



СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА АВИАКОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ В УСЛОВИЯХ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Антипов Д.В., Загидуллин Р.С.

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия

Аннотация. С каждым годом такие известные производители авиакосмической техники, как SpaceX, Boeing, Airbus, United Launch Alliance, Rocket Lab и др., в конструкциях своих изделий наращивают количество деталей и узлов, получаемых различными технологиями аддитивного производства. Вместе с тем отечественные производители авиакосмической техники еще на этапе 3D-печати первых опытных образцов деталей и узлов столкнулись с различного рода отклонениями (дефектами, неудовлетворительными геометрическими параметрами) вплоть до разрушения конструкций на этапе испытаний и эксплуатации. Инженерно-практический опыт показал, что источники отклонений напечатанных деталей и узлов авиакосмической техники могут быть как на этапах проектирования и изготовления (предпечатной подготовки и 3D-печати), так и на последующих этапах испытания и эксплуатации. Для решения описанной проблемы возникла необходимость разработать новую структурно-функциональную модель обеспечения качества авиакосмической техники в условиях аддитивного производства, которая обеспечит выполнение сквозного развертывания требований и качества системы проектирования, изготовления, испытания и эксплуатации изделий. Авторами предложена структурно-функциональная модель обеспечения качества авиакосмической техники в условиях аддитивного производства на базе подходов робастного проектирования (QFD, FMEA, MSA, планирование экспериментов по методу Тагути), математических моделей и конструкторско-технологических подходов обеспечения качества, основанных на применении статистических методов и экспериментальных исследований, в соответствии со стандартами авиакосмической отрасли. По предварительным прогнозам, внедрение предложенной модели позволит отечественным производителям авиакосмической техники сократить количество напечатанных дефектных деталей и узлов на 40-45% и сократить сроки разработки на 20-30% за счет сквозного развертывания требований и качества.

Ключевые слова: авиакосмическая техника, аддитивное производство, качество, структурно-функциональная модель, робастное проектирование, конструкторско-технологические подходы, математическая модель

© Антипов Д.В., Загидуллин Р.С., 2025

Для цитирования

Антипов Д.В., Загидуллин Р.С. Структурно-функциональная модель обеспечения качества авиакосмической техники в условиях аддитивного производства // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №4. С. 156-167. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-156-167>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

STRUCTURAL AND FUNCTIONAL MODEL OF QUALITY ASSURANCE OF AEROSPACE ENGINEERING IN CONDITIONS OF ADDITIVE MANUFACTURING

Antipov D.V., Zagidullin R.S.

Samara National Research University, Samara, Russia

Abstract. Every year, such well-known aerospace manufacturers as SpaceX, Boeing, Airbus, United Launch Alliance, Rocket Lab and others increase the number of parts and units in their product designs obtained using various additive manufacturing technologies. At the same time, domestic manufacturers of aerospace engineering, even at the stage of 3D printing the first prototypes of parts and units, encountered various types of deviations (defects, unsatisfactory geometric parameters) up to the destruction of structures at the testing and operation stage. Engineering and practical experience has shown that sources of deviations in printed parts and units of aerospace engineering can be both at the design and manufacturing stages (pre-printing treatment and 3D printing), and at subsequent stages of testing and operation. To solve the described problem, it became necessary to develop a new structural and functional model for ensuring the quality of aerospace engineering in the context of additive manufacturing, which will ensure the implementation of end-to-end deployment of requirements and quality of the design, manufacturing, testing and operation system of products. The authors propose a structural and functional model for ensuring the quality of aerospace technology in the context of additive manufacturing based on robust design approaches (QFD, FMEA, MSA, planning of experiments using the Taguchi method), mathematical models and design and technological approaches to quality assurance based on the use of statistical methods and experimental studies in accordance with the standards of the aerospace industry. According to preliminary forecasts, the implementation of the proposed model will allow domestic manufacturers of aerospace engineering to reduce the number of printed defective parts and units by 40-45% and reduce lead time by 20-30% due to the end-to-end deployment of requirements and quality.

Keywords: aerospace engineering, additive manufacturing, quality, structural and functional model, robust design, design and technological approaches, mathematical model

For citation

Antipov D.V., Zagidullin R.S. Structural and Functional Model of Quality Assurance of Aerospace Engineering in Conditions of Additive Manufacturing. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 4, pp. 156-167. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-156-167>

Введение

Одним из перспективных направлений промышленного производства изделий авиакосмической техники являются аддитивные технологии. Аддитивные технологии по сравнению с субтрактивными технологиями изготовления обладают рядом преимуществ: возможность формирования сложной и нестандартной геометрии, возможность формирования сетчатых и ячеистых структур, исключение технологической оснастки, минимизация трудовых ресурсов и человеческого воздействия в процессе изготовления, минимизация доводочных операций и т.д. [1].

Ярким примером использования аддитивных технологий в авиакосмической отрасли являются зарубежные компании-производители изделий авиакосмической техники SpaceX, Boeing, Airbus, United Launch Alliance, Rocket Lab [2-6]. В то же время отечественные предприятия-производители изделий авиакосмической техники еще на этапе 3D-печати первых опытных образцов деталей и узлов столкнулись с различного рода отклонениями: дефектами (содержание количества дефектных деталей и узлов

может доходить до 40-50% от общего объема), неудовлетворительными геометрическими параметрами (при этом действительные геометрические отклонения могут достигать 60-80% и более от заложенных предельных отклонений на номинальный размер), разрушения на этапе наземной экспериментальной отработки (испытаний) и эксплуатации изделий.

Теоретический анализ работ [7-15] по обеспечению качества проектирования и изготовления деталей и узлов аэрокосмических конструкций в условиях аддитивного производства (АП) показал, что преобладающее большинство отечественных и зарубежных исследований в области обеспечения качества деталей и узлов в условиях аддитивного производства посвящены главным образом отдельным его этапам: проектированию, предпечатной подготовке и изготовлению, то есть не обеспечено сквозное развертывание требований и качества.

При этом инженерно-практический опыт на предприятиях авиакосмической отрасли показал, что источники отклонений могут быть как на этапах проектирования и изготовления (предпечатной подготов-

ки и 3D-печати), так и на этапах испытаний и эксплуатации изделий.

