

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной и инновационной работе
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»,
д.т.н., профессор



Олег Николаевич Тулупов

« 03 » 11 2023 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»
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 диссертационной работы

Актуальность выбранной темы исследования обусловлена необходимостью решения задачи по повышению качества деталей и узлов авиационно-космической техники из полимерных композиционных материалов, полученных методом послойного наложения материала методом FDM 3D-печати (Fused Deposition Modeling). FDM 3D-печать является одним из наиболее распространённых методов аддитивного производства в мире. Благодаря разработкам в области полимерных материалов, упрочненных угле- и стекловолокном, FDM 3D-печать получает широкое распространение в авиакосмической отрасли для изготовления деталей и узлов беспилотных летательных аппаратов, самолетов, ракет-носителей и космических аппаратов. FDM 3D-печать позволяет получать

Входящий № 206-874
Дата 16 НОЯ 2023
Самарский университет

детали и узлы из полимерных композиционных материалов сложной геометрической формы с «ячеистой» архитектурой строения. Это обеспечивает уменьшение массы получаемых деталей на 20-30% и более по сравнению с деталями и узлами, полученными традиционными методами производства из металлических сплавов, без потери значений показателей прочности и жесткости.

Однако, как показывает практический опыт на производстве, при FDM 3D-печати возникают различного рода дефекты (зазоры, щели, деформация углов, стенок модели с сечением менее 1 мм и т.д.) и геометрические отклонения (отклонение от цилиндричности, овальность, огранка, отклонения от плоскостности и т.д.) напечатанных деталей и узлов из полимерных композиционных материалов. Указанные несоответствия могут быть вызваны ошибками на различных этапах производства: проектирование, подготовка модели к печати (предпечатная подготовка) и изготовление (непосредственно 3D-печать).

Таким образом, выбранная автором диссертации научная задача, заключающаяся в совершенствовании модели обеспечения качества проектирования и изготовления деталей и узлов аэрокосмических конструкций из полимерных композиционных материалов методами аддитивного производства, является оправданной, тема работы является актуальной

Оценка структуры и содержания работы

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы (185 наименований), содержит 89 рисунков, 22 таблицы. Содержание диссертации изложено на 171 страницах машинописного текста. Имеется 3 приложения на 3 страницах. Общий объем диссертации составляет 174 страницы. Структура диссертации определена целью, задачами, научной новизной и экспериментальными исследованиями автора.

Во введении обоснованы актуальность темы диссертационной работы, обозначены цель и задачи работы, сформулированы научная новизна, теорети-

ческая и практическая значимость работы, положения, выносимые на защиту, приведены доводы о достоверности научных положений, выводов и результатов диссертационного исследования.

В первой главе проведен анализ отечественного и зарубежного опыта применения FDM технологии для изготовления деталей и узлов изделий авиационно-космической техники. Рассмотрены перспективные материалы (филаменты) для FDM 3D-печати аэрокосмических конструкций. Проведен анализ источников дефектов на стадиях проектирования, предпечатной подготовки и FDM 3D-печати. Установлено, что благодаря достижениям и разработкам в области специальных филаментов, в частности, полимерным материалам, упрочненных угле- и стекловолокном, FDM технологии находит широкое применение в производстве деталей и узлов изделий авиационно-космической техники.

Также в первой главе приведены результаты теоретического анализа отечественных и зарубежных научных работ по обеспечению качества проектирования, предпечатной подготовки и FDM 3D-печати деталей и узлов изделий авиационно-космической техники. Результаты теоретического анализа показали, что большинство научных работ посвящено каждому отдельному этапу без обеспечения сквозного развертывания качества и применения современных методов и подходов обеспечения качества.

Во второй главе диссертации проанализированы международные и отечественные стандарты, определяющие требования к планированию качества продукции авиационно-космического назначения. Это явилось основанием для уточнения требований к деталям и узлам аэрокосмических конструкций, полученных методом аддитивных технологических процессов. На основании этого разработана функциональная модель обеспечения качества деталей и узлов аэрокосмических конструкций из полимерных композиционных материалов в условиях аддитивного производства. Данная модель основана на применении робастных методов, а именно метода развертывания функции качества (QFD), ана-

лиза видов и последствий потенциальных несоответствий (FMEA), планирования экспериментов по методу Г. Тагути в совокупности с программными системами трехмерного проектирования и инженерного анализа. Модель обеспечивает выполнение сквозного развертывания требований и качества системы проектирования, предпечатной подготовки и 3D-печати деталей и узлов.

