



**МИНОБРАЗОВАНИЯ РОССИИ**  
федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого»  
(ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

ИНН 7804040077, ОГРН 1027802505279, ОКПО 02068574  
ул. Политехническая, д. 29 литера Б,  
вн. тер. г. муниципальный округ Академическое,  
г. Санкт-Петербург, 195251  
тел.: +7(812)552-60-80, office@spbstu.ru

15.11.2024 № 24/ВШПЦТ-1115  
на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор,  
д.т.н., профессор,  
член - корреспондент  
Российской Академии Наук



Сергеев В.В.

2024 г.

### ОТЗЫВ

ведущей организации федерального государственного автономного  
образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский  
политехнический университет Петра Великого»  
на диссертационную работу Алексеева Вячеслава Петровича  
«Совершенствование инструментов повышения качества продукции в  
процессах производства деталей методом селективного лазерного сплавления»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 2.5.22 «Управление качеством продукции. Стандартизация.  
Организация производства»

### Актуальность темы исследования

В настоящее время остро стоит задача повышения качества продукции в процессах производства методами аддитивного производства, в частности технологии селективного лазерного сплавления (СЛС). Технология СЛС относится к наиболее востребованной технологии, позволяющая изготавливать сложнопрофильные детали газотурбинных двигателей и газотурбинных установок.

В технологии СЛС наблюдается высокая изменчивость, обусловленная множеством факторов, такие как параметры лазерного излучения, свойства порошка, температура и атмосферные условия. Эти факторы приводят к непостоянству показателей качества. Решение этой задачи требует тщательной проверки и анализа процесса СЛС. Понимание природы изменений позволяет

Входящий № 206-8842  
Дата 25 НОЯ 2024  
Самарский университет

предвидеть потенциальные риски и принимать меры для их минимизации, что способствует стабильности качества продукции.

Одной из важных задач при производстве сложнопрофильных деталей методом СЛС остается обеспечение управляемости процесса в условиях малосерийного производства, характерного для данной технологии.

Использование контрольных карт статистического управления процессами позволяет визуализировать и анализировать данные о процессе в реальном времени. В условиях ограниченности данных и постоянного изменения процессов традиционные методы статистического управления процессами могут оказаться неэффективными. Существует потребность в совершенствовании инструментов повышения качества продукции для эффективного управления, что крайне актуально для достижения стабильного качества продукции.

Таким образом, совершенствование инструментов повышения качества продукции в процессах производства деталей методом СЛС является **актуальной** задачей.

### **Оценка структуры и содержания работы**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 109 наименований. Основной текст 95 страниц, 35 иллюстраций и 11 таблиц. Общий объем диссертации составляет 132 страницы. Структура диссертации определена целью, задачами, научной новизной и экспериментальными исследованиями автора

**Во введении** приведена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, а также пути их достижения. Отмечена научная новизна, практическая значимость и достоверность результатов выполненной работы, приведены результаты, выносимые на защиту автором. Представлена информация по апробации и публикации результатов.

**В первой главе** автором проведен анализ особенностей при изготовлении деталей ГТД. Наиболее востребованной и широко применяемой технологией аддитивного производства (АП) является технология СЛС металлопорошковой

композиции (МПК). Технология СЛС, в отличие от традиционных производственных процессов позволяет изготавливать заготовки высокой сложности с высокой точностью и минимальной последующей обработкой.

Процесс СЛС обладает изменчивостью вследствие действия на него множества факторов, что приводит к непостоянству показателей качества изготавливаемого изделия. К таким факторам относятся характеристики исходной МПК, технологические параметры процесса, оборудования и программного обеспечения.

Для обеспечения показателей качества АП и его управления рассмотрены основные методы и инструменты управления технологическим процессом. Выявлено, что наиболее востребованными методами улучшения качества являются метод анализа видов и последствий потенциальных несоответствий и статистического управления процессом.

Статистические методы управления качеством наукоемких изделий остаются наиболее востребованными. Основным инструментом такого контроля являются контрольные карты, но для их применения требуются достоверные исторические данные, что не характерно для аддитивного производства.

Анализ краткосрочных карт выявил, что метод краткосрочного статистического управления процессом использует отклонение от цели. Преимущества этих диаграмм многочисленны: минимизируют количество контрольных карт и сокращают задачи по администрированию карт; их также можно использовать для мониторинга и контроля всего производственного процесса.

Обзор литературы свидетельствует о недостаточной разработанности данной темы в контексте проблемы управления качеством.

**Во второй главе** автором проведен анализ разработанной функциональная модель процесса СЛС, описывающая основные этапы ЖЦИ и факторы, оказывающие влияние на показатели качества, которые далее соотнесены с основными этапами. Выделено 13 ключевых этапов, установлены связи с этапами и агрегировано 6 групп дефектов, вошедших в разработанную карту дефектов.

