

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

На правах рукописи

АЛЕКСЕЕВ ВЯЧЕСЛАВ ПЕТРОВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТОВ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА
ПРОДУКЦИИ В ПРОЦЕССАХ ПРОИЗВОДСТВА ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ
СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ**

2.5.22 – Управление качеством продукции.
Стандартизация. Организация производства

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Хаймович Александр Исаакович,
доктор технических наук, доцент

Самара – 2024

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	11
1.1 Особенности аддитивного производства при изготовлении деталей ГТД.....	11
1.2 Анализ методов и инструментов управления технологическим процессом	20
1.3 Статистические методы управления качеством наукоемких изделий.....	23
1.4 Обзор краткосрочных одномерных подходов к контролю качества.....	27
Заключение по главе 1	30
2 РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ОЦЕНКИ РИСКОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ВИДОВ, ПОСЛЕДСТВИЙ И ПРИЧИН ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ НЕСООТВЕТСТВИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ (PFMEA).....	32
2.1 Разработка функциональной модели технологического процесса изготовления деталей, технологией селективного лазерного сплавления.....	32
2.2 Факторы, оказывающие влияние на качество изготовления заготовок технологией селективного лазерного сплавления	38
2.3 Структурирование показателей качества заготовок, влияющих на эксплуатационные свойства	44
2.4 Разработка модели оценки рисков, построенной на основе анализа видов, последствий и причин потенциальных несоответствий технологического процесса селективного лазерного сплавления (PFMEA).....	48
Заключение по главе 2	60
3 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПОВЫШЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЕЙ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ.....	62
3.1 Аналитический анализ существующих методов и подходов управления процессом ...	65
3.2 Разработка алгоритма повышения показателей качества изготовления деталей технологией селективного лазерного сплавления с использованием статистических методов контроля	68
3.3 Разработка модифицированных целевых краткосрочных контрольных карт и определение индексов воспроизводимости.....	70
Заключение по главе 3	74
4 РАЗРАБОТКА И АПРОБАЦИЯ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯМИ КАЧЕСТВА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ СО	

СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ ТЕХНОЛОГИЕЙ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ..	75
4.1 Разработка алгоритма управления показателями качества в технологических процессах изготовления изделий со сложной геометрией технологией селективного лазерного сплавления.....	75
4.2 Определение технических требований к заготовкам лопаток соплового аппарата турбины, изготовленных методом селективного лазерного сплавления.....	77
4.3 Производство, сбор статистики по контролируемым параметрам.....	79
4.4 Статистический контроль процесса изготовления заготовок лопаток соплового аппарата турбины методом селективного лазерного сплавления.....	82
4.5 Анализ последствий и причин потенциальных несоответствий технологического процесса изготовления заготовок лопаток соплового аппарата турбины методом селективного лазерного сплавления	89
Заключение по главе 4	93
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	94
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	96
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Функциональная модель процесса селективного лазерного сплавления	108
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Структурный и функциональный анализ технологического процесса селективного лазерного сплавления.....	109
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Этап 2 и 3 бланка протокола PFMEA	114
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Этап 4, 5 и 6 бланка протокола PFMEA.....	117
ПРИЛОЖЕНИЕ Д. План управления технологическим процессом селективного лазерного сплавления	127
ПРИЛОЖЕНИЕ Е. Акт внедрения результатов диссертационной работы	130
(АО «Лазерные системы»).....	130
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж. Акт внедрения результатов диссертационной работы.....	131
ПРИЛОЖЕНИЕ З. Акт внедрения результатов диссертационного исследования в учебный процесс	132

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Качество машиностроительных изделий, и, в частности, сложнопрофильных деталей газотурбинных двигателей (ГТД) и газотурбинных установок (ГТУ) в большей степени определяется используемыми технологическими процессами их изготовления.

К перспективному направлению, обеспечивающему снижение трудоемкости и стоимости изготовления деталей ГТД, следует отнести технологии аддитивного производства, в частности, процесс селективного лазерного сплавления металлического порошка. Основная проблема технологии селективного лазерного сплавления заключается в том, что процесс аддитивного производства подвержен определенной изменчивости вследствие наличия большого количества воздействующих факторов. Поэтому наблюдаемые результаты работы процесса также непостоянны. Исследование этой изменчивости позволяет достичь понимания ее природы, что обеспечивает возможность управления процессом [2]. Преобладающим инструментом отслеживания изменений в процессе и обеспечения того, чтобы процесс находился в контролируемом состоянии, являются контрольные карты статистического управления процессами (SPC), учитывающие характерные черты аддитивного производства.

Характерными чертами аддитивного производства, в частности технологии селективного лазерного сплавления, являются небольшой размер партии, короткое время выполнения заказа, частые настройки/переналадки и ограниченные данные процесса. Поэтому технология селективного лазерного сплавления на сегодняшний день относится к мелкосерийному производству. Установление надежных параметров карты в краткосрочной перспективе затруднено из-за присущей им ограниченности данных и их постоянного пересмотра. В таких условиях традиционные методы статистического управления процессами и анализа воспроизводимости и пригодности процесса не работают. Чтобы иметь возможность предоставить некоторую значимую информацию о стабильности

процесса и его возможности для совершенствования процесса, необходимо применять краткосрочные контрольные карты.

В настоящее время исследованием качества изготовления изделий технологией селективного лазерного сплавления занимаются многие ведущие ученые, производители ГТД и ГТУ. Особое внимание уделяется деталям горячего тракта ГТД и ГТУ. Геометрические параметры этих деталей во многом определяют технико-экономические характеристики двигателя в целом.

Для обеспечения показателей качества и их стабильности в технологических процессах изготовления деталей технологией СЛС необходимо обеспечить управление процессом селективного лазерного сплавления.

Следовательно, актуальность диссертационной работы определяется тем, что повышение качества изделий, получаемых технологией селективного лазерного сплавления, связано с разработкой методики обеспечения показателей качества аддитивного производства, основанной на типовой модели оценки рисков, построенной на основе анализа видов, последствий и причин потенциальных несоответствий технологического процесса (PFMEA) и статистической обработки данных.

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

Решением вопросов, связанных с технологическими процессами селективного лазерного сплавления, занимались многие отечественные и зарубежные ученые: И.В. Шишковский, В.М. Довбыш, М.Д. Кривилев, С.П. Мурзин, А.А. Попович, А.А. Сапрыкин, И.Ю. Смуров, А.П. Назаров, В.Ш. Суфияров, Е.В. Харанжевский, В.Г. Смелов, А.Б. Мазалов, А.В. Сотов, С.Д. Voley, Chee Kai Chua, С. Coddet, А. V. Gusarov, Kai Zeng, S.A. Khairallah,

J.P. Kruth, Maarten Van Elsen, T. Ozel, A. Riemer, A.M. Rubenchik, J. Sienz, E.M. Weissman, Xiaoze Du и другие.

Проведенный обзор литературы свидетельствует о недостаточной разработанности данной темы в контексте проблемы управления качеством. Это обусловлено отсутствием:

1. классификации возможных несоответствий для процесса селективного лазерного сплавления в разрезе этапов жизненного цикла изделий (ЖЦИ);
2. апробированных подходов к сегментации рынка продукции селективного лазерного сплавления для обеспечения требуемых потребителем групп показателей качества;
3. моделей оценки рисков для технологического процесса селективного лазерного сплавления, построенных на основе методики PFMEA (анализа видов, последствий и причин потенциальных несоответствий);
4. проработанной методики статистического контроля продукции для малых серий, характерных для аддитивного производства.

Учитывая вышеизложенное, можно сформулировать следующую цель диссертационного исследования: совершенствование инструментов повышения качества продукции в процессах производства деталей методом селективного лазерного сплавления за счет разработки методики обеспечения повышения стабильности процесса аддитивного производства с учетом его серийности.

Задачи работы:

1. Провести теоретический анализ существующих подходов к обеспечению показателей качества изделий, изготовленных технологией селективного лазерного сплавления.
2. Разработать функциональную модель обеспечения качества изделий, изготовленных технологией селективного лазерного сплавления, учитывающую основные этапы ЖЦИ на стадии конструкторско-технологической подготовки аддитивного производства.
3. Провести анализ потенциальных несоответствий и разработать научно обоснованный подход для создания и выполнения плана корректирующих

действий, предотвращающих появление дефектов при реализации технологии изготовления деталей методом селективного лазерного сплавления. Разработать модель оценки рисков, построенной на основе анализа видов, последствий и причин потенциальных несоответствий технологического процесса (PFMEA)

4. Разработать методику управления стабильностью аддитивного производства на основе статистического анализа воспроизводимости процесса селективного лазерного сплавления изделий со сложной геометрией малыми сериями.

5. Провести комплексную апробацию предложенных решений на примере изготовления заготовок лопаток соплового аппарата турбины методом селективного лазерного сплавления.

Область исследования 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 специальности 2.5.22 Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства.

Объектом исследования является технологический процесс изготовления изделия технологией селективного лазерного сплавления.

Предметом исследования являются методы и модели обеспечения показателей качества изделий, изготовленных технологией селективного лазерного сплавления.

Методы исследования. Решение поставленных задач проведено на основе методологии всеобщего управления качеством (TQM), процессного и системного подходов, метода развертывания функции качества (QFD), анализа видов и последствий потенциальных несоответствий технологического процесса (PFMEA), статистического управления процессами (SPC).

Научная новизна диссертационного исследования заключается в разработке подходов и инструментария повышения качества изделий, изготовленных технологией селективного лазерного сплавления, и состоит в следующем:

1. 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.

2. Разработан 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 ЖЦИ при их функциональном моделировании и накопленной статистикой по несоответствиям на основе разработанной карты классификации выявленных дефектов.

