия являются: наличие материалов для рассматриваемого изделия, соответствие размеров изделия рабочей камере FDM 3D-принтера, длительность изготовления, стоимость изготовления, объем выпуска и т.д.

После принятия положительного решения о применении FDM технологии для изготовления изделия производится моделирование конструкции изделия с учетом технологических требований FDM 3D-печати (минимальная толщина стенки модели, исключение острых углов с заменой на радиусы, усадка филамента, коробление изделия после печати и т.д.) и выбор филамента. Рекомендуется при моделировании конструкции изделия использовать топологическую оптимизацию для исключения использования большого объема филамента для изготовления.

На четвертом этапе необходимо провести процесс полигонизации или триангуляции, то есть перевод цифровой модели САПР в фасеточную модель.

Полигонизация – создание цифровой модели в виде большого числа соединенных многоугольников (полигонов) [158].

Триангуляция – создание цифровой модели в виде большого числа соединенных треугольников [158].

Под полигоном подразумевают плоскость в трехмерном пространстве, ограниченную тремя и более ребрами, определяемую, как правило, координатами ее вершин [158].

На следующем этапе производится обработка фасеточной модели в программе-слайсере, т.е. проводят предпечатную подготовку: ориентация изделия

на рабочем столе 3D-принтера, выбор технологических режимов печати (температура сопла, рабочего стола, скорость печати, мощность работы вентилятора (охлаждения) и т.д.), высота слоя печати, количество внешних стенок, выбор схемы и степени (процента) заполнения, применение опорных (поддерживающих) структур и т.д.

После процесса FDM 3D-печати производится процесс пост-обработки напечатанного изделия: удаление «юбки», опорных (поддерживающих) структур, «соплей», шлифовка и т.д. Рекомендуется работы по пост-обработке напечатанных изделий приводить к минимуму путем подбора параметров печати на предыдущем шаге (например, уменьшение высоты слоя печати).

Завершающим этапом структурной модели является процесс измерения напечатанного изделия. Для изделий со сложной геометрией рекомендуется применять бесконтактное измерение – 3D-сканирование.

Таким образом, разработана структурная модель аддитивного технологического процесса – FDM 3D-печати, в соответствии с которой в следующем разделе разработана функциональная модель управления качеством проектирования и изготовления изделий авиационно-космической техники.

2.4 Разработка функциональной модели обеспечения качества деталей и узлов аэрокосмических конструкций в условиях аддитивного производства

Каждое предприятие авиакосмической отрасли в зависимости от выпуска вида изделия, серии и применяемых технологических процессов изготовления разрабатывает свою «индивидуальную» функциональную модель обеспечения качества. Кроме того, важно отметить, что разработку модели обеспечения качества должны проводить в соответствии с международными и государственными стандартами, которые устанавливают требования к выпускаемым изделиям и перспективному планированию качеству изделий (продукции).

Как было указано в главе 1 настоящей работы, преобладающее большинство отечественных и зарубежных исследований [1-145] в области обеспечения качества деталей и узлов аэрокосмических конструкций 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 и качеству проведения (алгоритма) подготовки 3D-модели к FDM 3D-печати в программе-слайсере без применения современных методов и подходов обеспечения качества.

В соответствии с международными стандартами AS9145 (аналогом является российский стандарт ПНСТ 415-2020), AS9100, AS9102, AS9103, AS9110, государственными стандартами ГОСТ Р ЕН 9110-2011, ГОСТ 57586-2017, ГОСТ Р ИСО 16336-2020, разработанной структурной модели аддитивного технологического процесса – FDM 3D-печати (рисунок 36) и на основе результатов теоретического исследования [1-145] разработана функциональная модель обеспечения качества в условиях аддитивного производства.

Разработанная функциональная модель обеспечения качества обеспечивает требования потребителей (заказчика) к деталям и узлам аэрокосмических конструкций из ПКМ, получаемых с использованием FDM технологии, и снижает возможные риски появления отказов, как в конструкции, так и в процессе изготовления.

Главными инструментами функциональной модели обеспечения качества являются робастные подходы: QFD, FMEA и планирования экспериментов по методу Г. Тагути с совокупности с программными системами трехмерного проектирования и инженерного анализа [159-169].

На рисунке 37 представлена разработанная функциональная модель обеспечения качества деталей и узлов аэрокосмических конструкций в условиях аддитивного производства.

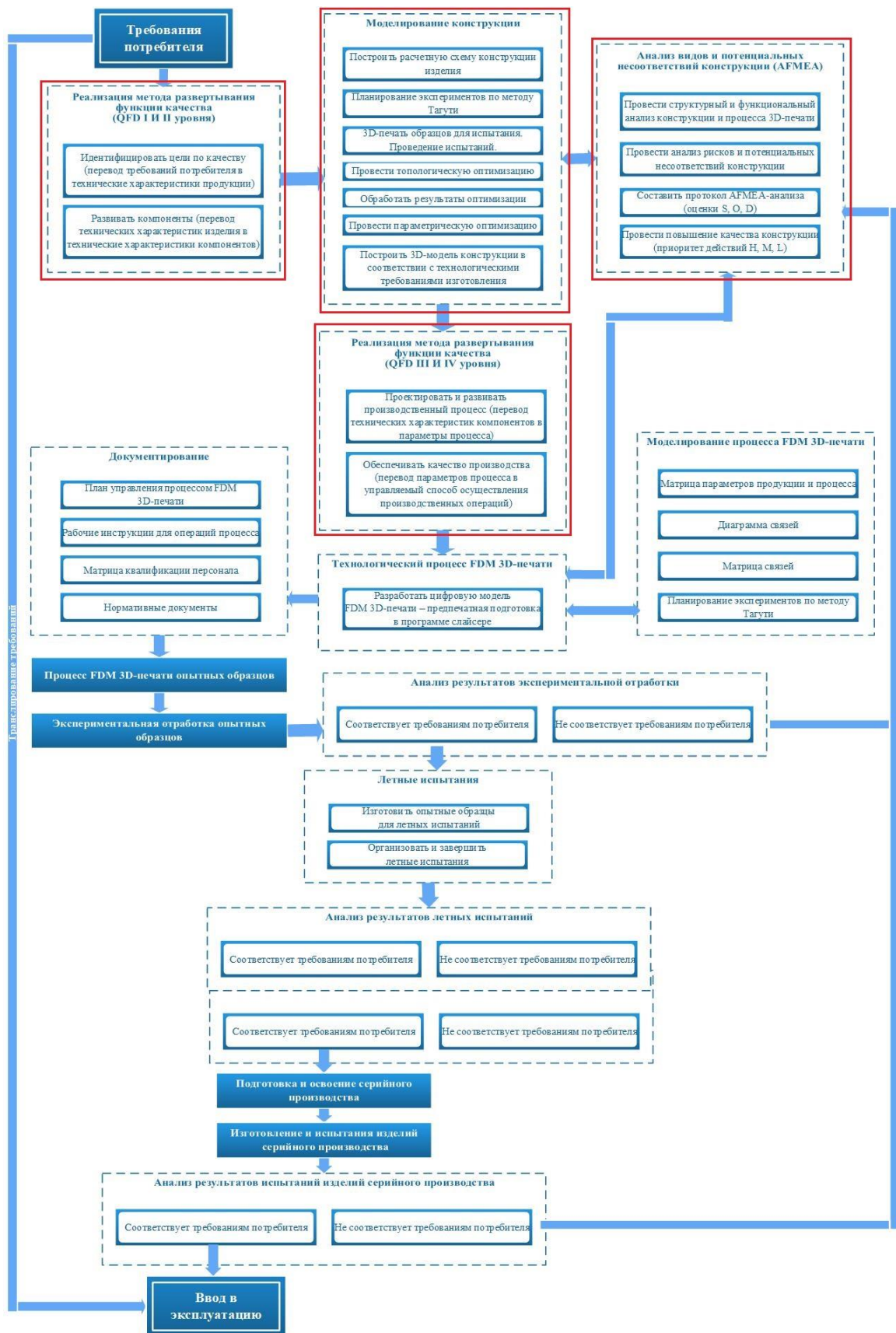


Рисунок 37 – Функциональная модель обеспечения качества деталей и узлов аэрокосмических конструкций в условиях аддитивного производства

Как видно из рисунка 37, разработанная функциональная модель обеспечения качества представляет собой совокупность взаимосвязанных блоков – этапов процесса производства изделия в условиях аддитивного производства – FDM 3D-печати.

На первом этапе (начальный блок) проводится анализ требований потребителя (заказчика), изложенного в ТТЗ (ТЗ) на изделие. На этом же этапе принимается решение о целесообразности применения аддитивных технологий, в частности FDM технологии. Рекомендуется за основу принятия указанного решения взять схему принятия решения, представленного в ГОСТ Р 59037-2020 [2].

После анализа требований заказчика и принятия решения о применении аддитивных технологий для изготовления изделия реализуют QFD 1 и 2 уровня, в частности, перевод требований в технические характеристики со следующим их переводом в технические характеристики компонентов изделия.

На основе полученных результатов реализации QFD 1 и 2 уровня проводят моделирование конструкции изделия: строят расчетную схему конструкции, планирование экспериментов по методу Г. Тагути для получения оптимального технологического режима печати по критерию прочности (при растяжении, сжатии, изгибе и т.д.), проводят топологическую оптимизацию с последующей обработкой ее результатов, параметрическую оптимизацию и построение 3D-модели конструкции изделия в соответствии с технологическими требованиями FDM 3D-печати: минимальная толщина стенки, угол свеса элементов конструкции, экструзии филамента и т.д.

Далее для повышения качества конструкции изделия полученную 3D-модель конструкции передают для DFMEA-анализа: проводят структурный и функциональный анализ, анализ рисков и потенциальных несоответствий конструкции, составляют протокол DFMEA-анализа и, в случае необходимости, проводят повышение качества конструкции изделия.

После согласования и утверждения 3D-модели конструкции изделия реализуют QFD 3 и 4 уровня, в частности, проектируют и развивают

производственный процесс (переводят технические характеристики компонентов в параметры технологического процесса изготовления) и обеспечивают качество производства (перевод параметров технологического процесса в управляемый способ осуществления производственных операций).

Далее на основе полученных результатов реализации QFD 3 и 4 уровня проводят разработку технологического процесса FDM 3D-печати (построение «архитектуры»). При этом технологический режим печати взаимодействует с этапом моделирования. Для повышения качества технологического процесса FDM 3D-печати проводят моделирование процесса FDM 3D-печати, результатом которого является матрица параметров изделия и процесса, диаграмма и матрица связей и результаты планирования экспериментов по методу Г. Тагути (например, по критерию времени печати).

Следующим этапом (блоком) является PFMEA-анализ разработанного технологического процесса FDM 3D-печати: проводят структурный и функциональный анализ, анализ рисков и потенциальных несоответствий процесса, составляет протокол PFMEA-анализа и, в случае необходимости, проводят повышение технологического процесса изготовления изделия.

После утверждения и согласования технологического процесса изготовления изделия проводят документирование: составляют план управления процессом, разрабатывают рабочие инструкции, составляют матрицу квалификации персонала и нормативные документы.

Далее производят FDM 3D-печать опытных образцов и их экспериментальную отработку: статические, динамические, термовакуумные и другие виды испытаний в соответствии разработанной комплексной программой экспериментальной отработки изделия.

При положительных результатах экспериментальной отработки опытных образцов изделие допускают к летным испытаниям. При неудовлетворительных результатах экспериментальной отработки проводят DFMEA-анализ 3D-модели конструкции изделия с последующей ее коррекцией и повторным воспроизведением ранее проведённых этапов.

При положительных результатах летных испытаний начинают подготовку и освоение серийного производства. При неудовлетворительных результатах летных испытаний проводят DFMEA-анализ 3D-модели конструкции изделия с последующей ее коррекцией и повторным воспроизведением ранее проведенных этапов.

Далее проводят изготовление (FDM-печать) и испытания изделий серийного производства. При положительных результатах серийного производства производят ввод в эксплуатацию изделия. При неудовлетворительных результатах серийного производства проводят PFMEA-анализ технологического процесса изготовления с последующим его коррекцией и повторным воспроизведением ранее проведенных этапов.

Таким образом, разработана функциональная модель обеспечения качества деталей и узлов аэрокосмических конструкций в условиях аддитивного производства – FDM 3D-печати. Отличительной особенностью разработанной функциональной модели управления качеством является комплексный подход к достижению сквозного развертывания требований и качества деталей и узлов аэрокосмических конструкций из ПКМ, получаемых с использованием FDM технологии, на основе робастных подходов: QFD, FMEA, планирование экспериментов по методу Г. Тагути в совокупности с программными системами трехмерного проектирования и инженерного анализа.

2.5 Разработка методики анализа видов и потенциальных несоответствий 3D-печати (Additive Failure Mode and Effects Analysis, AFMEA)

Как было отмечено в главе 1 настоящей диссертации, одной из ключевых достоинств применения аддитивных технологий являются сокращение производственного цикла изготовления деталей и узлов, когда разработанная инженером-конструктором 3D-модель поступает на предпечатную подготовку и далее на 3D-печать. Вместе с тем, важно заметить, что все три этапа: проектирование, предпечатная подготовка и, непосредственно, 3D-печать связаны

между собой. Так, например, инженер-конструктор на этапе проектирования должен спроектировать и подготовить 3D-модель конструкции под условия аддитивного производства: исключить близкое расположение сборочных отверстий к границе модели, использование в конструкции малоразмерных тонкостенных зон, «выпирающих» и нависающих элементов и т.д. В свою очередь, специалист по аддитивным технологиям на этапе предпечатной подготовки определяет «структуру» (строение) будущей детали: толщину и количество слоев оболочки конструкции, использование «ячеистой» структуры, направление укладки нитей филамента и т.д. Кроме того, специалист по аддитивным технологиям должен выбрать оптимальные технологические параметры 3D-печати, которые обеспечат оптимальные значения показателей качества конструкции (статистическая и динамическая прочность, жесткость конструкции, твердость, геометрические размеры и т.д.) и бездефектность печати (пористость, однородность наложения нитей филамента, исключение искривления детали или узла из-за тепловых напряжений и т.д.). Соответственно, указанные результаты операций этапов должны быть взаимосогласованы между собой.

На основе изложенного, возникает необходимость проведения FMEA-анализа одновременно всех трех указанных этапов. Кроме того, как было отмечено выше, специалист по аддитивным технологиям на этапе предпечатной подготовки, определяет структуру (строение) будущей детали. Таким образом возникает необходимость введения нового элемента функционирования этапа предпечатной подготовки – Структура модели.

С учетом особенностей аддитивных технологий, общих рекомендаций, изложенных в ГОСТ Р ИСО/АСТМ 52950-2022 [158], работе [117] на основе разработанной структурной модели (рисунок 36) и дерева отказов процесса FDM 3D-печати (Приложение Б) разработана методика анализа видов и потенциальных несоответствий 3D-печати (Additive Failure Mode and Effects Analysis, AFMEA).

Разработанная методика AFMEA-анализ охватывает три этапа: проектирование, предпечатная подготовка и, непосредственно, этап 3D-печати.

Введен новый элемент функционирования этапа предпечатной подготовки – Структура модели.

На первой стадии для проведения всестороннего анализа формируется команда экспертов, в состав которой рекомендуется включить:

- 1) руководителя межфункциональной службы;
- 2) инженера-конструктора;
- 3) специалиста по аддитивным технологиям;
- 4) инженера по качеству.

На первой стадии AFMEA-команда анализирует требования технического задания на проектирование детали или узла. Далее команда подтверждает целесообразность использования аддитивных технологий для изготовления детали.

На второй стадии AFMEA-команда проводит структурный анализ процесса создания детали в условиях аддитивного производства, где вводят в протокол AFMEA-анализа три этапа: проектирование, предпечатная подготовка и этап 3D-печати. Для каждого этапа команда определяет элементы функционирования: персонал, оборудования, филамент (материал), окружающая среда. Для этапа предпечатной подготовки вводят дополнительный элемент функционирования – Структура модели.

Важно заметить, что этап проектирования ограничивается не только разработкой 3D-моделей, но и 3D-печатью образцов для испытаний. Такая необходимость возникает вследствие особенностей аддитивных технологий, в частности, каждый технологический режим 3D-печати «выдает» свои значения выходных характеристик напечатанных деталей и узлов: прочности при растяжении, изгибе, жесткости конструкции, наличия/отсутствия дефектов и т.д. Таким образом, возникает необходимость после разработки расчетной схемы специалисту по аддитивным технологиям провести экспериментальный подбор технологического режима печати, который «выдает» оптимальные выходные характеристики напечатанных деталей и узлов. И только после получения

результатов экспериментальной печати инженер-конструктор должен приступить к детальному моделированию конструкции.

На третьей стадии AFMEA-команда проводит определение функций, процесса, этапов процесса и элементов функционирования на основе технических и законодательных требований к конструкции напечатанных деталей и узлов.

На четвертой стадии AFMEA-команда проводит анализ несоответствий: определяет последствия несоответствий конечного потребителя или следующего верхнего уровня, несоответствия этапов процесса и причины несоответствий в элементах функционирования этапов процесса. Анализ несоответствий команда проводит на основе анализа технических требований к системе, функций и требований к конструкции напечатанных деталей и узлов и информации о несоответствиях подобных деталей и узлов, возникающих в эксплуатации.

Команда также оценивает значимость для каждого несоответствия из списка потенциальных несоответствий и их последствий. Оценка зависит от тяжести последствий несоответствия и определяется с помощью 10-балльной шкалы (таблица 3).

Таблица 3 – Типовая шкала значимости несоответствия при AFMEA

Последствие	Критерий значимости	Балл
1	2	3
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
Важное	Напечатанные детали/узлы работоспособны, но снижен уровень эффективности эксплуатации	7

Продолжение таблицы 3

Умеренное	Напечатанные детали/узлы работоспособны, но потребитель на этапах сборки испытывает затруднения	6
Слабое	Напечатанные детали и узлы работоспособны, но присутствуют высокая шероховатость, частые неровности, несплошности, включения. Требуется трудоемкая постобработка	5
Очень слабое	На поверхности напечатанных деталей, узлов присутствуют частые неровности, несплошности, включения. Требуется трудоемкая постобработка	4
Незначительное	На поверхности напечатанных деталей, узлов присутствуют редкие, но регулярные неровности, несплошности, включения. Требуется незначительная постобработка	3
Очень незначительное	На поверхности напечатанных деталей, узлов присутствуют редкие неровности, несплошности	2
Отсутствует	Нет последствия	1

На пятой стадии AFMEA-команда проводит анализ рисков: определяет текущие меры управления по предупреждению и обнаружению причины или несоответствия, приоритет действий (Action Priority, AP) (таблица 4), оценивает ранги возникновения (таблица 5) и обнаружения (таблица 6), расчет приоритетного числа риска (ПЧР) [117].

Применение ПЧР совместно с приоритетом действий обусловлено необходимостью составления на предприятиях оборонно-промышленного комплекса отчета с анализом рисков конструкций изделий в бальной системе. Допускается составления протокола AFMEA-анализа без приоритета действий.

Выделяют три приоритета в действиях по снижению риска: высокий H (High), средний M (Medium), низкий L (Low).

Таблица 4 – Выбор приоритета действий

Обозначение приоритета действий	Значение приоритета действий	Действия команды
H	Высокий приоритет рассмотрения и принятия мер	Команда должна либо определить действия для улучшения мер предупреждения и/или обнаружения, либо обосновать и задокументировать адекватность и достаточность существующих мер
M	Средний приоритет для рассмотрения и принятия мер	Следует разработать действия. Команде следует определить действия для улучшения мер предупреждения и/или обнаружения, либо по выбору организации, обосновать и задокументировать адекватность и достаточность существующих мер
L	Низкий приоритет для рассмотрения и принятия мер	Команда может определить действия для улучшения мер предупреждения и/или обнаружения

Таблица 5 – Типовая шкала баллов возникновения несоответствия при AFMEA

Вероятность несоответствия	Возможная частота несоответствия		Балл
Очень высокая: Несоответствие почти неизбежно	$\geq 40\%$	≥ 40 на 100 деталей	10
	$\geq 30\%$	≥ 30 на 100 деталей	9
Высокая: Повторяющиеся несоответствия	$\geq 25\%$	≥ 25 на 100 деталей	8
	$\geq 20\%$	≥ 20 на 100 деталей	7
Умеренная: случайные несоответствия	$\geq 15\%$	≥ 15 на 100 деталей	6
	$\geq 10\%$	≥ 10 на 100 деталей	5
	$\geq 5\%$	≥ 5 на 100 деталей	4
Низкая: Случайные несоответствия	$\geq 3\%$	≥ 3 на 100 деталей	3
	$\geq 2\%$	≥ 2 на 100 деталей	2
Малая: Несоответствие маловероятно	$\geq 1\%$	≤ 1 на 100 деталей	1

Таблица 6 – Типовая шкала баллов обнаружения несоответствия при AFMEA [117]

Обнаружение	Способность обнаружения	Балл
Не обнаруживается	Контроль не обнаружит или не может обнаружить несоответствие (причину), или контроль не предусмотрен	10
Очень плохое	Очень плохие шансы обнаружить несоответствие (причину)	9
Плохое	Плохие шансы обнаружить несоответствие (причину)	8
Очень слабое	Очень ограниченные шансы обнаружения несоответствия	7
Слабое	Ограниченные шансы обнаружения несоответствия	6
Умеренное	Умеренные шансы обнаружения несоответствия	5
Умеренно хорошее	Умеренно высокие шансы обнаружения несоответствия	4
Хорошее	Высокие шансы	3
Очень хорошее	Очень высокие шансы	2
Почти наверняка	Контроль почти наверняка обнаружат несоответствие	1

На шестой стадии AFMEA-команда проводит разработку рекомендаций по снижению риска. Разрабатываемые рекомендации должны быть направлены на снижение рангов обнаружения и возникновения.

На заключительной стадии осуществляется оценивание эффективности запланированных мероприятий.

По завершении выполнения запланированных мероприятий или возникновении новых данных руководитель межфункциональной команды осуществляет сбор команды в прежнем составе.

В том случае, если все запланированные мероприятия внедрены и эффект соответствует при их разработке целям, процедура завершается, и команда распускается.

В противном случае принимается решение о повторном AFMEA-анализе и разработке новых рекомендуемых мероприятий.

В приложении 2 представлен протокол AFMEA-анализа соединительного узла (СУ) для монтажа датчико-преобразующей аппаратуры в межбаковом отсеке (МБО) ракет-носителей (РН) семейства «Союз».

Таким образом, разработана методика анализа видов и потенциальных несоответствий 3D-печати (Additive Failure Mode and Effects Analysis, AFMEA), которая позволяет учитывать особенности аддитивного производства, в частности, ортотропные свойства напечатанных деталей и узлов (в связи с послойным нанесением филамента) и использование «ячеистой» структуры при предпечатной подготовке в программе-слайсере.

2.6 Выводы по главе 2

В данной главе:

– рассмотрены международные и российские стандарты, которые определяют требования к планированию качества продукции авиационно-космического назначения;

– определены основные, дополнительные и уточнены специальные требования к изделиям авиационно-космической техники, полученных методом аддитивных технологических процессов.

В данной главе разработаны:

– структурная модель аддитивного технологического процесса – FDM 3D-печати (рисунок 36) с учетом общих рекомендаций, изложенных в ГОСТ Р ИСО/АСТМ 52950-2022;

– функциональная модель обеспечения качества деталей и узлов авиакосмических конструкций в условиях аддитивного производства (рисунок 37)

в соответствии с международными стандартами AS9145 (аналогом является российский стандарт ПНСТ 415-2020), AS9100, AS9102, AS9103, AS9110, государственными стандартами ГОСТ Р ЕН 9110-2011, ГОСТ 57586-2017, ГОСТ Р ИСО 16336-2020, разработанной структурной модели аддитивного технологического процесса – FDM 3D-печати (рисунок 36) и на основе результатов теоретического исследования [1-145];

– методика анализа видов и потенциальных несоответствий 3D-печати (Additive Failure Mode and Effects Analysis, AFMEA).

Новизна разработанной функциональной модели обеспечения качества деталей и узлов авиакосмических конструкций в условиях аддитивного производства заключается:

1) 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;

2) 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.

3) в обеспечении сквозного развертывания требований и качества изделий из ПКМ, получаемых с использованием аддитивных технологий, в частности, FDM технологии.

Новизна разработанной методики анализа видов и потенциальных несоответствий 3D-печати (Additive Failure Mode and Effects Analysis, AFMEA) заключается:

1) 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;

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

3) разработана типовая шкала баллов значимости несоответствия с учетом особенностей аддитивного производства (таблица 3);

4) разработана типовая шкала баллов возникновения несоответствия с учетом особенностей аддитивного производства (таблица 5);

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

3 Разработка методики нивелирования («компенсации») высокого уровня вариабельности диаметра прутка филамента для обеспечения качества деталей и узлов аэрокосмических конструкций из ПКМ

3.1 Статистическая обработка замеров диаметра прутка полимерных композиционных материалов для FDM 3D-печати

Как было отмечено в главе 1, дефекты напечатанных деталей и узлов могут быть вызваны неудовлетворительными выбранными технологического параметрами процесса FDM 3D-печати, несовершенствами конструкции FDM 3D-принтера и подготовкой 3D-модели к печати, различного рода недостатками поставляемых филаментов.

На рисунке 38 продемонстрирована диаграмма Исикавы для FDM 3D-печати деталей и узлов аэрокосмических конструкций. В качестве ключевого показателя качества выбрана прочность напечатанных деталей и узлов [170].



Рисунок 38 – Диаграмма Исикавы для FDM 3D-печати деталей и узлов

Как видно из диаграммы, одним из факторов, влияющих на прочность напечатанных деталей и узлов, являются геометрические свойства поставляемых филаментов, в частности, вариабельность диаметра прутка поставляемых филаментов.

На рисунке 39 продемонстрирован замер электронным цифровым штангенциркулем (с точностью до 0,02 мм) диаметра прутка специального филамента – ПКМ с матрицей из нейлона PA12 и наполнителя из стекловолокна GF12 отечественной компании-производителя филаментов REC.



Рисунок 39 – Замер диаметра прутка специального филамента цифровым штангенциркулем

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 и график частот появления значений замеров диаметра прутка филамента (рисунки 40-42).



Рисунок 40 – Частота появления значений первых 100 замеров диаметра филамента

Номинальный диаметр D_N прутка филамента, заявленный производителем, равен 1,75 мм. Согласно ГОСТ Р 59100-2020 предельное отклонение по диаметру должно составлять $\pm 0,03$ мм [5].