Проведен структурный, функциональный анализ технологического процесса изготовления деталей технологией СЛС, потенциальных несоответствий технологического процесса. В результате анализа видов и последствий потенциальных несоответствий технологического процесса изготовления заготовок технологией селективного лазерного сплавления (PFMEA анализа) сформулированы отказы, связанные с технологическим процессом СЛС, определены их последствия и потенциальные причины возникновения.

Оценка возможности возникновения, обнаружения и предупреждения причин отказов позволила сформулировать основные мероприятия, направленные на повышение показателей качества процесса СЛС.

**В третьей главе автором** представлена оригинальная методика и статистического анализа воспроизводимости технологического процесса изделий со сложной геометрией для коротких серий, основанная на критическом анализе имеющихся методов построения контрольных карт и индексов возможностей для краткосрочных процессов.

К метрикам воспроизводимости и управляемости процессом для коротких серий модифицированы индексы воспроизводимости, рассчитанные по отклонениям и наличие (отсутствие) тренда смещения среднего отклонений от центра поля допуска.

Для сложных деталей с большим количеством контрольных характеристик очевидно, что при использовании модифицированной целевой контрольной карты достигается значительная экономия в отслеживании процесса.

**Четвертая глава** посвящена разработке и валидации алгоритм управления показателями качества в технологических процессах изготовления изделий со сложной геометрией методом СЛС.

Для сложных деталей с большим количеством контрольных характеристик очевидно, что при использовании разработанной модифицированной целевой контрольной карты достигается значительное упрощение в отслеживании процесса, его анализе и интерпретации результатов анализа.

Алгоритм апробирован при изготовлении заготовок лопаток соплового аппарата турбины ГТД методом СЛС из порошка жаропрочного сплава ВЖ159. Выявлено, что процесс СЛС заготовок лопаток соплового аппарата пригоден для обеспечения заданных требований, но не обладает достаточным запасом возможностей, необходимым для эффективного управления ходом процесса.

Было выявлено, что разработанные инструменты повышения качества изготовления заготовок лопаток соплового аппарата турбины технологией СЛС позволили предотвратить брак последующих 60 шт. заготовок, что составляет 50% от общего объема заказа.

**В заключении** работы приведены основные результаты работы и определены перспектива дальнейшего развития темы исследования, которые будут направлены на развитие процессного подхода и статистических методов управления качеством при изготовлении деталей методами аддитивного производства.

### **Научная новизна полученных результатов**

**Автором работы разработана** методика сегментации требований потребителя к изделиям для процесса селективного лазерного сплавления на основе метода функций развертывания качества (QFD), отличающаяся от известных решений определением уровня значимости связей между требованиями потребителя к продукции и технологическими параметрами подготовки и реализации процесса селективного лазерного сплавления.

**Лично автором сформирован** подход к созданию инструмента оценки рисков на основе анализа видов, последствий и причин потенциальных несоответствий технологического процесса селективного лазерного сплавления (PFMEA), отличающийся от известных решений алгоритмом получения матрицы рисков, обеспечивающим ее полноту и непротиворечивость за счет выявления структурно-логических связей между ключевыми этапами жизненного цикла изделий при их функциональном моделировании и накопленной статистикой по несоответствиям на основе разработанной карты классификации выявленных дефектов.

**Автором работы разработана** методика статистического анализа управления качеством селективного лазерного сплавления, включающая анализ воспроизводимости процесса производства изделий со сложной геометрией малыми сериями и отличающаяся от известных решений разработкой и применением модифицированных целевых краткосрочных контрольных карт и индексов воспроизводимости технологического процесса.

**Лично автором впервые предложен** алгоритм управления показателями качества в технологических процессах изготовления изделий со сложной геометрией методом селективного лазерного сплавления, отличающийся от аналогов интеграцией методик статистического анализа воспроизводимости процесса производства изделий на малых сериях и PFMEA для селективного лазерного сплавления.

### **Значимость полученных результатов для практики**

Практическая значимость результатов работы заключается в следующем:

- разработана методика сегментации требований потребителя к изделиям для процесса селективного лазерного сплавления на основе метода функций развертывания качества (QFD);

- разработана методика анализа последствий и причин потенциальных несоответствий технологического процесса селективного лазерного сплавления (PFMEA);

- разработана методика статистического анализа управления качеством селективного лазерного сплавления на основе анализа воспроизводимости процесса производства изделий со сложной геометрией малыми сериями;

- разработан алгоритм управления качеством в технологических процессах изготовления изделий со сложной геометрией технологией селективного лазерного сплавления.

Предложенная методика PFMEA внедрена в производственный процесс изготовления деталей сложной геометрии методом селективного лазерного сплавления в АО «Лазерные системы». Предложенная методика статистического анализа воспроизводимости процесса производства изделий со сложной

геометрией малыми сериями, позволяющая отслеживать процесс аддитивного производства заготовок лопаток соплового аппарата турбины и своевременно реагировать при потере стабильности процесса внедрена в ООО НПО «Базовое машиностроение».

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

Обоснованность и достоверность основных положений и выводов работы подтверждается внедрением научных положений и практикой их применения для отдельных организаций. При написании диссертации соискатель дал все необходимые ссылки на авторов и источники литературы, откуда он заимствовал материалы или отдельные результаты.