Возникла необходимость разработать структурно-функциональную модель обеспечения качества авиакосмической техники в условиях аддитивного производства, которая обеспечит выполнение сквозного развертывания требований и качества системы проектирования, изготовления (предпечатной подготовки и 3D-печати), испытаний и эксплуатации изделий. При этом важно отметить, модель обеспечения качества авиакосмической техники в условиях АП должна быть разработана в соответствии со стандартами авиакосмической отрасли, регламентирующими разработку, изготовление, испытания и эксплуатацию изделий авиакосмической техники.

Материалы и методы исследования

Структурно-функциональная модель обеспечения качества авиакосмической техники в условиях АП разработана на основе процессного и риск-ориентированного подходов в соответствии с ГОСТ Р ИСО 9001-2015 [16]. Процессный подход – применение для управления деятельностью и ресурсами организации системы взаимосвязанных процессов [17].

Этапы разработки и изготовления авиакосмической техники в разработанной модели соответствуют ГОСТ 2.103-2013 [18]. Разработанная структурно-функциональная модель обеспечения качества включает в себя стандарты авиакосмической отрасли, методы робастного проектирования, математические модели и методические рекомендации на основе конструкторско-технологических способов обеспечения качества авиакосмической техники в условиях АП.

Анализ стандартов авиакосмической отрасли авторами произведен в информационно-поисковой системе поиска, хранения и использования нормативно-технических документов «NormaCS» [19].

Методы робастного проектирования для разработки модели обеспечения качества включают в себя развертывание (структурирование) функции качества (Quality Function Deployment, QFD), анализ видов и последствий потенциальных несоответствий (Failure Mode and Effects Analysis, FMEA), метод анализа измерительных систем (Measurement system analysis, MSA), планирование экспериментов по методу Тагути [20].

Подробное описание применения методов QFD, FMEA, MSA представлено в работах [20-22].

Подробное описание применения планирования экспериментов по методу Тагути представлено в ГОСТ Р ИСО 16336-2020 [23].

Конструкторско-технологическими подходами обеспечения качества в настоящей работе являются подходы, основанные на применении экспериментальных исследований и математико-статистических подходах обеспечения качества. Примером такого подхода является работа [24], где для повышения качества FDM 3D-печати проведено нивелирование

вариабельности диаметра прутка филамента. Подход в работе [24] основан на экспериментальном поиске технологических параметров FDM-печати с последующими испытаниями на прочность при растяжении и математико-статистической обработкой результатов испытаний.

Математические (цифровые) модели служат для контроля и оптимизации аддитивных технологических процессов (АТП) [25]. Так, например, в работе [26] представлена модель подачи филамента в процессе послойного синтеза. Такая модель позволяет оптимизировать параметры печати, улучшить качество и точность 3D-печати, а также сократить время печати. В работе [27] представлено моделирование механического поведения стохастически армированных композиционных материалов аддитивного производства. Моделирование позволило понять взаимосвязь между микроструктурой материалов и их макроскопическими свойствами, предоставило данные для оптимизации производственных процессов [27].

Графическое представление структурно-функциональной модели построено в векторном графическом редакторе диаграмм и блок-схем Microsoft Visio.

Полученные результаты и их обсуждение

На основе процессного и риск-ориентированного подходов в соответствии с ГОСТ Р ИСО 9001-2015 и ГОСТ 2.103-2013 разработана структурно-функциональная модель обеспечения качества авиакосмической техники в условиях аддитивного производства (рис. 1).

На первом этапе производят анализ требований к изделию авиакосмической техники, изложенных в техническом задании (ТЗ) и техническом предложении (ТП): функциональное назначение, свойства изделия, условия эксплуатации, показатели надежности, массогабаритные характеристики, объем выпуска и т.д. На основе результатов анализа принимают решение о целесообразности применения аддитивных технологий (АТ) для изготовления изделия. Рекомендуется за основу принятия указанного решения применять алгоритм на основе схемы, представленный в ГОСТ Р 59037-2020 [1].

Далее проводится анализ:

- 1) требований к изделиям, получаемым методом АТП;
- 2) требований к материалам, используемым в АП;
- 3) требований к оборудованию для АТП;
- 4) требований к квалификации персонала.

Основные и дополнительные требования к изделиям, получаемым методом АТП, указаны в ГОСТ 57586 – 2017 [28]. Однако следует отметить, что необходимо провести дополнительный анализ специальных требований к изделиям авиакосмической техники: радиационная стойкость, стойкость к электрофизическим воздействиям космического пространства, стойкость к воздействию статического электричества, стойкость к термоциклированию и т.д.