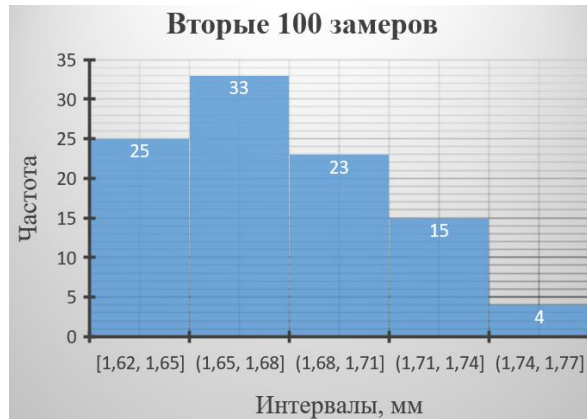


Рисунок 41 – Частота появления значений вторых 100 замеров диаметра филамента

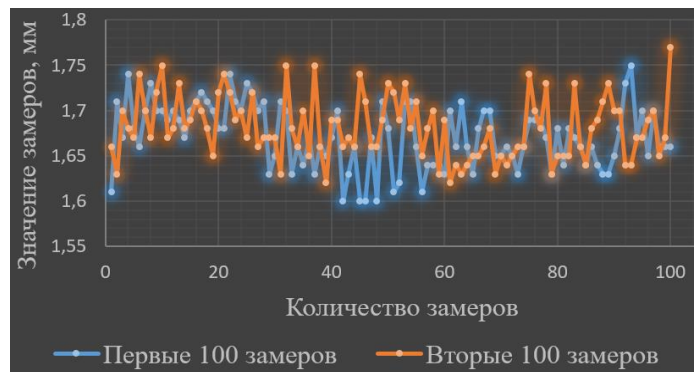


Рисунок 42 – График значений замеров диаметра прутка филамента

Как видно из рисунков 40 и 41, наблюдается высокий уровень вариабельности диаметра прутка филамента: минимальный диаметр прутка филамента D_{min} равен 1,60 мм, а максимальный D_{max} – 1,77 мм. Наиболее высокие значения частоты появления имеют интервалы размеров 1,63-1,66 мм (рисунок 40) и 1,65-1,68 мм (рисунок 41). Низкие значения частоты появления имеют интервалы размеров 1,72-1,75 мм (рисунок 40) и 1,74-1,77 (рисунок 41).

Из рисунка 5 видно, что вариабельность диаметра прутка филамента для обоих замеров практически лежит в одном диапазоне значений.

Среднее арифметическое значение \bar{x} первых 100 замеров диаметра прутка филамента составляет 1,6713 мм, для вторых 100 замеров – 1,6811 мм.

Среднее квадратичное отклонение S первых 100 замеров диаметра прутка филамента составляет 0,035 мм, для вторых 100 замеров – 0,034 мм.

На рисунке 43 приведены график Гаусса-Лапласа для проведенных замеров.

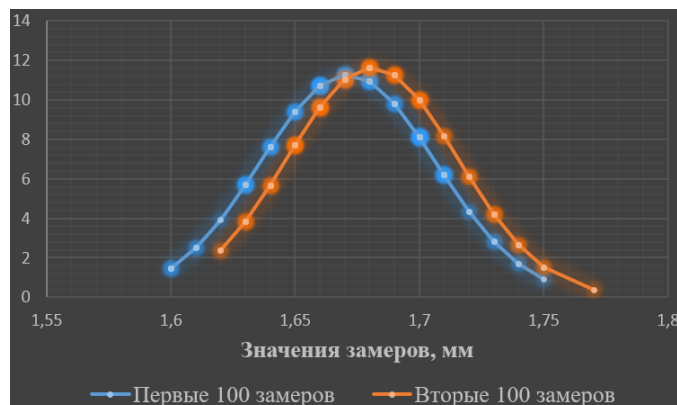


Рисунок 43 – График Гаусса-Лапласа для проведенных замеров

Высокий уровень вариабельности диаметра прутка филамента обусловлен введением в матрицу филамента наполнителя из стекловолокна.

На рисунке 44 продемонстрировано фотоизображение ПКМ без механической обработки с цифрового промышленного микроскопа Eakins 37MP с объективом 8x-100x C-Mount китайской компании Shenzhen Huaxin Electronic Co со 100 кратным увеличением.



Рисунок 44 – Фотоизображение ПКМ с цифрового микроскопа

На рисунке 45 продемонстрировано фотоизображение филамента ABS (акрилонитрил-бутадиен-стирол) без механической обработки с цифрового микроскопа.



Рисунок 45 – Фотоизображение филамента ABS с цифрового микроскопа

Как видно из рисунков 44 и 45 у ПКМ наблюдается крайне «грубая» шероховатость поверхности по сравнению с филаментом ABS.

Высокие значения частоты появления интервалов размеров 1,63-1,66 мм и 1,65-1,68 мм приводят к недоэкструзии филамента, которая в свою очередь приводит к понижению прочности напечатанных деталей и узлов.

На рисунке 46 продемонстрирован первый слой FDM печати образца с вышеуказанными значениями вариабельности диаметра прутка ПКМ.



Рисунок 46 – Первый слой FDM печати образца с вариабельности диаметра прутка филамента: $D_{\max} = 1,75$ мм, $D_{\min} = 1,61$ мм

Как видно из рисунка 46, форма первого слоя образца представляет собой образец для испытаний типа 1В согласно ГОСТ 32656-2017 (ISO 527-4:1997, ISO 527-5:2009) [5].

На рисунке 47 продемонстрирована фотоизображение указанного слоя FDM печати образца. В качестве программного обеспечения для обработки фотоизображения применена программное обеспечение ToprView.

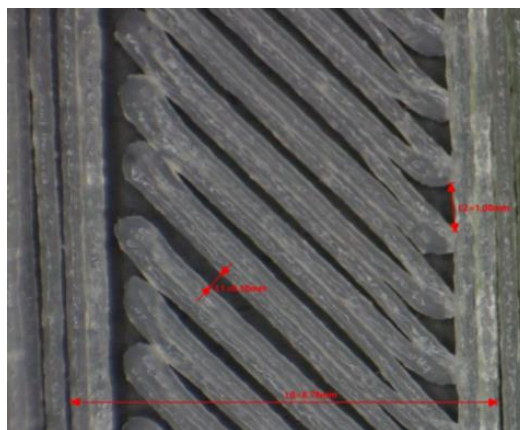


Рисунок 45 – Фотоизображение первого слоя FDM печати образца с микроскопа

В качестве FDM 3D-принтера использован 3D-принтер марки Flying Bear Tornado 2 Pro китайского производителя Flying Bear.

В качестве программы-слайсера выбрана программа UltiMaker CURA 5.2.1. Указанная программа является одной из наиболее популярных и распространенных программ-слайсеров среди операторов и технологов FDM аддитивного оборудования во всем мире.

Для FDM печати указанного выше первого слоя образца выбраны технологические режимы печати согласно стандартным настройкам программы CURA – профиль «Draft» (таблица 7).

Таблица 7 – Выбранные технологические режимы FDM печати

№ п/п	Технологические режимы FDM печати	Значение
1	2	3
1	Высота слоя, мм	0,2
2	Ширина линии (нити), мм	0,5
3	Ширина линии первого слоя, %	100
4	Температура сопла, °С	260
5	Температура стола, °С;	105
6	Поток, %;	100
7	Поток для первого слоя, %	100

Продолжение таблицы 7

8	Скорость печати, мм/сек	50
9	Коэффициент выравнивания потока, %	100
10	Типа прилипания к столу	кайма
11	Ширина каймы, мм;	8
12	Количество линий каймы	20
13	Диаметр совместимого материала (экструдер), мм;	1,75
14	Диаметр прутка филамента: 1,75 мм	1,75
15	Ориентация образца на рабочем столе	XY

Температура сопла экструдера и рабочего стола FDM принтера выбраны на основе инженерно-практического опыта как среднее значение интервала температур, рекомендованного компанией-производителем филамента (рисунок 46).



Рисунок 46 – Основные технологические режимы печати филамента

Как видно из рисунка 45, на образце между нитями присутствуют зазоры (щели) Z : максимальный зазор между внутренними параллельно экструдированными (расположенными) нитями $Z_{pmax} = 0,38$ мм, максимальный угловой зазор между стенкой и внутренними параллельно нитями $Z_{cmx} = 1,00$ мм. Указанные зазоры свидетельствуют о недостаточном экструдировании филамента, которое вызвано вариабельностью диаметра прутка филамента. В свою очередь, недостаточное экструдирование приводит к снижению такого

ключевого требования к аэрокосмическим конструкциям, как прочность и жесткость.

На основании изложенного возникает необходимость исключить из использования в производстве аэрокосмических конструкций дорогостоящие специальные филаменты (ПКМ) с высоким уровнем вариабельности диаметра прутка или стремиться нивелировать («компенсировать») эту вариабельность.

3.2 Экспериментальный поиск технологических параметров FDM печати для нивелирования вариабельности диаметра прутка филамента

Проведен экспериментальный поиск технологических параметров FDM печати для нивелирования вариабельности диаметра прутка филамента [171].

Установлено, что наиболее эффективным способом нивелирования вариабельности диаметра прутка филамента является изменение в программеслайсере параметра «Поток» во вкладке «Параметры печати» [170].

С увеличением коэффициента потока K_F значения зазоров Z_{pmax} и Z_{cmax} уменьшаются, вплоть до нулевого значения на 120-125% коэффициента потока K_F (рисунок 47, 48).

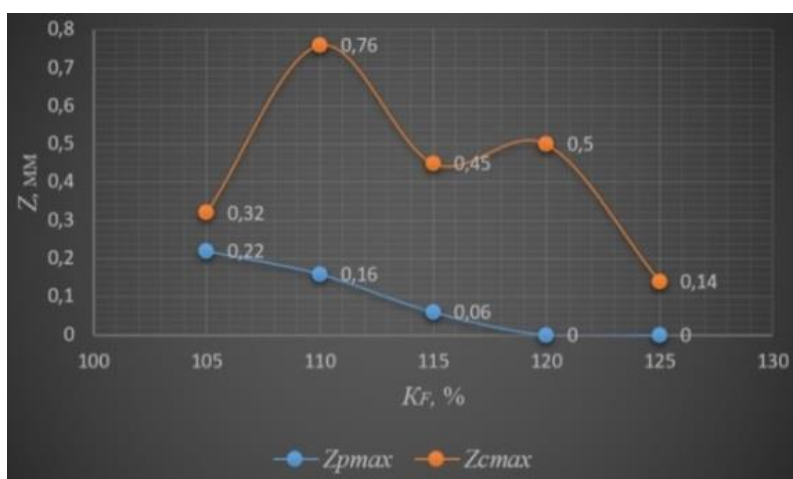


Рисунок 47 – Диаграмма зависимости зазоров Z_{pmax} и Z_{cmax} от коэффициента потока K_F

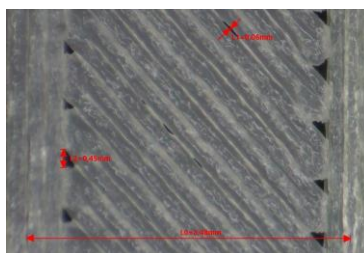


Рисунок 48 – Фотоизображение первого слоя FDM печати образца с микроскопа с коэффициентом потока $K_F = 115\%$

Кроме того, с увеличением коэффициента потока K_F средние значения прямоугольного сечения S_{mid} и массы m_{mid} увеличиваются с увеличением значения коэффициента потока K_F и достигают максимальной величины при 125% значения коэффициента потока K_F (рисунок 49, 50).

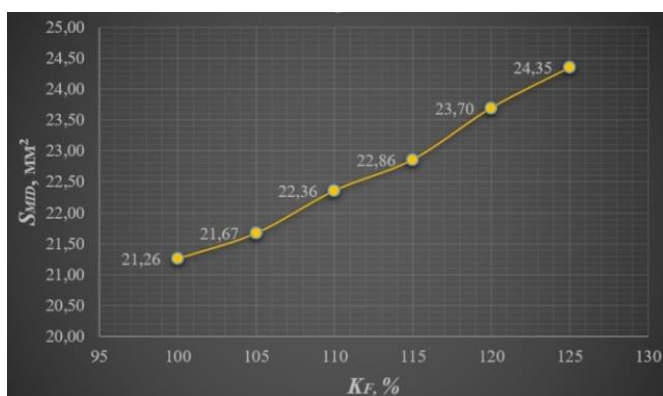


Рисунок 49 – Диаграмма зависимости среднего прямоугольного сечения S_{mid} напечатанных образцов от коэффициента потока K_F

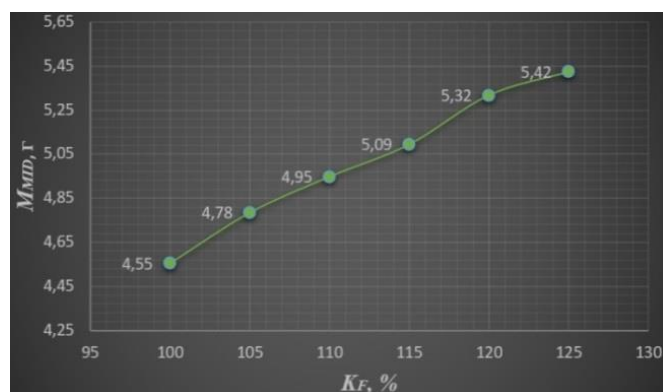


Рисунок 50 – Диаграмма зависимости средней массы m_{mid} напечатанных образцов от коэффициента потока K_F

3.3 Испытания напечатанных образцов на растяжение

Используя найденные экспериментальным путем технологических параметров FDM печати для нивелирования («компенсации») высокого уровня вариабельности диаметра прутка филамента, напечатаны образцы для испытания на растяжение типа 1В в соответствии с ГОСТ 32656-2017 (ISO 527-4:1997, ISO 527-5:2009). Проведены испытания напечатанных образцов на растяжение. Выявлено, что значения среднего максимального напряжения $\sigma_{mid\ max}$ достигают максимальной величины при 115-120 % значения коэффициента потока K_F , а при 125 % идет понижение величины напряжения $\sigma_{mid\ max}$ (рисунок 51).

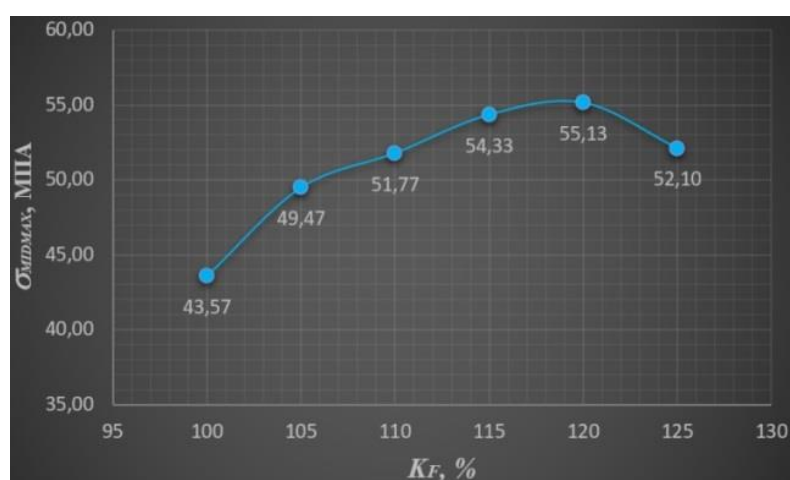


Рисунок 51 – Диаграмма зависимости среднего максимального напряжения $\sigma_{mid\ max}$ напечатанных образцов от коэффициента потока K_F

Предположено, что при коэффициенте потока K_F равным 125%, происходит «глубокое» наслаивание друг на друга нитей экструдированного (выдавливаемого) филамента, что приводит к понижению величины значения напряжения $\sigma_{mid\ max}$.

Наиболее оптимальный технологический режим FDM печати при вариабельности диаметра прутка филамента с 1,60 до 1,75 мм достигается при коэффициенте потока K_F равным 115 %. При данном значении коэффициента потока K_F достигается оптимальное сочетание геометрических размеров образцов, массы и значения напряжения σ_{max} [172].

Таким образом, разработана методика нивелирования («компенсации») высокого уровня диаметра прутка филамента для обеспечения качества деталей и узлов аэрокосмических конструкций из ПКМ [169-171].

3.3 Выводы по главе 3

В данной главе разработана методика нивелирования («компенсации») высокого уровня диаметра прутка филамента для обеспечения качества деталей и узлов аэрокосмических конструкций из ПКМ.

Разработанная методика состоит из четырех последовательных этапов.

На первом этапе проводится статическая обработка замеров диаметра прутка филамента.

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

На третьем этапе, используя найденные экспериментальным путем технологические параметры FDM печати для нивелирования вариабельности диаметра прутка филамента, печатаются образцы для испытания на растяжение (или, например, на сжатие, изгиб т.д.) и проводятся испытания.

На заключительном этапе на основе полученных экспериментальных данных испытания на растяжение выдаются рекомендации по технологическим режимам FDM 3D-печати для обеспечения качества деталей и узлов аэрокосмических конструкций из ПКМ.

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

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

Разработка методики проектирования деталей и узлов аэрокосмических конструкций из ПКМ в условиях аддитивного производства проведена в соответствии с разработанной в главе 2 настоящей работы структурной модели аддитивного производства и функциональной моделей обеспечения качества деталей и узлов аэрокосмических конструкций в условиях аддитивного производства.

4.1 Выбор объекта для демонстрации и отработки методики

В качестве объекта демонстрации и отработки разработанной методики выбран типовой соединительный узел (ТСУ), представляющий собой конструкцию, составными частями которой являются кронштейн, прокладка или термоплата (при необходимости) и монтируемая на них датчиково-преобразующая аппаратура (ДПА) или прибор. На рисунке 52 изображен ТСУ изделий РКТ.

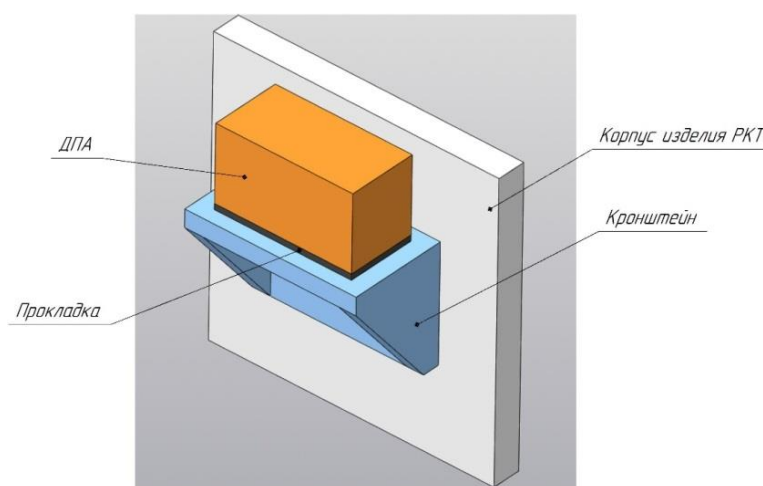


Рисунок 52 – ТСУ изделий РКТ

Кронштейн, закрепляемый к корпусу изделия РКТ, изготавливают главным образом из алюминиевого или титанового сплава. В качестве ДПА может

выступать датчик давления, например, в МБО РН. ДПА монтируется к кронштейну через прокладку, изготавливаемой из пластины резиновой ОСТ В 38.0525-85. В случае использования термоплаты, например, для монтажа приборов в космических аппаратах (КА), то ее главным образом изготавливают из алюминиевого сплава.

Массовые характеристики составных частей ТСУ приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Массовые характеристики составных частей ТСУ

№ п/п	Составная часть ТСУ	Масса, г
1	Кронштейн	150-2000
2	Прокладка	10-100
3	Термоплата	1000-3000
4	ДПА	150-15000

Необходимо отметить, что в состав ТСУ, кроме перечисленных составных частей, входят крепежные элементы: болты, винты, шайбы, хомуты и т.д. Вид и количество крепежных элементов зависит от конструкции кронштейна и типа применяемой ДПА (или прибора).

Описанная конструкция ТСУ часто применяется при разработке изделий РКТ (РН и КА) в АО «Ракетно-космический центр «Прогресс». На рисунке 53 представлены примеры использования указанной конструкции ТСУ для монтажа ДПА в МБО РН семейства «Союз».

Таким образом, в качестве объекта исследования выбран ТСУ изделий РКТ, в частности, соединительный узел (СУ), применяемый в МБО РН для монтажа датчика давления, температура эксплуатации от -50 до +50 °С.

В следующем разделе продемонстрирован анализ и выбор перспективного ПКМ (филамента) для изготовления (FDM 3D-печати) кронштейна и хомутов СУ изделия РКТ.

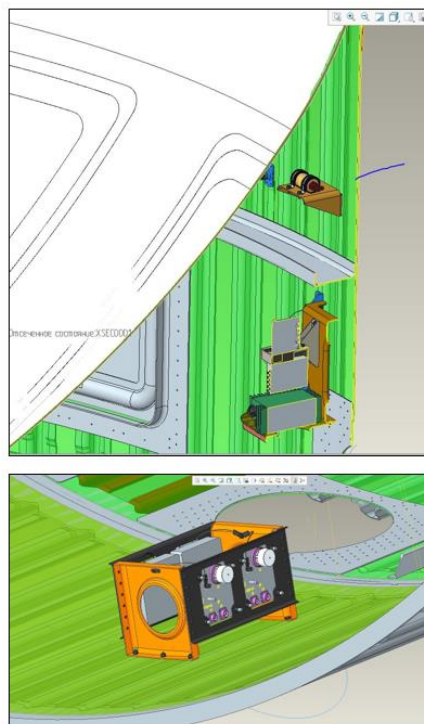


Рисунок 53 – Монтаж ДПА в МБО РН семейства «Союз»

4.2 Выбор полимерного композиционного материала для изготовления типового соединительного узла изделий авиационно-космической техники

Общие технические требования к филаментам, применяемых в аддитивных технологических процессах, основанных на послойном наложении филамента (FDM-технология) устанавливает ГОСТ Р 59100-2020 Пластмассы. Филаменты для аддитивных технологий. Общие технические требования [32].

Как было указано в разделе 1.2 «Материалы для FDM 3D-печати» настоящей работы, в производстве деталей и узлов аэрокосмических конструкций применяют главным образом инженерные и специальные филаменты.

Специальные филаменты, среди которых в том числе ПКМ, применяются при повышенных физико-механических и химических требованиях к готовому изделию или обладающие специальными (уникальными) свойствами [34, 35]. Для ПКМ в качестве полимерных связующих (матриц) преимущественно выступают ABS, PLA, Nylon, PETG и PEEK [44-51]. ПКМ используются для FDM 3D-печати

деталей и узлов гражданских и военных БПЛА и самолетов, а также ракет-носителей космического назначения и космических аппаратов [12, 17, 19, 52].

В настоящее время на отечественном и международном рынках представлено большое количество филаментов, и как показывает теоретический анализ [24-31, 34-64], это количество будет только расти. Как было указано в разделе 2.2 «Требования к деталям и узлам аэрокосмических конструкций в условиях аддитивного производства, полученных методом аддитивных технологических процессов» настоящей работы, главными критериями выбора филамента для FDM 3D-печати деталей и узлов изделий авиационно-космической техники из ПКМ являются его прочностные и эксплуатационные характеристики.

В таблице 9 продемонстрированы филаменты известных отечественных и зарубежных компаний-производителей филаментов, их состав, механические свойства (предел прочности при растяжении), плотность и температура эксплуатации.

Таблица 9 – Филаменты, их состав, механические свойства, плотность и температура эксплуатации

№ п/п	Название филамента (ПКМ)	Состав	Предел прочности при растяжении, σ_B , МПа	Плотность, ρ , г/см ³	Температура эксплуатации, °С
1	2	3	4	5	6
1	FRICTION REC	PA12 + GF12	≈60	1,05	-60 до +90
2	UltraX	PA6 + CF30	170	1,11	-60 до +150
3	GF MAX	PETG + GF10	170	1,23	-30 до +80
4	FormaX	ABS+CF15	35,52	1,11	-60 до +105
5	REC PEEK	PEEK	≈100	1,3	-70 до +172
6	REC PSU	PSU (полисульфон)	≈100	1,24	-70 до +172

Продолжение таблицы 9

1	2	3	4	5	6
7	TOTAL CF-5	TPU (термопластичный полиуретан) + CF	46,7	1,16	-50 до +120
8	TOTAL GF-10	TPU + GF	≈75	1,4	-50 до +110
9	TOTAL GF-30	TPU + GF	≈80	1,45	-50 до +130
10	TERMAX GF-40	PPS + GF	190	1,65	-190 до +240
11	TITAN GF-12	ABS + GF	60	1,16	-50 до +110
12	PA66 GF-30	PA66+ GF	190	1,36	-60 до +250
13	AEROTEX	SAN (сополимер стирола и акрилонитрила) + CF	51	0,819	≈ -40 до +120
14	U3 NYLON 6C ALL IN 0	PA6 + CF	75	≈1,1	≈ -60 до +200
15	U3 NYLON 6C M4 V.3	PA6 + CF20	75,8	≈1,1	≈ -60 до +200
16	U3 NYLON SC2 V0 FLAME STOP	PA12 + CF10	31,7	≈1,1	≈ -60 до +90
17	U3 TECHNO NYLON 12C M4 v.3	PA12 + CF20	52,6	≈1,1	≈ -60 до +90
18	PA NYLON	PA + CF	140	1,24	≈-60 до +90
19	ePA12-CF	PA12 + CF	108,18	1,2	≈ -60 до +90
20	OMNI3D PEKK-A	PEKK-A	≈110	1,261	≈ -70 до +172

В таблице 10 представлены компании - и страны-производители, указанных в таблице 9 филаментов, их технологические характеристики (температура сопла и рабочего стола) и стоимость за 1 г.

Таблица 10 – Филаменты, компания - и страна-производители, технологические характеристики и стоимость за 1 г

№ п/п	Название филамента (ПКМ)	Компания - и страна-производитель	Температура сопла экструдера, °С	Температура рабочего стола, °С	Стоимость за 1 г, руб.
1	FRICTION REC	REC, Россия	250-270	100-110	7,24
2	UltraX	REC, Россия	300-310	90	10,16
3	GF MAX	REC, Россия	250	90	5,32
4	FormaX	REC, Россия	270-290	95-110	5,98
5	REC PEEK	REC, Россия	375-410	130-145	71,40
6	REC PSU	REC, Россия	350-380	140-160	25,98
7	TOTAL CF-5	Filamentarno, Россия	215-240	80-100	5,60
8	TOTAL GF-10	Filamentarno, Россия	220-245	60-100	4,00
9	TOTAL GF-30	Filamentarno, Россия	230-250	60-100	4,00
10	TERMAX GF-40	Filamentarno, Россия	320-340	110-140	14,40
11	TITAN GF-12	Filamentarno, Россия	280-300	110-120	5,60
12	PA66 GF-30	Filamentarno, Россия	305-320	140	7,33
13	AEROTEX	Filamentarno, Россия	240-260	80-100	4,93
14	U3 NYLON 6C ALL IN 0	U3Print, Россия	320-330	110-130	10,30
15	U3 NYLON 6C M4 V.3	U3Print, Россия	280-300	110-130	7,10
16	U3 NYLON SC2 V0 FLAME STOP	U3Print, Россия	235-245	100	7,00
17	U3 TECHNO NYLON 12C M4 v.3	U3Print, Россия	220-240	110-130	6,42
18	PA NYLON	EasyThread, Китай	260-290	45-60	2,15
19	ePA12-CF	Antinsky, Китай	260-300	≈ 110	7,00
20	OMNI3D PEKK-A	OMNI3D, Польша	370-380	60-80	≈ 70,00

Согласно таблице 10, исходя из критерия прочности при растяжении (не менее 60 Мпа) и температуры эксплуатации (-50 до +50 °С), наиболее оптимальными вариантами для изготовления ТСУ являются следующие филаменты:

- FRICTION;
- UltraX;
- REC PEEK;
- REC PSU;
- TITAN GF-12
- TOTAL GF-10
- TOTAL GF-30;
- TERMAX GF-40;
- PA66 GF-30;
- U3 NYLON 6C ALL IN 0;
- U3 NYLON 6C M4 V.3;
- PA NYLON;
- ePA12-CF;
- OMNIZD PEKK-A.