3. 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;
- индексов воспроизводимости технологического процесса.

4. Впервые разработан и успешно апробирован на практике 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.

Теоретическая значимость заключается в разработке комплексного подхода к управлению качеством селективного лазерного сплавления, связывающего этапы ЖЦИ, анализ которых базируется на функциональной модели

процесса, методе анализа рисков потенциальных несоответствий на ключевых этапах ЖЦИ и адаптированном статистическом методе управления качеством, использующем разработанные модифицированные контрольные карты для малых серий.

Практическая значимость результатов работы заключается в разработке методики сегментации требований потребителя к изделиям для процесса селективного лазерного сплавления на основе метода функций развертывания качества (QFD); методики анализа последствий и причин потенциальных несоответствий технологического процесса селективного лазерного сплавления (PFMEA); методики статистического анализа управления качеством селективного лазерного сплавления на основе анализа воспроизводимости процесса производства изделий со сложной геометрией малыми сериями; алгоритма управления качеством в технологических процессах изготовления изделий со сложной геометрией технологией селективного лазерного сплавления.

Апробация результатов исследования.

Основные результаты диссертационной работы были представлены на конференциях, в том числе: на 63-й Всероссийской научной конференции МФТИ (23–29 ноября 2020, г. Москва); LXXII молодёжной научной конференции, посвящённой 80-летию КуАИ-СГАУ-Самарского университета и 115-летию со дня рождения академика С.П. Королёва (5–7 апреля 2022 года, г. Самара); XIV Общероссийской молодежной научно-технической конференции «Молодежь. Техника. Космос» (23–27 мая 2022 года, г. Санкт-Петербург); Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» (21–23 июня 2023 года, г. Самара); XI конференции «Лучевые технологии и применение лазеров» (22–25 сентября 2024 г, г. Санкт-Петербург).

Положения, выносимые на защиту

1. 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.

2. 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 этапам ЖЦИ при их функциональном моделировании и накопленной статистикой по несоответствиям на основе разработанной карты классификации выявленных дефектов.

3. 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.

4. 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.

Публикации. По теме исследования опубликовано 14 научных работ, из них 5 статей в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК; 1 статья в журналах, индексируемых в базе данных Scopus; 5 статей в материалах других журналов и научно-практических конференций; 3 патента на изобретения.

Автор благодарит коллектив кафедры технологий производства двигателей Самарского университета за ценные советы в процессе выполнения работы.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Особенности аддитивного производства при изготовлении деталей ГТД

В последние годы широкое распространение получили технологии аддитивного производства (АП) [1, 2]. Согласно данным «Wohlers Associates 2024», объем поставок оборудования для аддитивного производства металлических деталей увеличился на 24,4% в 2023 году [3]. По оценкам, в 2023 году было продано 3793 оборудования аддитивного производства по сравнению с 3049 в 2022 году. Тем временем индустрия цифровой печати выросла на 11,1%, до 20,035 млрд долларов. Прогнозируется, что объём мирового рынка аддитивных технологий к 2033 году достигнет 97,1 млрд долларов [3].

Внедрение аддитивных технологий в производство направлено непосредственно на промышленный или производственный рынок, который включает в себя медицину, аэрокосмическую, автомобильную и энергетическую промышленность; и потребительский рынок, который включает аксессуары для дома, моду и развлечения [4].

Аддитивный технологический процесс – это процесс создания физического объекта на основе трехмерной геометрической модели, как правило, слой за слоем, в отличие от традиционных субтрактивных методов обработки и методов формообразования (литье, штамповка) [5, 6]. Технологии АП позволяют изготавливать детали сложной геометрической формы в кратчайшие сроки. Кроме того, с помощью технологий АП возможно перепроектирование изделий с уменьшением количества деталей за счет их объединения.

В лаборатории аддитивных технологий Самарского университета были изготовлены детали «горелочное устройство», применяемые в ГТД (рисунок 1.1), первоначально состоявшие из нескольких деталей [7, 8]. Перепроектирование геометрии заготовки позволило сократить количество сборочных единиц и снизить трудоемкость изготовления.



Рисунок 1.1 – Детали «Горелочное устройство»,
изготовленные технологией селективного лазерного сплавления

Ярким примером использования технологии АП в аэрокосмической отрасли является изготовление элементов опытного образца малоразмерного турбореактивного двигателя Микроджет 100Н, адаптированного под технологию АП (рисунок 1.2) [9].



Рисунок 1.2 – Изготовление деталей двигателя Микроджет 100Н
методом селективного лазерного сплавления [9]

Наиболее востребованной и широко применяемой технологией АП является технология селективного лазерного сплавления (СЛС) металлопорошковой композиции (МПК). Метод основан на послойном изготовлении изделий путем выборочного сканирования лазерным лучом МПК, нанесенной на платформу построения. Технология СЛС – одна из немногих запатентованных технологий АП, разработана в 1995 году [10].

Технология СЛС, в отличие от традиционных производственных процессов, позволяет изготавливать заготовки высокой сложности с высокой точностью и минимальной последующей обработкой. В настоящее время успешно применяются различные сплавы на основе алюминия [11, 13], титана [4, 14, 15], никеля [16–19] и нержавеющей стали [20–22].

Процесс СЛС обладает изменчивостью вследствие действия на него множества факторов, что приводит к непостоянству показателей качества изготавливаемого изделия [23].

Качество деталей, изготовленных аддитивным способом, в значительной степени зависит от характеристик исходных материалов МПК [24, 25]. Основными технологическими параметрами являются форма частиц, распределение размеров частиц, морфология поверхности, насыпная плотность и текучесть порошков [26].

Методы производства МПК оказывают существенное влияние на показатели качества исходных МПК. Известен способ производства металлических порошков методом газового распыления [27]. В качестве распыляющей текучей среды можно использовать воду или газ, в частности, инертный газ, такой как аргон или азот. Главным преимуществом газового распыления является управляемость [28] размером, формой и морфологией порошка.

Центробежное распыление является классическим процессом производства металлических порошков, который заключается в электродуговой плавке вращающегося элемента (электрода) [29, 30]. Ввиду того, что в процессе центробежного распыления образование и затвердевание капель металла происходит в инертной атмосфере, степень загрязнения поверхности порошка

незначительна. Центробежно распыленные порошки характеризуются высокой чистотой и сферической формой частиц.

Одним из методов производства металлических порошков для АП является метод распыления струи расплава водой высокого давления [31]. Однако, он не позволяет получить металлические порошки, имеющие правильную сферическую форму или имеющие требуемое распределение размеров частиц [27]. Использование данного метода получения МПК позволяет изготавливать изделия с высокой прочностью [32, 33].

Порошки, обработанные способами плазменного вращающегося электрода и распыления водой, демонстрируют наиболее однородное распределение размеров соответственно [34]. Порошки с равномерным распределением размеров способствуют однородному плавлению и хорошему межслоевому сцеплению, структуре, механическим свойствам и качеству поверхности [35,36]. Напротив, порошки, обработанные в процессе газового распыления, часто содержат захваченные пузырьки газа, приводящие к пористости в заготовках [36].

Выбор метода производства МПК оказывает существенное влияние на показатели качества синтезируемых изделий, поэтому способ производства необходимо выбирать с учетом их качества и стоимости изготовления.

Значительное влияние на показатели качества оказывают технологические параметры процесса АП. Скорость изготовления изделий методом АП регулируется скоростью сканирования и толщиной слоя МПК. Так, с увеличением скорости сканирования увеличивается скорость построения, что приводит к изменению ванны расплава, к ее удлинению и нестабильности, и, как следствие, дефектам в виде пористости и несплавления [37].

Пористость и несплавление являются распространенными дефектами в АП, которые необходимо минимизировать или устранить из-за их неблагоприятного воздействия на механические свойства [38]. Возникновение дефектов может быть вызвано следующими факторами. Во-первых, лазерное плавление в режиме замочной скважины приводит к тому, что глубина ванны расплава может быть намного больше, чем наблюдается в режиме проводимости. Кроме того,

разрушение паровой полости, образующейся при испарении металла, может привести к образованию пустот в следе за лазерным лучом. Существует порог для перехода от режима проводимости лазерного сплавления к режиму замочной скважины, который зависит от мощности, скорости сканирования и размера пятна фокуса луча [39]. Такие поры имеют сферическую форму (рисунок 1.3, а).

Вторым фактором является захват защитного газа внутрь частиц МПК во время процесса сплавления [40]. Такой эффект приводит к образованию газовых пор.

Дефекты несплавления (рисунок 1.3, б) в процессе СЛС возникают из-за недостаточного проникновения ванны расплава в платформу построения или в ранее нанесенный слой [40].