Также в этой главе представлена усовершенствованная методика FMEA-анализа процесса 3D-печати. Методика позволяет комплексно анализировать систему проектирования, предпечатной подготовки и 3D-печати деталей и узлов. Исходя из особенностей аддитивного производства для усовершенствованной методики FMEA-анализа процесса 3D-печати разработаны новые шкалы баллов значимости и несоответствия. Для методики FMEA-анализа процесса 3D-печати автор ввел новое название «Additive Failure Mode and Effects Analysis», AFMEA.

В третьей главе диссертации разработана методика, которая позволяет нивелировать («компенсировать») высокий уровень вариабельности диаметра прутка филамента. Методика разработана на основе результатов статистической обработки замеров диаметра прутка филамента и выявленных закономерностей: зависимости среднего значения площади прямоугольного сечения S_{mid} , среднего значения массы m_{mid} , среднего значения предела прочности σ_{mid} от технологических параметров FDM 3D-печати. Закономерности выявлены в ходе экспериментальных исследований на примере полимерного материала – полиамида, упорочнённого стекловолокном.

В четвертой главе диссертации в рамках функциональной модели, на основе разработанных методик и робастных методов разработана и апробирована методика проектирования и изготовления деталей и узлов аэрокосмических конструкций из полимерных композиционных материалов в условиях аддитивного производства. Автор на примере проектирования и изготовления соединительного узла датчика давления межбакового отсека ракеты-носителя подробно

продемонстрировал преимущества и практическую применимость разработанной методики. В этой же главе проведен расчет экономической эффективности внедрения разработанных методик и модели обеспечения качества. Показано, что суммарный годовой экономический эффект от использования результатов исследования для разработки и изготовления соединительного узла датчика давления межбакового отсека ракеты-носителя составляет 208330,2 руб.

В заключении приведены основные результаты работы и определены дальнейшие перспективы исследования, которые будут направлены на повышение качества деталей и узлов изделий авиационно-космической техники из специальных филаментов, обладающих тепло- и электропроводностью.

Научная новизна полученных результатов

Научная новизна представленной к защите диссертационной работы состоит в следующем:

- разработана функциональная модель для выполнения сквозного развертывания требований и качества системы проектирования, предпечатной подготовки и 3D-печати деталей и узлов, отличающаяся применением совокупности робастных методов с программными системами трехмерного проектирования и инженерного анализа, которая может быть использована для последующей валидации результатов проектирования;
- разработаны новые шкалы баллов значимости несоответствий с учетом особенностей аддитивного производства, что позволяет комплексно анализировать систему проектирования, предпечатной подготовки и 3D-печати деталей и узлов;
- установлены закономерности зависимости среднего значения площади сечения S_{mid} , среднего значения массы m_{mid} , среднего значения предела прочности σ_{mid} прутка филамента от технологических параметров FDM 3D-печати;
- введены новые термины и обозначения, отражающие особенности 3D-

печати: для усовершенствованной методика FMEA-анализа процесса введено название «Additive Failure Mode and Effects Analysis» (AFMEA); на этапе предпечатной подготовки AFMEA-анализа введено название нового элемента функционирования этапа процесса « Структура 3D-модели». Для технологических режимов FDM 3D-печати введены новые обозначения K_F - коэффициент потока (flow coefficient), K_{FER} - коэффициент выравнивания потока (flow equalization ratio). Для максимальных зазоров, возникающих в напечатанных деталях и узлах вследствие недоэкструзии филамента, введены названия и их обозначения: максимальный параллельный зазор для максимальных зазоров между внутренними параллельно экструдированными (расположенными) нитями (Z_{pmax} , maximum parallel) и максимальный угловой зазор для максимальных зазоров между стенкой и внутренними параллельно экструдированными нитями ($Z_{сmax}$, maximum corner).