Важно отметить, что при выборе филамента для изготовления деталей и узлов аэрокосмических конструкций из ПКМ, необходимо учесть не только прочностные и эксплуатационные характеристики, но и технологические характеристики (температура сопла экструдера и рабочего стола) и стоимость филамента.

Кроме того, увеличение температуры сопла экструдера и рабочего стола влекут за собой большое потребление электроэнергии и более мощное аддитивное оборудование, а значит, и стоимость конечного напечатанного изделия будет дороже.

Согласно таблице 5 среди выбранных по таблице 4 филаментов наиболее оптимальными (по критериям: температура сопла экструдера и рабочего стола до

280 и 120 °С, соответственно) и стоимость филамента (до 10 рублей за 1 г) являются:

- FRICTION;
- TOTAL GF-10;
- TOTAL GF-30.

Важно отметить, что при относительно равных характеристиках (не смотря на низкую стоимость китайских или других зарубежных филаментов) для изготовления деталей и узлов аэрокосмических конструкций предпочтение отдается отечественным материалам.

У филамента FRICTION REC удельная прочность выше, чем у TOTAL GF-10 и TOTAL GF-30 (таблица 11).

Таблица 11 – Удельная прочность филаментов

№ п/п	Название филамента	Предел прочности при растяжении, σ_B , МПа	Плотность, ρ , г/см ³	Удельная прочность (σ_B/ρ), кН×м / кг
1	FRICTION REC	60	1,05	57,14
2	TOTAL GF-10	75	1,4	53,5
3	TOTAL GF-30	80	1,45	55,2

Таким образом, исходя из прочностных, эксплуатационных, технологических и стоимостных характеристик, наиболее оптимальным вариантом для изготовления (FDM 3D-печати) ТСУ является филамент FRICTION отечественной компании-производителя REC (рисунок 54).



Рисунок 54 – Филамент FRICTION отечественной компании REC

Как было отмечено выше, главными критериями выбора филамента для изготовления объекта демонстрации (ТСУ) были не только прочностные и эксплуатационные характеристики, но и технологические и стоимостные.

4.3 Выбор FDM 3D-принтера для изготовления типового соединительного узла из полимерных композиционных материалов для изделий авиационно-космической техники

В настоящее время на отечественном и международном рынках, преимущественно на китайском, представлено большое количество FDM 3D-принтеров разной конструкции и кинематикой.

Общие требования к оборудованию для аддитивных технологических процессов устанавливает ГОСТ Р 57588–2021 Аддитивные технологии. Оборудование для аддитивных технологических процессов. Общие требования. Требования к конструкции функциональных и иных элементов оборудования, их составным частям, компоновке, размещению, взаимодействию определены технической документацией на оборудование. Конструкция оборудования должна минимизировать риск ошибок и обеспечивать возможность его эффективной очистки и обслуживания с целью предотвращения появления любых факторов, которые могут негативно повлиять на качество производимого продукта [173].

Несмотря на различную конструкцию FDM 3D-принтеров, представленных на рынках аддитивного оборудования, можно выделить следующие основные узлы и детали:

- а) экструдер;
- б) рабочий стол, или платформа для 3D-построения;
- в) механизмы перемещения и направляющие;
- г) модуль управления;
- д) блок питания;

е) рама.

Главной составной частью любого 3D-принтера является экструдер (рисунок 55). Экструдер – электромеханический компонент, предназначенный для плавления и выдавливания материала для построения трехмерной модели на рабочем столе 3D-принтера.

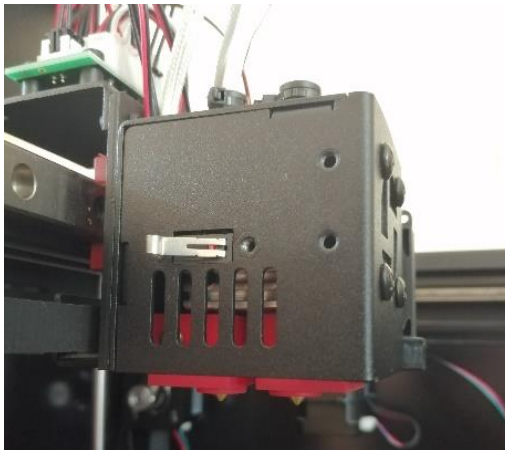


Рисунок 55 – Двойной экструдер FDM 3D-принтера

Экструдер состоит из двух составных частей:

- 1) cold end – механизм для подачи материала для 3D-печати;
- 2) hot end – механизм для плавления материала для 3D-печати.

В настоящее время существует два вида конструкции экструдера: bowden extruder и direct extruder. Отличие между двумя видами конструкции экструдера состоит в том, что: в bowden extruder механизм для подачи материала соотнесен от механизма для плавления материала и находится на раме 3D-принтера.

Каждая конструкция имеет свои преимущества и недостатки. Но главным преимуществом bowden extruder является более низкая инерция и вибрация при 3D-печати за счет соотнесенного cold end, что несомненно повышает качество напечатанных деталей.

Рабочий стол, или платформа для 3D-построения – составная часть 3D-принтера, на которой происходит формирование детали, то есть 3D-печать детали (рисунок 56).

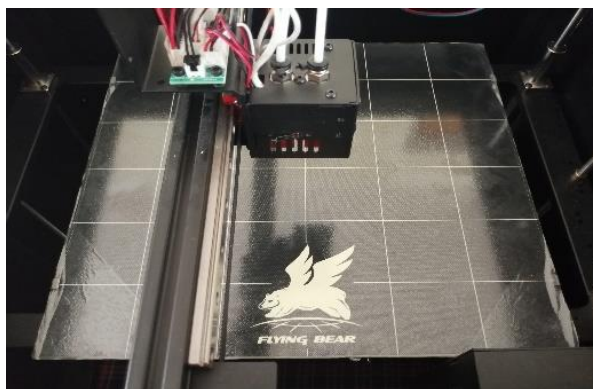


Рисунок 56 – Рабочий стол FDM 3D-принтера

Рабочий стол состоит из верхней и нижней частей. На верхней части формируется деталь, а нижняя часть предназначена для нагрева и фиксации рабочего стола.

Для обеспечения движения экструдера и рабочего стола используют механизмы перемещения и направляющие, к которым относятся шаговые двигатели и рейки (рисунок 57).

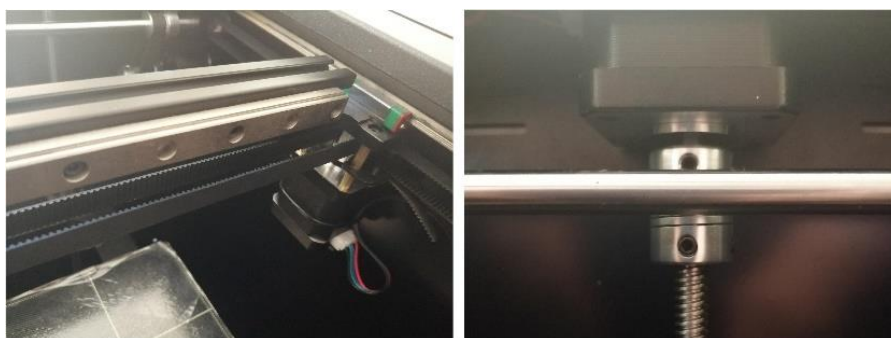


Рисунок 57 – Механизмы перемещения и направляющие

Для преобразования вращения вала шагового двигателя в поступательное движение экструдера или рабочего стола используются система шкивов, зубчатых колес, ремней и валов.

Работой всех компонентов 3D-принтера управляет система управления, которая включает модуль управления, программное обеспечение (например, Marlin), материнскую плату, промежуточные платы и датчики-концевики. На рисунке 58 представлены модуль управления 3D-принтера и датчик-концевик.

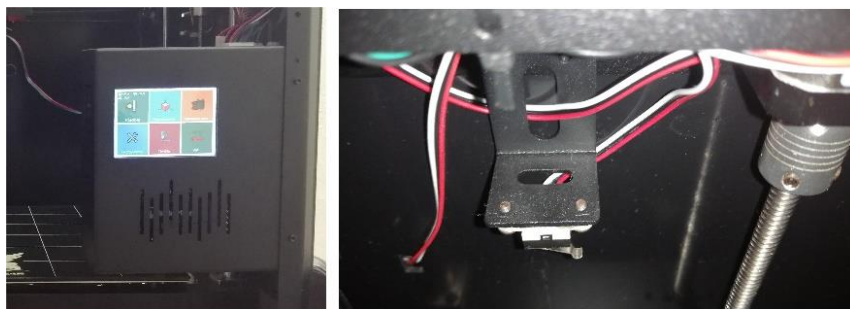


Рисунок 58 – Модуль управления и датчик-концевик

Блок питания преобразует высокое напряжения внешней сети в низкое напряжение для стабильной работы 3D-принтера.

Все выше перечисленные узлы и механизмы размещаются в раме 3D-принтера. Рама изготавливается из алюминиевых профилей и листов из материала ABS или органического стекла.

Кинематика 3D-принтера – это схема, по которой перемещаются экструдер и рабочий стол 3D-принтера. В настоящее время наибольшее распространение получили два вида кинематики: картезианские 3D-принтеры и дельта 3D-принтеры. Есть и другие виды кинематики 3D-принтеров, но из-за их небольшого распространения в настоящей работе они не будут рассматриваться. Каждый вид кинематики имеет свои преимущества и недостатки.

Картезианские 3D-принтеры. Работа картезианских 3D-принтеров основана на декартовой системе координат. Движение экструдера относительно рабочего стола задается по трем осям: X, Y и Z. На рисунке 59 представлен китайский FDM 3D-принтер модели Flyingbear Tornado 2 PRO.



Рисунок 59 – FDM 3D-принтер модели Flyingbear Tornado 2 PRO

Наиболее распространенными картезианскими 3D-принтерами являются следующие два типа:

1) экструдер движется по осям X и Y , в то время как рабочий стол движется по оси Z ;

2) экструдер движется по оси Z , а рабочий стол по осям X и Y .

Главными преимуществами картезианских 3D-принтеров являются:

- а) простота конструкции;
- б) простота калибровки;
- в) большие возможности модернизации конструкции;
- г) изготовление и сборка 3D-принтеров любых габаритов и размеров;
- д) картезианские 3D-принтеры подходят для массового выпуска деталей и узлов.

Основными недостатками картезианских 3D-принтеров являются невысокая скорость печати и большие габариты по сравнению с 3D-принтерами, имеющих другую кинематику.

Экструдер дельта 3D-принтеров движется одновременно по трем осям по сложной траектории согласно тригонометрической функции, рабочий стол остается неподвижным. Перемещение экструдера обеспечивается благодаря движению тяг, закрепленных на трех осях 3D-принтера.

Главными преимуществами дельта 3D-принтеров являются высокая скорость печати и малые габариты.

Основными недостатками дельта 3D-принтеров являются:

- а) высокие требования к точности изготовления и сборки конструкции;
- б) сложность калибровки;
- в) невысокие возможности модернизации конструкции;
- г) необходимость использования материнских плат с высокими вычислительными мощностями.

Обобщенными требованиями к 3D-принтеру являются:

- размеры рабочей камеры;
- качество (геометрическая точность и шероховатость) печати;

- надежность конструкции;
- возможность печатать различными филаментами;
- простота использования и обслуживания;
- низкая стоимость покупки и эксплуатации.

Разные виды кинематики в разной степени способны обеспечить выполнение данных требований.

Ниже в таблице 12 приведена оценка выполнения требований различными видами кинематики [174].

Таблица 12 – Оценка степени выполнения требований различными видами кинематики FDM 3D-принтера

Требования Значимость для потребителя абс / отн			Оценка кинематики 3D-принтера (5-балльная шкала, 0 - не выполняет требование, 5 - лучший)						
			Картезианская H-bot	Картезианская CoreXY	Дельта	Полярные	Роботы	SCARA	Идеал
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Размеры рабочей камеры	8	11,8	3	3	4	4	5	4	5
Качество (точность и шероховатость) печати	10	14,7	4	5	3	2	3	5	5
Надежность конструкции	9	13,2	4	4	3	3	4	4	5
Возможность печатать различными материалами	8	11,8	4	4	4	2	5	3	5
Простота использования и обслуживания	7	10,3	3	4	3	3	2	3	5
Скорость печати	9	13,2	4	4	3	3	4	4	5

Продолжение таблицы 12

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Безопасность (включая шум и вибрации)	10	14,7	4	3	3	3	3	4	5
Низкая стоимость покупки и эксплуатации	7	10,3	4	5	4	3	1	2	5
Абс. оценка качества			378	399	334	285	353	372	500
Отн. оценка качества			75,6	79,7	66,8	57,1	70,6	74,4	100

Значимость требований определена по 10-балльной шкале с точки зрения промышленного потребителя. В случае использования 3D-принтера в частном порядке или в учебных заведениях значимость конкретных характеристик была бы другой.

Соответствие требованиям оценивалось экспертно по 5-балльной шкале. Общая оценка качества рассчитывалась по аналогии с методикой, принятой в НоQ QFD как сумма произведений оценок выполнения требований на значимость требования [175].

Наилучшей оценкой (79,7%) обладают FDM 3D-принтеры с картезианской кинематикой. Наихудшими (57,1%) на настоящий момент мы считаем полярные принтеры. Они имеют ограниченное применение. Перспективы имеют 3D-принтеры SCARA, но они пока достаточно дорогие.

Для экспериментальной оценки влияния технологических режимов FDM 3D-печати на качество напечатанных деталей и узлов изделий авиационно-космической техники и апробации разработанной функциональной модели управления качеством проведена закупка FDM 3D-принтера с картезианской кинематикой китайского производства модели Flyingbear Tornado 2 PRO. Технические характеристики указанного принтера представлены в таблице 13.

Таблица 13 – Технические характеристики FDM 3D-принтера Flyingbear Tornado 2 PRO

№ п/п	Наименование технической характеристики	Единица измерения	Размерность
1	Размеры принтера	мм	583x360x375
2	Вес принтера	кг	25
3	Размеры печати	мм	360x360x375
4	Точность позиционирования по оси Z	мм	0,002
5	Точность позиционирования по осям X и Y	мм	0,01
6	Максимальная скорость печати	мм/сек	150
7	Максимальная температура сопла экструдера	°С	280
8	Максимальная температура рабочего стола	°С	115
9	Количество сопел экструдера	шт.	2
10	Мощность блока питания	Вт	600
11	Диаметр филамента	мм	1,75
12	Вид кинематики	–	Картезианская
13	Тип экструдера	–	Bowden
14	Программное обеспечения принтера	–	Marlin
15	Рекомендуемые программы-слайсеры	–	CURA, Repetier Host
16	Подключение к принтеру	–	SD-карта, USB-кабель, Wi-Fi
17	Совместимость с операционной системой	–	Windows, Mac OS

Таким образом, в настоящем разделе проведено описание и анализ конструкции и видов кинематик FDM 3D-принтеров, приведены технические характеристики купленного FDM 3D-принтера – Flyingbear Tornado 2 PRO для изготовления объекта исследования – ТСУ.

4.4 Реализация функции развертывания качества QFD I и II уровня

Размещение СУ для крепления и фиксации датчика давления в МБО первой ступени РН семейства «Союз» продемонстрировано на рисунке 60.

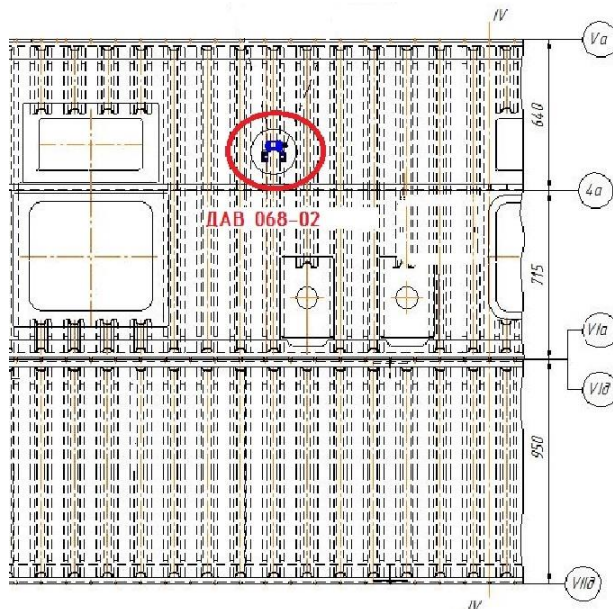


Рисунок 60 – Размещение СУ в МБО первой ступени РН семейства «Союз»

Общий вид датчика давления представлен на рисунке 61.

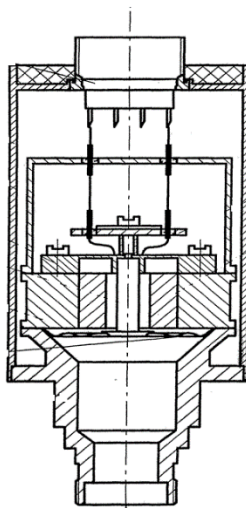


Рисунок 61 – Общий вид датчика давления

Масса датчика давления составляет 0,2 кг.

К СУ предъявляются следующие требования, сформулированные в техническом задании на его разработку и изготовление:

1) Требования назначения – СУ должен обеспечить:

- надежное крепление и фиксацию датчика давления на кронштейне СУ;
- размещение и закрепление СУ с датчиком давления на корпусе МБО РН;

2) Прочность конструкции – СУ должен обеспечивать надежное сопротивление разрушению под действием приложенных нагрузок (статических, динамических);

3) Жесткость конструкции – центр массы СУ не должен допускать перемещения под действием единичной перегрузки не более 0,5-0,16 мм относительно корпуса МБО РН в направлении действия перегрузки;

4) Требования минимальной массы конструкции СУ – СУ должен обладать минимальной массой по критерию прочности;

5) Требования живучести и стойкости к внешним воздействиям. Условия эксплуатации СУ:

- температура окружающего воздуха: от -50 до +50 °С;
- относительная влажность воздуха: от 45 до 75%;
- атмосферное давление: от 645 до 795 мм рт. ст.;
- синусоидальная вибрация в трех взаимно перпендикулярных направлениях: амплитуда ускорения (максимальное значение) 147,0 м/с² (15,0 g), диапазон частот (максимальное значение) 2000 Гц.

6) Требования к составу СУ. Составные части СУ:

- кронштейн;
- скоба для закрепления датчика давления;
- крепежные элементы.

7) Требования к технологичности – при разработке и изготовлении ТСУ должно быть предусмотрено использование прогрессивных технологических процессов, обеспечивающих достижение заданных характеристик при минимальных затратах на его изготовление;

8) Требования к материалам – изготовление СУ должно осуществляться преимущественно из материалов отечественного производства;

9) Требования безопасности – применяемые в СУ материалы и покрытия не должны выделять токсичных веществ;

10) Требования к транспортированию СУ:

– СУ должны транспортироваться в транспортной таре на любые расстояния любым видом транспорта без ограничения скорости и высоты;

– СУ должны транспортироваться в составе изделия в соответствии с требованиями к транспортированию самого изделия.

11) Экономические требования – экономичность использования материальных и трудовых ресурсов на разработку документации (проектной, технологической) и изготовление СУ;

12) Эргономичность конструкции.

Основным инструментом методологии QFD является матрица, которая в соответствии с формой называется домом качества НоQ (рисунок 62) [166].

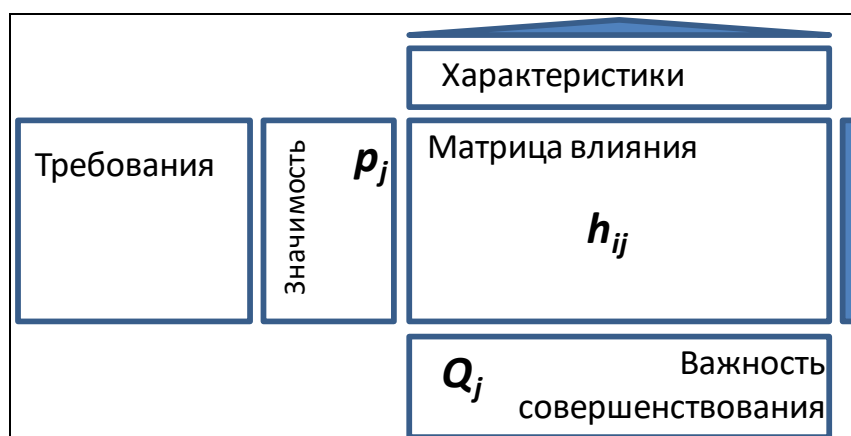


Рисунок 62 – Схематичное изображение дома качества НоQ QFD

Важность совершенствования компонента / характеристики / процесса Q_j рассчитывается по формуле [166]:

$$Q_j = \sum (p_i \times h_{ij}), \quad (1)$$

где p_i – значимость требования потребителя (заказчика), h_{ij} – степень влияния компонента / характеристики / процесса на выполнение требования потребителя (рисунок 63).

Значимость требования потребителя p_i обычно устанавливается по 10-балльной шкале с приведением к относительному значению. Степень влияния h_{ij} определяется экспертно с использованием шкалы: 1 - слабое, 3 – среднее, 9 – сильное влияние.

С помощью метода QFD выявлены характеристики, в наибольшей степени определяющие качество СУ.

В результате проведения QFD I уровня выявлены наиболее важные характеристики конструкции ТСУ, в наибольшей степени влияющие на прочность и жесткость конструкции, а также на выполнение других требований технического задания:

- материал конструкции СУ;
- тип (оптимизированная или традиционная) конструкция СУ;

На рисунке 63 представлена матрица дома качества QFD I уровня для конструкции СУ.

Для реализации (воплощения) характеристик качества СУ (QFD I уровня) идентифицированы наиболее важные характеристики компонентов (составных частей СУ) в результате проведения QFD II уровня:

- оптимизированная конструкция кронштейна СУ;
- применение ПКМ для изготовления кронштейна и скобы;

На рисунке 64 представлена матрица дома качества QFD II уровня для компонентов СУ.

Таким образом, на основе проведения QFD I и II уровня проведены:

- 1) перевод требований технического задания на разработку СУ в технические характеристики изделия;
- 2) идентификация ключевых характеристик СУ;
- 3) перевод технических характеристик изделия в технические характеристики компонентов;
- 4) идентификация ключевых характеристик компонентов (составных частей СУ).

Согласно функциональной модели результаты проведения QFD I и II уровня транслируются на следующий шаг «Моделирование конструкции».

Row #	Max Relationship Value in Row	Relative Weight	Weight / Importance	Demanded Quality (a.k.a. "Customer Requirements" or "Whats")	Column #			
					1	2	3	4
					Direction of Improvement: Minimize (▼), Maximize (▲), or Target (x)			
					X	X	▲	▲
					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	○		▲	▲
Target or Limit Value					ПКМ	Оптимизированная конструкция	100%	100%
Difficulty (0=Easy to Accomplish, 10=Extremely Difficult)					1	9	9	6
Max Relationship Value in Column					9	9	9	9
Weight / Importance					617,2	389,7	196,6	148,3
Relative Weight					45,7	28,8	14,5	11,0

Рисунок 63 – Матрица дома качества QFD I уровня

Row #	Max Relationship Value in Row	Relative Weight	Weight / Importance	Demanded Quality (a.k.a. "Whats")	Column #			
					1	2	3	4
Direction of Improvement: Minimize (▼), Maximize (▲), or Target (x)					▲	X	▲	▲
Quality Characteristics (a.k.a. "Hows")					Оптимизированная конструкция кронштейна	Применение ПКМ для изготовления кронштейна и скобы	Стандартных и унифицированных элементов крепления датчика	Стандартные и унифицированные элементы крепления на корпус МБО
1	9	45,7	617,2	Материал	○	○	▲	▲
2	9	28,8	389,7	Тип (традиционная или оптимизированная) конструкции	○	○		
3	9	14,5	196,6	Уровень унификации материала для изготовления СЧ конструкции СУ	○	○		
4	9	11,0	148,3	Уровень стандартизации и унификации деталей			○	○
Target or Limit Value					Топологическая оптимизация	Friction Rec	Шайба С5.04.016 ГОСТ 11371-78, болт М5-6ex12,66.019	Шайба С5.04.016 ГОСТ 11371-78, болт М5-6ex12,66.019
Difficulty (0=Easy to Accomplish, 10=Extremely Difficult)					10	5	1	1
Max Relationship Value in Column					9	9	9	9
Weight / Importance					440,1	628,3	144,4	144,4
Relative Weight					32,4	46,3	10,6	10,6

Рисунок 64 – Матрица дома качества QFD II уровня для компонентов СУ

4.5 Расчетная схема конструкции кронштейна СУ

В качестве расчетной принята следующая схема расположения конструкции кронштейна СУ (рисунок 65):

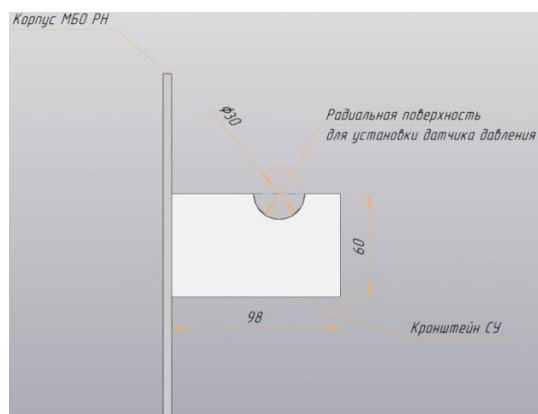


Рисунок 65 – Расчетная схема конструкции кронштейна СУ

При этом, как было указано выше, масса датчика давления ДАВ 068-02 составляет 0,2 кг.

Максимальные нагрузки, действующие на СУ, назначены в соответствии с перегрузками, возникающими на всех этапах эксплуатации изделия (таблица 14).

Таблица 14 – Максимальные перегрузки, действующие на СУ

Суммарные нагрузки					
Эксплуатационные			Расчетные		
$n_{\Sigma x}^3$	$n_{\Sigma y}^3$	$n_{\Sigma z}^3$	$n_{\Sigma x}^p$	$n_{\Sigma y}^p$	$n_{\Sigma z}^p$
15,0	15,0	15,0	19,5	19,5	19,5

На основе проведения QFD II уровня для разработки и изготовления на базе кафедры производства летальных аппаратов и управления качеством в машиностроении Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева выбрана конструкция кронштейна и скобы из ПКМ, в частности, из филамента Friction Rec.

4.6 Определение робастной комбинации технологических параметров FDM 3D-печати деталей и узлов аэрокосмических конструкций из ПКМ

4.6.1 Выбор технологических параметров FDM 3D-печати

Как показывает теоретический анализ [88, 105-115], на механические свойства напечатанных изделий, являющиеся одними из важнейших качественных характеристик, существенное влияние оказывают технологические параметры FDM 3D-печати. Поэтому необходимо определить комбинацию технологических параметров печати, которая обеспечит максимальные значения показателей механических свойств.