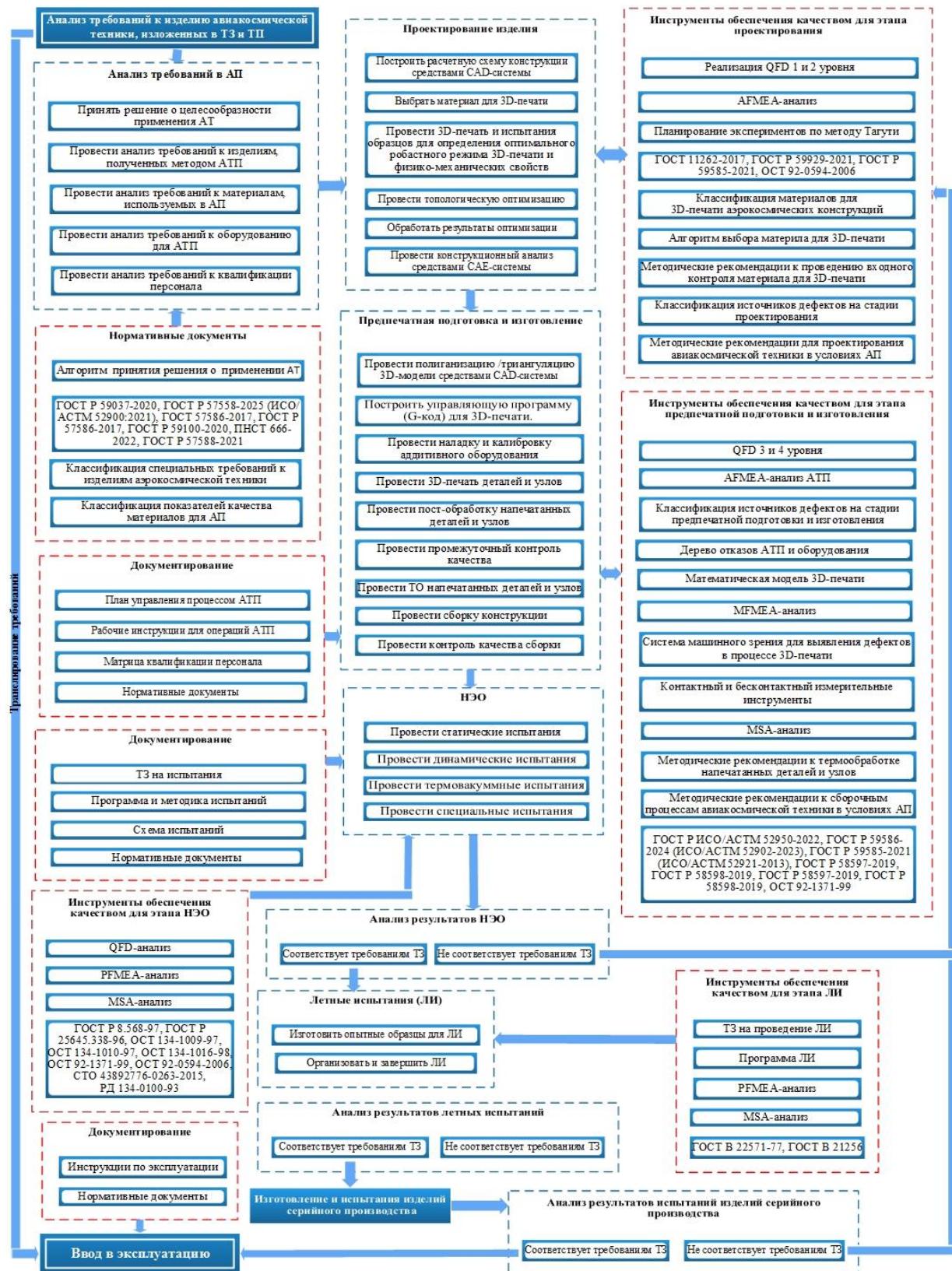


Рис. 1. Структурно-функциональная модель обеспечения качества авиакосмической техники в условиях аддитивного производства

Fig. 1. Structural and functional model of quality assurance of aerospace engineering in the conditions of additive manufacturing

После принятия положительного решения о применении методов АТП для изготовления авиакосмической техники и анализа требований в АП производят проектирование изделия.

На этапе проектирования изделия после реализации QFD 1-го и 2-го уровней и построения средствами CAD-системы расчетной схемы конструкции производят планирование экспериментов по методу Тагути для получения оптимального технологического режима печати по критерию прочности при растяжении, сжатии, изгибе и т.д. (в зависимости от условий эксплуатации изделия).

На рис. 2 продемонстрирована матрица дома качества QFD 1-го уровня для разработки соединительного узла (СУ) датчико-преобразующей аппаратуры межбакового отсека ракеты-носителя в условиях АП.

материал конструкции, тип конструкции СУ (оптимизированная или традиционная).

На рис. 3 продемонстрирована матрица дома качества QFD 2-го уровня для разработки СУ датчико-преобразующей аппаратуры межбакового отсека ракеты-носителя в условиях АП.

Для реализации (воплощения) характеристик качества СУ (QFD 1-го уровня) идентифицированы наиболее важные характеристики составных частей СУ в результате проведения QFD 2-го уровня: оптимизированная конструкция кронштейна СУ и применение полимерного композиционного материала (ПКМ) для изготовления кронштейна и скобы (рис. 3).

Выбор материала необходимо проводить исходя из классификации материалов для 3D-печати авиакосмических конструкций [29].

Проектирование необходимо проводить согласно методическим рекомендациям к проектированию изделий авиакосмической техники в условиях АП в соответствии с технологическими требованиями 3D-печати: минимальная толщина стенки, угол свеса элементов конструкции и т.д.

Для анализа рисков и потенциальных несоответствий конструкции авиакосмической техники в условиях АП рекомендовано применять AFMEA-анализ (Additive Failure Mode and Effects Analysis) – усовершенствованная методика анализа видов и последствий потенциальных несоответствий процесса 3D-печати [30].

AFMEA-анализ позволяет проводить анализ трех взаимосвязанных последовательных этапов: этап проектирования, этап предпечатной подготовки и этап 3D-печати. Кроме того, на этапе предпечатной подготовки введен новый элемент функционирования этапа процесса – структура 3D-модели, которая позволяет учитывать причины появления несоответствий построения «архитектуры» деталей и узлов в условиях аддитивного производства. AFMEA-анализ рекомендовано производить на основе классификации дефектов на стадии проектирования в условиях АП. Проведение AFMEA-анализа продемонстрировано в работе [30].

На рис. 4 продемонстрирован фрагмент протокола AFMEA-анализа для конструкции СУ из ПКМ для монтажа датчика давления в межбаковом отсеке ракеты-носителя в условиях АП.

На третьем этапе производят предпечатную подготовку и изготовление конструкции изделия авиакосмической техники. Предпечатная подготовка заключается в полиганизации 3D-модели конструкции изделия средствами CAD-системы, процессе разбиения модели на слои (слайсинге), наладке и калибровке аддитивного оборудования.

Перед проведением полигонизации и слайсинга 3D-модели конструкции производят QFD-анализ 3-го и 4-го уровней.