### **Соответствие автореферата диссертационной работе**

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

### **Личный вклад соискателя в получении результатов исследования**

Личный вклад соискателя состоит в разработке методики сегментации требований потребителя к изделиям для процесса селективного лазерного сплавления на основе метода функций развертывания качества (QFD), подхода к созданию инструмента оценки рисков на основе анализа видов, последствий и причин потенциальных несоответствий технологического процесса селективного лазерного сплавления (PFMEA) и методики статистического анализа управления качеством селективного лазерного сплавления, включающая анализ воспроизводимости процесса производства изделий со сложной геометрией малыми сериями.

Кроме того, соискателем изготовлены заготовки лопаток соплового аппарата турбины и проведена апробация разработанного алгоритма управления

показателями качества в технологических процессах изготовления изделий со сложной геометрией методом СЛС.

### **Соответствие содержания диссертации заявленной специальности**

Диссертационная работа Алексева Вячеслава Петровича соответствует п. 7 «Научные основы управления рисками и предотвращения несоответствий в технических и организационных системах», п. 8 «Разработка научно-практического статистического инструментария управления качеством» паспорта научной специальности 2.5.22 Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства.

### **Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации**

Практическое значение работы состоит в использовании разработанных методик и алгоритмов в производстве АО «Лазерные системы», ООО НПО «Базовое машиностроение» для обеспечения показателей качества заготовок, изготовленных методом СЛС.

Результаты диссертационной работы рекомендуются к использованию в АО «Решетнев», ПАО «ОДК-Кузнецов», АО «Силовые машины», АО «ОДК-Авиадвигатель», ПАО «ОДК-Сатурн» и других организациях, занимающихся производством изделий методом селективного лазерного сплавления.

### **Замечания по диссертационной работе**

1. В главе 1.3 не приведены работы по статистическим методам управления качеством продукции.
2. В главе 2.1 не представлена расшифровка сокращений рисунка 2.1.
3. В работе указано, что для контроля отклонений в коротких сериях можно применить непараметрический статистический анализ, но не представлены его методы.
4. В работе не представлен индивидуальный протокол PFMEA.

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

### **Оценка работы в целом**

Диссертация написана 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 14 работах, в том числе 5 статьях, опубликованных в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК, 1 статья в изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, 5 публикаций в других журналах и в материалах конференций.

### **Заключение по диссертации**

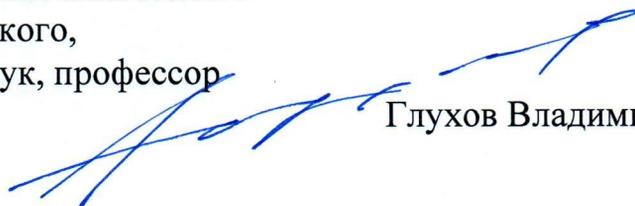
Диссертация Алексеева В.П. на соискание ученой степени кандидата технических наук представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой решена актуальная для двигателестроения научная задача по совершенствованию инструментов повышения качества продукции в процессах производства деталей методом селективного лазерного сплавления. Полученные теоретические и практические результаты достоверны и достаточны для обоснования сделанных выводов.

Результаты, представленные в диссертационной работе, получены автором лично в процессе научной деятельности. Рассматриваемая диссертация выполнена на высоком уровне, носит законченный характер и соответствует п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», а ее автор Алексеев Вячеслав Петрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.22. Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства.

Диссертация Алексева В.П. и отзыв на нее рассмотрены и одобрены на совместном заседании Высшей школы передовых цифровых технологий Передовой инженерной школы «Цифровой инжиниринг» и кафедры ЮНЕСКО «Управление качеством образования в интересах устойчивого развития» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (протокол № 3 от 14.11.2024 г.) и представлен на 10 (десяти) страницах печатного текста.

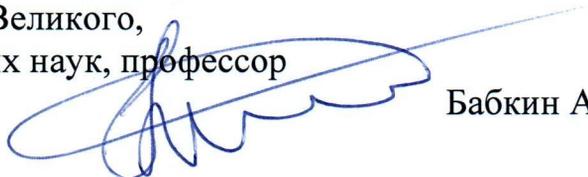
Отзыв составили:

Заместитель заведующего кафедрой ЮНЕСКО «Управление качеством образования в интересах устойчивого развития»  
Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого,  
доктор экономических наук, профессор



Глухов Владимир Викторович

Ассоциированный член, профессор кафедры ЮНЕСКО «Управление качеством образования в интересах устойчивого развития»  
Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого,  
доктор экономических наук, профессор



Бабкин Александр Васильевич

Директор Высшей школы передовых цифровых технологий,  
Передовой инженерной школы «Цифровой инжиниринг»  
Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого,  
кандидат экономических наук, доцент



Левенцов Валерий Александрович

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Адрес: 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

Телефон: +7 (812) 591-65-28

E-mail: office@spbstu.ru

Web-сайт: www.spbstu.ru