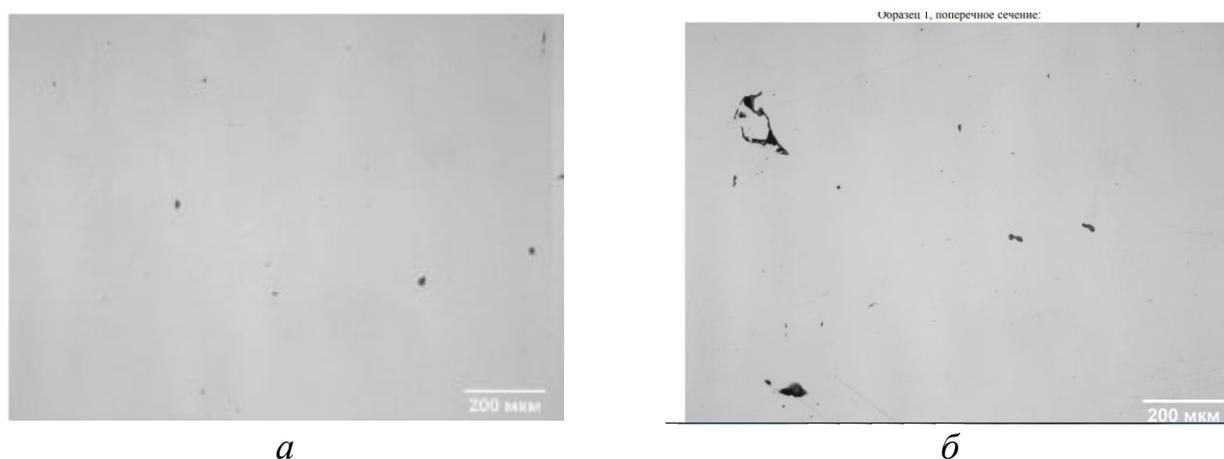


Рисунок 1.3 – Пористость, образованная во время СЛС нержавеющей стали 12X18H10T

В качестве защитной среды для предотвращения загрязнения ванны расплава в процессе СЛС используется инертный газ аргон. Известно, что инертные газы нерастворимы в жидких металлах [41], поэтому любые созданные поры останутся в затвердевшей ванне, если только они не смогут вырваться, всплыв из расплавленной ванны.

Было показано, что неинертный защитный газ, такой как азот, уменьшает и/или устраняет пористость в сварных швах из нержавеющей стали, растворяясь в жидкой ванне расплава до ее затвердевания [41], но не может использоваться для всех металлов из-за неблагоприятной реакционной способности с некоторыми

металлами. Было также показано, что исключение защитного газа и выполнение лазерной сварки в вакууме уменьшает или устраняет пористость в металлах, склонных к пористости, однако эта практика еще не была опробована для лазерного АП [42]. Недостаточное проникновение может привести к образованию удлиненных пустот в конечном продукте [43, 44]. Эти макропоры намного больше газовых пор и могут быть различимы по острым краям, которые действуют как концентраторы напряжений при приложенных нагрузках.

Одним из методов уменьшения и устранения пор является увеличение подвода тепла на единицу длины, определяемого как отношение мощности лазера к скорости сканирования, за счет увеличения глубины ванны расплава. С увеличением скорости сканирования уменьшается размер ванны расплава и повышается вероятность образования пористости [45]. С увеличением мощности лазера возможно уменьшить пористость за счет увеличения размера ванны расплава [46].

Одним из методов устранения пор является процесс горячего изостатического прессования (ГИП) [47]. ГИП основано на одновременном воздействии на заготовку высокой температуры и высокого давления газа [47]. Методом ГИП трудно устранить дефекты поверхностных трещин. Процесс ГИП является трудоемким и дорогим, поэтому для уменьшения и устранения пор необходимо стремиться к определению рационального соотношения технологических параметров процесса СЛС.

Шероховатость поверхности является важной характеристикой для сложнопрофильных изделий, изготовленных с использованием методов АП. Возможность применения технологий АП существенно ограничена из-за высокой шероховатости выращенных деталей по сравнению с деталями, полученными с применением механической обработки.

Шероховатость поверхности или характер поверхности деталей, изготовленных методами АП, являются результатом ряда взаимозависимых входных параметров, что приводит к нескольким наблюдаемым или измеримым выходным условиям, которые в конечном итоге могут повлиять на

производительность заготовки. Эти входные параметры связаны с исходным материалом, конструкцией детали, выбором процесса, параметрами процесса и постобработкой. Выходные условия могут варьироваться от частично сплавленных частиц порошка, отсутствия сплавления слоев или стратегии сканирования. Условия исходного материала включают тип сплава, распределение размеров частиц и морфологию порошка. Условия проектирования детали и процесса связаны с поверхностями нижнего слоя, геометрией элемента, ориентацией детали в объеме сборки и опорными конструкциями. Параметры процесса, связанные с шероховатостью поверхности, включают мощность, скорость сканирования, толщину слоя, углы нависания и стратегию сканирования. Этапы постобработки включают удаление поддержки, отделение от платформы построения, виброгалтовку, механическую обработку и химическую обработку.

На шероховатость поверхностей существенно влияет ступенчатый метод выращивания деталей [48]. Ступенчатый метод выращивания деталей применяется практически во всех технологиях, относящихся к аддитивным. Метод заключается в том, что машина строит деталь послойно, согласно заданным перед началом построения сечениям. Следовательно, существенное влияние на шероховатость заготовок оказывает толщина спекаемого слоя, а также угол расположения детали на платформе построения.

С уменьшением угла наклона детали относительно платформы построения в плоскости $X-Z$ уменьшается геометрическое разрешение и создается эффект лестницы (рисунок 1.4), что увеличивает шероховатость поверхности и ее отклонение от заданного профиля [48].

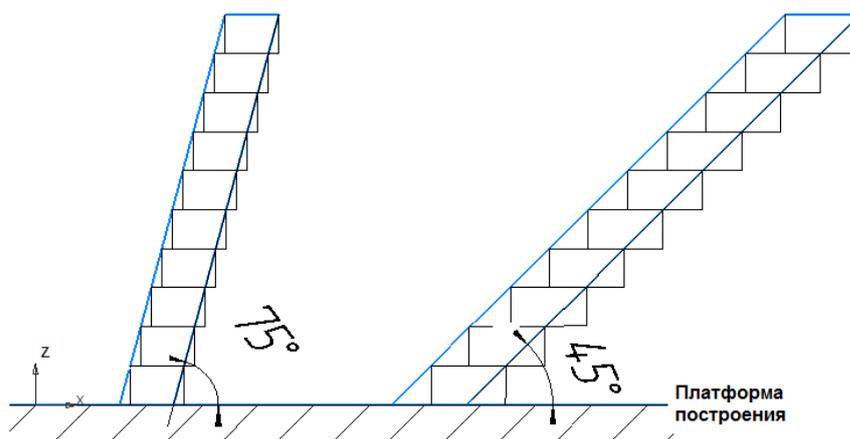


Рисунок 1.4 – Ступенчатый вид боковой поверхности

Уменьшение шероховатости возможно за счет правильного выбора угла ориентации сложнопрофильных заготовок на платформе построения и уменьшения толщины слоя МПК, но при этом увеличивается время изготовления.

Вторым механизмом образования поверхностей высокой шероховатости является неправильное сплавление частиц порошка и явление комкования [49], вызванное недостаточным подводом тепла. Твердые частицы порошка прилипают к поверхностям заготовок, как показано на рисунке 1.5 [49]. Средняя шероховатость поверхности, вызванная неправильно расплавленными частицами, имеет тот же порядок величины, что и диаметр МПК.



Рисунок 1.5 – Частицы МПК на поверхности алюминиевого сплава РС553

Уменьшить эффект комкования возможно за счет увеличения мощности лазера и уменьшения скорости сканирования, что приводит к полному растворению частиц порошка. Однако чрезмерный подвод энергии может быть пагубным для качества поверхности из-за высоких термических напряжений и неравномерной скорости затвердевания [35]. Наконец, более крупные частицы порошка трудно расплавить, поэтому заготовки, изготовленные из более грубых порошков, могут иметь плохую частоту поверхности. Более крупные твердые частицы на поверхности сборки также приводят к более высокой шероховатости поверхности [50].

Одной из разновидностей дефектов несплавления является трещина. Существует три основных типа трещин, наблюдаемых в заготовках, изготовленных аддитивным способом [37]. Во-первых, трещины при затвердевании в АП, наблюдаемые вдоль границ зерен. Данный тип трещин образуется за счет усадки при затвердевании и термического сжатия. Во-вторых, ликвационное растрескивание наблюдается в зоне «кашеобразования» или частично расплавленной зоне при печати [37]. В частично расплавленной зоне быстрый нагрев ниже температуры ликвидуса сплава вызывает сплавление определенных фаз выделений на границах зерен, таких как карбиды с низкой температурой плавления. Во время охлаждения частично расплавленная зона испытывает растягивающее усилие из-за усадки при затвердевании и термического сжатия отложения, что приводит к трещинам (рисунок 1.6).



Рисунок 1.6 – Трещина, возникшая в процессе СЛС МПК ВВ751П

В процессе СЛС в поверхностном слое возникают остаточные напряжения, которые могут привести к короблению геометрии детали и, как следствие, к снижению геометрической точности. Остаточные напряжения могут вызвать расслоение поверхностного слоя, как показано на рисунке 1.7.



Рисунок 1.7 – Трещина, вызванная остаточными напряжениями

Процесс АП подвержен изменчивости в следствие большого количества воздействующих факторов. Поэтому необходимо контролировать процесс с помощью измерений на месте и регулировать параметры процесса по мере необходимости для обеспечения показателей качества деталей. В последнее время большое внимание уделяется контролю АП для получения обратной связи от процесса с общей целью управления процессом.

Для обеспечения показателей качества АП и его управления рассмотрим основные методы и инструменты управления технологическим процессом.

1.2 Анализ методов и инструментов управления технологическим процессом

Изготовление высококачественных деталей быстро и воспроизводимо экономически эффективным способом остается важной задачей. Достижение этой важной задачи затруднено из-за высокой сложности природы АП.

Для обеспечения показателей качества продукции применяются методы и инструменты менеджмента качества для контроля технологических процессов [51].

Для обеспечения максимальных показателей качества применяется система TQM. Концепция TQM развивалась на протяжении долгих лет на основе работ следующих ученых: Ф.У. Тейлор обосновал необходимость применения научного подхода к производству, разделения сложных технологических операций на простые действия; А. Маслоу показал повышение эффективности производства за счет социального управления, мотивации сотрудников.

Системный подход к вопросам управления качеством предложили У.Э. Деминг, А. Фейгенбаум, Ф.Б. Кросби, К. Исикава, Ф. Шухарт.