Row #	Max Relationship Value in Row	Relative Weight	Weight / Importance	Demanded Quality (a.k.a. "Customer Requirements" or "Whats")	Column #			
					1	2	3	4
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

Рис. 2. Матрица дома качества QFD 1-го уровня
Fig. 2. QFD Level 1 House of Quality Matrix

В результате проведения QFD 1-го уровня (см. рис. 2) выявлены наиболее важные характеристики конструкции СУ, в наибольшей степени влияющие на прочность и жесткость конструкции, а также на выполнение других требований технического задания:

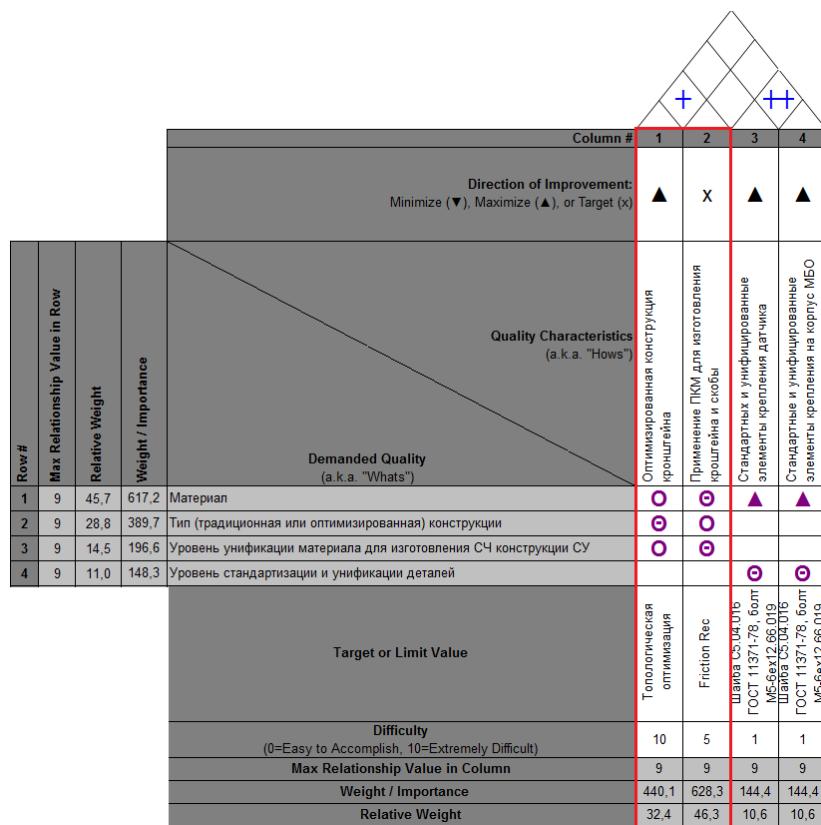


Рис. 3. Матрица дома качества QFD 2-го уровня
Fig. 3. QFD Level 2 House of Quality Matrix

Протокол AFMEA (Additive Failure Mode and Effects Analysis)					
Протокол анализа видов и потенциальных несоответствий 3D-печати					
Планирование и подготовка (Стадия 1)					
Название организации	Самарский университет				
Инженерная площадка	Кафедра ПЛА и УКМ				
Потребитель	Отдел эксплуатации РКН				
Изделие	РН СК серии "Союз"				
Объект	Соединительный узел для монтажа датчика				
Структурный анализ (Стадия 2)					
№	Постоянное улучшение	1. Процесс создания детали, узла или изделия в условиях аддитивного производства	2. Этап процесса	3. Элемент функционирования этапа процесса (персонал, оборудование, структура 3D-модели, фильтр, окружающая среда)	
1	История изменений, если приемлемо	
2	Проектирование и изготовление соединительного узла для монтажа датчика давления в МБО РН серии "Союз" в условиях аддитивного производства	Предпечатная подготовка 3D-модели соединительного узла для монтажа датчика давления в программе-слайсере		1. Специалист по аддитивным технологиям (технолог по 3D-печати) 2. Оборудование: графическая станция 3. Программа-слайсер: UltiMaker CURA 5.2.1 4. Структура (строение) объекта 3D-печати 5. Окружающая среда: температура помещения, влажность, освещение и т.д.	

Рис. 4. Фрагмент протокола AFMEA-анализа для конструкции соединительного узла из полимерного композиционного материала

Fig. 4 Fragment of the AFMEA analysis protocol for the construction of a connecting unit made of a polymer composite material

На рис. 5 продемонстрирована матрица дома качества QFD 3-го уровня для изготовления СУ датчико-преобразующей аппаратуры межбакового отсека ракеты-носителя в АП.

Для реализации изготовления оптимизированной конструкции кронштейна соединительного узла из ПКМ применяют АТП, в частности FDM 3D-печать (см. рис. 4).

Row #	Max Relationship Value in Row	Relative Weight	Weight / Importance	Column #	1	2
Direction of Improvement: Minimize (▼), Maximize (▲), or Target (x)						
					▲	
Quality Characteristics (a.k.a. "Hows")						
Demanded Quality (a.k.a. "Whats")						
1	9	32,4	440,1	FDM 3D-печать		
2	9	46,3	628,3	Традиционное производство		
3	9	10,6	144,4			
4	9	10,6	144,4			
Target or Limit Value						
Difficulty (0=Easy to Accomplish, 10=Extremely Difficult)						
Max Relationship Value in Column						
Weight / Importance						
Relative Weight						

Рис. 5. Матрица дома качества QFD 3-го уровня
Fig. 5. QFD Level 3 House of Quality Matrix

На рис. 6 продемонстрирована матрица дома качества QFD 4-го уровня изготовления СУ датчико-преобразующей аппаратуры межбакового отсека ракеты-носителя в условиях АП.

Для слайсинга 3D-модели используют технологические параметры 3D-печати, выявленные в процессе проведения планирования экспериментов по методу Тагути на втором этапе.

После проведения слайсинга проводят AFMEA-анализ этапа предпечатной подготовки [30]. AFMEA-анализ этапа предпечатной подготовки рекомендуется проводить на основе классификации источников дефектов на стадии предпечатной подготовки и результатов анализа дерева отказов АТП [31].

Для проверки разработанной управляющей программы (результатов слайсинга) проводят математическое моделирование процесса 3D-печати [25-27].

При наладке и калибровке аддитивного оборудования следует учитывать результаты анализа дерева отказов аддитивного оборудования и анализа видов и последствий потенциальных несоответствий оборудования (Machinery Failure Mode Effects and Analysis, MFMEA) [32].