Теоретическая значимость результатов диссертационной работы Р.С. Загидуллина заключается в совершенствовании методов и подходов управления качеством в авиакосмической отрасли. Эти методы и подходы 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.

Значимость полученных результатов для практики

Практическая значимость результатов диссертационной работы заключается в следующем:

- разработаны технологические режимы FDM 3D-печати, позволяющие нивелировать («компенсировать») высокий уровень вариабельности диаметра прутка филамента, что обеспечивает получение напечатанных деталей и узлов

аэрокосмических конструкций из полимерных композиционных материалов с требуемым уровнем механических свойств;

- разработана методика проектирования и технология изготовления деталей и узлов методом FDM 3D-печати, представляющая совокупность робастных подходов, методов планирования эксперимента, программных систем трехмерного проектирования и инженерного анализа, позволяющая нивелировать высокий уровень вариабельности диаметра прутка филамента для обеспечения требуемого качества получаемой продукции.

Практическая значимость 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 технологии FDM 3D-печати. Предложенные функциональная модель и методики обеспечения качества прошли апробацию в АО «Ракетно-космический центр «Прогресс» для разработки и изготовления соединительных узлов датчиков-преобразующей аппаратуры ракет-носителей и космических аппаратов.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций

Решение поставленных задач в диссертационной работе проведено на основе применения методологии Всеобщего управления качеством (TQM), процессного и системного подходов, метода развертывания функции качества (QFD), анализа видов и последствий потенциальных несоответствий (FMEA), планирования эксперимента по методу Г. Тагути, статистических методов управления качеством, методов квалиметрии, методов математического моделирования.

Достоверность научных положений, выводов и результатов исследования обеспечивается анализом существующих подходов к обеспечению качества, ва-

лидацией предложенных решений, экспериментальными исследованиями, а также практикой их применения в головном предприятии страны по выпуску ракет-носителей АО «Ракетно-космический центр «Прогресс».

Соответствие автореферата диссертационной работе

Автореферат полностью соответствует основному содержанию диссертационной работы.

Личный вклад соискателя в получении результатов исследования

Личный вклад соискателя состоит в проведении анализа существующих методов и подходов обеспечения качества деталей и узлов аэрокосмических конструкций из полимерных материалов с использованием технологии FDM 3D-печати, а также возможных ошибок на этапах проектирования, предпечатной подготовки и FDM 3D-печати, приводящих к дефектам и геометрическим отклонениям получаемых изделий. Соискатель лично проанализировал действующие нормативно-технические документы, регламентирующие планирование качества изделий авиакосмической техники, а также существующих требований к деталям и узлам аэрокосмических конструкций, полученных методом аддитивных технологических процессов. На основе полученных результатов автором уточнены специальные требования к деталям и узлам аэрокосмических конструкций, полученных методом аддитивных технологических процессов, и разработана робастная функциональная модель и методики, которые позволяют обеспечить сквозное развертывание требований и качества системы проектирования, предпечатной подготовки и FDM 3D-печати. Кроме того, соискателем сформулированы цель и задачи исследования, он принимал непосредственное участие в проведении теоретических и экспериментальных исследований, проведена апробация разработанных моделей и методик в условиях действующего

предприятия авиакосмической отрасли, подготовлены к публикации статьи по теме диссертационного исследования.

Соответствие содержания диссертации заявленной специальности

Диссертационная работа 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» паспорта научной специальности 2.5.22. Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы

Практическое значение работы состоит в использовании разработанных модели и методик в производстве АО «Ракетно-космический центр «Прогресс» для обеспечения качества деталей и узлов ракет-носителей из полимерных композиционных материалов на этапах проектирования, предпечатной подготовки и FDM 3D-печати. Полученные результаты представляют интерес для предприятий-изготовителей изделий авиационно-космической техники: АО «НПО Лавочкина», АО «ГКНПЦ имени М.В. Хруничева», ПАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королева», АО «ГРЦ им. академика В.П. Макеева», АО «Решетнёв», АО «ЦКБ ТМ», ПАО «Ил», ОАО «Компания «Сухой», АО «Российская самолётостроительная корпорация «МиГ».