Ключевым постулатом теории У.Э. Деминга является постоянное улучшение процессов планирования и производства, устранение ошибок за счет последовательных этапов планирования, выполнения; контроль и воздействие (управление, корректировка), которые образуют замкнутый цикл.

Джозеф Джуран сформулировал принцип «триады качества». Триада – это взаимодействие трех основных процессов: планирования, контроля и совершенствования качества. Дж. Джуран первым обосновал переход от контроля качества к управлению качеством. Им разработана знаменитая «спираль качества» (спираль Джурана) – вневременная пространственная модель, определившая основные стадии непрерывно развивающихся работ по управлению качеством и послужившая прообразом многих появившихся позже моделей.

Арманд Фейгенбаум предложил подход Total Quality Control (TQC) – подход комплексного (всеобщего) управления качеством, которое разворачивается на всех этапах жизненного цикла.

Статистический метод управления качеством производственного процесса, предложенный У. Шухартом, применяется и сегодня в виде контрольных карт, с помощью которых выявляются отклонения производственного процесса, устанавливаются причины их возникновения и возможно прогнозирование дальнейшего хода процесса.

Ф. Кросби является идеологом системы ZD («ноль дефектов»). Ключевым принципом программы «ноль дефектов» стал принцип недопустимости

изначального установления какого-либо приемлемого уровня дефектности, кроме нулевого.

Диаграмма К. Исикавы позволяет определить главные причинно-следственные связи между факторами и результатами процесса.

Сейфи Т.Ф. является основателем системы КАНАРСПИ (качество, надежность, ресурс с первых изделий). Разработанная система способствовала обеспечению высокого уровня конструкторской и технологической подготовки производства и получению в сжатые сроки требуемого качества продукции с первых промышленных образцов [52]. Данная система ориентирована на использование современных технологических процессов, максимальное использование типовых технологических процессов, унифицированного оборудования и универсальной сборной оснастки.

Перечень методов улучшения качества из международного стандарта ИСО 9004-4.1993 включает: для нечисловых данных – диаграмму сродства, бенчмаркинг, диаграмму Исикавы, мозговой штурм, карту процессов, древовидную диаграмму; для числовых данных – контрольные карты, гистограмму, диаграмму рассеивания, диаграмму Парето.

Одним из методов обеспечения и повышения показателей качества технологического процесса (ТП) является метод анализа видов и последствий потенциальных отказов (FMEA – Failure Mode and Effects Analysis) [53–55]. Метод позволяет предотвратить отказы и снизить последствия, вызванные ими.

Широкое распространение в разрезе управления качеством получили методы статистического анализа технологических процессов [56]. Статистические методы управления качеством наукоемких изделий по сравнению с текущим контролем продукции позволяют выявить на этапе подготовки и планирования производства отклонения от технологического процесса, которые приведут к появлению брака, тем самым формируя прогнозные (предиктивные) модели управления качеством продукции [57].

1.3 Статистические методы управления качеством наукоемких изделий

К основным статистическим методам управления качеством продукции относят [111]:

– Статистический анализ точности и стабильности технологического процесса – установление статистическими методами значений показателей точности и стабильности технологического процесса и определение закономерностей его протекания во времени.

– Статистическое регулирование технологического процесса – корректирование значений параметров технологического процесса по результатам выборочного контроля контролируемых параметров, осуществляемое для технологического обеспечения требуемого уровня качества продукции.

– Статистический приемочный контроль качества продукции – контроль, основанный на применении методов математической статистики для проверки соответствия качества продукции установленным требованиям и принятия продукции.

– Статистический метод оценки качества продукции – метод, при котором значения показателей качества продукции определяют с использованием правил математической статистики.

Статистические методы анализа точности, стабильности и управления технологическими процессами, регламентированные нормативными документами, предусматривают контроль процесса лишь по одному показателю качества выпускаемого изделия [58].

При производстве сложнопрофильных изделий качество изготовления характеризуется большим количеством показателей. Независимый контроль отдельных показателей может привести к значительной погрешности, поэтому необходимо рассматривать контроль показателей качества комплексно.

В настоящий момент статистический контроль ТП проводится средствами автоматизации – программными продуктами, что намного облегчило многомерный статистический контроль и повысило его надежность.

Стоит отметить, что вмешательство в ТП требуется тогда, когда выпускаемая продукция еще удовлетворяет техническим требованиям, но статистические показатели качества процесса свидетельствуют о наличии неслучайных воздействий.

Задача о статистическом контроле процесса при известных вероятностях перехода из налаженного состояния в разлаженное всесторонне исследована А.Н. Ширяевым [59]. Им получено строгое математическое решение задачи о нарушении настройки процесса с синтезом оптимальных алгоритмов при известном распределении момента появления разладки процесса.

Статистический контроль технологических процессов – одно из интенсивно развивающихся направлений всеобщего менеджмента качества, его внедрение – необходимое условие сертификации предприятия на соответствие международным стандартам качества ИСО-9000. Основным инструментом такого контроля – контрольные карты процесса [60, 61]. Они обеспечивают простой графический метод, позволяющий:

- определить, является ли процесс стабильным, т. е. функционирующим под воздействием не изменяющейся во времени системы случайных причин, характеризующих собственную изменчивость процесса (процесс находится в «состоянии статистической управляемости»);

- оценить собственную изменчивость процесса;

- сравнить информацию, полученную из выборок, представляющих текущее состояние процесса, с границами, отражающими его изменчивость, с целью оценки того, остался ли процесс стабильным или нет, уменьшилась или нет его изменчивость;

- идентифицировать, исследовать и по возможности уменьшить/устранить влияние специальных причин изменчивости, которые могут привести процесс к недопустимому уровню функционирования;

- использовать для управления процессом данные о его изменчивости (наличие тренда серии, циклов и т. п.);

- определить, ведет ли он себя предсказуемым и стабильным образом и возможна ли оценка соответствия процесса установленным требованиям;
- определить, соответствуют ли требованиям продукция, услуга, воспроизводимость процесса для измеряемой характеристики;
- обеспечить регулирование процесса на основе прогноза его поведения, используя статистические модели;
- оценивать результативность системы измерений.

Контрольные карты являются преобладающими инструментами статистического управления процессами (SPC), используемыми для отслеживания изменений в процессе и обеспечения того, чтобы процесс находился в контролируемом состоянии [62]. Классические приложения, впервые предложенные У. Шухартом в начале 1920-х годов, включают в себя две отдельные фазы, а именно фазы 1 и 2 [63–65]. Фаза 1 представляет собой ретроспективный анализ, в ходе которого на основе исторических данных строятся контрольные пределы. На этапе 2 используется контрольная карта для мониторинга результатов процесса. Контрольные карты могут быть как одномерными, так и многомерными. Одномерные контрольные карты измеряют и контролируют одну характеристику. Многомерные контрольные карты измеряют множество характеристик производственного процесса [65].

Базовые контрольные диаграммы Шухарта – это диаграммы \bar{X} ср, используемые для контроля среднего значения процесса, и диаграммы R (или S -диаграммы), используемые для контроля изменчивости процесса. Контрольные диаграммы Шухарта отображают последовательность измерений процесса с верхними и нижними контрольными пределами. Пределы контроля обычно устанавливаются на уровне ± 3 стандартных отклонений от центральной линии, в результате чего возникает ошибка 1-го типа (ложная тревога) = 0,0027, когда основное распределение нормальное [66, 67]. Реакция за пределами контролируемых пределов указывает на наличие особой причины (определяемой причины) и запускает сдерживающие и корректирующие действия [68].

Чувствительность к обнаружению небольших сдвигов можно повысить, внедрив правила запуска [69].

Хотя диаграммы Шухарта просты и легки в реализации [70], они предполагают естественность и независимость технологических данных [63]. Это условие требует надежного набора исторических данных для установки действительных контрольных пределов и оценки параметров процесса. Кроме того, на практике требуются сложные процедуры построения, мониторинга и управления отдельными диаграммами для различных процессов, типов деталей и испытательных станций.

Широкое внедрение компьютерной техники и современного программного обеспечения в значительной мере снимает эту проблему. В последних версиях статистических пакетов (Statistica) наряду с широко используемыми картами средних значений, характеристик вариации и накопленных сумм имеются и инструменты для построения и анализа карт, скользящих средних, регрессионных карт, а также многомерных карт.

Характерными чертами аддитивного производства, в частности технологии СЛС, являются небольшой размер партии, многокомпонентные типы, короткое время выполнения заказа, частые настройки/переналадки и ограниченные данные процесса. Поэтому технология селективного лазерного сплавления на сегодняшний день относится к мелкосерийному производству, ближе к единичному.

Установление надежных параметров контрольных карт в краткосрочной перспективе затруднено из-за присущей им ограниченности данных и их постоянного пересмотра. В таких условиях традиционные методы статистического управления процессами и анализа воспроизводимости и пригодности процесса не работают.

В контроле качества мелкие партии обычно относятся к производству продукции в небольших объемах [71]. Аналогичные термины включают короткие тиражи [72] и мелкосерийное производство [73]. Установление надежных параметров карты в краткосрочной перспективе затруднено из-за присущей им ограниченности данных [66, 74, 75, 76] и их постоянного пересмотра.