Изготовление конструкции состоит из следующих процессов:

- 3D-печати конструкции изделия;
- пост-обработки напечатанной конструкции;
- промежуточного контроля качества;
- термической обработки (TO) напечатанной конструкции;
- сборочного процесса (в случае 3D-печати конструкции из двух и более составных частей);
- контроля качества сборки конструкции.

Row #	Max Relationship Value in Row	Relative Weight	Weight / Importance	Column #	1	2	3	4	5
Direction of Improvement: Minimize (▼), Maximize (▲), or Target (x)									
					▲	▲	▲	▲	x
Quality Characteristics (a.k.a. "Hows")									
Demanded Quality (a.k.a. "Whats")									
1	9	78,7	708,5	FDM 3D-печать					
2	1	21,3	191,5	Традиционное производство					
Target or Limit Value									
Difficulty (0=Easy to Accomplish, 10=Extremely Difficult)									
Max Relationship Value in Column									
Weight / Importance									
Relative Weight									

Рис. 6. Матрица дома качества QFD 4-го уровня
Fig. 6. QFD Level 4 House of Quality Matrix

Для выявления дефектов в процессе 3D-печати используют систему компьютерного зрения [33]. Для контроля качества напечатанной конструкции используют контактные (например, цифровой штангенциркуль) и бесконтактные (3D-сканер) измерительные средства измерений. Для повышения качества проведения процесса измерения проводят MSA-анализ.

Процессы ТО и сборки напечатанной конструкции необходимо проводить согласно методическим рекомендациям к ТО и сборке изделий авиакосмической техники в условиях АП на основе экспериментальных исследований и математико-статистических подходов обеспечения качества.

На четвертом этапе проводят наземную экспериментальную отработку (НЭО) напечатанной конструкции изделия авиакосмической техники, которая включает в себя следующие виды испытания:

- 1) статические/зачетные статические испытания;
- 2) динамические/зачетные динамические испытания;
- 3) термовакуумные испытания;
- 4) специальные испытания (испытания на раскрытие, отстыковку и т.д.).

В зависимости от вида изделия авиакосмической техники (космический аппарат, ракета-носитель и т.д.) перечень испытаний может быть дополнен.

Для повышения качества проведения НЭО напечатанной конструкции авиакосмической техники проводят QFD-, FMEA- и MSA-анализы процессов испытаний изделия. После положительных результатов проведения НЭО (в случае отрицательных результатов проводят повторный AFMEA-анализ и доработку конструкции) изготавливают образцы конструкции авиакосмической техники для летных испытаний (ЛИ) на основе программы ЛИ в соответствии ТЗ. Перед проведением ЛИ проводят анализ рисков и потенциальных несоответствий процесса проведения ЛИ (PFMEA-анализ).

После положительных результатов проведения ЛИ (в случае отрицательных результатов проводят повторный AFMEA-анализ и доработку конструкции) проводят изготовление и испытания серийных изделий авиакосмической техники и ввод в эксплуатацию. Эксплуатацию серийных изделий авиакосмической техники проводят в соответствии с инструкциями по эксплуатации, учитывающими особенности изготовления АП. На протяжении всего срока этапа эксплуатации серийных изделий авиакосмической техники производят постоянное совершенствование конструкции на основе FMEA-анализа.

Как видно из **рис. 1**, на каждом этапе разработанной модели обеспечения качества учтены стандарты авиакосмической отрасли и АП.

В работе [34] для контроля и повышения качества 3D-печати разработан и рассмотрен усовершенствованный метод «Шесть сигм» для АП. Авторы работы [35] предложили комплексный подход к обеспечению

качества АП на основе интеграции компьютерной томографии с метрологическим программным обеспечением GOM. В работе [36] рассмотрена концепция виртуального обеспечения качества деталей при АП на основе цифрового двойника. Автором работы [37] разработана и предложена методика обеспечения качества АП на основе применения статистических методов регулирования потока процесса и алгоритма выбора материала для 3D-печати.

В настоящей работе, в отличие от вышеперечисленных работ [34-37], обеспечение качества авиакосмической техники в условиях АП предложено производить в рамках модели обеспечения качеством, которая включает в себя стандарты авиакосмической отрасли, методы робастного проектирования (QFD, FMEA, MSA, планирование экспериментов по методу Тагути), математические модели и методические рекомендации на основе конструкторско-технологических способов обеспечения качества авиакосмической техники в условиях АП.

Заключение

Таким образом, разработана структурно-функциональную модель обеспечения качества авиакосмической техники в условиях АП на основе процессного и риск-ориентированного подходов, которая включает в себя стандарты авиакосмической отрасли, методы робастного проектирования, математические модели и методические рекомендации на основе конструкторско-технологических способов обеспечения качества авиакосмической техники в условиях АП.

Предварительная оценка результатов апробации предложенной модели на предприятии-производителе авиационно-космической техники Самарской области показала, что внедрение модели позволит отечественным производителям авиакосмической техники сократить количество напечатанных дефектных деталей и узлов на 40-45% и сократить сроки разработки на 20-30% за счет сквозного развертывания требований и качества.

Дальнейшие исследования направлены на математическое описание и моделирование процессов разработанной структурно-функциональной модели обеспечения качества авиакосмической техники в условиях АП.

Список источников

1. ГОСТ Р 59037-2020. Аддитивные технологии. Конструирование металлических изделий. Руководящие принципы. М.: Стандартинформ, 2020. 11 с.
2. Additive manufacturing of structural materials / L. Guo, Z. Xiaofeng, C. Xuliang and others // Materials Science and Engineering: Reports. 2021, vol. 145, 67 p. doi: [https://doi.org/10.1016/j.mser.2020.100596/](https://doi.org/10.1016/j.mser.2020.100596).
3. Malfitano B. Evaluation and implementation of additive manufacturing technologies for structural applications // Proceedings of the International Committee on Aeronautical Fatigue (ICAF2017) and Structural Integrity 36th Conference & 29th Symposium. 2017. C.1154-1155.