Но, важно отметить, что кроме управляемых технологических параметров печати, на механические свойства напечатанных изделий оказывают влияние и неуправляемые факторы, такие как скачки напряжения в сети, кратковременные изменения или колебания температуры и влажности окружающей среды и т.д. Наличие неуправляемых факторов влечет за собой необходимость получения такой комбинации технологических параметров FDM 3D-печати, которая обеспечит не только оптимальные механические свойства, но и их робастность, то есть получение стабильных значений показателей механических свойств напечатанных деталей.

Для определения комбинации технологических параметров печати, которая обеспечит получение максимальных и стабильных значений показателей механических свойств напечатанных деталей, в работе использовано робастное планирование экспериментов по методу Гэнъити Тагути [133-138]. Подробное описание проведения робастного планирования экспериментов по указанному методу приведено в ГОСТ Р ИСО 16336-2020 [115].

Основными технологическими параметрами FDM 3D-печати являются:

- 1) высота слоя печати;
- 2) скорость печати;
- 3) температура сопла экструдера;
- 4) диаметр сопла экструдера;
- 5) ориентация и расположение образца на рабочем столе FDM 3D-принтера в соответствии с ГОСТ Р 59929-2021 и ГОСТ Р 59585-2021 (ИСО/АСТМ 52921:2013) [176, 177];
- 6) температура рабочего стола;
- 7) температура пространства построения (печати) внутри рабочей камеры FDM 3D-принтера.

Перечисленные выше технологические параметры приняты в качестве управляемых факторов, кроме температуры рабочего стола и температуры пространства построения внутри рабочей камеры FDM 3D-принтера – исходя из инженерно-практического опыта указанные параметры остаются неизменяемыми.

Кроме того, упомянутые технологические параметры исключили для оптимизации ортогональной матрицы, и, соответственно, уменьшения количества экспериментов.

На основе результатов теоретического анализа работ [88, 105-115, 178] и инженерно-практического опыта для управляемых факторов принято 4 уровня. В таблице 15 представлены управляемые факторы и их уровни со значениями.

Таблица 15 – Управляемые факторы и их уровни

Наименование фактора	Обозначение фактора	Единица измерения	Уровни			
			1	2	3	4
Высота слоя печати	A	мм	0,1	0,2	0,3	0,4
Скорость печати	B	мм/с	40	50	60	70
Температура сопла экструдера	C	С°	250	255	260	270
Диаметр сопла экструдера	D	мм	0,5	0,6	0,8	1,0
Ориентация образца на рабочем столе	E	–	X \bar{Y}	$\bar{Y}X$	C + 45° от X	Z \bar{X}

В качестве факторов шума приняты:

- 1) колебание температуры сопла экструдера;
- 2) колебание температуры рабочего стола;
- 3) натяжение ремня ременной передачи по оси X.

Указанные дестабилизирующие факторы могут вызваны нестабильностью (скачками) напряжения в сети и несовершенствами (или износом) конструкции FDM 3D-принтера.

На основе результатов теоретического анализа [88, 105-115, 178] и инженерно-практического опыта дестабилизирующих факторов принято 3 уровня.

В таблице 16 представлены дестабилизирующие факторы и их уровни со значениями.

Таблица 16 – Дестабилизирующие факторы и их уровни

Наименование фактора	Обозначение фактора	Единица измерения	Уровни		
			1	2	3
Колебание температуры сопла экструдера	G	С°	-3	0	+3
Колебание температуры рабочего стола	H	С°	-3	0	+3
Натяжение ремня ременной передачи по оси X	I	–	недотяг	натяг	перетяг

В качестве внутренней таблицы (плана) принята ортогональная матрица $L16 (4^5)$, а в качестве внешней таблицы $L4 (2^2)$.

Внутренняя таблица (план) – план эксперимента, параметры которого рассматривают как управляемые факторы [115]. Внешняя таблица (план) – план эксперимента, в котором факторами служат условия эксплуатации, рассматриваемые как факторы шума [115].

В таблице 17 представлена ортогональная матрица $L16 (4^5)$.

Таблица 17 – Ортогональная матрица $L16 (4^5)$.

$L16 (4^5)$						
1	2	3	4	5	6	7
Прогон	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>X</i>
1	1	1	1	1	1	X_1
2	1	2	2	2	2	X_2
3	1	3	3	3	3	X_3
4	1	4	4	4	4	X_4
5	2	1	2	3	4	X_5

Продолжение таблицы 17

6	2	2	1	4	3	X_6
7	2	3	4	1	2	X_7
8	2	4	3	2	1	X_8
9	3	1	3	4	2	X_9
10	3	2	4	3	1	X_{10}
11	3	3	1	2	4	X_{11}
12	3	4	2	1	3	X_{12}
13	4	1	4	2	3	X_{13}
14	4	2	3	1	4	X_{14}
15	4	3	2	4	1	X_{15}
16	4	4	1	3	2	X_{16}

Таблица 18 – Ортогональная матрица $L9 (3^3)$

$L9 (3^4)$				
Прогон	a	b	c	X
1	1	1	1	X_1
2	1	2	2	X_2
3	1	3	3	X_3
4	2	1	2	X_4
5	2	2	3	X_5
6	2	3	1	X_6
7	3	1	3	X_7
8	3	2	1	X_8
9	3	3	2	X_9

На основе выбранных ортогональных матриц для управляемых и дестабилизирующих факторов составлена ортогональная матрица для планирования и проведения экспериментов (таблица 19).

Таблица 19 – 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		
						I	1	2	3	2	3	1	3	1	2		
Внутренняя матрица						Выходные экспериментальные данные, y, σ_{\max} , МПа									Среднее квадр. откл. / оклика y, σ_{\max}	Сигнал / шум $S/N, \eta$	
Прогон	A	B	C	D	E	1	2	3	4	5	6	7	8	9			
1	1	1	1	1	1												
2	1	2	2	2	2												
3	1	3	3	3	3												
4	1	4	4	4	4												
5	2	1	2	3	4												
6	2	2	1	4	3												
7	2	3	4	1	2												
8	2	4	3	2	1												
9	3	1	3	4	2												
10	3	2	4	3	1												
11	3	3	1	2	4												
12	3	4	2	1	3												
13	4	1	4	2	3												
14	4	2	3	1	4												
15	4	3	2	4	1												
16	4	4	1	3	2												

В качестве показателя механических свойств, и, соответственно, отклика, принято значение прочности при растяжении, которая является одним из ключевых показателей качества для ТСУ.

4.6.2 FDM 3D-печать образцов для испытания

Как было указано в разделе 4.3, в качестве FDM 3D-принтера выбран принтер китайского производства Flyingbear Tornado 2 PRO, а в качестве филамента – ПКМ Friction Res отечественного производителя.

В качестве объекта для FDM 3D-печати и последующих испытаний на прочность при растяжении принят образец для испытаний типа 1В в соответствии с ГОСТ 32656-2017 (ISO 527-4:1997, ISO 527-5:2009) [179].

Образец для испытаний типа 1В представлен на рисунке 66.

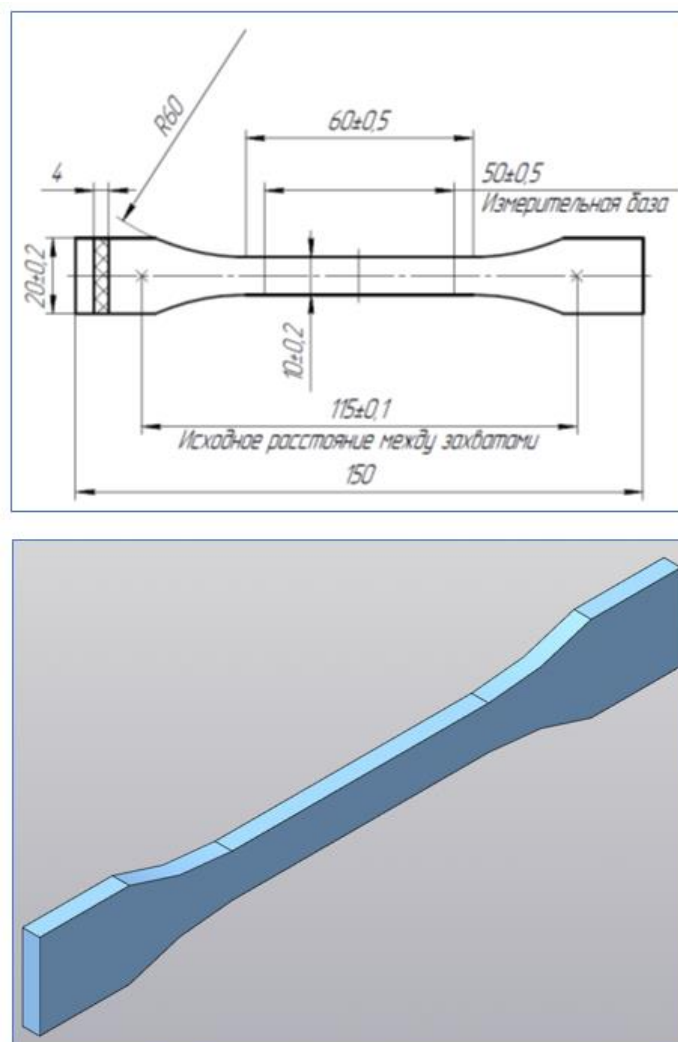


Рисунок 66 – Образец для испытания типа 1В

Для FDM 3D-печати образцов для испытания необходимо 3D-модель образцов с помощью программы-слайсера перевести в G-код, то есть провести предпечатную подготовку модели. В качестве программы-слайсера выбрана программа UltiMaker CURA 5.2.1.

На рисунке 67 представлена стартовое окно программы UltiMaker CURA 5.2.1.

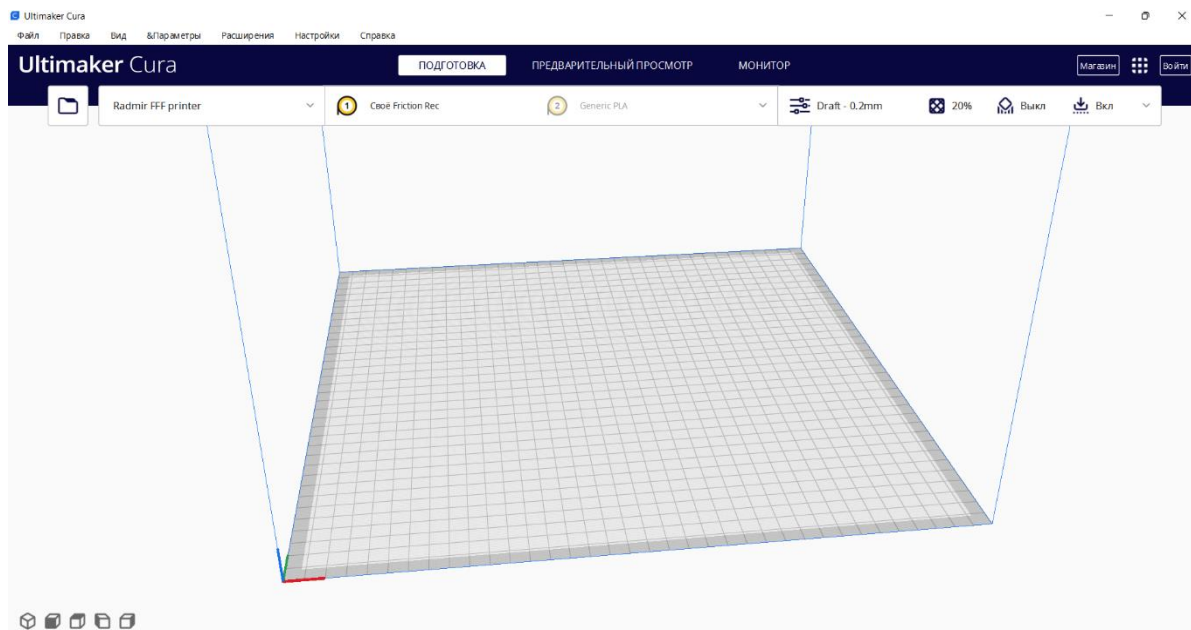


Рисунок 67 – Стартовое окно программы UltiMaker CURA 5.2.1

Указанная программа является одной из наиболее популярных и распространенных программ-слайсеров среди операторов и технологов FDM аддитивного оборудования во всем мире.

Перед выгрузкой 3D-модели образца для испытания в программно-слайсере проведен выбор диаметра сопла экструдера FDM 3D-принтера и диаметра совместимого филамента (рисунок 68).

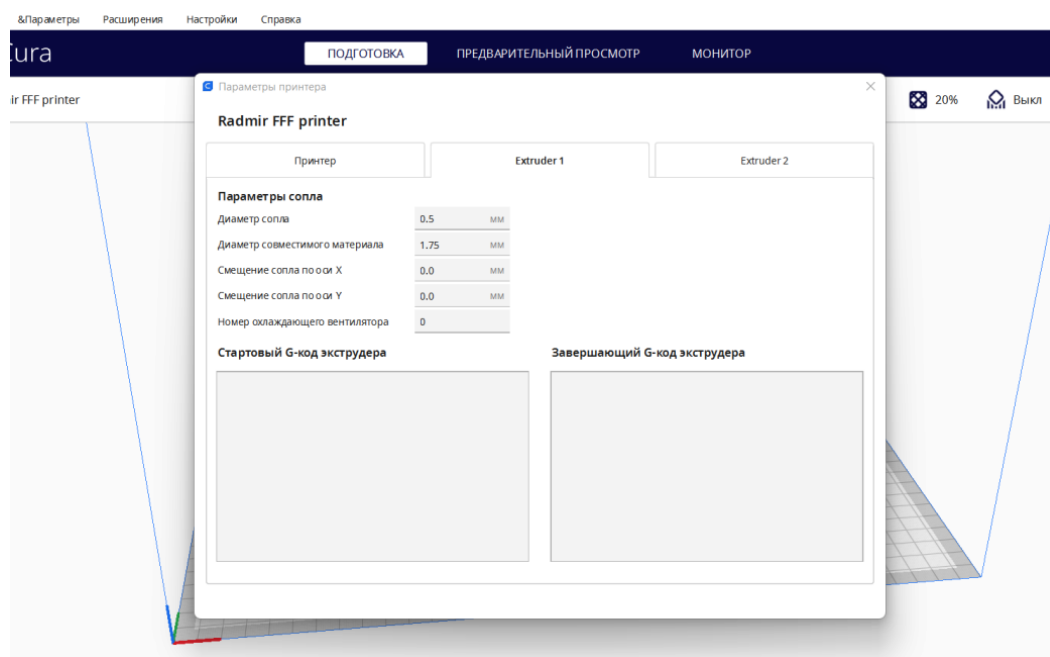


Рисунок 68 – Выбор диаметра сопла экструдера FDM 3D-принтера

Далее проведен выбор и установлены параметры филамента Friction Rec (рисунок 69).

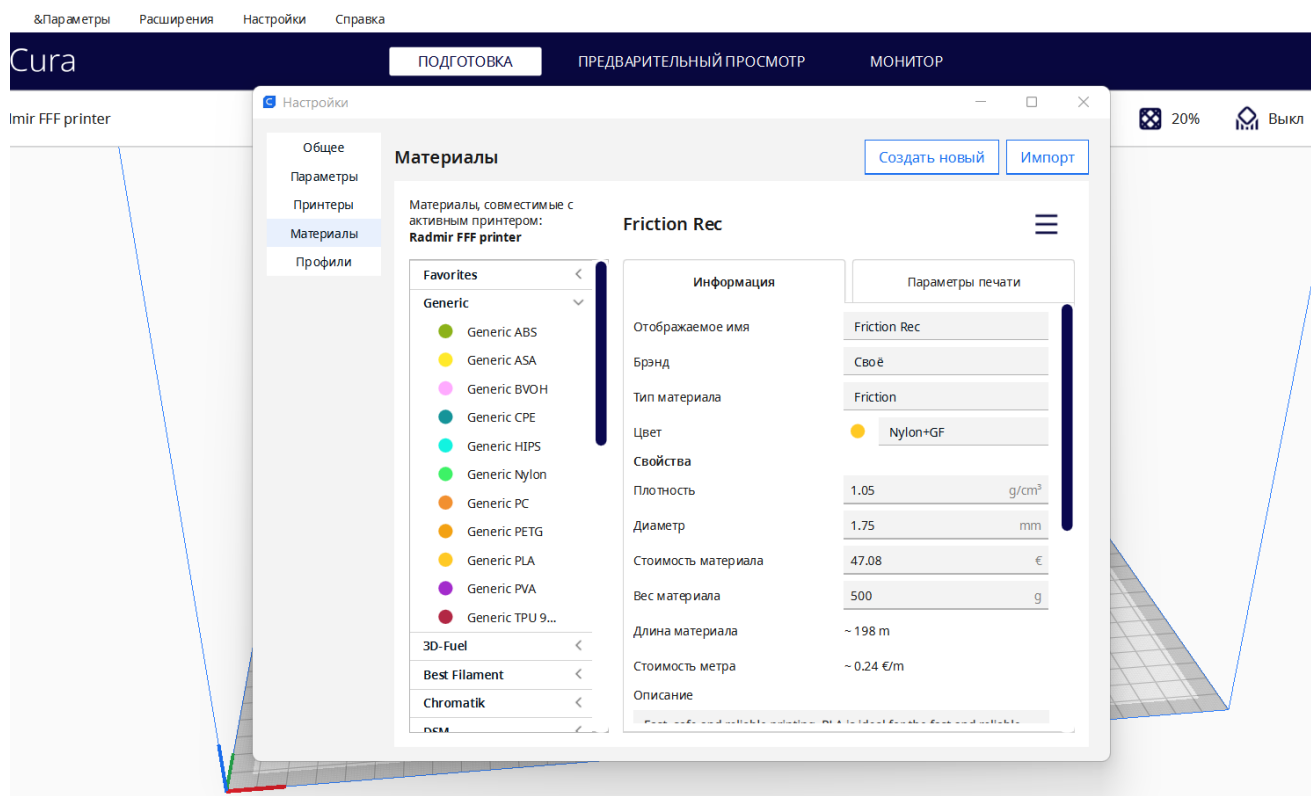


Рисунок 69 – Выбор диаметра филамента Friction Rec

После загрузки 3D-модели образца для испытания в программу UltiMaker CURA 5.2.1 необходимо провести ориентацию модели на виртуальном рабочем столе.

Размещение модели образца по ориентации XY для прогона 1, 8, 10 и 15 на виртуальном рабочем столе продемонстрировано на рисунке 70.

Размещение модели образца по ориентации YX для прогона 2, 7, 9 и 16 на виртуальном рабочем столе продемонстрировано на рисунке 71.

Размещение образца по ориентации $C + 45^\circ$ от X для прогона 4, 5, 1 и 14 на виртуальном рабочем столе продемонстрировано на рисунке 72.

Размещение образца по ориентации ZX для прогона 6, 16, 12 и 13 на виртуальном рабочем столе продемонстрировано на рисунке 73.

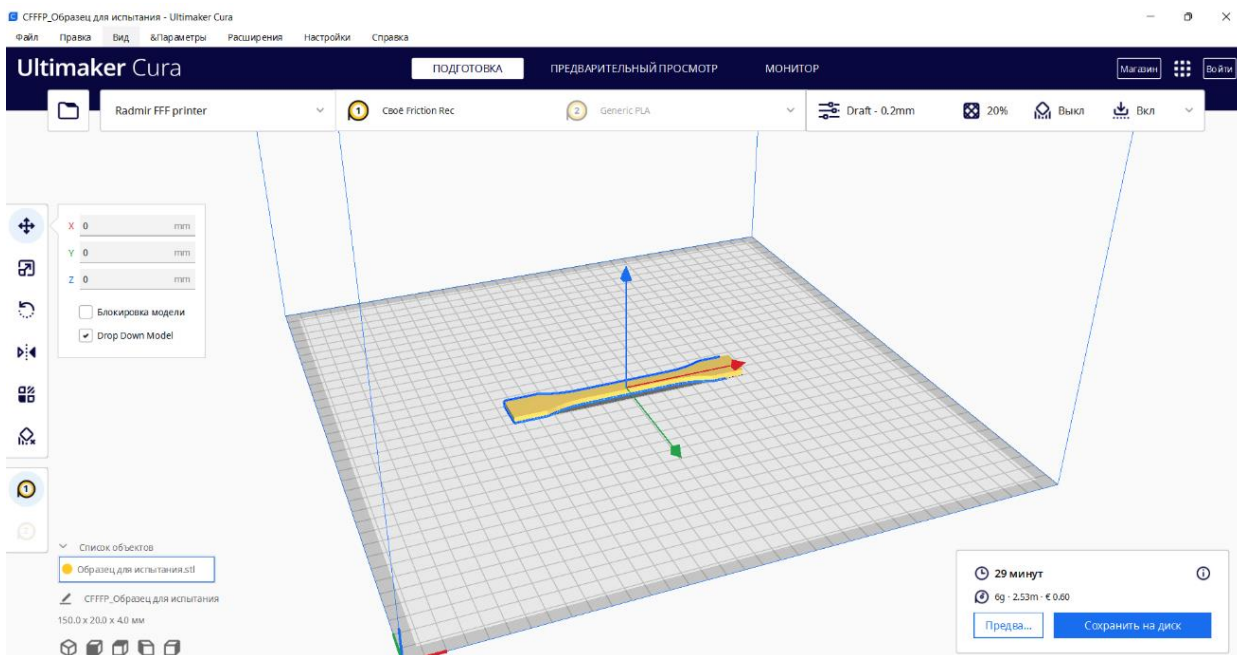


Рисунок 70 – Размещение модели образца по ориентации XУ

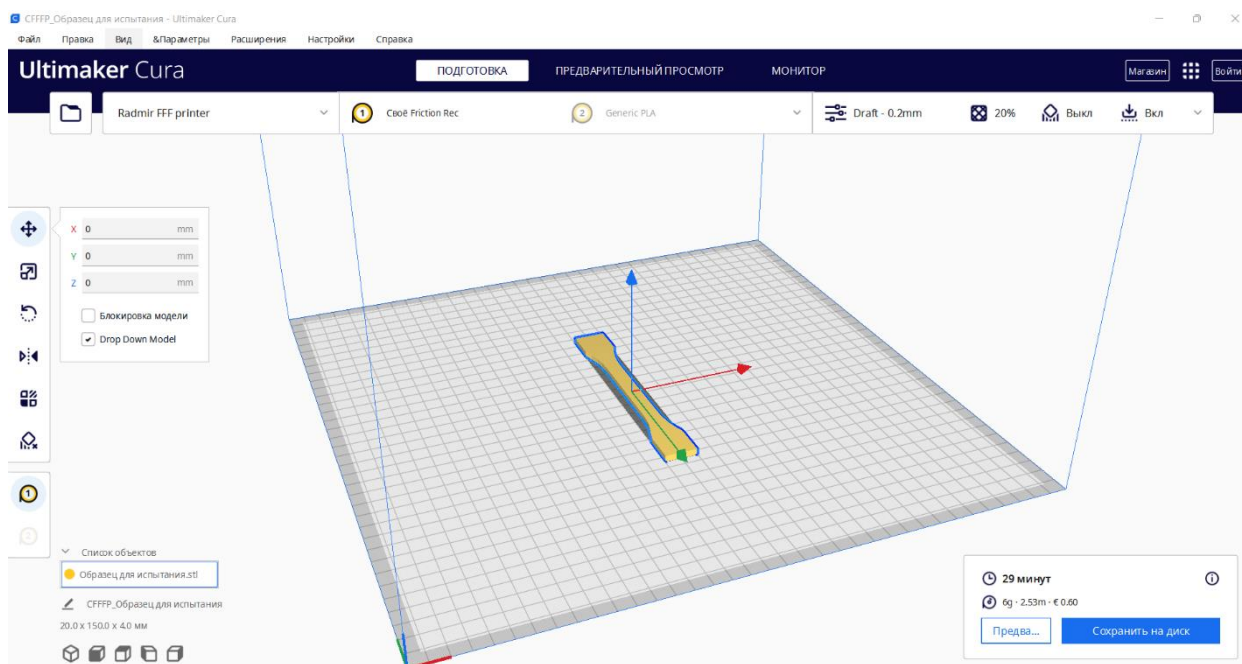


Рисунок 71 – Размещение модели образца по ориентации УХ

Выбранные в разделе 4.5.2 технологические параметры поочередно «вбиваются» в окно «Параметры печати», предварительно активировав его левой кнопкой мыши (рисунок 74).