Замечания по диссертационной работе

1. В разделе 1.5 первой главы диссертационной работы автор проводит теоретический анализ робастных подходов к проектированию и изготовлению деталей и узлов аэрокосмических конструкций в условиях аддитивного производства. При этом недостаточно описаны особенности робастного планирования экспериментов по методу Гэнити Тагути.

2. В главе 2 недостаточно представлены и описаны государственные стандарты по технологии FDM 3D-печати.

3. Отсутствует применение в разработанной функциональной модели и методиках метода анализа измерительных системы (Measurement System Analysis, MSA).

4. В разделе 4.11 главы 4 расчет экономического эффекта от внедрения разработанных модели и методик проведен на примере только одного вида соединительного узла датчика давления в межбаковом отсеке ракеты-носителя, что не дает полной картины и точных данных экономического эффекта внедрения результатов диссертационной работы. Следовало провести расчет экономического эффекта в совокупности с другими соединительными узлами датчико-преобразующей аппаратуры ракеты-носителя.

Необходимо отметить, что указанные замечания не являются принципиальными и не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы.

Оценка работы в целом

Диссертация написана точным научным языком, ясным для понимания, хорошо структурирована и оформлена. Содержание глав диссертации логически взаимосвязано и в полном объеме раскрывает постановку, методы и алгоритмы решения поставленных задач. Изложение выводов и практических рекомендаций достаточно кратко и определено. Основные результаты диссертационной работы отражено в 16 работах, в том числе 7 статьях, опубликованных в веду-

щих рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК, 4 публикации проиндексированы в наукометрических базах Scopus и Web of Science.

Заключение

Тема диссертационной работы, представленная Загидуллиным Радмиром Салимьяновичем является актуальной для авиакосмической отрасли и значимой с научной и практической точки зрения. Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой решена важная научно-практическая задача в области повышения качества аэрокосмических конструкций. Полученные научно-прикладные результаты имеют важное значение для отечественных предприятий-изготовителей изделий авиационно-космической техники.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации, научные труды, опубликованные автором, соответствуют выбранной проблематике и отражают основные положения работы.

С учетом актуальности выполненных исследований, научной новизны и практической значимости полученных результатов диссертационная работа «Совершенствование модели обеспечения качества проектирования и изготовления деталей и узлов аэрокосмических конструкций из полимерных композиционных материалов в условиях аддитивного производства» удовлетворяет требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842, а ее автор, Загидуллин Радмир Салимьянович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.22. Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства.

Диссертация Р.С. Загидуллина и отзыв на нее рассмотрены и одобрены на расширенном заседании кафедры Технологий обработки материалов федераль-

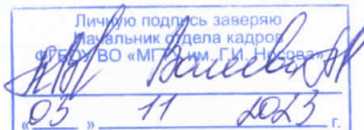
ного государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» 1 ноября 2023 г., протокол № 1.

Присутствовали на заседании 25 чел.

Результаты голосования: «за» – 25, «против» – нет, «воздержалось» – нет.

Зав. кафедрой Технологий обработки материалов
д-р техн. наук, проф.

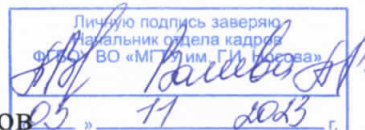
Александр Борисович Моллер



(докторская диссертация защищена по специальности 05.02.23 – Стандартизация и управление качеством продукции)

Профессор кафедры Технологий обработки материалов
д-р техн. наук, доц.

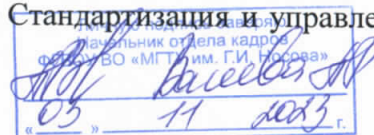
Марина Андреевна Полякова



(докторская диссертация защищена по специальности 05.02.23 – Стандартизация и управление качеством продукции)

Профессор кафедры Технологий обработки материалов
д-р техн. наук, доц.

Эдуард Михайлович Голубчик



(докторская диссертация защищена по специальности 05.02.23 – Стандартизация и управление качеством продукции)

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

Адрес: Россия, 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38.

телефон: +7 (3519) 22-84-26

E-mail: mgtu@magtu.ru

Web-сайт: <https://www.magtu.ru>