4. Евтодьева М.Г. Аддитивное производство и дополненная реальность как новые производственные технологии в авиационной отрасли // Вестник МГИМО-Университета. 2020. № 13(5). С. 307-330.
5. Кулик В.И., Нилов А.С. Аддитивные технологии в производстве изделий авиационной и ракетно-космической техники: учеб. пособие. СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2018. 160 с.
6. Sung W., Sivagaminathan B., Stupple D. Composites Additive Manufacturing for Space Applications: A Review. Materials. 2022, vol. 15(13), 4709. DOI: 10.3390/ma15134709.
7. Optimization of FDM process parameters for tensile properties of polylactic acid specimens using Taguchi design of experiment method / Heidari-Rarani M., Ezati N., Sadeghi P., Badrossamay M. // Journal of Thermoplastic Composite Materials. 2022, vol. 5(12), pp. 2435-2452. DOI:10.1177/0892705720964560.
8. Kam M., Ipekci A., Sengul O. Investigation of the effect of FDM process parameters on mechanical properties of 3D printed PA12 samples using Taguchi method // Journal of Thermoplastic Composite Materials. 2021, vol. 36, issue 1, pp. 307-325. DOI:10.1177/08927057211006459.
9. Vishal W., Darshit J., Akhshata J., Experimental investigation of FDM process parameters using Taguchi analysis / C. Rakesh // Materials Today: Proceedings. 2020, vol. 27, part 3, pp. 2117-2120. DOI: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.09.078.
10. Buranska E., Meszaros D. Risk analysis of the 3D printer // Proceedings of 10th International Conference, Bratislava. 2020, pp. 35-42
11. Andreasson J., Fredriksson J. The construction of a shredder for discarded PLA: A machine construction // Independent thesis, Malardalen University, School of Innovation, Design and Engineering. 2022. Access at: <https://www.divaportal.org/smash/record.jsf?dswid=1977&pid=diva2%3A1636704> (Accessed October 10, 2025).
12. Study of the Technical Feasibility and Design of a Mini Head Screw Extruder Applied to Filament Deposition in Desktop 3-D Printer / Zilda C.S., Matheus S.F., Paulo I.N., Jorge S. // Key Engineering Materials. 2014, vol. 572, pp. 151-154. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.572.151.
13. Efrain Rodriguez E., Alvares A., Jaimes C. Conceptual design and dimensional optimization of the linear delta robot with single legs for additive manufacturing // 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.
14. Developing an open source, inexpensive, large-scale polar configuration 3D printer / Deshpande S.P., Kulkarni S., Shah S., Irwin J. // International journal of engineering research and innovation. 2019, vol. 11, no. 1, pp. 13-22.
15. Patel P.K. Overview of 3D-printing Technology: History, Types, Applications and Materials // Additive Manufacturing with Medical Applications. 2022, pp. 243-264.
16. ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования. М.: Стандартинформ, 2015. 32 с.
17. Управление процессами системы менеджмента качества на предприятиях машиностроения: учеб. пособие / В.А. Барвинок, Ю.С. Ключков, В.П. Самохвалов и др.; под общ. ред. чл.-кор. РАН, д-ра техн. наук, проф. В.А. Барвинка. Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2012. 380 с.
18. ГОСТ 2.103-2013. Единая система конструкторской документации. Стадии разработки. М.: Стандартинформ, 2019. 10 с.
19. Каталог документов NormaCS. URL: <https://www.normacs.ru/Doclist> (дата обращения: 07.05.2025).
20. Дмитриев А.Я., Ващуков Ю.А., Митрошкина Т.А. Робастное проектирование и технологическая подготовка производства изделий авиационной техники: учеб. пособие. Самара: Изд-во СГАУ, 2016. 76 с.
21. Dmitriev A., Mitroshkina T. Improving the efficiency of aviation products design based on international standards and robust approaches // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019, vol. 476, 012009. DOI: 10.1088/1757-899X/476/1/012009.
22. Dmitriev A., Mitroshkina T., Rogachev G. Structural and parametric analysis of robust design quality of complex technical systems // ITM WEB OF CONFERENCES. 2017, vol. 10, 01001. DOI: 10.1051/itmconf/20171001001.
23. ГОСТ Р ИСО 16336-2020. Статистические методы. Применение к новым технологиям и процессу разработки продукции. Робастное параметрическое проектирование (RPD). М.: Стандартинформ, 2020. 70 с.
24. Загидуллин Р.С., Жуков В.Д., Родионов Н.В. Экспериментальное исследование и способ повышения качества FDM 3D-печати за счет нивелирования вариабельности диаметра прутка филамента // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. Вып. 5. С. 265-271.
25. Чабаненко А.В. Обеспечение качества аддитивного производства посредством моделирования процессов печати // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 4. С. 33-39.
26. Чабаненко А.В. Модель подачи полимера в процессе послойного синтеза // XXVI Международная научная конференция «Волновая электроника и инфокоммуникационные системы»: сб. ст. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, 2023. Т. 3. С. 198-202.
27. Чабаненко А.В. Моделирование механического поведения стохастически армированных композиционных материалов аддитивного производства // Всероссийская научная конференция «Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем»: сб. докл. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, 2024. С. 226-230.
28. ГОСТ Р 57586 – 2017. Изделия, полученные методом аддитивных технологических процессов. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2019. 8 с.
29. Антипов Д.В., Загидуллин Р.С. Разработка классификации полимерных и композиционных материалов для изготовления авиакосмической техники в условиях аддитивного производства // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2025. Т. 27. № 1 (123). С. 12-23.
30. Загидуллин Р.С. Совершенствование модели обеспечения качества проектирования и изготовления деталей и узлов аэрокосмических конструкций из полимерных композиционных материалов в условиях аддитивного производства: дис. ... канд. техн. наук. Самара, 2023. 174 с.