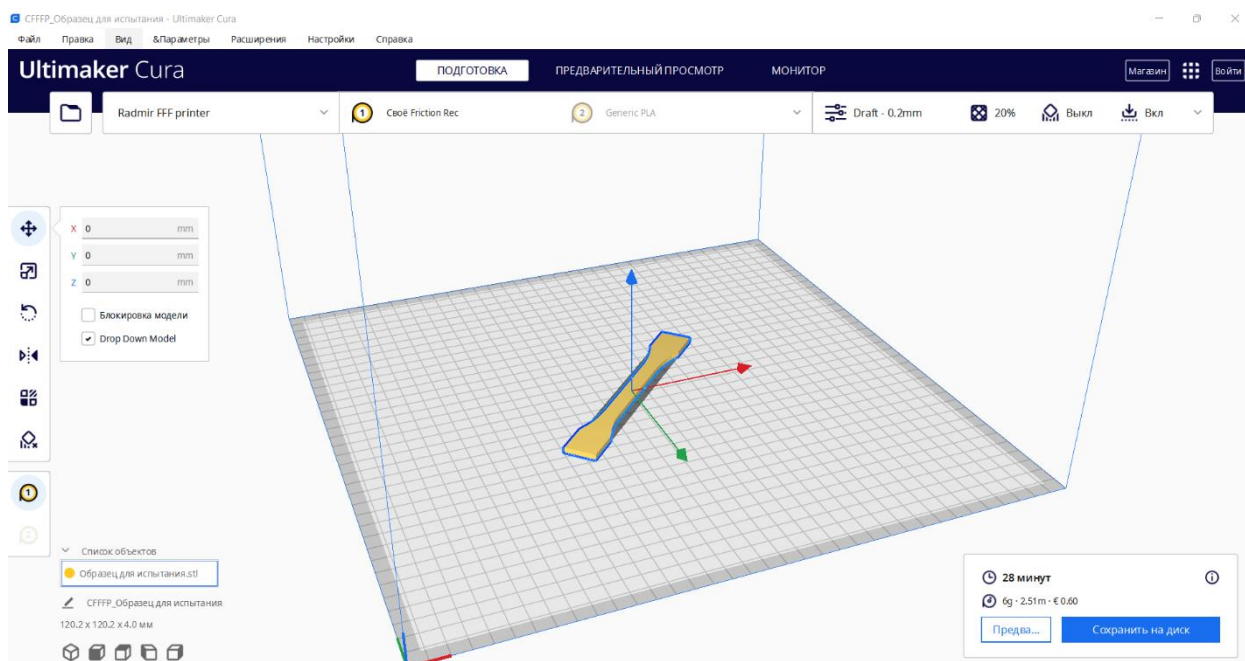


Рисунок 72 – Размещение модели образца по ориентации $C + 45^\circ$ от X

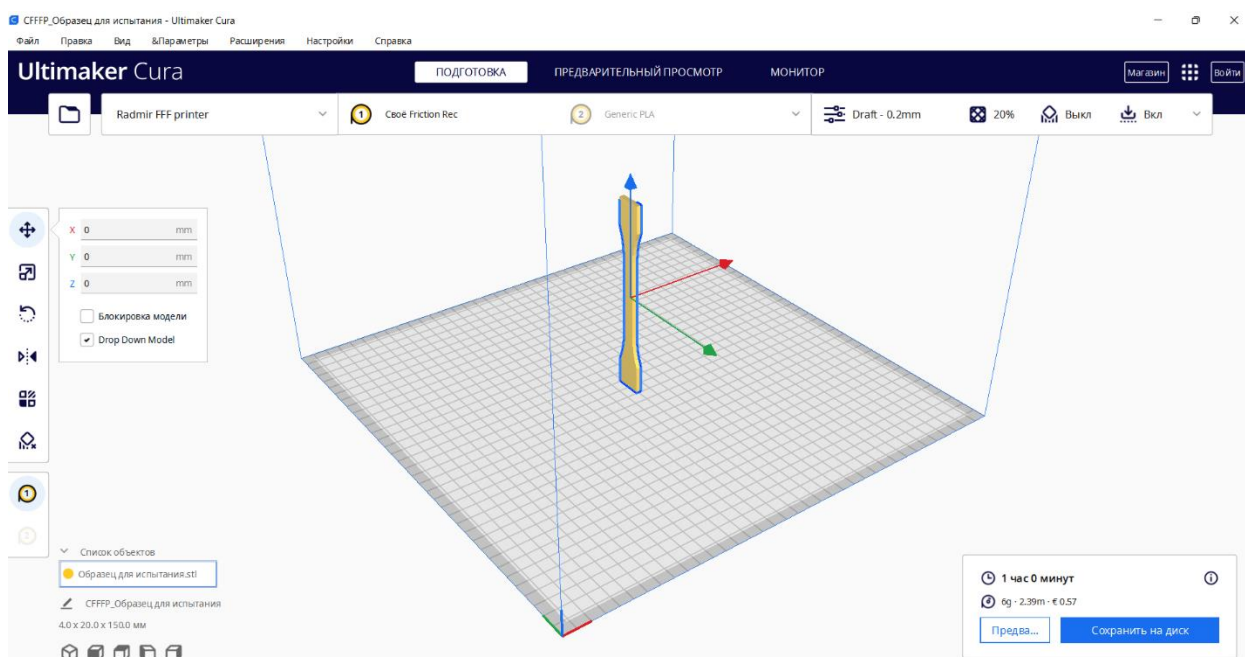


Рисунок 73 – Размещение модели образца по ориентации ZX

Выбор остальных параметров FDM 3D-печати (высота первого слоя, ширина линии, толщина стенки и т.д.) производится программой-слайсером автоматически в зависимости от выбранных основных технологических параметров.

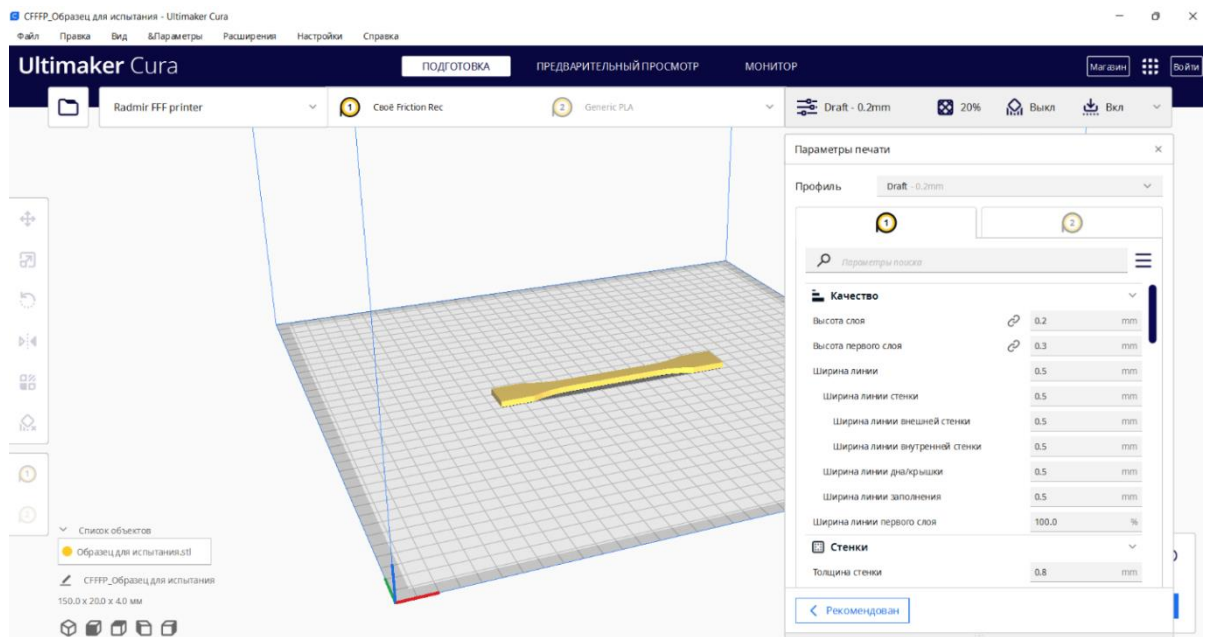


Рисунок 74 – Окно «Параметры печати»

Далее произведена непосредственно операция «слайсинг» (нарезание) и перевод модели в G-код.

Перед загрузкой G-кода в FDM 3D-принтер проведена визуальная проверка имитации FDM 3D-печати модели образца для испытания в программе-слайсере (рисунок 75).

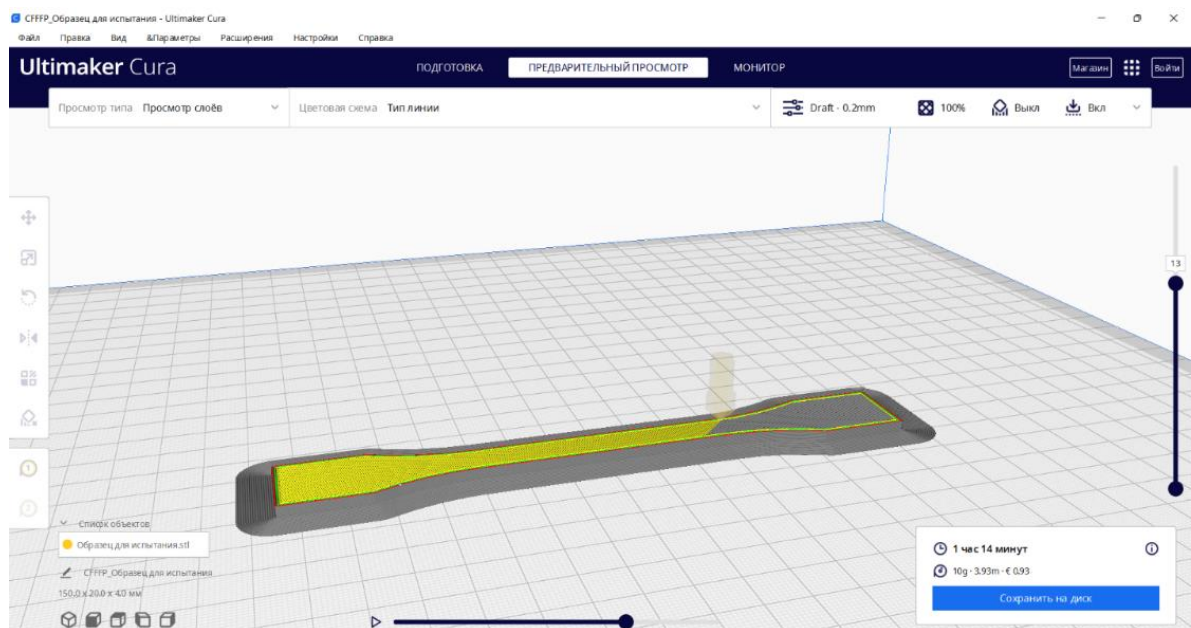


Рисунок 75 – Виртуальная имитация FDM 3D-печати в программе-слайсере

Условия окружающей среды при FDM 3D-печати образцов для испытания на растяжение составили:

- температура окружающей среды $21 \pm 3^\circ\text{C}$.
- влажность воздуха от $35\% \pm 5\%$.
- атмосферное давление воздуха от 760 мм ртутного столба.

Моделирование скачка напряжения со колебаниями температуры сопла экструдера производили с помощью блока управления FDM 3D-принтера (рисунок 76).



Рисунок 76 – Блок управления FDM 3D-принтера

На рисунке 77 представлены напечатанные образцы для прогона 12.



Рисунок 77 – Напечатанные образцы

Как видно из рисунка 77, каждый напечатанный образец пронумерован для исключения ошибки при анализе результатов испытания после проведения испытания на прочность при растяжении.

В таблицах 20 и 21 представлены массовая и геометрические характеристики напечатанных образцов, где массе образца присвоено обозначение m , г; ширине образца – b , мм; толщине образца – δ , мм.

Таблица 20 – Массовая и геометрическая характеристики напечатанных образцов для вариантов шумовых факторов комбинаций 1-5

Прогон	Массовая и геометрические характеристики напечатанных образцов									
	1		2		3		4		5	
	$b \times \delta$	m	$b \times \delta$	m	$b \times \delta$	m	$b \times \delta$	m	$b \times \delta$	m
1	10,2 x 1,8	4,68	10,19 x 1,96	4,9	10,15 x 1,98	4,81	10,19 x 1,86	4,78	10,15 x 1,95	4,87
2	9,92 x 1,90	4,81	9,95 x 1,96	4,89	9,90 x 2,05	4,90	10,00 x 2,00	4,90	9,95 x 2,00	4,89
3	10,24 x 2,01	5,00	10,18 x 2,00	4,91	10,18 x 2,03	4,91	10,04 x 1,96	4,63	10,24 x 1,98	4,89
4	5,51 x 4,53	5,22	-	-	-	-	-	-	-	-
5	5,07 x 4,96	5,08	4,90 x 4,97	5,06	-	-	-	-	-	-
6	10,35 x 2,11	5,20	10,26 x 2,15	5,30	10,31 x 2,13	5,26	10,25 x 2,02	5,20	10,28 x 2,15	5,26
7	10,11 x 2,04	5,12	10,10 x 2,07	5,13	9,90 x 2,08	5,09	10,00 x 2,09	5,13	10,08 x 2,03	5,11
8	9,96 x 1,98	4,94	10,00 x 2,00	4,99	9,98 x 1,99	4,99	10,00 x 2,08	5,01	9,99 x 2,10	5,01
9	9,98 x 2,08	5,01	10,02 x 2,10	5,16	10,02 x 2,05	5,19	10,00 x 2,08	5,10	10,01 x 2,13	5,18
10	10,09 x 2,13	5,12	9,98 x 2,03	5,10	10,06 x 2,11	5,30	10,00 x 2,18	5,24	10,02 x 2,15	5,31
11	8,67 x 2,61	4,92	8,51 x 2,61	4,93	8,61 x 2,65	4,95	8,48 x 2,71	4,93	-	-
12	9,80 x 2,05	4,63	9,97 x 2,08	4,82	9,98 x 2,10	4,88	9,98 x 2,08	4,90	9,96 x 2,09	4,86
13	10,16 x 1,80	4,56	10,15 x 1,89	4,68	10,20 x 1,91	4,72	10,16 x 1,9	4,68	10,15 x 1,96	4,72
14	9,60 x 2,50	4,85	9,75 x 2,48	4,83	9,63 x 2,40	4,80	9,60 x 2,40	4,80	9,60 x 2,50	4,81
15	9,93 x 1,80	4,05	10,01 x 1,90	4,10	10,00 x 1,90	4,06	9,80 x 1,86	4,01	9,95 x 1,86	4,01
16	9,97 x 1,84	3,99	9,82 x 1,83	3,94	9,89 x 1,87	3,99	9,95 x 1,88	4,00	9,90 x 1,86	3,91

Таблица 21 – Массовая и геометрическая характеристики напечатанных образцов для вариантов шумовых факторов комбинаций 6-9

Прогон	Массовая и геометрические характеристики напечатанных образцов							
	6		7		8		9	
	$b \times \delta$	m	$b \times \delta$	m	$b \times \delta$	m	$b \times \delta$	m
1	10,1 x 1,84	4,76	10,15 x 1,96	4,9	10,13 x 1,95	4,93	10,13 x 1,96	4,95
2	9,90 x 1,90	4,84	9,91 x 1,95	4,85	9,98 x 1,98	4,86	9,90 x 1,96	4,86
3	10,18 x 1,96	4,95	10,16 x 2,06	4,99	10,18 x 2,05	4,99	10,18 x 1,99	5,00
4	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-
6	10,35 x 1,98	5,06	10,25 x 2,11	5,26	10,25 x 2,00	5,01	10,22 x 2,04	5,19
7	10,03 x 2,00	5,00	10,03 x 2,08	5,14	10,08 x 2,07	5,13	10,06 x 2,08	5,14
8	10,00 x 1,99	5,00	9,99 x 2,09	5,00	10,00 x 2,00	5,01	10,00 x 2,08	5,01
9	9,95 x 1,98	4,93	10,15 x 2,03	5,08	10,17 x 2,07	5,13	10,13 x 2,10	5,20
10	9,93 x 2,17	5,11	10,02 x 2,23	5,30	10,00 x 2,05	5,13	10,01 x 2,10	5,30
11	-	-	-	-	-	-	-	-
12	10,00 x 2,04	4,85	9,98 x 2,10	4,86	9,95 x 2,04	4,89	10,00 x 2,03	4,87
13	10,18 x 1,81	4,58	10,12 x 1,92	4,71	10,21 x 1,80	4,59	10,13 x 1,90	4,69
14	9,62 x 2,50	4,84	9,62 x 2,48	4,83	4,70 x 2,40	4,80	9,60 x 2,26	4,50
15	10,01 x 1,98	4,01	10,03 x 1,98	4,18	10,01 x 1,83	4,00	10,02 x 1,91	4,01
16	9,97 x 1,84	3,99	9,82 x 1,83	3,94	9,89 x 1,87	3,99	9,95 x 1,88	4,00

4.6.3 Испытания напечатанных образцов на прочность при растяжении

Базовым документом, на основе которого была разработана программа испытаний на растяжение и проведена обработка результатов испытаний, является стандарт ГОСТ 11262-2017 (ISO-527-2:2012) [180]. Для проведения испытания использована универсальной испытательной машины фирмы ZwickRoell Z050 с датчиком перемещений нагружающего цилиндра. В ходе испытания образцы нагружались с постоянной скоростью 2 мм/мин. Запись показаний датчиков силы, перемещения и экстензометра была синхронизирована по времени и производилась непрерывно с периодом 10^{-2} с.

Типовой график нагружения образцов представлен на рисунке 78.

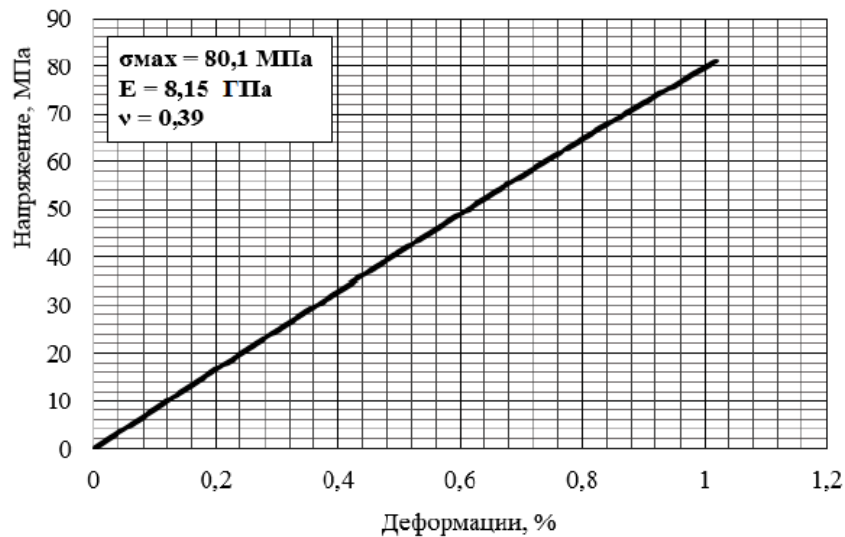


Рисунок 78 – Типовой график нагружения образцов

Образец в испытательной оснастке (тисках) универсальной испытательной машины представлен на рисунке 79.



Рисунок 79 – Напечатанный образец в тисках универсальной испытательной машины фирмы ZwickRoell Z050

В таблице 22 представлена ортогональная матрица для планирования и проведения экспериментов с выходными экспериментальными данными и отклика.

Таблица 22 – 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					
		I	1	2	3	2	3	1	3	1	2					
Внутренняя матрица						Выходные экспериментальные данные, y , σ_{\max} , МПа									Среднее квадр. откл. отклика y	Сигнал / шум S/N, η
Прогон	A	B	C	D	E	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
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	30,27
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 22 необходимо отметить, что прогоны № 4 и 11 проведены частично, а прогон №4 не проведен в связи с деформациями образца.

Отношение сигнал/шум S/N, η , вычислена по следующей формуле:

$$\eta = -10 \log \hat{\sigma}^2 = 10 \log \frac{1}{\hat{\sigma}^2} \quad (2)$$

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

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n} \left(\frac{1}{y_1^2} + \frac{1}{y_2^2} + \dots + \frac{1}{y_n^2} \right) \quad (3)$$

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

4.7 Моделирование конструкции СУ

Разработка кронштейна СУ проведена с помощью метода топологической оптимизации, основанный на моделировании методом конечных элементов в приложении APM FEM системы КОМПАС 3D v21 с применением тела переменной плотности.

Топологическая оптимизация и последующая обработка результатов оптимизации в системе КОМПАС 3D v21 без экспорта в сторонние системы автоматизированного проектирования позволяют значительно сократить временные ресурсы. Кроме того, необходимо отметить, система КОМПАС 3D v21 является отечественным программным продуктом, что немаловажно для отечественных предприятий авиационно-космической отрасли.

Алгоритм использования тела переменной плотности предложен в [181] и подробно описан в работе [182]. Основой методики использования тела переменной плотности является заполнение области пространства, в которую нужно «вписать» проектируемую конструкцию, непрерывной упругой средой, имеющей переменную жесткость, то есть изменяемый модуль упругости [183]. Геометрия тела переменной плотности создана с учетом условий закрепления и компоновки [184].

Тело переменной плотности, используемое для проведения топологической оптимизации, представлено на рисунке 80.

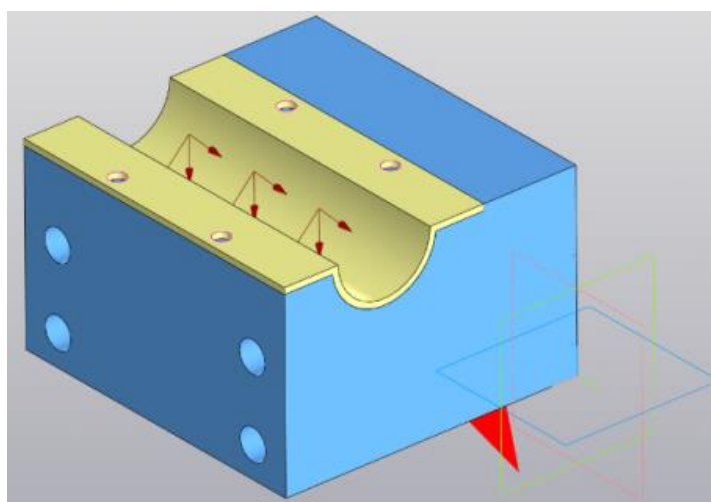


Рисунок 80 – Тело переменной плотности

На первом этапе заданы условия закрепления тела, действующие нагрузки, совпадающие поверхности, механические свойства ПКМ.

На втором этапе заданы условия для проведения непосредственно топологической оптимизации: отклики, целевая функция, ограничения и поставлена оптимизационная задача (рисунок 81).

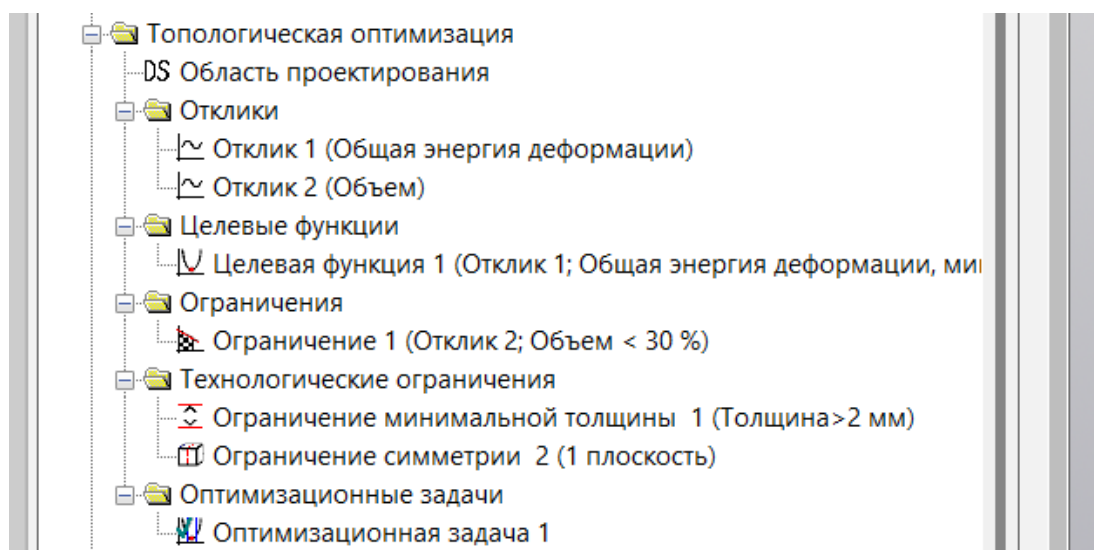


Рисунок 81 – Второй этап работы в приложении APM FEM системы КОМПАС 3D v21

На третьем этапе проведена непосредственно топологическая оптимизация, для чего предварительно построена конечно-элементная сетка и заданы условия расчета (рисунок 82).

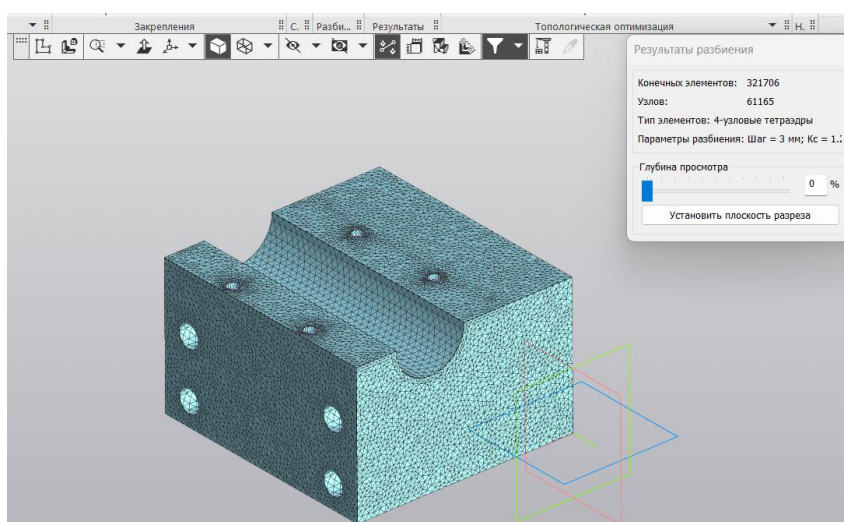


Рисунок 82 – Конечно-элементная сетка модели

Топологическая оптимизация позволила снизить массу конструкции, но при этом повысить жесткостные характеристики изделия. Фасеточная геометрия

кронштейна СУ, полученная в результате топологической оптимизации, представлена на рисунке 83.

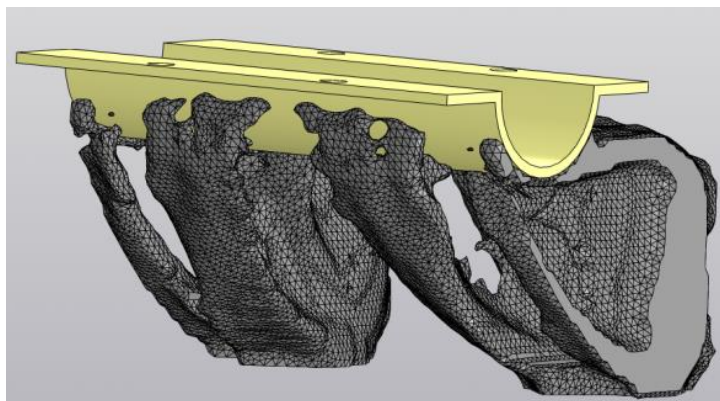


Рисунок 83 – Результат топологической оптимизации в приложении АРМ FEM системы КОМПАС 3D v21

На четвертом этапе полигональный объект, полученный в результате топологической оптимизации, для сглаживания поверхности импортирован и доработан в приложении «Свободная форма» системы КОМПАС 3D v21 (рисунок 84).

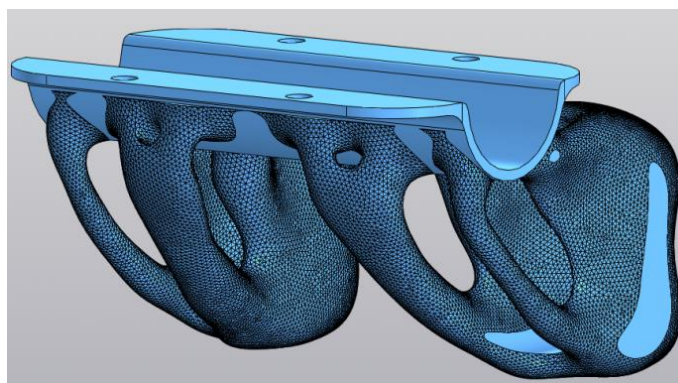


Рисунок 84 – Результат сглаживания в приложении «Свободная форма» системы КОМПАС 3D v21

После обработки результатов топологической оптимизации смоделированы остальные детали СУ, в частности, хомут и собрана общая сборка (рисунок 85)

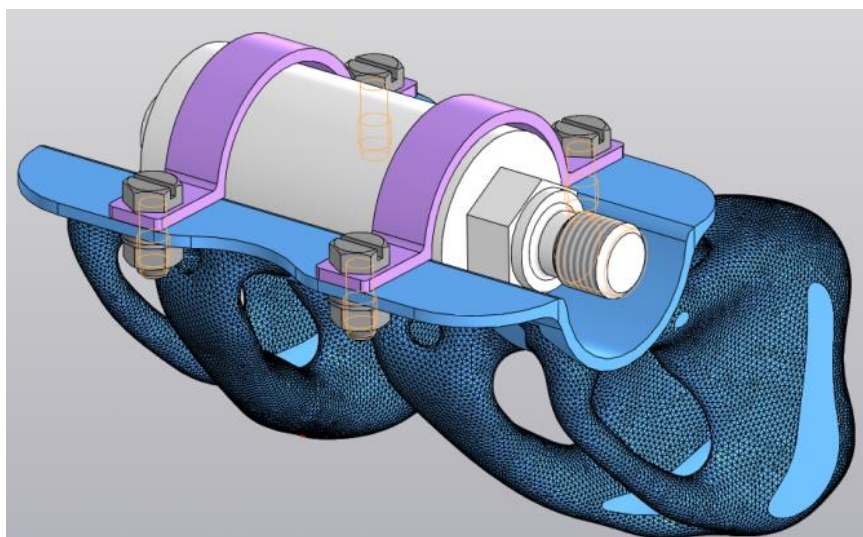


Рисунок 85 – 3D-модель сборки СУ

4.8 AFMEA-анализ конструкции соединительного узла

После разработки конструкции, проводят AFMEA-анализ. Результаты AFMEA-анализа конструкции соединительного узла представлены в приложении 3.