1.4 Обзор краткосрочных одномерных подходов к контролю качества

Многочисленные исследования по использованию краткосрочных методов статистического управления процессом в одномерных контрольных картах посвящены определенной области контрольных карт. Al-Salti и Statham рассмотрели методы статистического управления процессом в серийном производстве, сосредоточив внимание на преобразовании данных и использовании стандартизированных контрольных карт [77]. Acosta-Meijia и др. сравнили характеристики средней длины пробега контрольных карт для мониторинга нормальных процессов на предмет изменений дисперсии [78]. Tang провел исчерпывающий обзор, в котором контрольные карты сравниваются на основе степени их зрелости, практического использования, относительной простоты и преобладания преимуществ над недостатками [79]. Дель Кастильо и др. критически сравнили предположения, последние разработки, преимущества и недостатки альтернативных методов [80]. В нескольких исследованиях был представлен общий обзор, предваряющий предлагаемую модель принятия решений. Например, Noskiewiczová и Woska разработали методологию статистического контроля краткосрочных металлургических процессов [81].

Краткосрочные подходы SPC подразделяются на повторяющиеся и неповторяющиеся процессы. Повторяющийся процесс позволяет производить минимальное количество одинаковых продуктов на одной и той же машине или производственной линии без серьезных переналадок. Таким образом, эти продукты демонстрируют несколько разные спецификации или характеристики измерения [71]. Неповторяющийся процесс, который обычно происходит в мастерских, предполагает изготовление продукции на заказ и требует оригинального производственного оборудования [71].

В большинстве неповторяющихся процессов среднее значение и дисперсия изначально неизвестны.

Краткосрочные подходы статистического управления процессом для повторяющегося производственного процесса требуют преобразования

объединенных данных о разных продуктах или различных деталях с использованием одной и той же таблицы с разными номинальными размерами и допусками [82]. Рассмотрены два типа методов преобразования данных: отклонения от целевых и стандартизированные наблюдения.

Cullen J.M. использовал технику отклонения от цели [83]. Этот метод разработан для исследования возможностей процесса вокруг процесса, а не на продукте, и полезен для измерения характеристик с номинальными различиями, но с одинаковым допуском. В частности, отклонения процесса предполагаются однородными для всех номеров деталей или продуктов [84]. Различия между фактическими размерами и номинальными размерами получены из компонентов с идентичным материалом, процессом обработки и допуском. Диаграммы \bar{X} и R могут быть построены с общим средним значением 0 и стандартным отклонением, равным σ .

Bothe D.R. предложил «номинальную таблицу», в которой измеряемые значения регистрируются как отклонения от номинального значения для разных номеров деталей (или спецификаций) [85]. Номинальное значение определяется из спецификации для каждого номера детали. Измеренные значения наносятся с использованием классических диаграмм Шухарта \bar{X} и R . Пределы контроля определяются с использованием традиционных формул Шухарта при получении достаточных данных о подгруппах (например, $g = 25$).

Более того, в разностной диаграмме, предложенной D.J. Wheeler, используется номинальное значение для конкретного продукта, которое вычитается из каждого измеренного значения [86]. Номинальная стоимость рассчитывается либо на основе исторического среднего значения, либо на основе целевой стоимости каждого продукта. Диапазоны подгрупп остаются неизменными. Значения диапазона различных подгрупп нанесены на графики относительно следующих контрольных пределов:

$$CL_D = 0, UCL_D = +A_2\bar{\bar{R}}, LCL_D = -A_2\bar{\bar{R}}$$

$$CLR_R = \bar{\bar{R}}, UCL_R = D_4\bar{\bar{R}}, LCL_R = D_3\bar{\bar{R}}$$

Подобно номинальной диаграмме, диаграмма отклонения от номинального значения (DNOM) использует отклонение от номинального размера в качестве переменной на контрольной карте [87].

Farnum N.R. разработал диаграмму DNOM на основе отношений среднего значения подгруппы к номинальным результатам для устранения непостоянных отклонений и ошибок измерения [88].

Lin S.L. предложил использовать соотношение R_{\max} (в качестве альтернативы F -тесту) для анализа отклонений деталей [89].

Vermani S.K. изменил номинальную/целевую контрольную карту, чтобы отделить количество ответов в таблице от количества измерительных характеристик [90]. В модифицированной диаграмме применяется отклонение от целевой методики для расчета измеренного значения и соответствующее номинальное или целевое значение. Подгруппы деталей объединяются, когда они имеют одинаковую дисперсию по всем измерительным характеристикам. Этот процесс уменьшает количество ответов на диаграмму и устраняет риск неправильной интерпретации состояния процесса. Модифицированные диаграммы фокусируются на процессе, а не на отдельных характеристиках измерений.

Традиционные подходы, разработанные для повторяющихся производственных процессов, требуют дополнительного преобразования данных для размещения нескольких продуктов в единой общей контрольной карте [91]. Как упоминалось ранее, преобразование данных может представлять собой либо отклонения от цели (например, диаграммы дельта- x , номинальные, разные и DNOM), либо стандартизированные методы наблюдения (например, стандартизированные \bar{X} и R , краткосрочные \bar{X} и R и диаграммы Z и W).

Простой метод краткосрочного статистического управления процессом использует отклонение от цели [66]. Этот метод действителен, когда преобразованные значения имеют нормальное распределение, а отклонения процесса аппроксимируются для всех частей [92]. Стандартизированный метод наблюдения предпочтителен, учитывая значительные различия между всеми типами деталей и доступность параметров процесса (σ и μ).

Carbone предположил, что необходимо учитывать неопределенность измерений, чтобы снизить риски ложного принятия в статистическом управлении процессом с учетом ошибок измерения [93–94].

Преимущества этих диаграмм (как с использованием отклонений, так и с использованием стандартизации) многочисленны: минимизируют количество контрольных карт и сокращают задачи по администрированию карт; их также можно использовать для мониторинга и контроля всего производственного процесса. Диаграммы контроля отклонений предполагают, что дисперсия процесса однородна и в основном подходит для индивидуальных измерений [91].

Заключение по главе 1

На основании анализа современного состояния вопроса обеспечения показателей качества при изготовлении деталей ГТД с использованием технологии аддитивного производства металлических порошков, проведенного в главе 1, можно сделать следующие выводы:

1. Обзор технологии селективного лазерного сплавления показал, что данный процесс обладает изменчивостью вследствие действия на него множества факторов, что приводит к непостоянству показателей качества изготавливаемого изделия.

2. Характерными чертами аддитивного производства, в частности технологии селективного лазерного сплавления, являются небольшой размер партии, многокомпонентные типы, короткое время выполнения заказа. Ввиду ограниченного размера партий, возможности быстрой переналадки и позиционирования типа производства как «производство на заказ» актуальным становится вопрос управления качеством на малых сериях.

4. Особенности и ограничения технологии селективного лазерного сплавления усложняют процесс статистического контроля технологического процесса, т.к. для применения контрольных карт требуется наличие надежного

набора исторических данных для установки допустимых контрольных пределов и оценки параметров процесса.

5. Недостаточность разработки данной темы в контексте проблемы управления качеством обусловлена отсутствием классификация возможных несоответствий для процесса селективного лазерного сплавления в разрезе этапов жизненного цикла изделий (ЖЦИ).

6. Для обеспечения воспроизводимости параметров технологического процесса и показателей качества существует потребность в разработке методик управления качеством на основе анализа данных статистики и предиктивной аналитики на базе методов PFMEA.

2 РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ОЦЕНКИ РИСКОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ВИДОВ, ПОСЛЕДСТВИЙ И ПРИЧИН ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ НЕСООТВЕТСТВИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ (PFMEA)

2.1 Разработка функциональной модели технологического процесса изготовления деталей, технологией селективного лазерного сплавления

Разработка функциональной модели необходима для определения основных стадий ЖЦИ на этапах конструкторско-технологической подготовки и АП, и определения основных факторов, оказывающие влияние на качество заготовок, изготовленных технологий СЛС. На основе проведенного анализа основных процессов АП [95] и опыта лаборатории аддитивных технологий (АТ) Самарского университета, разработана функциональная модель процесса изготовления заготовок методом СЛС (рисунок 2.1).

Функциональная модель процесса изготовления заготовок методом СЛС также представлена в Приложении А.

На первоначальном этапе при получении заявки и соответствующих входных данных (чертеж и ЭГМ) необходимо провести анкетирование заказчика для определения технических требований к продукции и последующей идентификации изделия к определенному сегменту. Выходным параметром является анкета для определения характеристик продукции. Анкетирование заказчика является важным этапом и необходимо для согласования технических требований к заготовке и технологическому процессу, а также определения контролируемых показателей качества в зависимости от назначения изделия в эксплуатации.

Следующим этапом является технологическая подготовка производства (ТПП). В качестве элементов управления выступают правила проектирования [96] и назначения припусков на заготовку, в качестве механизмов – персонал и программное обеспечение (ПО).