31. Zagidullin R.S., Zezin N.I., Rodionov N.V. Improving the quality of FDM 3D printing of UAV and aircraft parts and assemblies by parametric software changes // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2021, vol. 1027, 012031. DOI:10.1088/1757-899X/1027/1/012031.
32. Zagidullin R.S., Antipov D.V., Dmitriev A.Ya. and others Development of a methodology for eliminating failures of an FDM 3D printer using a “failure tree” and FMEA analysis // Journal of Physics: Conference Series. 2021, vol. 1925, 012085. DOI: 10.1088/1742-6596/1925/1/012085.
33. Чабаненко А.В. Автоматическое распознавание дефектов с использованием компьютерного зрения // XXVI Международная научная конференция «Волновая электроника и инфокоммуникационные системы»: сб. ст. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, 2023. Т. 3. С. 314-317.
34. Six-Sigma Quality Management of Additive Manufacturing / H. Yang, R. Prahalad, S. Timothy and others // Proceedings of the IEEE. 2021, vol. 109, no. 4, pp. 347-376. DOI: 10.1109/JPROC.2020.3034519.
35. Advanced Quality Assurance of Additive Manufacturing Through Computed Tomography / M. Jałowiec, E. Walcher, O. Bodur // Industrial Engineering in the Industry 4.0 Era. ISPR 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2024, 176-199. DOI: 10.1007/978-3-031-53991-6_14.
36. Хомяков Н.В. Концепция виртуального контроля качества деталей при аддитивном производстве на основе цифрового двойника // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. № 2. С. 163-169. doi: 10.18503/1995-2732-2024-22-2-163-169.
37. Чабаненко А.В. Модели и методики обеспечения качества корпусных элементов, выполненных по аддитивным технологиям: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2019. 18 с.
6. Paek S. W., Balasubramanian S. and Stupple D. Composites additive manufacturing for space applications: A review. Materials. 2022;15(13):4709. DOI: 10.3390/ma15134709.
7. Heidari-Rarani M., Ezati N., Sadeghi P., Badrossamay M. Optimization of FDM process parameters for tensile properties of polylactic acid specimens using Taguchi design of experiment method. Journal of Thermoplastic Composite Materials. 2022;5(12):2435-2452. DOI: 10.1177/0892705720964560.
8. Kam M., Ipekci A., Sengul O. Investigation of the effect of FDM process parameters on mechanical properties of 3D printed PA12 samples using Taguchi method. Journal of Thermoplastic Composite Materials. 2021;36(1):307-325. DOI: 10.1177/08927057211006459.
9. Vishal W., Darshit J., Akshata J., Rakesh C. Experimental investigation of FDM process parameters using Taguchi analysis. Materials Today: Proceedings. 2020;27(3):2117-2120. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.09.078>.
10. Buranska E., Meszaros D. Risk analysis of the 3D printer. Proceedings of 10th International Conference, Bratislava. 2020;35-42.
11. Andreasson J., Fredriksson J. The construction of a shredder for discarded PLA: A machine construction. Independent thesis, Malardalen University, School of Innovation, Design and Engineering. 2022. Available at: <https://www.divaportal.org/smash/record.jsf?dsid=1977&pid=diva2%3A1636704> (Accessed October 10, 2025).
12. Zilda C.S., Matheus S.F., Paulo I.N., Jorge S. Study of the Technical Feasibility and Design of a Mini Head Screw Extruder Applied to Filament Deposition in Desktop 3-D Printer. Key Engineering Materials. 2014;572:151-154. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.572.151.
13. Efrain Rodriguez E., Alvares A., Jaimes C. Conceptual design and dimensional optimization of the linear delta robot with single legs for additive manufacturing. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering. 2019;233(7):443-450. DOI: 10.1177/0015732515680408.
14. Deshpande S.P., Kulkarni S., Shah S., Irwin J. Developing an open source, inexpensive, large-scale polar configuration 3D printer. International journal of engineering research and innovation. 2019;11(1):13-22.
15. Patel P.K. Overview of 3D-printing Technology: History, Types, Applications and Materials. Additive Manufacturing with Medical Applications. 2022;243-264.
16. State standard GOST R ISO 9001-2015. Quality management system. Requirements. Moscow: Standards Publishing House, 2015, 32 p. (In Russ.)
17. Barvinok V.A., Klochkov Yu.S., Samokhvalov V.P. et al. Управление процессами системы менеджмента качества на предприятиях машиностроения: учебное пособие [Management of processes of quality management system at the enterprises of mechanical engineering: study guide]; edited by general editor Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor V.A. Barvinok. Samara: Publishing house of the Samara scientific center of the Russian Academy of Sciences, 2012, 380 p. (In Russ.)
18. State standard GOST 2.103-2013. Unified system of design documentation. Development stages. Moscow: Standards Publishing House, 2019, 10 p. (In Russ.)

References

1. State standard GOST R 59037-2020 Additive technologies. Designing metal parts. Guidelines processes. Moscow: Standards Publishing House, 2020, 11 p. (In Russ.)
2. Guo Liu, Xiaofeng Zhang, Xuliang Chen, Yunhu He, Lizi Cheng, Mengke Huo, Jianan Yin, Fengqian Hao, Siyao Chen, Peiyu Wang Additive manufacturing of structural materials. Materials Science and Engineering: R: Reports. 2021;145:67. DOI: 10.1016/j.mser.2020.100596.
3. Malfitano B. Evaluation and implementation of additive manufacturing technologies for structural applications. Proceedings of the International Committee on Aeronautical Fatigue (ICAF2017) and Structural Integrity 36th Conference & 29th Symposium, June 5th-9th. 2017;1154-1155.
4. Evtodyeva M.G. Additive production and augmented reality as new production technologies in the airline industry. Vestnik MGIMO-UNIVERSITETA [MGIMO Review of International Relations]. 2020;13(5):307-330 (In Russ.)
5. Kulik V.I., Nilov A.S. Additivnye tekhnologii v proizvodstve izdeliy aviatzionnoy i raketno-kosmicheskoy tekhniki: uchebnoe posobie [Additive technologies in production of products of aviation and the missile and space equipment: study guide]. St. Petersburg: Baltic State Technical University, 2018, 160 p. (In Russ.)