За счет введения таких предупреждающих мероприятий, как разработка методики нивелирования («компенсации») высокого уровня диаметра прутка филамента, применения планирования экспериментов по методу Г. Тагути, разработки кодификатора отказов аддитивного оборудования и программного обеспечения удалось значительно снизить среднее значение приоритетного числа рисков (ПЧР) возникновения потенциальных несоответствий с 281 до 44 баллов.

4.9 Предпечатная подготовка 3D-модели соединительного узла

Проведена предпечатная подготовка 3D-модели соединительного узла 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 (рисунок 86). Технологические параметры FDM 3D-печати

выбраны по результатам планирования экспериментов по методу Г. Тагути (таблица 23).

Таблица 22 – Технологические параметры FDM 3D-печати

Наименование фактора	Обозначение фактора	Единица измерения	3
			Высота слоя печати
Скорость печати	B	мм/с	50
Температура сопла экструдера	C	С°	250
Диаметр сопла экструдера	D	мм	1
Ориентация образца на рабочем столе	E	–	C + 45° от X

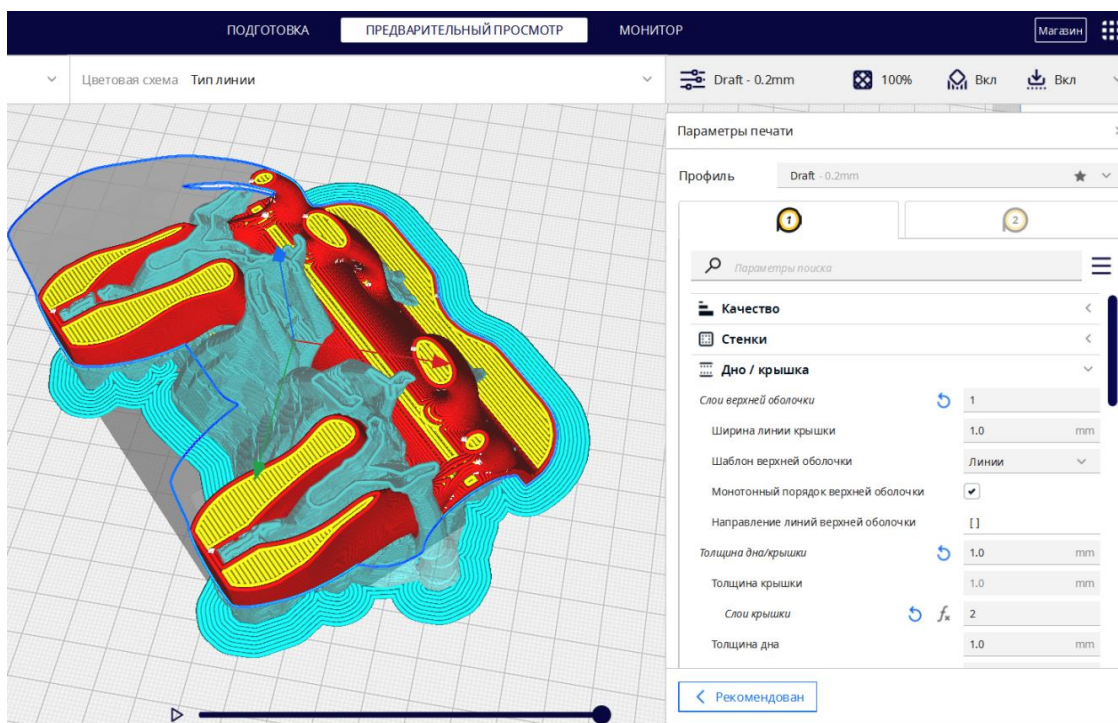


Рисунок 86 – Предпечатная подготовка 3D-модели соединительного узла в программе-слайсере Ultimaker CURA 5.2.1

4.10 Реализации функции развертывания качества QFD III и IV уровня

В результате проведения QFD III уровня (рисунок 87) для реализации изготовления оптимизированной конструкция кронштейна соединительного узла из ПКМ выявлена необходимость применения аддитивных технологий, в частности, FDM 3D-печати.

В результате проведения QFD IV уровня (рисунок 88) для обеспечения качества FDM 3D-печати кронштейна соединительного узла выявления необходимость использования:

– методики нивелирования («компенсации») высокого уровня диаметра прутка филамента для обеспечения качества для обеспечения качества деталей и узлов аэрокосмических конструкций из ПКМ;

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

				Column #	
				1	2
				Direction of Improvement: Minimize (▼), Maximize (▲), or Target (x)	
				▲	
				Quality Characteristics (a.k.a. "Hows")	
				FDM 3D-печать	Традиционное производство
				Demanded Quality (a.k.a. "Whats")	
Row #	Max Relationship Value in Row	Relative Weight	Weight / Importance		
1	9	32,4	440,1	Оптимизированная конструкция кронштейна	⊙
2	9	46,3	628,3	Применение ПКМ для изготовления кронштейна и скобы	⊙
3	9	10,6	144,4	Стандартных и унифицированные элементы крепления датчика	⊙
4	9	10,6	144,4	Стандартные и унифицированные элементы крепления на корпус МБО	⊙
				Target or Limit Value	
				Flying Bear Trnardo Pro 2	Механическая обработка, штамповка
				Difficulty (0=Easy to Accomplish, 10=Extremely Difficult)	
				10	1
				Max Relationship Value in Column	
				9	9
				Weight / Importance	
				708,5	191,5
				Relative Weight	
				78,7	21,3

Рисунок 87 – Матрица дома качества QFD III уровня

Row #	Max Relationship Value in Row	Relative Weight	Weight / Importance	D demanded Quality (a.k.a. "Whats")	Column #				
					1	2	3	4	5
Direction of Improvement: Minimize (▼), Maximize (▲), or Target (X)					▲	▲	▲	▲	X
Quality Characteristics (a.k.a. "Hows")					Нивелирование диаметра прутка филамента	Планирование эксперимента	Применение САД- и САЕ-систем	Предпочтительная подготовка	Применение FMEA-анализа
1	9	78,7	708,5	FDM 3D-печать	○	○	○	○	○
2	1	21,3	191,5	Традиционное производство			▲		▲
Target or Limit Value					Методика обеспечения качества	Планирование экспериментов по методу Г. Тагучи	КОМПАС 3D с приложением APFМ FEM	UltMaker CURA	AFMEA-анализ
Difficulty (0=Easy to Accomplish, 10=Extremely Difficult)					7	10	8	7	6
Max Relationship Value in Column					9	9	9	9	9
Weight / Importance					708,5	708,5	729,8	708,5	729,8
Relative Weight					19,8	19,8	20,4	19,8	20,4

Рисунок 88 – Матрица дома качества QFD IV уровня

На заключительном этапе проведена FDM 3D-печать соединительного узла с последующей пост-обработкой, предварительно просушив филамент (рисунок 89).

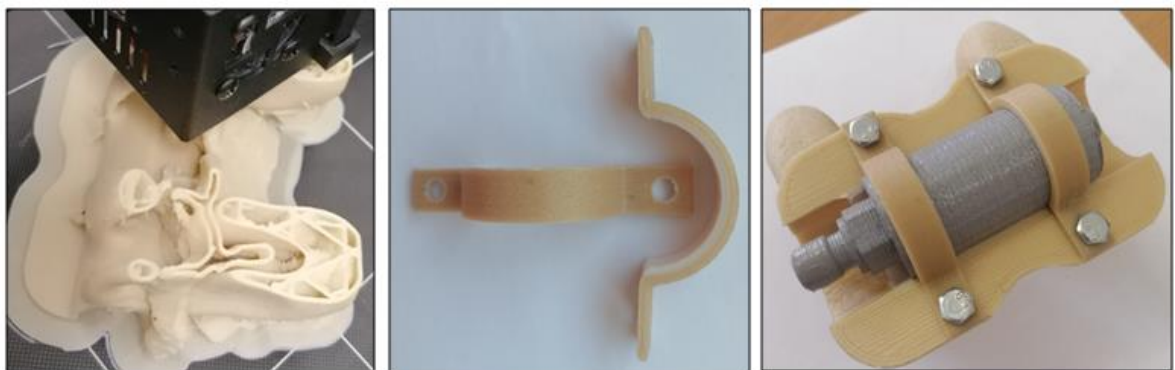


Рисунок 89 – Кронштейн и хомуты СУ из ПКМ

Спроектированная и изготовленная конструкция СУ обладает меньшей массой (на 30 %) по сравнению с используемыми в настоящее время СУ на РН семейства «Союз».

Таким образом проведена разработка и демонстрация методики проектирования и изготовления деталей и узлов аэрокосмических конструкций из

ПКМ на основе робастных подходов на примере СУ для крепления и фиксации датчика давления ДАВ 068-02 в МБО РН. Отработанная методика проектирования и изготовления позволит предприятиям авиакосмической отрасли оперативно внедрить на предприятия авиакосмической отрасли технологию FDM 3D-печати деталей и узлов из ПКМ на основе современных инструментов качества.

4.11 Расчет экономической эффективности

4.11.1 Расчет экономического эффекта

Экономическая целесообразность внедрения результатов настоящего диссертационного исследования достигается за счет внедрения разработанных методик и модели обеспечения качества на основе робастных подходов и методов в совокупности с системами трехмерного проектирования и инженерного анализа, позволяющих значительно снизить количество дефектной продукции.

Как показал инженерно-практический опыт, применение FDM 3D-печати ПКМ позволяет снизить вес деталей и узлов аэрокосмических конструкций от 30 до 50% в зависимости от их функционального назначения и условий эксплуатации. Так разработанный в настоящем диссертационном исследовании СУ для монтажа датчика ДАВ 068-02 в МБО РН обладает на 30 % меньшей массой, чем использующиеся в настоящее время СУ в серийно-выпускающихся РН семейства «Союз-2». Цена 1 кг выводимой полезной нагрузки на низкую опорную орбиту РН семейства «Союз» составляет 5 750\$ или 464 600 рублей (курс долларов по отношению к рублю на 04.06.2023 г.) [185]. Из расчета на 1 кг, применение FDM 3D-печати СУ из ПКМ для монтажа датчика ДАВ 068-02 в МБО РН семейства «Союз» позволяет вывести на 300 г больше полезной нагрузки, чем использующиеся в настоящее время СУ. А это 1725\$ или 139 380 рублей дополнительной экономической прибыли.

Как показывает экспериментальные и статистические данные в главе 3 настоящего диссертационного исследования методика нивелирования диаметра

прутка филамента для обеспечения качества деталей и узлов из ПКМ позволяет сократить количество дефектных напечатанных деталей и узлов до 50 %.

Методика проектирования и изготовления деталей и узлов аэрокосмических конструкций из ПКМ в условиях аддитивного производства, основанную на применении робастных подходов: QFD, AFMEA, планирования экспериментов по методу Г. Тагути в совокупности с программными системами трехмерного проектирования и инженерного анализа позволяет сократить время разработки на 20-40%, увеличить значение ключевого показателя качества деталей и узлов аэрокосмических конструкций из ПКМ – значения прочности при растяжении на 30% от среднего значения, снизить значения приоритетного числа риска (ПЧР) возникновения потенциальных несоответствий с 281 до 44 баллов (среднее значение баллов ПЧР по этапам проектирования, предпечатной подготовки и FDM 3D-печати).

Экономический эффект от использования функциональной модели и методик обеспечения качества определяется по формуле:

$$\mathcal{E} = \mathcal{Z}_{П1} - \mathcal{Z}_{П2}, \quad (4)$$

где $\mathcal{Z}_{П1}$ – затраты на FDM 3D-печать до внедрения результатов диссертационного исследования, руб.; $\mathcal{Z}_{П2}$ – затраты на FDM 3D-печать после внедрения результатов диссертационного исследования, руб.

Затраты на изготовление деталей и узлов аэрокосмических конструкций из ПКМ в условиях аддитивного производства включают в себя:

- 1) затраты на материалы, $\mathcal{Z}_{\text{мат}}$;
- 2) затраты на электроэнергию, $\mathcal{Z}_{\text{элек}}$;
- 3) затраты на заработную плату основных рабочих, включая отчисления на социальные нужды, $\mathcal{Z}_{\text{ЗАРПЛ}}$;
- 4) расходы на ремонт и эксплуатацию FDM 3D-принтера, A ;

В двух МБО РН семейства «Союз-2» 6 СУ для монтажа датчика ДАВ 068-02 (без учета других СУ для монтажа датчико-преобразующей аппаратуры, количество которых может достигать до 30 на одном МБО). В зависимости от

класса и модификации РН семейства «Союз-2» АО «РКЦ «Прогресс» изготавливает до 20 РН в год. Итого в год необходимо изготовить 120 СУ для монтажа датчика ДАВ 068-02.

Затраты на материалы составляют 300000 руб.

Затраты на электроэнергию рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{элек}} = \frac{N_{\text{об}} \times t_{\text{п}} \times \Pi_{\text{элек}}}{\eta}, \quad (5)$$

где $N_{\text{об}}$ – мощность FDM 3D-принтера, равная 600 Вт; $t_{\text{п}}$ – норма времени на печать, равная 8 ч для одного СУ и, соответственно, 960 ч для 120 СУ; $\Pi_{\text{элек}}$ – стоимость 1 кВт/ч электроэнергии, равная 4,5 руб.; η – коэффициент полезного действия электродвигателей FDM 3D-принтера, равный 0,2;

Итого затрат на электроэнергию получаем:

$$Z_{\text{элек}} = \frac{0,6 \times 960 \times 4,5}{0,2} = 12960 \text{ руб.}$$

Затраты на заработную плату основных рабочих определяется по формуле:

$$Z_{\text{ЗАРП}} = t_{\text{шт-к}} \times K_3 \times K_{\text{ПР}} \times K_{\text{ОСН}}, \quad (6)$$

где $t_{\text{шт-к}}$ – штучно калькуляционное время, равное 960 ч; K_3 – тарифная ставка инженера по 3 категории, равная 186 руб/ч; $K_{\text{ПР}}$ – коэффициент, учитывающий премию, составляет 1,35; $K_{\text{ОСН}}$ – коэффициент, учитывающий отчисления на социальные нужды, составляют 1,3.

Итого затрат на заработную плату основных рабочих получаем:

$$Z_{\text{ЗАРП}} = 960 \times 186 \times 1,35 \times 1,3 = 313373 \text{ руб.}$$

Расходы на ремонт и эксплуатацию FDM 3D-принтера определяется по формуле:

$$A = \frac{C_{\text{обор}} \times O_{\text{экс}} \times t_i}{100 \times \Phi_{\text{пол}}}, \quad (7)$$

где $C_{\text{обор}}$ – первоначальная стоимость FDM 3D-принтера, равная 70000 руб.;

$O_{\text{экт}}$ – отчисления на ремонт и обслуживание FDM 3D-принтера, равные 20%; t_i – норма времени на i -операцию, равное 960 ч; $\Phi_{\text{пол}}$ – полезный фонд времени работы при односменном режиме работы, составляет 1900 ч/год;

Итого расходов на ремонт и эксплуатацию FDM 3D-принтера получаем:

$$A = \frac{70000 \times 20 \times 960}{100 \times 1900} = 7074 \text{ руб.}$$

Как показал инженерно-практический опыт на производстве изделий РКТ, количество дефектных деталей и узлов, получаемых с помощью FDM технологии достигает 40%. Соответственно, для подсчета объема используемых материалов, электроэнергии, количества часов для изготовления, расходов на ремонт и эксплуатацию аддитивного оборудования необходимо вести и умножить на коэффициент дефекта $K_{\text{д}} = 1,4$.

Итого затраты на FDM 3D-печать СУ составят:

$$Z_{\text{п}} = K_{\text{д}} \times (Z_{\text{МАТ}} + Z_{\text{ЭЛЕК}} + Z_{\text{ЗАРП}} + A) \quad (8)$$

$$Z_{\text{п}} = 1,4 \times (300000 + 12960 + 374400 + 7074) = 972207,6 \text{ руб.}$$

После внедрения результатов диссертационного исследования затраты на FDM-печать снизились за счет снижения дефектных деталей и узлов до 10% и составляют:

$$Z_{\text{п}} = K_{\text{д}} \times (Z_{\text{МАТ}} + Z_{\text{ЭЛЕК}} + Z_{\text{ЗАРП}} + A) \quad (9)$$

$$Z_{\text{п}} = 1,1 \times (300000 + 12960 + 374400 + 7074) = 763877,4 \text{ руб.}$$

Суммарный годовой экономический эффект от использования результатов исследования составляет (3):

$$\mathcal{E} = 972207,6 - 763877,4 = 208330,2 \text{ руб.}$$

4.11.2 Расчет затрат на выполнение исследования

Затраты на выполнение диссертационного исследования включают:

1) затраты на материалы, $Z_{\text{мат}}$;

- 2) затраты на электроэнергию, $Z_{\text{элек}}$;
- 3) затраты на заработную плату, $Z_{\text{ЗАРПЛ}}$;
- 4) расходы на ремонт и эксплуатацию FDM 3D-принтера, A ;
- 5) накладные расходы, H_P .

Для FDM 3D-печати деталей и узлов из ПКМ требуется:

$$Z_{\text{МАТ}} = \text{Филамент} + \text{Полимерный клей} \quad (10)$$

В ходе проведения работ по FDM 3D-печати образцов для экспериментальных исследований затрачено следующее количество материалов:

- 1) 2 кг филамента (ПКМ) Friction Res по цене 8000 руб/кг;
- 2) 0,5 кг филамента VFlex по цене 3000 руб/0,5 кг;
- 3) 1 баллон полимерного клея по цене 1000 руб/баллон.

Итого затрат на материалы для экспериментальных исследований составили:

$$Z_{\text{МАТ}} = 2 \times 8000 + 3000 + 800 = 20000 \text{ руб.}$$

Затраты на электроэнергию, связанные с работой FDM 3D-принтера по печати образцов для экспериментальных исследований определены по формуле:

$$Z_{\text{элек}} = \frac{N_{\text{об}} \times t_{\text{п}} \times C_{\text{элек}}}{\eta}, \quad (11)$$

где $N_{\text{об}}$ – мощность FDM 3D-принтера, равная 600 Вт; $t_{\text{п}}$ – норма времени на печать, равная 100 ч; $C_{\text{элек}}$ – стоимость 1 кВт/ч электроэнергии, равная 4,5 руб.; η – коэффициент полезного действия электродвигателей FDM 3D-принтера, равный 0,2;

Итого затрат на электроэнергию получаем:

$$Z_{\text{элек}} = \frac{0,6 \times 100 \times 4,5}{0,2} = 1350 \text{ руб.}$$

Затраты на заработную плату включают в себя:

- 1) заработную плату исследователя;
- 2) заработную плату лаборанта;
- 3) затраты команды на проведение AFMEA-анализа.

Заработная плата исследователя составила 15000 руб., заработная плата лаборанта – 8000 руб., и затраты команды на проведение AFMEA-анализа составили 25000 руб.

Итого затрат на заработную плату:

$$Z_{ЗАРП} = 15000 + 8000 + 25000 = 48000 \text{ руб.}$$

В качестве аддитивного оборудования при проведении экспериментальных исследований использован FDM 3D-принтер Fling Bear Tornado 2 PRO.

Затраты на амортизацию определены по следующей формуле:

$$A = \frac{C_{БАЛ} \times H \times n}{100 \times 12}, \quad (12)$$

где $C_{БАЛ}$ – балансовая стоимость FDM 3D-принтера, равная 40000 руб.; H – норма амортизации, равная 20%; n – число месяцев использования FDM 3D-принтера, для экспериментальных исследований равно 1.

Итого затрат на амортизацию составили:

$$A = \frac{40000 \times 20 \times 1}{100 \times 12} = 70 \text{ руб.}$$

Накладные расходы являются косвенными и учитываются в системе затрат пропорционально затратам на заработную плату технического персонала:

$$H_P = \frac{\% H_P}{100} \times Z_{ЗАРП}, \quad (13)$$

где $\% H_P$ – процент накладных расходов в лаборатории, которые составляют 110%; $Z_{ЗАРП}$ – затраты на заработную плату, равные 23000 руб.

Итого затрат на заработную плату составили:

$$H_P = \frac{110}{100} \times 23000 = 25300 \text{ руб.}$$

Общие затраты на выполнение диссертационного исследования определяются по формуле:

$$Z_{НИР} = Z_{МАТ} + Z_{ЭЛЕК} + Z_{ЗАРП} + A + H_P \quad (14)$$

Итого затрат на выполнение диссертационного исследования получаем:

$$Z_{НИР} = 20000 + 1350 + 48000 + 70 + 25300 = 94720 \text{ руб.}$$

Коэффициент эффективности определяется по следующей формуле:

$$K_{\text{эф}} = \frac{\text{Э}}{Z_{\text{НИР}}}, \quad (15)$$

где Э – суммарный годовой эффект; $Z_{\text{НИР}}$ – затраты на выполнение диссертационного исследования.

В результате коэффициент эффективности равен:

$$K_{\text{эф}} = \frac{208330,2}{94720} = 2,2$$

4.12 Выводы по главе 4

В данной главе разработана методика проектирования и изготовления деталей и узлов аэрокосмических конструкций из ПКМ в условиях аддитивного производства, основанную на применении робастных подходов: QFD, AFMEA, планирования экспериментов по методу Г. Тагути в совокупности с программными системами трехмерного проектирования и инженерного анализа.

Для разработки методики проведен анализ и описание:

- конструкции ТСУ для изделий РКТ;
- перспективных ПКМ для изготовления (FDM 3D-печати) деталей и узлов изделий РКТ, представленных на отечественном и международном рынках, а также их прочностные, эксплуатационные, технологические и стоимостные характеристики;
- конструкции и видов кинематик FDM 3D-принтеров.

На основе результатов анализа проведен выбор объекта для отработки методики, ПКМ и аддитивного оборудования для изготовления объекта исследования:

- в качестве объекта исследования выбран ТСУ изделия РКТ, в частности, ТСУ, применяемый в межбаковом отсеке РН для монтажа ДПА;

– в качестве ПКМ для изготовления (FDM 3D-печати) ТСУ выбран специальный филамент FRICTION отечественной компании-производителя REC, состоящий из PA12 (матрица) и 12 % GF(наполнитель).

Кроме того, на основе общей оценки выполнения требований различными видами кинематики FDM 3D-принтеров, рассчитанной по аналогии с методикой, принятой в HoQ QFD, выбран FDM 3D-принтер китайского производства – Flyingbear Tornado 2 PRO для изготовления объекта исследования.

Кроме того, проведены:

– выбор технологических параметров FDM 3D-печати для печати образцов для испытания на растяжение;

– FDM 3D-печать образцов для испытания на растяжение;

– обработка результатов испытания напечатанных образцов на растяжение.

На основе результатов испытания напечатанных образцов на растяжение определены:

– максимальное напряжение σ_{\max} , для 16 комбинаций технологических параметров FDM 3D-печати;

– определены значения показателя робастности (отношение сигнал/шум S/N) для 16 комбинаций технологических параметров FDM 3D-печати;

– определена робастная комбинация технологических параметров FDM 3D-печати к колебаниям температуры сопла экструдера и рабочего стола.

Проведен расчет экономической эффективности от внедрения результатов диссертационного исследования. Суммарный годовой экономический эффект от использования результатов исследования составляет 208330,0 руб. Коэффициент использования разработанных методик и модели обеспечения качества деталей и узлов из ПКМ на основе робастных подходов составляет 2,2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Достигнута цель исследования по повышению качества деталей и узлов аэрокосмических конструкций из ПКМ в условиях аддитивного производства и решены следующие задачи:

1 Описаны отечественный и зарубежный опыт применения FDM 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, упрочненных стекло и углеволокном, специальных филаментов, обладающих тепло и электропроводностью;

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 из ПКМ 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;

– конструкторским и технологическим методам и подходам обеспечения качества.

Таким образом, не обеспечено сквозное развертывание требований и качества и применение современных методов и подходов управления качеством.

2 В соответствии с международными стандартами AS9145, AS9100, AS9102, AS9103, AS9110, государственными стандартами ГОСТ Р ЕН 9110-2011, ГОСТ 57586-2017, ГОСТ Р ИСО 16336-2020, структурной модели аддитивного производства – FDM 3D-печати разработана функциональная модель обеспечения

качества деталей и узлов аэрокосмических конструкций из ПКМ, получаемых с использованием аддитивных технологий, основанную на применении робастных подходов в совокупности с программными системами трехмерного проектирования и инженерного анализа. Функциональная модель позволила сократить сроки разработки и изготовления деталей и узлов в условиях аддитивного производства на 20-30%.

3 Разработана методика анализа видов и последствий потенциальных несоответствий процесса 3D-печати (Additive Failure Mode and Effects Analysis, AFMEA). AFMEA-анализ позволяет учитывать 3 взаимосвязанных этапа: этапы проектирования, предпечатной подготовки, 3D-печати. На этапе предпечатной подготовки введен новый элемент функционирования этапа процесса – структура 3D-модели.

Проведен AFMEA-анализ СУ датчика давления ДАВ 068-02 в МБО РН семейства «Союз». За счет введения предупреждающих мероприятий удалось значительно снизить значения ПЧР:

а) Разработка методики нивелирования («компенсации») высокого уровня диаметра прутка филамента для обеспечения качества деталей и узлов аэрокосмических конструкций из ПКМ позволила снизить ПЧР возникновения потенциальных несоответствий с 240 баллов до 48;

б) Разработка методики проектирования и изготовления деталей и узлов аэрокосмических конструкций из ПКМ в условиях аддитивного производства значительно снизила ПЧР возникновения потенциальных несоответствий с 560 баллов до 40;

в) Разработка кодификатора отказов аддитивного оборудования и программного обеспечения снизила значение ПЧР возникновения потенциальных несоответствий с 240 до 48 баллов.

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

5 Разработана методика проектирования и изготовления деталей и узлов аэрокосмических конструкций из ПКМ в условиях аддитивного производства, основанную на комплексном применении робастных подходов в совокупности с программными системами трехмерного проектирования и инженерного анализа и разработанных методик (AFMEA-анализа, методики нивелирования диаметра прутка филамента). Разработанная методика позволила увеличить значение ключевого показателя качества деталей и узлов аэрокосмических конструкций из ПКМ – значения прочности при растяжении на 30% от среднего значения.

6 Проведена комплексная апробация предложенных решений на базе Самарского национального университета имени академика С.П. Королева и АО «Ракетно-космический центр «Прогресс».

