

В диссертационный совет 24.2.379.05,  
созданный на базе ФГАОУ ВО  
«Самарский национальный исследовательский  
университет имени академика С.П. Королева»

## **ОТЗЫВ**

### **официального оппонента**

доктора технических наук, доцента Панюкова Дмитрия Ивановича  
на диссертационную работу Загидуллина Радмира Салимьяновича  
«Совершенствование модели обеспечения качества проектирования и  
изготовления деталей и узлов аэрокосмических конструкций из полимерных  
композиционных материалов в условиях аддитивного производства»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 2.5.22. Управление качеством продукции. Стандартизация.  
Организация производства

### **Актуальность темы диссертации**

Аддитивные технологии представляют возможность конструкторам авиакосмической отрасли оптимизировать конструкцию деталей и узлов изделий авиакосмической техники и значительно снизить их массу.

Разработка новых материалов (филаментов) для 3D-печати, в частности, полимерных материалов, упрочненных стекло- и углеволокном, металлическими порошками, ускорили внедрение аддитивных технологий в аэрокосмическую отрасль.

Однако, следует заметить, что на зарубежных предприятиях-изготовителях изделий авиакосмической техники, прежде всего на предприятиях США и ЕС, аддитивные технологии находят более широкое применение, чем на отечественных. Во многом это связано с отсутствием методик обеспечения качеством системы проектирования и изготовления деталей и узлов изделий авиакосмической техники в условиях аддитивного производства.

Таким образом, тема диссертационной работы Загидуллина Радмира Салимьяновича, направленная на решение задачи повышения качества деталей и узлов аэрокосмических конструкций из полимерных композиционных

Входящий №	206-9145
Дата	27 НОЯ 2023
Самарский университет	

материалов, выполненных с применением аддитивных технологий, путем разработки модели и методик обеспечения качества системы проектирования, предпечатной подготовки и 3D-печати деталей и узлов, является значимой и актуальной.

### **Научная новизна полученных результатов**

Новизна проведенных исследований и полученных результатов заключается в следующем:

1. Разработана функциональная модель обеспечения качества, основанная на применении робастных методах: метода развертывания функции качества (QFD), анализа видов и последствий потенциальных несоответствий (FMEA), планирования экспериментов по методу Г. Тагути в совокупности с программными системами трехмерного проектирования и инженерного анализа. Разработанная модель обеспечивает выполнение сквозного развертывания требований и качества системы проектирования, предпечатной подготовки и 3D-печати деталей и узлов.

2. Разработана усовершенствованная методика FMEA процесса 3D-печати, которая с учетом особенностей аддитивного производства позволяет комплексно анализировать 3 взаимосвязанных последовательных этапов: этап проектирования, этап предпечатной подготовки и этап 3D-печати. Для усовершенствованной методики FMEA процесса 3D-печати:

а) предложено оригинальное название метода – «Additive Failure Mode and Effects Analysis», AFMEA;

б) введен новый элемент функционирования этапа процесса «Структура 3D-модели» на этапе предпечатной подготовки FMEA процесса 3D-печати, которая позволяет учитывать причины появления несоответствий построения ячеистой структуры деталей и узлов;

в) разработаны новые шкалы баллов значимости и несоответствия исходя из особенностей аддитивного производства.

3. Для методики нивелирования («компенсации») высокого уровня вариабельности диаметра прутка филамента выявлены закономерности зависимости среднего значения площади прямоугольного сечения  $S_{mid}$ , среднего значения массы  $m_{mid}$  и среднего значения предела прочности  $\sigma_{mid}$  от технологических параметров FDM 3D-печати.

4. Введены новые обозначения для коэффициента потока –  $K_F$  (flow coefficient); для коэффициента выравнивания потока –  $K_{FER}$  (flow equalization ratio); для максимальных зазоров между внутренними параллельно экструдированными (расположенными) нитями – максимальный параллельный зазор  $Z_{pmax}$  (maximum parallel); для максимальных зазоров между стенкой и внутренними параллельно экструдированными нитями – максимальный угловой зазор  $Z_{cmax}$  (maximum corner).

### **Значимость результатов для науки и практики**

Теоретическая значимость результатов диссертационной работы Загидуллина Радмира Салимьяновича заключается в разработке подходов и инструментария управления качеством, которые обеспечивают выполнение требований потребителей к деталям и узлам аэрокосмических конструкций из полимерных композиционных материалов, получаемых с использованием технологии FDM 3D-печати, и снижают возможные риски появления несоответствий, как в конструкции, так и в процессах предпечатной подготовки и изготовления.

Практическая значимость результатов диссертационной работы заключается в разработке методик, обеспечивающих сквозное развертывание требований и качества системы проектирования, предпечатной подготовки и 3D-печати деталей и узлов аэрокосмических конструкций из полимерных композиционных материалов, получаемых с использованием аддитивных технологий, в том числе методики нивелирования («компенсации») высокого уровня вариабельности диаметра прутка филамента для обеспечения качества деталей и узлов аэрокосмических конструкций из полимерных композиционных материалов и методика проектирования и изготовления деталей и узлов аэрокосмических конструкций из полимерных композиционных материалов в условиях аддитивного производства, основанная на применении робастных подходов: QFD, AFMEA, планирования экспериментов по методу Г. Тагути.

### **Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и заключений**

Научные положения, выводы и заключения, сформулированные в диссертации Загидуллина Радмира Салимьяновича получены с использованием

известных методов управления качеством, развертывания функции качества (QFD), анализа видов и последствий потенциальных несоответствий (FMEA), планирования экспериментов по методу Г. Тагути, статистических методов квалиметрии, методов математического моделирования.