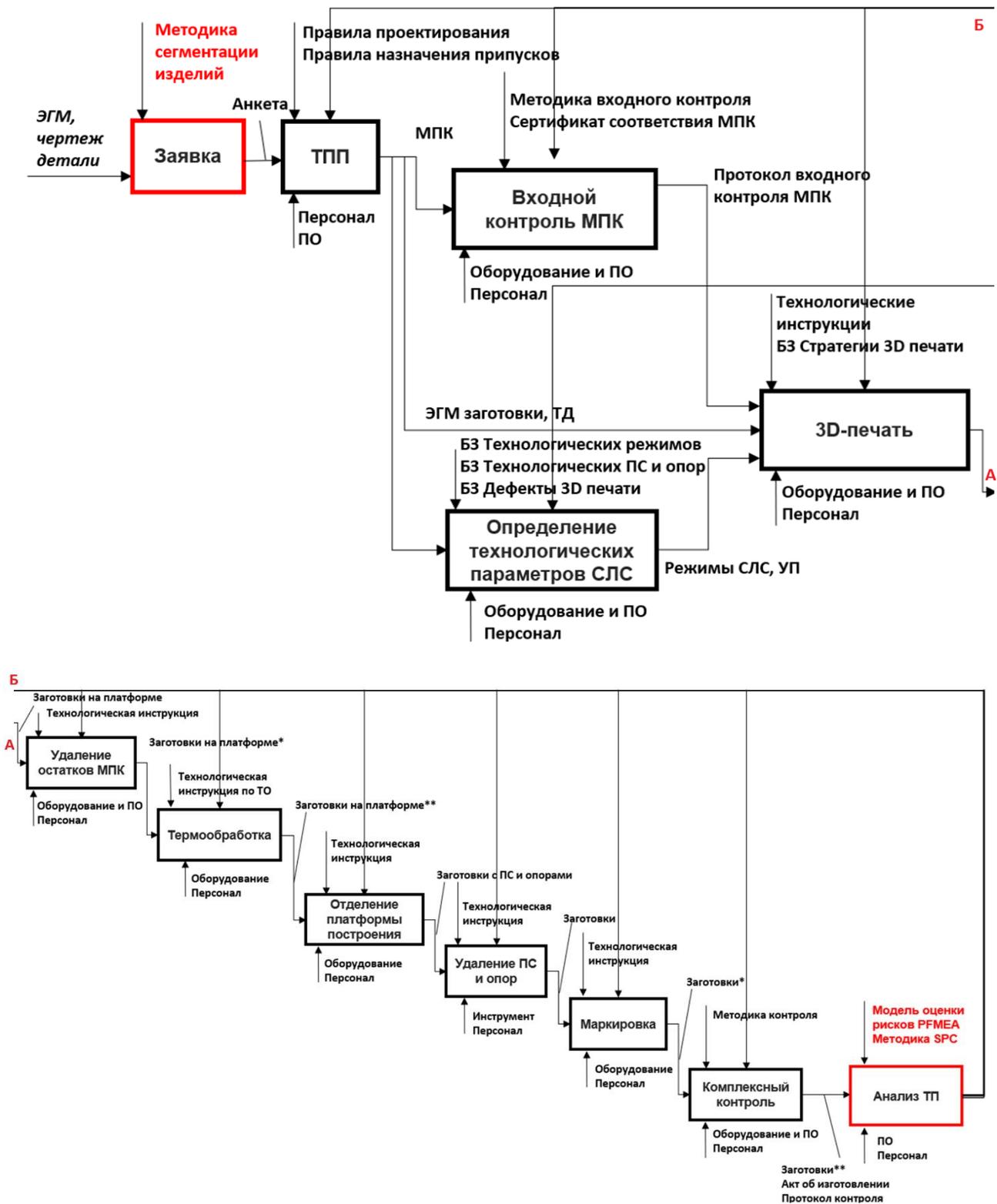


Рисунок 2.1 – Функциональная модель процесса изготовления заготовок методом СЛС, учитывающая основные стадии ЖЦИ на этапах конструкторско-технологической подготовки и аддитивного производства

ТПП состоит из следующих операций (рисунок 2.2):

- подготовка ЭГМ, включающая разработку заготовки и согласование ТТ с заказчиком;
- оптимизация детали;
- подготовка оборудования;
- обращение с МПК.

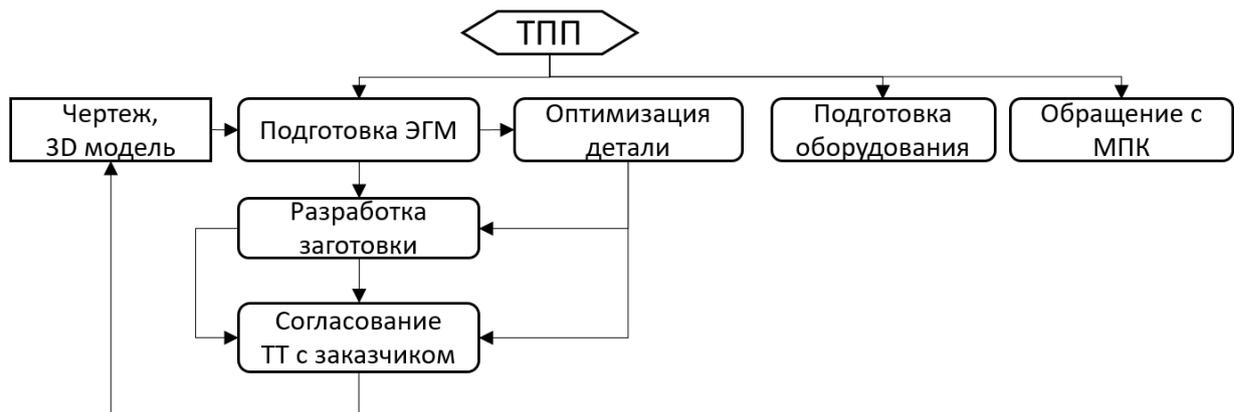


Рисунок 2.2 – Этапы технологической подготовки производства

Операция подготовки оборудования представлена на рисунке 2.3. На первом этапе необходимо очистить камеру от излишков МПК. Далее – выбрать, подготовить и установить платформу построения. На поверхности платформы построения не допускается наличие загрязнений и дефектов, ведущих к неравномерности нанесенного слоя. Далее необходимо снять рекоутер и проверить на наличие дефектов выравнитель. На поверхности выравнивателя не допускаются какие-либо дефекты. При наличии любых дефектов следует утилизировать выравниватель и выбрать для работы новый. Затем установить рекоутер и выровнять его относительно платформы построения. На поверхности рекоутера не допускаются дефекты, приводящие к неравномерности нанесенного слоя. Проверить воздушный фильтр, аргон и остатки МПК.

Основными элементами на данной операции являются: платформа построения, рекоутер, выравниватель, воздушный фильтр, аргон и МПК.

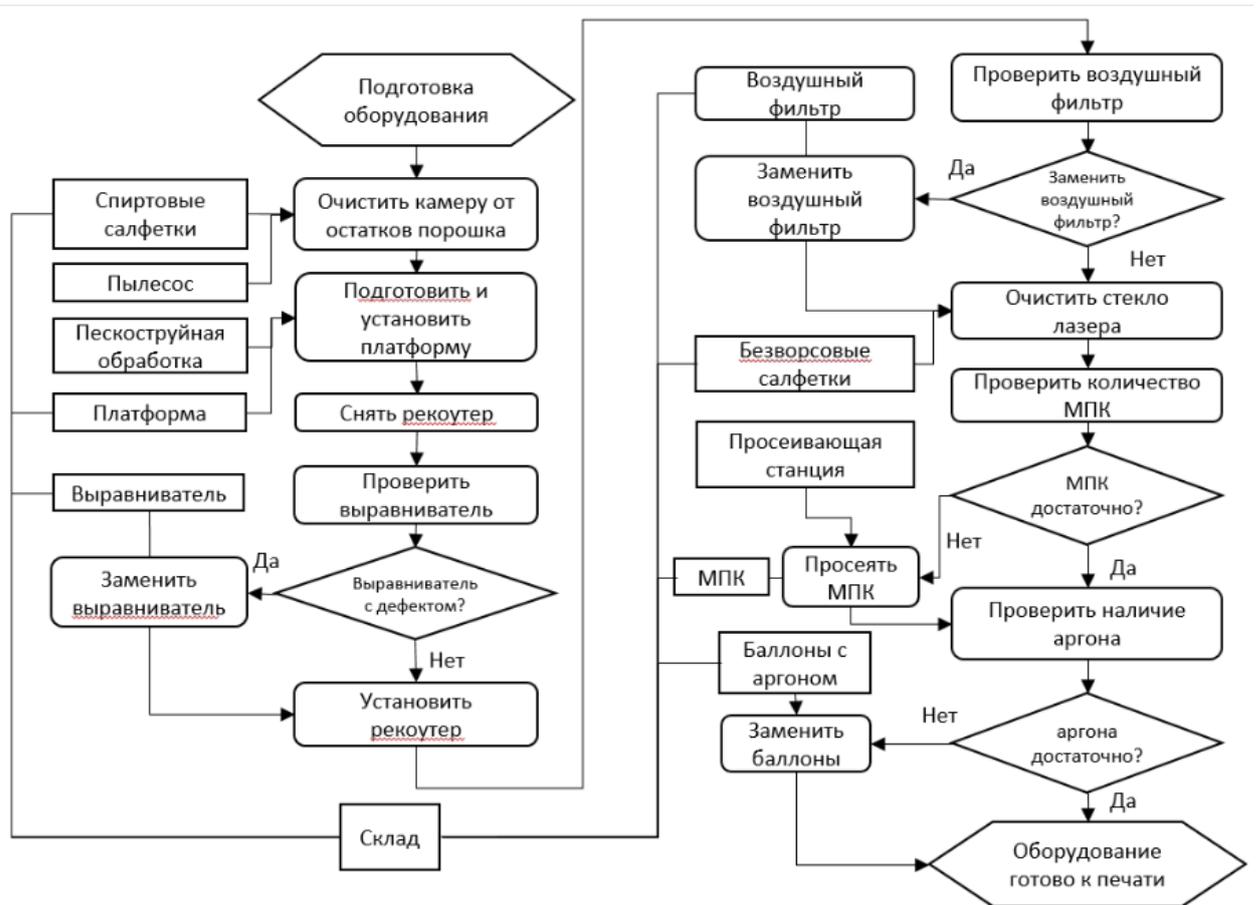


Рисунок 2.3 – Последовательности операций подготовки оборудования

Следующим этапом является входной контроль МПК. В качестве входных данных выступает МПК, элементом управления выступают методика входного контроля и сертификат соответствия МПК, в качестве механизмов – персонал и оборудование. Выходными данными являются протокол входного контроля МПК. Основные этапы входного контроля МПК представлены на рисунке 2.4.