Дальнейшие исследования будут направлены на повышение качества деталей и узлов изделий авиационно-космической техники из специальных филаментов, обладающих тепло и электропроводностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 57558-2017/ISO/ASTM 52900:2015 Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. – М.: Стандартинформ, 2018. – 16 с.
2. ГОСТ Р 59037 – 2020 Аддитивные технологии. Конструирование металлических изделий. Руководящие принципы. – М.: Стандартинформ, 2020. – 11 с.
3. Армашова-Тельник, Г.С. Аддитивные технологии: инновационный эффект в промышленности / Г.С. Армашова-Тельник, П.Н. Соколова, Д.В. Дегтерев // Вестник ВГУИТ. – 2020. – Т. 82. – № 4. – С. 347-353.
4. Ермаковская, М.А. Технологии аддитивного производства как наиболее приоритетные современные цифровые технологии / М.А. Ермаковская, В.Ю. Аронов, В.А. Осанов // Инновации. – 2018. – № 7 (237). – С. 23-27.
5. Дресвянников, В.А. Страхов Е.П. Классификация аддитивных технологий и анализ направлений их экономического использования / В.Х. Дресвянников, Е.П. Страхов // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2018. – № 2 (26). – С. 16–28.
6. Mariano, J. Additive manufacturing technologies: an overview about 3d printing methods and future prospects / J. Mariano, R. Luis, A.D. Iris, M.M.E. Maria, D. Manuel // Complexity in manufacturing processes and systems. – 2019. – Vol. 2019. – 30 p. DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/9656938>.
7. Mohd, J. Role of additive manufacturing applications towards environmental sustainability / J. Mohd, H. Abid, P.S. Ravi, S. Rajiv, R. Shanay // Advanced Industrial and Engineering Polymer Research. – 2021. – Vol. 4. – PP. 312-322. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2021.07.005>.
8. Tuan, N.A.T.R. Abdul Manaf Abdullah & Hazizan Md Akil Recent Developments in Fused Deposition Modeling-Based 3D Printing of Polymers and Their Composites / N.A.T.R. Tuan, M.A. Abdul, M.A. Hazizan // Polymer Reviews. – 2019. – Vol. 59. – Issue 4. – PP 589-624. DOI: [10.1080/15583724.2019.1597883](https://doi.org/10.1080/15583724.2019.1597883).
9. 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,

- Zagidullin, R.S., Zezin N.I., Rodionov N.V. Rodionov // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2020. – Vol. 1027 012031. – 7 p. DOI:10.1088/1757-899X/1027/1/012031.
10. ГОСТ 57589-2017 Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 2. Материалы для аддитивных технологических процессов. Общие требования. – М.: Стандартинформ, 2019. – 12 с.
11. The University of Sheffield [Электронный ресурс]: FDM-printed fixed wing UAV. – Режим доступа: <https://www.amrc.co.uk/case-studies/fdm-printed-fixed-wing-uav>.
12. Кулик, В.И. Аддитивные технологии в производстве изделий авиационной и ракетно-космической техники: учебное пособие / В.И. Кулик, А.С. Нилов. – СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2018. – 160 с.
13. Malfitano, B. Evaluation and Implementation of Additive Manufacturing Technologies for Structural Applications / B/ Malfitano // Proceedings of the International Committee on Aeronautical Fatigue (ICAF2017) and Structural Integrity 36th Conference and 29th Symposium, June 5th-9th. – 2017. – PP. 1154-1155.
14. Евтодьева, М.Г. Аддитивное производство и дополненная реальность как новые производственные технологии в авиационной отрасли / М.Г. Евтодьева // Вестник МГИМО-Университета. – 2020. – № 13(5). – С. 307-330.
15. Guo, L., Additive manufacturing of structural materials / L. Guo, Z. Xiaofeng, C. Xuliang, H. Yunhu, C. Lizi, H. Mengke, Y. Jianan, H. Fengqian, S. Chen, P. Wang, S. Yi, L. Wan, Z. Mao, Z. Chen, X. Wang, Z. Cao, J. Lu // Materials Science and Engineering: Reports. – 2021. – Vol. 145. – 67 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mser.2020.100596>.
16. Bishay, P.L., Development of a New Span-Morphing Wing Core Design / P.L. Bishay, K.E.B. Sepulveda, A. Akinwunmi, R. Phan // Designs. – 2019. – Vol. 3(1). DOI: <https://doi.org/10.3390/designs3010012>.
17. Yeh, Y.-L. The standard strength test of 3D printing materials and its application for UAV propellers / Y.-L. Yeh // Modern Physics Letters B. – 2020. – Vol. 34. – 5 p. DOI:10.1142/S0217984920400175.

18. Esakki, B. Development of light weight multi-rotor UAV structures through synergistic application of design analysis and fused deposition modelling / B. Esakki, N.V.S.S. Sagar, C.Udayagiri, S. Sachin // International Journal of Materials and Product Technology. – 2019. – Vol. 59. – № 3. – PP. 229-238. DOI: 10.1504/IJMPT.2019.10024474.
19. Salenko, A.F. Creation of sealed strong structures of rocket and space equipment FDM printing methods by ULTEM™ 9085 PEI plastic / A.F.Salenko, I.I. Derevianko, A.A.Samusenko, K.V.Avramov, A.V. Lithot, V.V. Rogulin // Mech. Adv. Technol. – 2021. – Vol. 5. – № 3. – PP. 282–293.
20. Tobiasz, M. Scalability analysis of additively manufactured grain for 4 kN High Test Peroxide Hybrid Rocket Motor / M. Tobiasz, B. Bartkowiak // 8TH European conference for aeronautics and space sciences (EUCASS). – 2019. – 12 p. DOI: 10.13009/EUCASS2019-979.
21. Дерусова, Д.А. Неразрушающий контроль корпуса CUBSAT спутника с использованием лазерной виброметрии / В.П. Вавилов, Н.В. Дружинин, О.И. Казакова, В.О. Нехорошев, В.В. Федоров, С.Ю. Тарасов, В.Ю. Шпильной, Е.А. Колубаев // Дефектоскопия. – 2019. – №5. – С. 57-64.
22. Abdullah, K. Evaluation of additively manufactured ultraperformance polymers to use as thermal protection systems for spacecraft / K. Abdullah, H. Wu, J. Langston, O. Atak, H. Kim, S. Kim, W. P. Fahy, R. Reber, J. Misasi, S. Bateman, J. H. Коо // Journal of Applied Polymer Science. – 2020. – Vol. 137: 49117. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.49117>.
23. Wei, J. Electromagnetic wave absorption and compressive behavior of a three-dimensional metamaterial absorber based on 3D printed honeycomb / J. Wei, Лю Yan, Н. Ма, Y. Fan, J. Wang, Мю Feng, S. Qu // Scientific Reports. – 2018. – Vol. 8:4817. – 7 p. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-23286-6>.
24. ГОСТ 59100–2020 Пластмассы. Филаменты для аддитивных технологий. Общие технические требования. – М.: Стандартинформ. – 2020. – 11 с.

25. Кондрашов, С.В. Функциональные материалы, полученные способом FDM-печати (обзор) / С.В. Кондрашов, А.А. Пыхтин, С.А. Ларионов // Труды ВИАМ. – 2021. – № 3(97). – С. 44-57.
26. Lopatina, Yu. A. Development of a High Strength Polymeric Composite Material Using 3D-Printing and Vacuum Impregnation Technology / Yu.A. Lopatina, V.E. Slavkina // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 934 012019. – 6 p. DOI:10.1088/1757-899X/934/1/012019.
27. Судан, А. О перспективах производства филаментов на базе полиамида 6 для FDM-печати / А. Судан, А.Н. Гайдук, А.А. Скаскевич // Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Серия 6. Техника. – 2021. – Т. 11. – № 2. – С. 83-90.
28. Пыхтин, А.А. Исследование влияния нековалентных модификаторов на структуру и свойства полимерных филаментов для FDM-печати на основе АБС-пластика и углеродных наночастиц / А.А. Пыхтин, А.Е. Сорокин, С.А. Ларионов, С.Л. Лонский // Труды ВИАМ. – 2021. – № 10 (104). – С. 29-35.
29. Кирин, Б.С. Материалы для 3D-печати на основе полиэфирэфиркетонов / Б.С. Кирин, С.Л. Лонский, Г.Н. Петрова, А.Е. Сорокин // Труды ВИАМ. – 2019. – № 4 (76). – С. 21-29.
30. Куц, В.В. Разработка токопроводящего филамента для 3D-печати / В.В. Куц, М.С. Разумов, А.К. Досумов, С.А. Чевычелов // СТИН. – 2021. – № 7. – С. 37-39.
31. Холхоев, Б.Ч., Функциональные композиты на основе полилактида и графена // Б.Ч. Холхоев, А.С. Буинов, М.Н.Козлова, В.Г. Макотченко, В.Е. Федоров, В.Ф. Бурдуковский / Журнал прикладной химии. – 2018. – Т. 91. – Выпуск 3. – С. 352-355.
32. Weng, Z. Mechanical and thermal properties of ABS/montmorillonite nanocomposites for fused deposition modeling 3D printing / Z. Weng, J. Wang, T. Senthil, L.Wu // Mater Des. – 2016. – Vol. 102. – PP. 276–83.

33. ГОСТ 33366.1–2015 (ISO 1043-1:2011) Пластмассы. Условные обозначения и сокращения. Часть 1. Основные полимеры и их специальные. – М.: Стандартиформ. – 2015. – 20 с.
34. Хейфец, М.Л. Классификация полимерных композиционных материалов, используемых в FDM-технологии / М.Л. Хейфец, Н.Л. Грецкий, Д.С. Ратуцкая, Ф.Л. Баранов, А.И. Гутковский // Перспективы развития аддитивных технологий в Республике Беларусь: сборник трудов Международного научно-практического симпозиума, Минск, 30 сентября 2020 г. – С. 141-149.
35. Богодухова, Е.С. 3D-печатающие головки для высокотемпературных и инженерных пластиков: обзор конструкций / Е.С. Богодухова, П.А. Петров // Машиностроение и инженерное образование. – 2020. – №3. – С. 3-12.
36. Дожделев, А.М. Оптимальный выбор пластика для 3D печати / А.М. Дожделев, А.Ю. Лаврентьев // Юность и Знания – Гарантия Успеха – 2019: сборник научных трудов 6-й Международной молодежной научной конференции. – 2019. – Т. 3. – С. 180-183.
37. Thirunahary, S. A Critical Review on of 3D Printing Materials and Details of Materials used in FDM / S. Thirunahary, M.M.R. Ketham, H. Akhil, N.K. Mavoori // International Journal of Scientific Research in Science. – Vol. 3. – Issue 2. – PP. 353-361.
38. Куриный, В.В. Особенности технологии изготовления корпусов двухсредных беспилотных аппаратов методом послойного наплавления FDM / В.В. Куриный, В.В. Солецкий, Б. Лю // Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – Т. 2– № 2. – С. 34-41.
39. Лю, Б. Сравнительный анализ филаментов для 3D печати планера беспилотного летательного аппарата / Б. Лю, В.В. Куриный // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы IV Всерос. нац. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – 2021. – Ч. 1. – С. 266-269.

40. Wai, Y.Y. 3D Printing of Carbon Fiber Composite: The Future of Composite Industry? / Y.Y. Wai, D.G. Guo // *Matter*. – 2020. – Vol. 2. – Issue 6. – PP. 1361-1363. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matt.2020.05.010>.
41. Благинин, С.И. 3D-принтер с программируемой термостатичной камерой для работы с высокотемпературными и специальными техническими полимерами / С.И. Благинин, А.В. Синьков, Е.П. Бойцов // *Аддитивные технологии: настоящее и будущее»: материалы IV Международной конференции (г. Москва, 30 мар. 2018 г.)*, [Электронный ресурс] / ФГУП «ВИАМ». – М.: ВИАМ, 2018. – С. 154-161.
42. Холхоев, Б.Ч. Функциональные композиты на основе полилактида и графена / Б.Ч. Холхоев, А.С. Буинов, М.Н. Козлова, В.Г. Макотченко, В.Е. Федоров, В.Ф. Бурдуковский // *Журнал прикладной химии*. – 2018. – Т. 91. – Вып. 3. – С. 352-355.ж
43. Ильясова, А.В. Исследование современного рынка пластиков, используемых для 3d-печати / А.В. Ильясова, О.А. Белицкая // *Концепции, теория, методики фундаментальных и прикладных научных исследований в области инклюзивного дизайна и технологий: сборник научных трудов по итогам Международной научно-практической заочной конференции (25-27 марта 2020 г.)*. Часть 1. – М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2020. – С. 36-41.
44. Малаховский, С.С. Основные тенденции получения и применения вторичных углеродных волокон (обзор) / С.С. Малаховский, С.И. Мишкин // *Труды ВИАМ*. – 2019. – №9 (81). – С. 73-79.
45. Valveza, S. 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA composites: A short review / S. Valveza, P. Santosa, J.M. Parentea, M.P. Silvaa, P.N.B. Reis // *Procedia Structural Integrity*. – 2020. – Vol. 25. – PP. 394-399. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.04.056>.
46. Криницын, М.Г. Создание новых композиционных материалов на полимерной основе для применения в аддитивных технологиях / М.Г. Криницын, Р.О. Черепанов, В.А. Юркина // *Инновационные технологии в машиностроении: сборник трудов IX Международной научно-практической конференции, 24–26 мая 2018 г., Юрга*. – Томск: Изд-во ТПУ, 2018. – С. 142-148.

47. Ozsarikaya, B. Tribological properties of carbon fiber and multiwalled carbon nanotube filled polyamide 66 composites / B. Ozsarikaya, S.H. Yetgin, H. Unal // BALTRIB 2019: proceedings of X international scientific conference, Vytautas Magnus University, Agriculture Academy, Kaunas, Lithuania, 14-16 November 2019. – PP. 33-41. DOI: 10.15544/baltrib.2019.07.
48. Seyed, H.R.S. 3D-Printed Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites: A Systematic Review / H.R.S. Seyed, P. Diana // J. Compos. Sci. – 2020. – Vol. 4(3); DOI:10.3390/jcs4030098. – 23 p.
49. Samir, K. Investigation of 3D printing strategy on the mechanical performance of coextruded continuous carbon fiber reinforced PETG / K. Samir, G. Geoffrey, A. Samir, A. Sebastien // Journal of applied polymer science. – 2021. – Vol. 138. – Issue 37. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.50955>.
50. Sommacal, S. Characterisation of void and fiber distribution in 3D printed carbon-fiber/PEEK using X-ray computed tomography / S. Sommacal, A. Matschinski, K. Drechsler, P. Compston // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2021. – Vol. 149. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2021.106487>.
51. Jahangir, M.N. Reinforcement of material extrusion 3D printed polycarbonate using continuous carbon fiber / M.N. Jahangir, K.M.M. Billah, Y. Lin, D.A. Roberson, R.B. Wicker, D. Espalin // Additive Manufacturing. – 2019. – Vol. 28. – PP. 354-364. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.05.019>.
52. Амангельдыулы, Н. Мировые тенденции в области исследований углепластиков / Н. Амангельдыулы, М.В. Федоров // Вопросы материаловедения. – 2019. – № 1(97). – С. 147-163.
53. Sezer, H.K. FDM 3D printing of MWCNT re-inforced ABS nano-composite parts with enhanced mechanical and electrical properties / H.K. Sezer, O. Eren // Journal of Manufacturing Processes. – 2019. – Vol. 37. – PP. 339–347.
54. Spinelli, G. Rheological and electrical behaviour of nanocarbon/poly (lactic) acid for 3D printing applications / G. Spinelli, P. Lamberti, V. Tucci, R. Ivanova, S. Tabakova, E. Ivanov, R. Kotsilkova, S. Cimmino, R.Di. Maio, C. Silvestre // Composites Part B: Engineering. – 2019. – Vol. 167. – PP. 467–476.

55. Tan, J.C. Embedded electrical tracks in 3D printed objects by fused filament fabrication of highly conductive composites / J.C. Tan, H.Y. Low // *Additive Manufacturing*. – 2018. – Vol. 23. – PP. 294–302.
56. Wei, X. 3D printable graphene composite / X. Wei, D. Li, W. Jiang, Z. Gu, X. Wang, Z. Zhang, Z. Sun // *Scientific reports*. – 2015. – Vol. 5. – 7 p. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep11181>.
57. Leigh, S.J. A simple, low-cost conductive composite material for 3D printing of electronic sensors / Leigh S.J., Bradley R.J., Purssell C.P., Billson D.R., Hutchins D.A. / S.J. Leigh, R.J. Bradley, C.P. Purssell, D.R. Billson, D.A. Hutchins // *PloS one*. – 2012. – Vol. 7. – № 11. – 6 p. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0049365>.
58. Lei, Z. Fabrication of highly electrical conductive composite filaments for 3D-printing circuits / Z. Lei, Z. Chen, H. Peng, Y. Shen, W. Feng, Y. Liu, Z. Zhang, Y. Chen // *Journal of Materials Science*. – 2018. – Vol. 53. – № 20. PP. 14495–14505. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-018-2645-1>.
59. Bollig, L.M. 3D printed magnetic polymer composite transformers / L.M. Bollig, P.J. Hilpisch, G.S. Mowry, B.B. Nelson-Cheeseman // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2017. – Vol. 442. – PP. 97–101. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.06.070>.
60. Palmero, E.M. Development of permanent magnet MnAlC/polymer composites and flexible filament for bonding and 3D-printing technologies / E.M. Palmero, J. Rial, J. Vicente, J. Camarero, B. Skarman, H. Vidarsson, P. Larsson, A. Bollero // *Science and Technology of advanced Materials*. – 2018. – Vol. 19. № 1. – PP. 465–473. DOI: <https://doi.org/10.1080/14686996.2018.1471321>.
61. Huber, C. 3D Printing of Polymer Bonded Rare-Earth Magnets with a Variable Magnetic Compound Density for a Predefined Stray Field / C. Huber, C. Abert, F. Bruckner, M. Groenefeld, S. Schuschnigg, I. Teliban, C. Vogler, G. Wautischer, R. Windl, D. Suess // *Scientific Reports*. – 2017. – Vol. 9419. – 8 p. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-09864-0>.

62. Nikzad, M. Thermo-mechanical properties of a highly filled polymeric composites for fused deposition modeling / M. Nikzad, S.H. Masood, I. Sbarski // *Materials & Design*. – 2011. – Vol. 32. – №. 6. – PP. 3448–3456.
63. Quill, T.J. Thermal and mechanical properties of 3D printed boron nitride–ABS composites / T.J. Quill, M.K. Smith, T. Zhou, M.G.S. Baioumy, J.P. Berenguer, B.A. Cola, K. Kalaitzidou, T.L. Bougher // *Applied Composite Materials*. – 2018. – Vol. 25. – № 5. – PP. 1205–1217. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10443-017-9661-1>.
64. Waheed, S. Three-dimensional printing of abrasive, hard, and thermally conductive synthetic microdiamond–polymer composite using low-cost fused deposition modeling printer / S. Waheed, J.M. Cabot, P. Smejkal, S. Farajikhah, S. Sayyar, P.C. Innis, S. Beirne, G. Barnsley, T.W. Lewis, M.C. Breadmore, B. Paull // *ACS applied materials & interfaces*. – 2019. – Vol. 11. – № 4. – PP. 4353–4363. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsami.8b18232>.
65. Измайлов, Д.В. Анализ дефектов поверхности изделия при 3d-печати по их изображениям с использованием методов машинного обучения / Д.В. Измайлов, Д.А. Дрыгин, К.В. Ежова // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. – 2020. – Т. 4. – № 4. – С. 552-559.
66. Тощакова, Ю.Д. Дефекты при 3d-печати / Ю.Д. Тощакова, К.В. Дрозд, И.О. Гребенников // *Полиграфия: технология, оборудование, материалы: материалы X науч. практ. конф. с международным участием (Омск, 15–16 мая 2019 г.)* – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2019. – С. 226-232.
67. Федоров, М.В. Анализ дефектов процесса FDM печати / М.В., Федоров // *Современные производственные технологии изготовления художественно-промышленных изделий из конструкционных материалов: сборник трудов научно-технического семинара*. – М.: ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», 2021. – С. 31-35.
68. Белов, П.С. Анализ дефектов изделий, получаемых методами аддитивных технологий / П.С. Белов, С.Л. Махов // *Наука и бизнес: пути развития*. – 2019. – № 1(91). – С. 8-13.

69. Ивашкова, К.П. Анализ и систематизация дефектов 3D-печати / К.П. Ивашкова, А.Н. Филиппов, Е.А. Копасов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2017. – Т. 60. – №5. – С. 426-430.
70. Холодилов, А.А., Пузынина М.В. Проблемы, возникающие при трехмерной печати объектов с использованием технологии FDM / А.А. Холодилов, М.В. Пузынина // Наука, образование, инновации: апробация результатов исследований: материалы Международной (заочной) научно-практической конференции. Прага, 09 февраля 2017 г. – С. 199-204.
71. Полякова, Д.А. Анализ зарубежных и отечественных исследований проблемы адаптации 3d-моделей для 3d-печати / Д.А. Полякова // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. Том 7. – СПб.: Университет ИТМО, 2018. – С. 249-252.
72. Зубрилин, А.В. Предпечатная подготовка 3d-моделей с использованием специализированного программного обеспечения / А.В. Зубрилин, М.В. Тагильцев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2017. – Выпуск 9. – Ч. 1. – С. 88-96.
73. Кузнецов, А.Е. Основные факторы, влияющие на прочность изделий при печати на 3d-принтере / А.Е. Кузнецов, В.М. Соколова // Химия и химическая технология: достижения и перспективы: сборник материалов v всероссийской конференции. Кемерово, 2020. – С. 118.1-118.5.
74. Федулов, В.М. Влияние технологических режимов при FDM-печати на качество поверхностей детали из ABS и PLA пластика / В.М. Федулов, Ю.С. Федулова, Е.Е. Кулик // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. – 2017. – № 4(43). – С. 162-167.
75. Мышечкин, А.А. Исследование влияния режимов FDM-технологии на свойства изделий / А.А. Мышечкин, Е.А. Шумило // Российская научно-техническая конференция с международным участием. Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике [Электронный ресурс]: сборник докладов конференции «Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике»

Физико-технологического института РТУ МИРЭА. — М.: РТУ МИРЭА, 2019. — Т. 2. — С. 276-280.

76. ГОСТ Р 57586 – 2017 Изделия, полученные методом аддитивных технологических процессов. Общие требования. – М.: Стандартинформ. – 2019. – 8 с.

77. Болдырев, А.А. К вопросу технологичности изделий сниженной массы в авиационной и ракетно-космической технике, полученных с помощью дегенеративного дизайна / А.А. Болдырев, Д.Ю. Левин, А.И. Болдырев // Воронежский научно-технический вестник. – 2021. – № 4 (38). – С. 29-35.

78. Куркин, Е.И. Опыт использования методов и программных продуктов топологической оптимизации при проектировании кронштейнов аэрокосмического назначения, изготавливаемых по аддитивным технологиям / Е.И. Куркин, М.О. Спирина, Р.Д. Азизов // Аддитивные технологии: настоящее и будущее: материалы IV Международной конференции (г. Москва, 30 мар. 2018 г.), [Электронный ресурс] / ФГУП «ВИАМ». – М.: ВИАМ, 2018. – С. 249-255.

79. Мирзаев, М.А. Снижение массы каркаса панелей солнечных батарей / М.А. Мирзаев, А.И. Дышеков // COLLOQUIUM-JOURNAL. – 2019. – № 16-2 (40). – С. 78-83.

80. Попова, Д.Д. Применение метода топологической оптимизации для уменьшения массы конструктивно подобного кронштейна трубопровода авиационного ГТД / Д.Д. Попова, Н.А. Самойленко, С.В.Семенов, А.А. Балакирев, А.Ю. Головкин // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2018. – № 55. – С. 42-51.

81. Камардина, Н.В. Топологическая оптимизация детали «Серьга» / Н.В. Камардина, Р.М. Гусейнов, И.К. Данилов, В.Н. Коноплёв, К.А. Иванов, А.С. Жарко, Г.М. Полищук // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. – 2020. – № 21(1). – С. 20-26.

82. Sohail, G. Performance of 3D printed topologically optimized novel auxetic structures under compressive loading: experimental and FE analyses / G. Sohail, H.

- Ghulam, I. Muhammad, A. Aaqib // Journal of Materials Research and Technology. – 2021. – Vol. 15. – PP. 394-408. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.07.149>.
83. Yangyang, Z. Comparison of Manual Setting Weight Reduction and Topology Optimization of the Wing Tips of Electric Vertical Take-Off and Landing Aircraft / Z. Yangyang, L. Jiayi, L. Shiyun, H. Xiaolong, L. Bing, D. Tao // Appl. Sci. – 2022, – №12, 5548. – 20 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12115548>.
84. Cesar, A.L.S. Topology optimized design approach for additive manufacturing on an aircraft engine bracket [Electronic source] // Department of Mechanical and Aerospace Engineering California State University, Long Beach. – 2015. – access mode:<https://www.proquest.com/openview/3d48f0ef7cd3f98f0772014288204f57/1?pq-origsite=gscholar&cbl=51922&diss=y>.
85. Русских, Г.С. Шалыгин С.В. Алгоритм формирования внутренней структуры изделия с учетом напряженно-деформированного состояния на примере трехточечного изгиба / Г.С. Русских, С.В. Шалыгин // Омский научный вестник. Серия авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. – 2021. – Т. 1. – № 5. – С. 80-85.
86. Толстоба, Н.Д. Проектирование деталей с учетом трехмерной технологии их изготовления / Н.Д. Толстоба, К.Ю. Бодров // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2021. – № 10 (124). – С. 39-44.
87. Delin, J. Continuous Fiber Angle Topology Optimization for Polymer Composite Deposition Additive Manufacturing Applications / J. Delin, H. Robert, E.S. Douglas // Fibers. – 2019, – № 7(2), 14. – 21 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/fib7020014>.
88. Jikai, L. Stress-constrained topology optimization for material extrusion polymer additive manufacturing / L. Jikai, Y. Jingjing, Y. Huangchao // Journal of Computational Design and Engineering. – 2021. – Vol. 8. – Issue 3. – PP 979–993. DOI: <https://doi.org/10.1093/jcde/qwab028>.
89. Попок, Н.Н. Система поддержки принятия решений по базированию моделей деталей машин в рабочей зоне 3d-принтеров / Н.Н. Попок, Н.В. Беляков, Яснев Д.А. // Вестник полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – № 3. – С. 9-20.