Достоверность научных положений, выводов и результатов диссертации обеспечивается:

а) анализом существующих методов и подходов к обеспечению качества;  
б) экспериментальными исследованиями на базе Самарского университета;

в) основные результаты работы докладывались и были одобрены на всероссийских и международных научных конференциях по управлению качеством, авиации и космонавтике;

г) практикой применения на головном предприятии ГК «Роскосмос по выпуску космических аппаратов и ракет-носителей АО «Ракетно-космический центр «Прогресс».

### **Структура и содержание диссертации**

Диссертационная работа Загидуллина Радмира Салимьяновича состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 185 наименований, трех приложений. Диссертации содержит 89 рисунков и 22 таблицы. Общий объем работы составляет 174 страницы.

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

**В первой главе** приведены примеры использования FDM 3D-печати в производстве изделий авиакосмической техники. Представлена классификация филаментов для FDM 3D-печати, а также описаны источники дефектов напечатанных деталей и узлов. Кроме того, автором в данной главе проведен теоретический анализ отечественных и зарубежных работ по обеспечению качества этапов проектирования, предпечатной подготовки деталей и узлов аэрокосмических конструкций, выполненных методом FDM 3D-печати.

На основе проведенного анализа автор сделал ряд выводов:

1) FDM 3D-печать находит широкое применение в производстве деталей и узлов аэрокосмических конструкций;

2) дефекты напечатанных деталей и узлов могут быть вызваны как на этапе проектирования, так и на этапах предпечатной подготовки и 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, при этом не обеспечено сквозное развертывание требований и качества, а также конструкторским и технологическим методам и подходам обеспечения качества без применения современных методов и подходов обеспечения качества.

**Во второй главе** автором представлены основные, дополнительные и уточнены специальные требования к деталям и узлам аэрокосмических конструкций, полученных методом аддитивных технологических процессов.

Разработана функциональная модель обеспечения качества, основанная на применении робастных методах: метода развертывания функции качества (QFD), анализа видов и последствий потенциальных несоответствий (FMEA), планирования экспериментов по методу Г. Тагути в совокупности с программными системами трехмерного проектирования и инженерного анализа.

Помимо функциональной модели обеспечения качества в данной главе разработана усовершенствованная методика анализа видов и последствий потенциальных несоответствий процесса 3D-печати, позволяющая учитывать особенности аддитивного производства.

**В третьей главе** автором разработана методика нивелирования («компенсации») высокого уровня вариабельности диаметра прутка филамента для обеспечения качества деталей и узлов аэрокосмических конструкций из полимерных композиционных материалов. Методика основана применении статистических подходов и выявленных закономерностях в результатах экспериментальных исследований: зависимости геометрических, массовых и прочностных характеристик от технологических режимов FDM 3D-печати.

**В четвертой главе** диссертации автором разработана методика проектирования и изготовления деталей и узлов аэрокосмических конструкций из полимерных композиционных материалов в условиях аддитивного производства, основанная на применении робастных методов: 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. В качестве объекта для демонстрации и отработки методики выбран соединительный узел межбакового отсека серийно выпускающихся ракет-носителей серии «Союз».

Дополнительно, автором в данной главе проведен расчет годового экономического эффекта от внедрения результатов диссертации, который для проектирования и изготовления соединительного узла ракеты-носителя составляет 208330,2 руб.

В заключении автором приведены основные результаты и выводы исследования и определены перспективы дальнейшего изучения проблемы.

### **Оценка соответствия публикаций, автореферата основным положениям диссертации**

Представленная диссертационная работа Загидуллина Р.С. является завершенной научно-квалификационной работой. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 16 работах, в том числе в 7 статьях, опубликованных в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК России, в 4 статьях Scopus и Web of Science.

Автореферат диссертации полностью соответствует основному содержанию диссертационной работы.

### **Замечания по диссертации**

Отмечая несомненные достоинства диссертации, необходимо перечислить некоторые замечания и пожелания диссертанту:

1. На функциональной модели обеспечения качества деталей и узлов аэрокосмических конструкций в условиях аддитивного производства (рисунок 37) указан блок применения «Анализа видов и потенциальных несоответствий конструкции (AFMEA)». Во-первых, пропущено слово «последствий», а во-вторых, почему в этом блоке указан только анализ конструкции? Ведь в тексте диссертации рассматривается, в том числе, PFMEA процесса 3D печати, и все это вместе как раз и получило название AFMEA.

2. Далее во второй главе диссертации при описании усовершенствованной методики анализа видов и последствий потенциальных несоответствий

процесса 3D-печати (AFMEA) было бы уместно представить схему (модель) процедуры AFMEA для её визуализации.

3. При описании процедуры проведения AFMEA также не увидел использование какой-либо ИТ-поддержки метода – например, можно было бы предусмотреть хотя бы информационную систему управления базой знаний по видам и причинам несоответствий, по рекомендованным мерам для аддитивного производства, а также по разработанным автором моделям данных, функциям и алгоритмам, которая могла бы использоваться как интеллектуальная система помощи при проведении AFMEA.

Указанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертации и могут рассматриваться как рекомендации для дальнейшего развития работы.

### **Заключение**

Диссертация Загидуллина Радмира Салимьяновича выполнена на актуальную тему, имеет завершённый характер, обладает научной новизной и практической значимостью.

Результаты исследования доведены до уровня практических рекомендаций, что позволяет использовать их на предприятиях авиакосмической отрасли.

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

Диссертация выполнена на высоком научно-техническом уровне и представляет собой завершённую научно-квалификационную работу. Диссертация полностью соответствует требованиям п. 9 Положения о