19. NormaCS Document Catalog. Available at: <https://www.normacs.ru/Doclist> (Accessed May 7, 2025).
20. Dmitriev A.Ya., Vashukov Yu.A., Mitroshkina T.A. *Robastnoe proektirovanie i tekhnologicheskaya podgotovka proizvodstva izdeliy aviatcionnoy tekhniki: uchebnoe posobie* [Robust design and technological preparation of production of aviation equipment: study guide]. Samara: SSAU Publishing House, 2016, 76 p. (In Russ)
21. Dmitriev A., Mitroshkina T. Improving the efficiency of aviation products design based on international standards and robust approaches. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019;476:012009. DOI: 10.1088/1757-899X/476/1/012009.
22. Dmitriev A., Mitroshkina T., Rogachev G. Structural and parametric analysis of robust design quality of complex technical systems. ITM WEB OF CONFERENCES. 2017;10:01001. DOI: 10.1051/itmconf/20171001001.
23. State standard GOST R ISO 16336-2020. Statistical Methods. Application to New Technologies and Product Development Process. Robust Parametric Design (RPD). Moscow: Standards Publishing House, 2020, 70 p. (In Russ.)
24. Zagidullin R.S., Zhukov V.D., Rodionov N.V. Experimental study and method for improving the quality of FDM 3D printing by leveling the variability of the filament rod diameter. *Izvestiya Tulsogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Tula State University. Technical sciences]. 2023;5:265-271. (In Russ.)
25. Chabanenko A.V. Quality assurance of additive production by means of modeling of processes of the press. *Izvestiya Tulsogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Tula State University. Technical sciences]. 2025;4:33-39. (In Russ.)
26. Chabanenko A.V. Model of supply of polymer in the course of layer-by-layer synthesis. *XXVI Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya «Volnovaya elektronika i infokommunikatsionnye sistemy»: sbornik statey* [XXVI International scientific conference "Wave Electronics and Information and communication Systems": collection of articles]. Publishing house: St. Petersburg State University of space instrument making. 2023;3:198-202. (In Russ.)
27. Chabanenko A.V. Modeling of mechanical behavior stochastically reinforced composition materials of additive production. *Vserossiiskaya nauchnaya konferentsiya «Modelirovaniye i situatsionnoe upravlenie kachestvom slozhnykh sistem»: sb. dokl.* [All-Russian scientific conference "Modelling and Situational Quality Management of Complex Systems": collection of articles]. Publishing house: St. Petersburg State University of space instrument making. 2024;226-230. (In Russ.)
28. State standard GOST R 57586 – 2017. The products received by method of additive technology processes. General requirements. Moscow: Standartinform, 2019, 8 p. (In Russ.)
29. Antipov D.V., Zagidullin R. S. Development of classification of polymeric and composition materials for production of aerospace equipment in the conditions of additive production. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoy akademii nauk* [News of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2025;27(1(123)):12-23. (In Russ.)
30. Zagidullin R.S. Sovershenstvovanie modeli obespecheniya kachestva proektirovaniya i izgotovleniya detaley i uzlov aero-kosmicheskikh konstruktsiy iz polimernykh kompozitsionnykh materialov v usloviyakh additivnogo proizvodstva: dis. na soiskanie uchenoy stepeni kand. tekhn. nauk [Improvement of model of quality assurance of design and production of parts and nodes of space designs from polymeric composition materials in the conditions of additive production: Ph.D. dissertation]. Samara, 2023. 174 p.
31. Zagidullin R.S., Zezin N.I., Rodionov N.V. Improving the quality of FDM 3D printing of UAV and aircraft parts and assemblies by parametric software changes. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2021;1027:012031. DOI: 10.1088/1757-899X/1027/1/012031.
32. Zagidullin R.S., Antipov D.V., Dmitriev A.Ya. Development of a methodology for eliminating failures of an FDM 3D printer using a "failure tree" and FMEA analysis. Journal of Physics: Conference Series. 2021;1925:012085. DOI: 10.1088/1742-6596/1925/1/012085.
33. Chabanenko A.V. Automatic recognition of defects with use of computer sight. *XXVI Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya «Volnovaya elektronika i infokommunikatsionnye sistemy»: sbornik statey* [XXVI International scientific conference "Wave Electronics and Information and communication Systems": collection of articles]. Publishing house: St. Petersburg State University of space instrument making. 2023;3:314-317. (In Russ.)
34. Yang H., Rao P., Simpson T., Lu Y., Witherell P., Nassar A.R., Reutzel E., Kumara S. Six-Sigma Quality Management of Additive Manufacturing. Proceedings of the IEEE. 2021;109(4):347-376. DOI: 10.1109/JPROC.2020.3034519.
35. Jajlowiec M., Walcher E., Bodur O., Gunther P., Martin K., Bayrakcil M. Advanced Quality Assurance of Additive Manufacturing Through Computed Tomography. Industrial Engineering in the Industry 4.0 Era (ISPR 2023). 2024;179-199. DOI: 10.1007/978-3-031-53991-6_14.
36. Homyakov N.V. The concept of virtual quality control of parts by additive production on the basis of the digital twin. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024;22(2):163-169. DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-2-163-169. (In Russ.)
37. Chabanenko A.V. Modeli i metodiki obespecheniya kachestva korpusnykh ehlementov, vypolnennykh po additivnym tekhnologiyam: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Models and techniques of quality assurance of the case elements executed on additive technologies: Extended abstract of Ph.D. dissertation]. Saint Petersburg, 2019, 18 p.

Поступила 24.06.2025; принята к публикации 20.10.2025; опубликована 25.12.2025
Submitted 24/06/2025; revised 20/10/2025; published 25/12/2025

Антипов Дмитрий Вячеславович – доктор технических наук, профессор,
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия.
Email: antipov.dv@ssau.ru. ORCID 0000-0002-1497-3394

Загидуллин Радмир Салимьянович – кандидат технических наук, старший преподаватель,
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия.
Email: Zagidullin_Radmir@mail.ru. ORCID 0000-0002-3175-8573

Dmitry I. Antipov – DrSc (Eng.), Professor,
Samara National Research University, Samara, Russia.
Email: antipov.dv@ssau.ru. ORCID 0000-0002-1497-3394

Radmir S. Zagidullin – PhD(Eng.), Senior Lecturer,
Samara National Research University, Samara, Russia.
Email: Zagidullin_Radmir@mail.ru. ORCID 0000-0002-3175-8573