При приемке новой МПК необходимо проверить целостность упаковки и наименование МПК в соответствии с сертификатом соответствия. Порошок следует хранить в защитной среде для предотвращения загрязнения и поглощения влаги. Далее на операции входного контроля МПК необходимо проверить основные технологические свойства МПК: текучесть, насыпную плотность, гранулометрический состав, химический состав и сделать заключение о годности МПК. В случае несоответствия не допускать МПК к производству, вернуть МПК производителю.

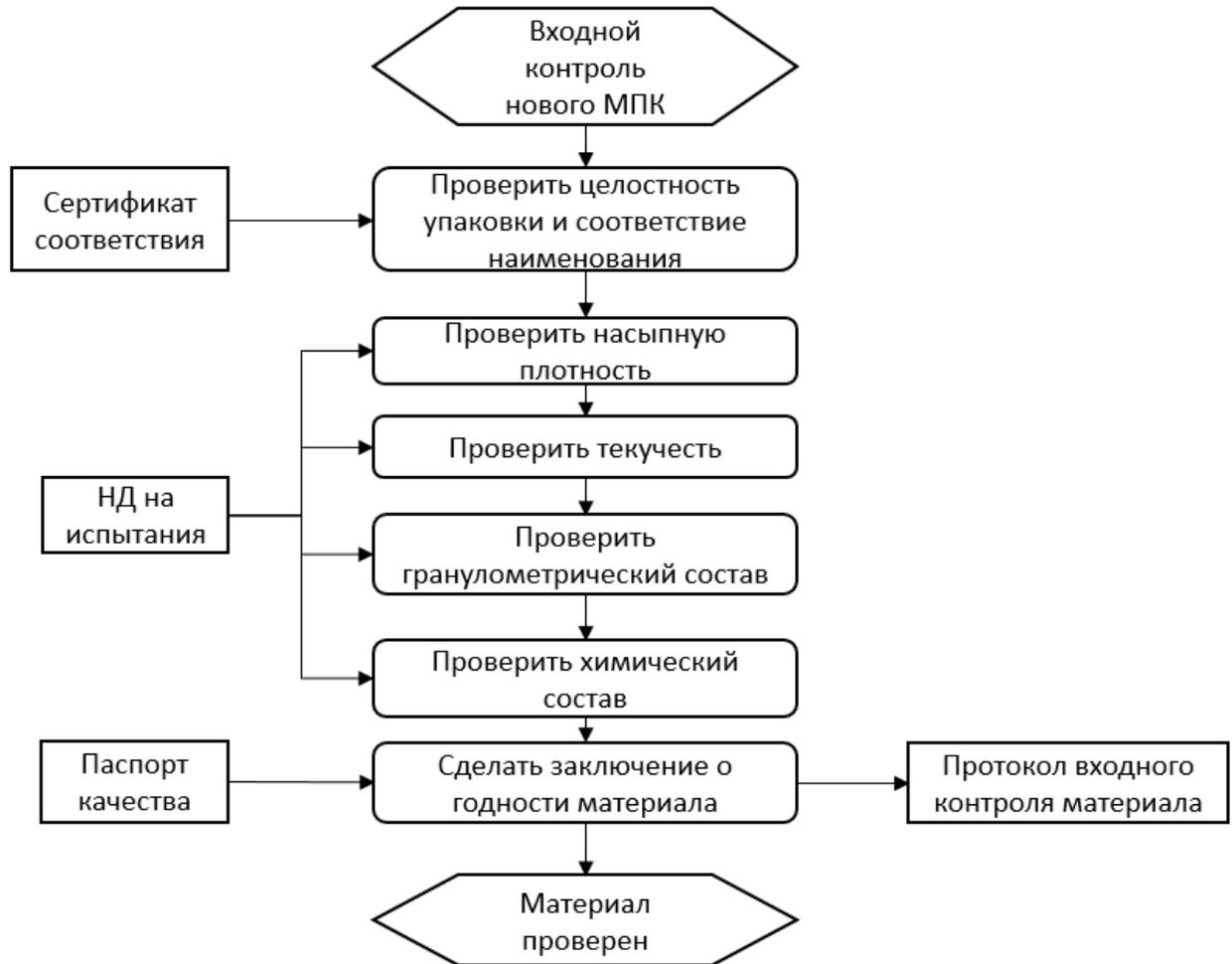


Рисунок 2.4 – Основные этапы процесса входного контроля МПК

Важным этапом является определение технологических параметров СЛС. В качестве входных данных выступают свойства материала. Элементами управления выступают базы данных технологических режимов, технологических поддерживающих структур и опор, и база данных дефектов процесса СЛС. В качестве механизмов – персонал, оборудование и программное обеспечение. Выходными данными являются: управляющая программа и рациональные режимы СЛС, обеспечивающие высокую плотность материала и заданные механические свойства материала. В качестве варьируемых технологических параметров СЛС выбирают: мощность, скорость сканирования, шаг сканирования и толщину слоя [47].

Следующим этапом является 3D-печать заготовок. В качестве входных данных выступают МПК, ЭГМ заготовки и управляющая программа. Элементами управления выступают методика статистического контроля параметров качества, технологические инструкции, база данных стратегии 3D-печати, базы данных технологических режимов. В качестве механизмов – персонал, оборудование и программное обеспечение. Выходными данными является заготовка на платформе построения.

После операции 3D-печати следуют операции постобработки: удаление остатков МПК, термообработка, отделение платформы построения, удаление поддерживающих структур и опор, маркировка. В качестве входных данных выступает заготовка на платформе построения. Элементами управления выступают технологические инструкции на каждой операции. В качестве механизмов – персонал и оборудование.

Важным этапом является комплексный контроль. В качестве входных данных выступает заготовка. Элементами управления выступают методика контроля, технические требования. В качестве механизмов – персонал, оборудование, программное обеспечение. Выходными данными является заготовка, прошедшая контроль и протокол контроля, и акт об изготовлении.

Окончательным этапом является анализ ТП. В качестве входных данных выступает протокол контроля. Элементами управления выступают модель оценки рисков PFMEA и методика статистического управления процессом. В качестве механизмов – персонал и программное обеспечение. Выходными данными является план корректирующих действий (план управления) для устранения выявленных несоответствий.

На основе функциональной модели определены основные операции типового ТП СЛС (рисунок 2.5).

На каждой операции ТП СЛС цифрами обозначены основные группы факторов, оказывающие влияние на показатели качества ТП, которые представлены в виде причинно-следственной диаграммы Исикавы (см. раздел 2.2).



Рисунок 2.5 – Основные операции типового технологического процесса СЛС

2.2 Факторы, оказывающие влияние на качество изготовления заготовок технологией селективного лазерного сплавления

В результате анализа основных операций ТП СЛС выявлено, что во время изготовления заготовок, показатели качества формируются под действием различных факторов. Определено около 130 входящих параметров, часть из которых являются управляемыми (контролируемыми). Часть параметров имеют многофакторное влияние на качество изготавливаемой детали, так размер и форма частиц порошка напрямую влияют на сыпучесть, а также на свойства формируемого слоя, которые в свою очередь определяют качество поверхности детали.

Определены основные группы факторов, оказывающие влияние на показатели качества заготовки в процессе СЛС (рисунок 2.6).

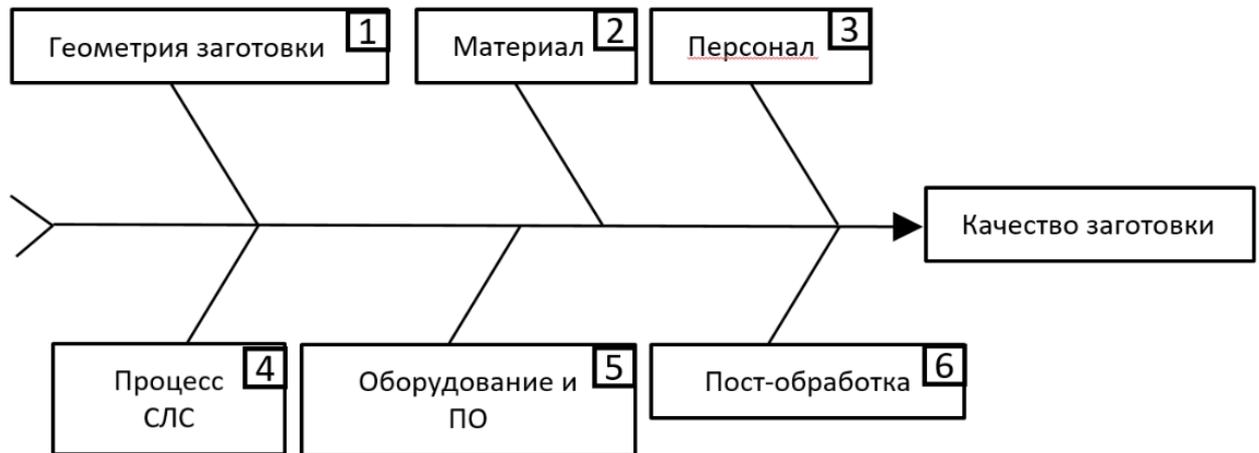


Рисунок 2.6 – Диаграмма Исикавы для качества заготовки, полученной методом СЛС

На качество геометрии заготовки оказывают влияние следующие факторы: качество поверхности 3D-модели, геометрия заготовки, наличие в модели концентраторов напряжений.

На рисунке 2.7 представлена Диаграмма Исикавы в части определения качества синтезируемого материала. Качество синтезируемого материала зависит от свойств частиц новой и вторичной МПК. Основными технологическими параметрами МПК являются насыпная плотность, текучесть.

В процессе СЛС порошок может использоваться повторно, однако свойства уже использованного в процессе порошка отличаются от свойств нового порошка, имеют включения, так называемые, брызги от ванны расплава.