90. Холодилова, М.В. Проблемы задания толщины слоя и контура внутреннего заполнения модели при трехмерной печати / М.В. Холодилова, А.А. Холодилов, Е.В. Фалеева // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. – 2020. – Т. 2. – С. 302-307.
91. Fernandez-Vicente M., Calle W., Ferrandiz et al. Effect of infill parameters on tensile mechanical behavior in desktop 3D printing // 3D printing and additive manufacturing. – 2016. – Vol. 3. – № 3. – PP. 183–192.
92. Baich, L., Manogharan G., Marie H. Study of infill print design on production cost-time of 3D printed ABS parts / L. Baich, G. Manogharan, H. Marie // International Journal of Rapid Manufacturing. – 2015. – Vol. 5. – №. 3-4. PP. 308–319.
93. Лацинина, С.В. исследование твердости изделий из ABS пластика изготовленных по FDM технологии / С.В. Лацинина, Е.В. Бакулин // Сборник материалов VIII всероссийской, научно-практической конференции молодых ученых с международным участием «Россия молодая». – 2016. – С. 236-239.
94. Судан, А. Технологические методы управления деформационно-прочностными характеристиками полимерных изделий, полученных методом FDM-печати / А. Судан, Т. Воропаева // Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Серия 6. Техника. – 2020. – Т. 10. – № 2. – С. 74-81.
95. Холодилов, А.А. Повышение качества трехмерной печати изделий сложных форм путем применения комплексного воздействия в рамках физико-математического подхода / А.А. Холодилов // Молодые ученые - Хабаровскому краю: материалы XXIII краевого конкурса молодых ученых, Хабаровск, 12-19 янв. 2021 г. / Правительство Хабаровского края; Министерство образования и науки Хабаровского края. - Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2021. – С. 116-121.
96. Волошинов, Д.В. Преобразование плоского контура методом построения эквидистант для задач 3D печати / Д.В. Волошинов, М.А. Сосновских, М.А. Трифанов // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. VI Международная научно-техническая и научно-методическая

конференция; сб. науч. ст. в 4 т. / Под. ред. С. В. Бачевского; сост. А. Г. Владыко, Е. А. Аникевич. СПб.: СПбГУТ, 2017. – Т. 3. – С. 133-136.

97. Фарниев, А.С. Математическая модель точности аддитивной печати профиля внутренней резьбы в зависимости от параметров деления 3d-модели / А.С. Фарниев, П.А. Новиков // Современные технологии: проблемы и перспективы: сборник статей всероссийской научно-практической конференции для аспирантов, студентов и молодых учёных (19 - 22 апреля 2021 г.) / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Севастопольский государственный университет, Политехнический институт, кафедра начертательной геометрии, инженерной и компьютерной графики; главный ред. к. т. н., PhD, доц. О.В. Мухина. – Севастополь: Изд-во «СевГУ», 2021. – С. 5-10.

98. Фарниев, А.С. Исследование точности внутренних резьб, сформированных при помощи технологии FDM / А.С. Фарниев, П.А. Новиков // Вестник современных технологий. – 2021. – №1 (21). – С. 33-38.

99. Фарниев, А.С. Точность внутренних резьб, полученных комбинированными методами механической обработки и аддитивными технологиями / А.С. Фарниев, П.А. Новиков // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. – 2021. – № 3 (73). – С. 176-181.

100. Гущин, И.А. Алгоритм деления объемной модели на слои для 3D-печати / И.А. Гущин, А.Р. Авдеев, А.А. Швец, А.В. Дроботов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – Выпуск 11. – Ч. 2. – С. 99-105.

101. Зубрилин, А.В. Предпечатная подготовка 3d-моделей с использованием специализированного программного обеспечения / А.В. Зубрилин, М.В. Тагильцев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2017. – Вып. 9. – Ч. 1. – С. 88-96.

102. Yanzhi, S. Function representation based slicer for 3D printing / S. Yanzhi, Ya. Zhouwang, L. Yuan, D. Jiansong // Computer Aided Geometric Design. – 2018. – Vol. 62. – PP. 276-293.

103. Syed, F.A. Optimization of Additive Manufacturing for Layer Sticking and Dimensional Accuracy / F.A. Syed, M.M. Fasih, F.K. Emin, B. Burak // Additive Manufacturing Technologies from an Optimization Perspective. – 2019. – PP. 185-198. DOI: 10.4018/978-1-5225-9167-2.ch009.
104. Paweł, K. Algorithms of control parameters selection for automation of FDM 3D printing process / K. Paweł, K. Krzysztof, G. Cezary, G. Grzegorz, P. Iwona // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 112 05011. – 6 p. DOI: 10.1051/matecconf/20171120501.
105. Колодкин, Д.Ю. Оптимизация технологических параметров FDM-печати для улучшения прочностных характеристик изделий из АБС-пластика / Д.Ю. Колодкин, В.В. Боброва, А.В. Спиглазов, Е.И. Кордикова // «НЕФТЕХИМИЯ - 2019»: материалы II Международного научно-технического и инвестиционного форума по химическим технологиям и нефтегазопереработке. – 2019. – С. 494-501.
106. Низина, Т.А. Влияние технологических режимов на упруго-прочностные характеристики FDM-печатных образцов / Т.А. Низина, Д.Р. Низин, Е.Б. Миронов, А.В. Мартьянова // ОГАРЁВ-ONLINE. – 2022. – № 3 (172). – С. 1-7. – Режим доступа: <http://journal.mrsu.ru/arts/vliyanie-texnologicheskix-rezhimov-na-uprugoprochnostnye-karakteristiki-fdm-pechatnyx-obrazcov>.
107. Осколков, А.А. Проблемы высокоскоростной трехмерной печати по технологии FDM/FFF / А.А. Осколков, Д.Н. Трушников, И.И. Безукладников // Автоматизированные системы управления и информационные технологии: материалы всероссийской научно-технической конференции. – 2020. – С. 494-501.
108. Кудрявцев, А.Р. Двухфакторный дисперсионный анализ в аддитивном производстве / Кудрявцев А.Р., Журавлёв Д.А. // Молодёжный вестник ИрГТУ. – 2020. – Т. 10. – № 2. – С. 11-18.
109. Slonov, A.L. The influence of the 3D-printing technology on the physical and mechanical properties of polyphenylene sulfone / A.L. Slonov, A.A. Khashirov, A.A. Zhansitov, E.V. Rzhetskaya, S.Y. Khashirova // Rapid Prototyping Journal. – 2018. – Vol. 24. – №. 7. – PP. 1124-1130.

110. Slonov, A.L. Mechanical properties of samples of polyphenylene sulfone obtained by the 3D-printing method / A.L. Slonov, A.A. Khashirov, A.A. Zhansitov, I.V. Dolbin // *Materials Science Forum*. – 2018. – Vol. 935. – PP. 21–26.
111. Aliaksandr, S. Influence of technological parameters of FDM-print on the strength characteristics of samples of polyamide / S. Aliaksandr, S. Ammar, D. Dzhendo // *Machines. Technologies. Materials*. – 2020. – Vol. 14. – Issue 5. – PP. 210-212.
112. Patrich, F. Relationship between FDM 3D printing parameters study: parameter optimization for lower defects / F. Patrich, L.-C. Christian, M.S. Gian, S. Merve, C. Elisa, F. Leonardo, D. Giampiero, L. Alfredo // *Polymers*. – 2021. – Vol. 13. – Issue 13. – PP. 210-212. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13132190>.
113. Razieh, H.S. Investigation of the adhesion properties of direct 3D printing of polymers and nanocomposites on textiles: Effect of FDM printing process parameters / H.S. Razieh, C. Christine, N. Vincent // *Applied Surface Science*. – 2017. – Vol. 403. – PP. 551-563.
114. Peng, W. Effects of FDM-3D printing parameters on mechanical properties and microstructure of CF/PEEK and GF/PEEK / W. Peng, Z. Bin, D. Shouling, L. Lei, H. Chuanzhen // *Chinese Journal of Aeronautics*. – 2021. – Vol. 34. – Issue 9. – PP. 236-246.
115. Teng-Chun, Y. Morphology and mechanical properties of 3D printed wood fiber/polylactic acid composite parts using Fused Deposition Modeling (FDM): the effects of printing speed / Y. Teng-Chun, Y. Chin-Hao // *Polymers*. – 2020. – Vol. 12, 1334. DOI:10.3390/polym12061334.
116. ГОСТ Р ИСО 16336-2020 Статистические методы. Применение к новым технологиям и процессу разработки продукции. Робастное параметрическое проектирование (RPD). – М.: Стандартинформ. – 2020. – 70 с.
117. Дмитриев, А.Я. Робастное проектирование и технологическая подготовка производства изделий авиационной техники: учеб. пособие / А.Я. Дмитриев, Ю.А. Вашуков, Т.А. Митрошкина. – Самара: Изд-во СГАУ, 2016. – 76 с.

118. Dmitriev, A. Improving the efficiency of aviation products design based on international standards and robust approaches / A. Dmitriev, T. Mitroshkina // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 476 012009. DOI: 10.1088/1757-899X/476/1/012009.
119. Dmitriev, A. Structural and parametric analysis of robust design quality of complex technical systems / A. Dmitriev, T. Mitroshkina, G. Rogachev // ITM WEB OF CONFERENCES. – 2017. – Vol. 10. DOI: 10.1051/itmconf/20171001001.
120. Dmitriev, A. The ontological model and the hybrid expert system for products and processes quality identification involving the approach based on system analysis and quality function deployment / A. Dmitriev, T. Mitroshkina // ITM WEB OF CONFERENCES. – 2016. – Vol. 6. DOI: 10.1051/itmconf/20160602005.
121. Антипов, Д.В. Разработка рабочих инструкций операторов для обеспечения производительности производственных процессов / Д.В. Антипов, А.С. Клентак // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2020. – Т. 22. – № 2(94). – С. 11-15. DOI: 10.37313/1990-5378-2020-22-2-11-15.
122. Flavia, V.B. Application of Taguchi method for the analysis of a multiple air jet impingement system with and without target plate motion / V.B. Flavia, D.T.S. Sergio, F.C.F. T. Senhorinha, C.F.T. Jose // International journal of heat and mass transfer. – 2021. – Vol. 176. – Vol. 121504. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121504>.
123. Sun, X. Multiobjective design optimization of an IPMSM for EVs based on Fuzzy method and sequential Taguchi method / X. Sun, Z. Shi, J. Zhu // in IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2021. – Vol. 68. – № 11. – PP. 10592-10600. DOI: 10.1109/TIE.2020.3031534.
124. Ajamloo, A.M. Multi-objective optimization of an outer rotor bldc motor based on Taguchi method for propulsion applications / A.M. Ajamloo, A. Ghaheri, Afjei E. // 10th International Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC). – 2019. – PP. 34-39. DOI: 10.1109/PEDSTC.2019.8697586.
125. Biyi, C. Power prediction formula for blade design and optimization of Dual Darrieus Wind Turbines based on Taguchi method and Genetic Expression

- Programming model / C. Biyi, D. Jianjun, Y. Yingxue // *Renewable Energy*. – 2022. – Vol. 192. – PP. 583-605. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.04.111>.
126. Castro, C.C. Taguchi approach for the optimization of refill friction stir spot welding parameters for AA2198-T8 aluminum alloy / C.C. Castro, A.H. Plaine, N.G. Alcantara, J.F. Santos // *International journal of advanced manufacturing technology*. – 2018. – Vol. 99. – PP. 1927–1936. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2609-2>.
127. Vysotskaya, M.V. Improve the integrity testing process based on QFD, FMEA and TRIZ / M.V. Vysotskaya, A.Ya. Dmitriev // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2021. – Vol. 1027 012029. doi:10.1088/1757-899X/1027/1/012029.
128. Zagidullin, R. QFD-based researching and improving of the press-fit assembling quality by use of technological equipment from shape memory alloy / R. Zagidullin, T. Mitroshkina, A. Panov // *AIP Conference Proceedings*. – 2021. – Vol. 2318 150027. DOI: 10.1063/5.0035757.
129. Altuntas, S. New product design for military aviation maintenance activities through quality function deployment (QFD) / S. Altuntas, T. Dereli, C. Ozşalap // *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*. – 2019. – Vol. 34(4). – PP. 2187-2202. DOI: 10.17341/gazimmfd.427449.
130. Khandoker, A. A requirements elicitation process for a purposeful general aviation (GA) aircraft design based on emerging economies / A. Khandoker, M. Hamid, A. Shahriar, A. Rahman, G. Gessl // *The Aeronautical Journal*. – 2022. – Vol. 126(1298). – PP. 645-680. DOI:10.1017/aer.2021.91.
131. Surendar, G. Design conception and evaluation of an unmanned amphibious aerial vehicle using systematic approach / G. Surendar, E. Balasubramanian, M. Silambarasan, P. Vikram // *Aviation*. – 2022. – Vol. 26. – № 1. DOI: <https://doi.org/10.3846/aviation.2022.16519>.
132. Mohammed, H. Investigation of tensile property-based Taguchi method of PLA parts fabricated by FDM 3D printing technology / H. Mohammed, R. Sarkawt, M.A. Yassin // *Results in Engineering*. – 2021. – Vol. 11 100264. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100264>.

133. Heidari-Rarani, M. Optimization of FDM process parameters for tensile properties of polylactic acid specimens using Taguchi design of experiment method / M. Heidari-Rarani, N. Ezati, P. Sadeghi, M. Badrossamay // Journal of Thermoplastic Composite Materials. – 2022. – Vol. 5(12). – PP. 2435-2452. DOI:10.1177/0892705720964560
134. Kam, M. Investigation of the effect of FDM process parameters on mechanical properties of 3D printed PA12 samples using Taguchi method / M. Kam, A. Ipekci, O. Şengul // Journal of Thermoplastic Composite Materials. – 2021. DOI:10.1177/08927057211006459.
135. Vishal, W. Experimental investigation of FDM process parameters using Taguchi analysis / W. Vishal, J. Darshit, J. Akshata, C. Rakesh // Materials Today: Proceedings. –2020. – Vol. 27. – Part 3. PP. 2117-2120. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.09.078>.
136. Radhwan, H. Optimization parameter effects on the quality surface finish of 3D-printing process using Taguchi method / H. Radhwan, Z. Shayfull, S.M. Nasir, Abdellah el-hadj Abdellah, A.R. Irfan // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 864 012143. DOI:10.1088/1757-899X/864/1/012143.
137. Ajay Kumar, M. Effect of machine parameters on strength and hardness of FDM printed carbon fiber reinforced PETG thermoplastics / M. Ajay Kumar, M.S. Khan, S.B. Mishra // Materials Today: Proceedings. – 2020. – Vol. 27. – Part 2. – PP. 975-983. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.291>.
138. Fanelli, M. Addressing Thermal-Induced Inefficiencies in 3D Printing / M. Fanelli, L. Khan, J. Melvin, S. Milevski, H. Wang // Research Report (conclusion). – 2020. – Access mode: <https://hdl.handle.net/2027.42/164444>.
139. Buranska, E. Risk analysis of the 3D printer / E. Buranska, D. Meszaros // Proceedings of 10th International Conference, Bratislava. – 2020. – PP. 35-42.
140. Andreasson, J. The construction of a shredder for discarded PLA: A machine construction / J. Andreasson, J. Fredriksson // Independent thesis, Malardalen University, School of Innovation, Design and Engineering. – 2022. – Access mode: <https://www.divaportal.org/smash/record.jsf?dswid=1977&pid=diva2%3A1636704>.

141. Zilda, C.S. Study of the Technical Feasibility and Design of a Mini Head Screw Extruder Applied to Filament Deposition in Desktop 3-D Printer / C.S. Zilda, S.F. Matheus, I.N. Paulo, S. Jorge // *Key Engineering Materials*. – 2014. – Vol. 572. – PP. 151-154. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.572.151.
142. Efrain Rodriguez, E. Conceptual design and dimensional optimization of the linear delta robot with single legs for additive manufacturing / E. Efrain Rodriguez, A. Alvares, C. Jaimes // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*. – 2019. – Vol. 233. – Issue 7. – PP. 443-450. DOI:10.1177/0015732515680408.
143. Гаска, Э.Э.Р. Применение методологии QFD при разработке 3d принтера / Э.Э.Р. Гаска, Б.Е.И. Кортеса, С.А.П. Кортес // *Колумбийский журнал передовых технологий*. – 2021. – Vol. 2 (28). – С. 47–54. DOI: <https://doi.org/10.24054/16927257.v28.n28.2016.289>.
144. Deshpande, S.P. Developing an open source, inexpensive, large-scale polar configuration 3D printer / S.P. Deshpande, S. Kulkarni, S. Shah, J. Irwin // *International journal of engineering research and innovation*. – 2019. – Vol. 11. – № 1. – С. 13-22.
145. Patel, P.K. Overview of 3D-printing Technology 1: History, Types, Applications and Materials / P.K. Patel // *Additive Manufacturing with Medical Applications*. – 2022. – С. 243-264.
146. Новиков, И.С. Разработка научно-методического обеспечения для повышения эффективности систем менеджмента качества организаций авиационной промышленности / И.С. Новиков // *Вестник МАИ*. – 2011. – Т.18. – №2. – С. 276-280.
147. Ведмидь, П.А. Планирование качества: ключевые характеристики в цеховой технологии контроля / П.А. Ведмидь // *Методы менеджмента качества*. – 2018. – №18. – С. 34-38.
148. Высоцкая, М.В. Анализ и совершенствование измерительной системы испытаний авиакосмической техники для верификации / валидации продукции / М.В. Высоцкая, Р.С. Загидуллин, Т.А. Митрошкина, А.Я. Дмитриев // *Известия*

Тулского государственного университета. Технические науки. – 2019. – № 12. – С. 23-27.

149. Высоцкая, М.В. Улучшение процесса испытаний на герметичность современными методами управления качеством / М.В. Высоцкая, Д.В. Хрящева, С.И. Орлова, В.Н. Цыман, И.В. Русских, М.А. Шуршев // Качество и жизнь. – 2018. – № 3 (19). – С. 16-24.

150. ПНСТ 415-2020 Предварительный национальный стандарт Российской Федерации. Системы менеджмента качества предприятий авиационной, космической и оборонной отраслей промышленности. Перспективное планирование качества продукции. Процесс одобрения этапов производства. – М.: Стандартиформ, 2020. – 24 с.

151. Поцебнева, И.В. Применение методики планирования качества продукции Advanced Product Quality Planning (APQP) / И.В. Поцебнева, М.С. Веденева, В.А. Юнда, Д.О. Александров // European scientific conference: сборник статей XXIV Международной научно-практической конференции. Пенза, 2021. – С. 36-39.

152. ГОСТ Р ЕН 9100–2011 Системы менеджмента качества организаций авиационной, космической и оборонных отраслей промышленности. Требования. – М.: Стандартиформ, 2012. – 32 с.

153. ГОСТ Р ЕН 9110–2011 Системы менеджмента качества. Требования к организациям технического обслуживания авиационной техники. – М.: Стандартиформ, 2012. – 36 с.

154. ГОСТ Р 56176–2014 Системы менеджмента качества организаций авиационной, космической и оборонных отраслей промышленности. Управление стабильностью ключевых характеристик. – М.: Стандартиформ, 2014. – 14 с.

155. ГОСТ Р 56515-2015 Аппараты космические автоматические и системы бортовые служебные космических аппаратов. Общие требования по защищенности и стойкости к воздействию электрофизических факторов космического пространства и статического электричества. – М.: Стандартиформ. – 2019. – 19 с.

156. ГОСТ Р 25645.332-94 Материалы полимерные для космических аппаратов с ядерным реактором. Требования к проведению радиационных испытаний. – М.: Изд-во стандартов. – 1995. – 19 с.
157. ГОСТ Р ИСО/АСТМ 52950-2022 Аддитивные технологии. Представление и обработка данных технологического процесса. Общие положения. – М.: Российский институт стандартизации. – 2020. – 16 с.
158. ГОСТ Р ИСО/АСТМ 52950-2022 Аддитивные технологии. Представление и обработка данных технологического процесса. Общие положения. – М.: Российский институт стандартизации. – 2020. – 16 с.
159. 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. – Выпуск 12. – С. 27-33.
160. Загидуллин, Р.С. Современные методы улучшения качества проектирования специальной технологической оснастки для испытаний сборочно-защитного блока научно-энергетического модуля / Р.С. Загидуллин, П.В. Баринов, В.А. Буркова, С.В. Глушков, Т.А. Митрошкина // Качество и жизнь. – 2019. – №2 (22). – С. 44-53.
161. 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.
162. Филиппова, Т.С. Инжиниринг качества сельскохозяйственного беспилотного летательного аппарата / Т.С. Филиппова, А.Я. Дмитриев, Р.С. Загидуллин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – Выпуск 5. – С. 543-548.
163. Dmitriev, A.Ya. Special Aspects of Quality Assurance in the Design, Manufacture, Testing of Aerospace Engineering Products / A.Ya. Dmitriev, R.S.

Zagidullin, T.A. Mitroshkina // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. Vol. 714 (2020) 012006. DOI:10.1088/1757-899X/714/1/012006.

164. 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.

165. 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.

166. 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.

167. 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.

168. 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.

169. 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. Vol. 1925 (2021) 012085. DOI:10.1088/1742-6596/1925/1/012085.

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

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

172. 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. – Выпуск 7. – С. 210-215.

173. ГОСТ Р 57588–2021 Аддитивные технологии. Оборудование для аддитивных технологических процессов. Общие требования 52950-2022. – М.: Российский институт стандартизации. – 2021. – 12 с.

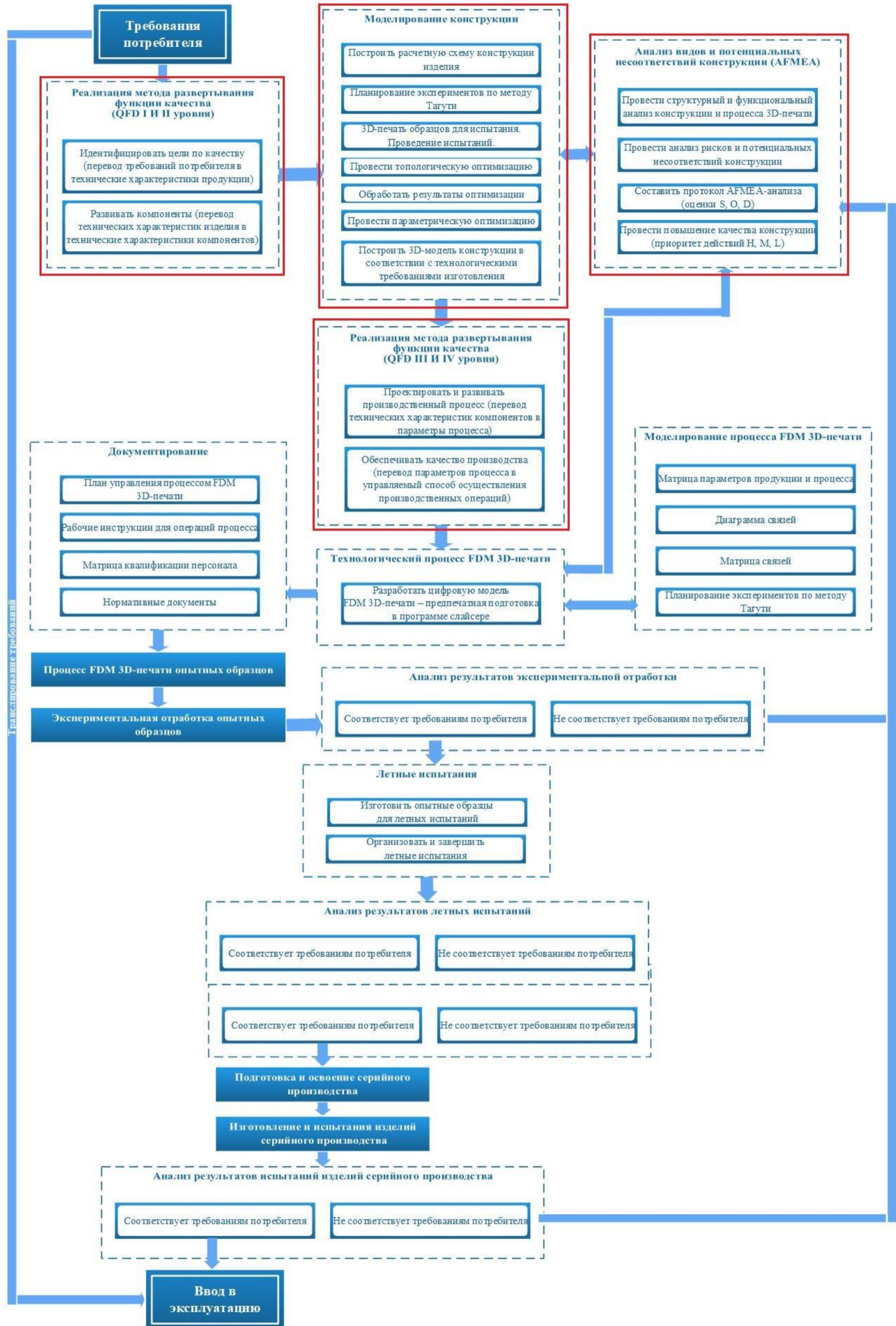
174. Дьяченко, Е.А. Анализ существующих кинематик 3d принтеров технологии FFF/FDM / Е.А. Дьяченко, М.Ю. Козенко, А.М. Макаров, А.В. Ваганов // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2021. – № 1 (248). – С. 57-60.

175. 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. Vol. 666 (2021) 062123. DOI:10.1088/1755-1315/666/6/062123.

176. ГОСТ Р 59929–2021 Данные об образцах для испытаний, изготовленных с применением аддитивных технологических процессов. Общие требования. – М.: Российский институт стандартизации. – 2021. – 16 с.

177. ГОСТ Р 59585-2021 (ИСО/АСЪМ 52921:2013) Аддитивные технологии. Системы координат. Общие положения. М.: Российский институт стандартизации. – 2022. – 24 с.
178. Русских, И.В. Апробация методики робастного проектирования параметров наладки на операции послойной укладки расплавленной полимерной нити / И.В. Русских, А.С. Русских, Д.В. Ермилина // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – Вып. 6. – С. 230-231.
179. ГОСТ 32656-2017 (ISO 527-4:1997, ISO 527-5:2009) Композиты полимерные. Методы испытаний. Испытания на растяжение. – М.: Стандартиформ. – 2017. – 30 с.
180. ГОСТ 11262-2017 (ISO-527-2:2012) Пластмассы. Метод испытания на растяжение. – М.: Стандартиформ. – 2018. – 24 с.
181. Комаров, В.А. Проектирование силовых схем авиационных конструкций / В.А. Комаров// Актуальные проблемы авиационной науки и техники. – М.: Машиностроение, 1984. – С.114-129.
182. Komarov, V.A. Aircraft design using a variable density model [Текст] / V.A. Komarov, A.V. Boldyrev, A.S. Kuznetsov, M.Yu. Lapteva // Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An Int. Journal. – 2012. – 84/3. – P.162-171.
183. Комаров, В. А. Рациональное проектирование силовых авиационных конструкций: дисс. докт. техн. наук: защищена 27.11.1976 / Комаров Валерий Андреевич. – М., 1976. – 329 с.
184. Экспериментально-аналитическая отработка и внедрение методики проектирования и технологии изготовления высоконагруженных узлов перспективных аэрокосмических конструкций из композиционного материала, армированного короткими высокопрочными волокнами: отчет о НИР / В.А. Комаров, А.В. Болдырев [и др.]. – Самара, 2017. – 153 с.
185. Лисьих, В.В. Обзор процесса разработки проекта многоразовой ракеты-носителя / В.В. Лисьих, М.В. Щербатов // Международный научно-исследовательский журнал. – 2023. – № 1 (127). – С. 1-4.

ПРИЛОЖЕНИЕ А Функциональная модель обеспечения качества деталей и узлов аэрокосмических конструкций в условиях аддитивного производства



ПРИЛОЖЕНИЕ Б Дерево отказов процесса FDM 3D-печати деталей и узлов