Плотность сплавляемого слоя зависит от размера частиц и их разброса, а также текучести порошка. Размер частиц и распределение: порошок с широким диапазоном размера частиц снижает механические свойства сплавляемых деталей и увеличивает шероховатость. Размер частиц влияет на плотность прилегания внутри слоя, что приводит к формированию необходимой плотности материала. Форма частиц также влияет на формируемую шероховатость поверхности.

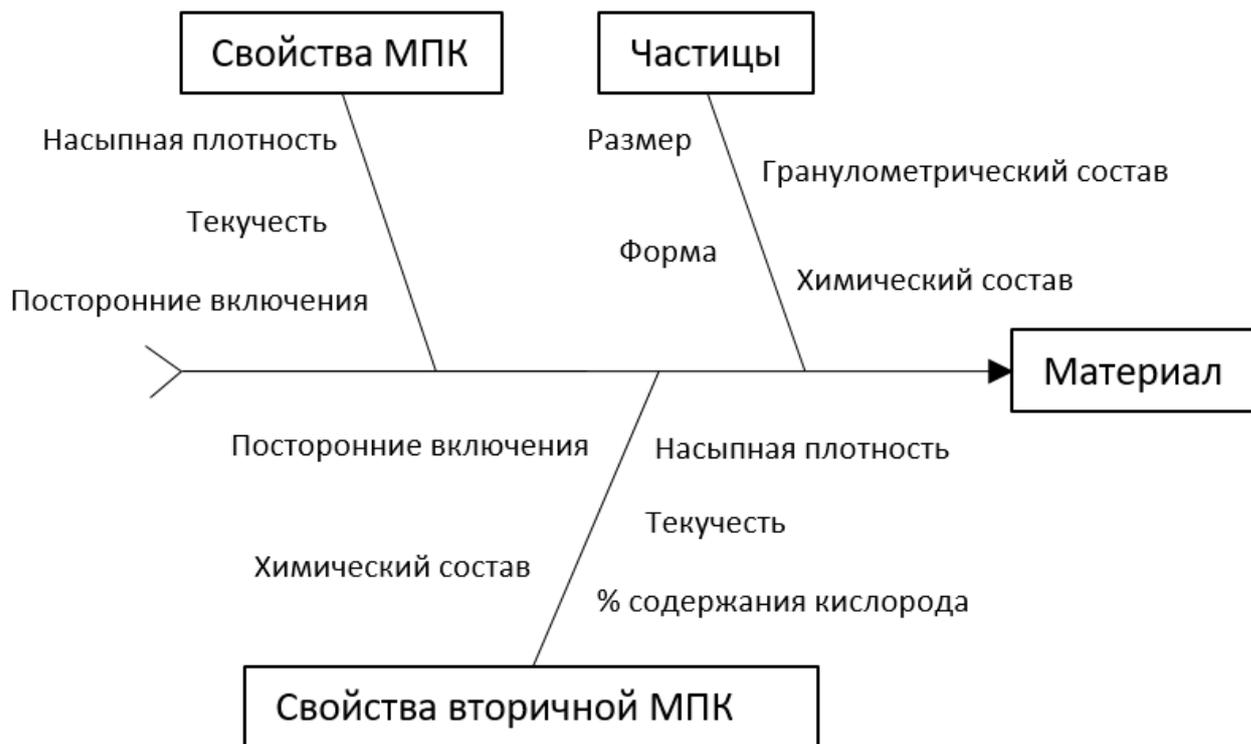


Рисунок 2.7 – Диаграмма Исикавы для технологии СЛС:
качество синтезируемого материала

Требования и ограничения по текучести определяются особенностями установок, типом рекоуторов. Тип рекоутора также определяет, как порошок перемещается вдоль платформы построения, степень сжатия слоя порошка.

Наблюдается тенденция применения порошка небольших фракций с наименьшим разбросом, что позволяет использовать небольшие толщины слоя, высокие скорости сканирования и увеличить производительность, улучшить плотность, следовательно, улучшить микроструктуру. Однако применение очень маленькой фракции снижает текучесть, что не обеспечивает показатели качества процесса СЛС.

Основное влияние на качество оказывают технологические параметры процесса СЛС (рисунок 2.8).

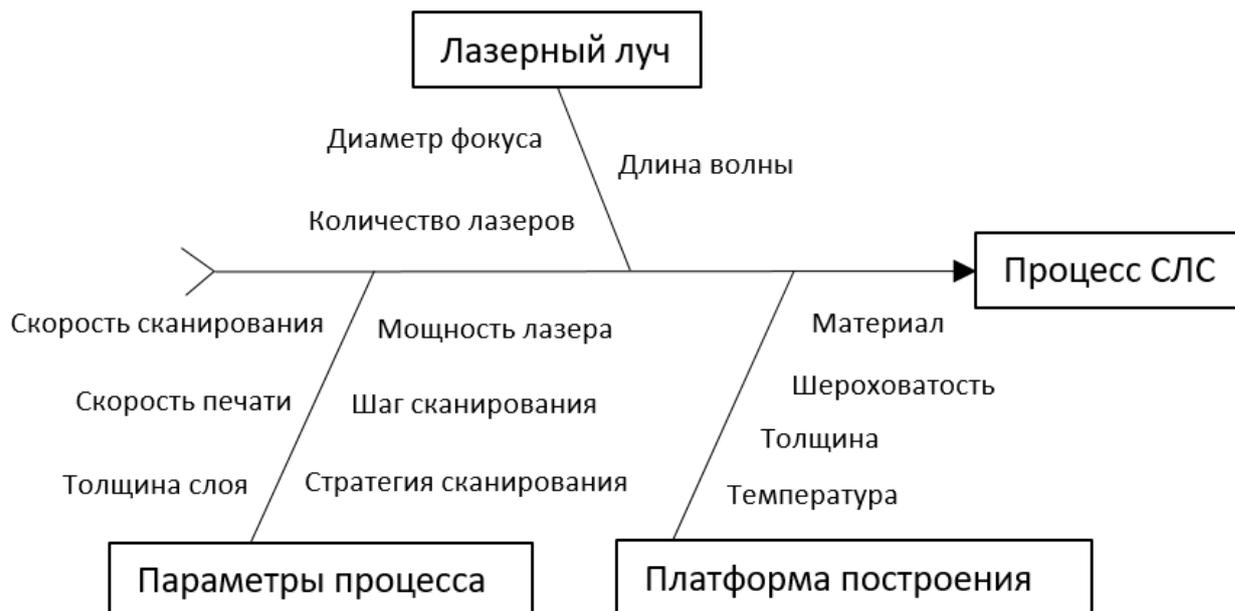


Рисунок 2.8 – Диаграмма Исикавы для процесса СЛС

На диаграмме 2.8 определены следующие технологические параметры процесса СЛС:

- параметры лазерного луча;
- параметры процесса;
- параметры платформы построения.

Скорость и шаг сканирования. Обычно поперечные сечения детали сканируются один раз, при этом один раз или несколько раз сканируется контур каждого сечения. Сканирование контура может быть конечным этапом формирования поверхности. Сканирование внутренней части поперечного сечения определяется различными стратегиями: параллельные прямые сквозь все сечение или островковое сканирование, когда сечение разбивается на небольшие зоны. Треки лазера от слоя к слою образуют угол для минимизации анизотропии свойств материала [5].

Наиболее важным параметром при сканировании является шаг сканирования – расстояние между ближайшими треками лазера. Очевидно, что слишком большой шаг приводит к недостаточному перекрытию треков и, как следствие, увеличивается пористость сплавляемого материала. И наоборот,

слишком сильное перекрытие треков увеличивает общую подводимую энергию на единицу площади и, как следствие, – увеличивается перегрев, что влияет на неоднородность поверхности.

Толщина слоя. При снижении скорости сканирования лазерная энергия полностью или частично проникает в ванну расплава, глубина которой не совпадает с толщиной слоя. Исследования показали, что частицы сплавляются в основном на передней кромке движущегося лазерного пятна, и поэтому большая часть энергии лазера проникает в ванну расплава.

Мощность лазера, скорость сканирования, шаг сканирования – основные технологические параметры, комбинация которых определяет значение плотности энергии E_V [97]. Плотность энергии описывает плотность материала, поэтому наименьшее значение характерно для высокой пористости (неудовлетворительная связь между лазерным треком и формированием пор). При высоких значениях E_V появляется эффект «замочной скважины». Данный эффект образуется в результате чрезмерного испарения материала, приводя к формированию пузырьков внутри затвердевающего материала. Это и приводит к формированию пор. Поэтому E_V – важный входящий/исходный параметр СЛС процесса, максимум плотности может быть достигнут при условии среднего значения E_V , зависящего от материала и толщины слоя.

Плотность энергии нельзя напрямую измерить как скорость сканирования, которая зависит от программы сканирующей системы, устанавливается в зависимости от разбиения детали на слои, зависит от стратегии печати.

На процесс печати оказывают влияние также количество и объем деталей, располагаемых на одной платформе построения, что определяет время между сканированием, температурное распределение.

Форма и геометрическая сложность изделия также влияет на процесс СЛС. Если изделие содержит тонкие элементы: стенки или ячеистую структуру, то теплоемкость нижних слоев уменьшается, а это, в свою очередь, снижает теплопроводность и формирует ванну расплава больших размеров, при этом уменьшается степень охлаждения. Таким образом, структура изделия напрямую

влияет на формируемую микроструктуру. Свойства материала и геометрия изделия обуславливают характер и значения внутренних напряжений и деформаций.

Параметры установки и ПО. Компоненты и системы установок СЛС определяют точность и качество изготовления деталей (рисунок 2.9).

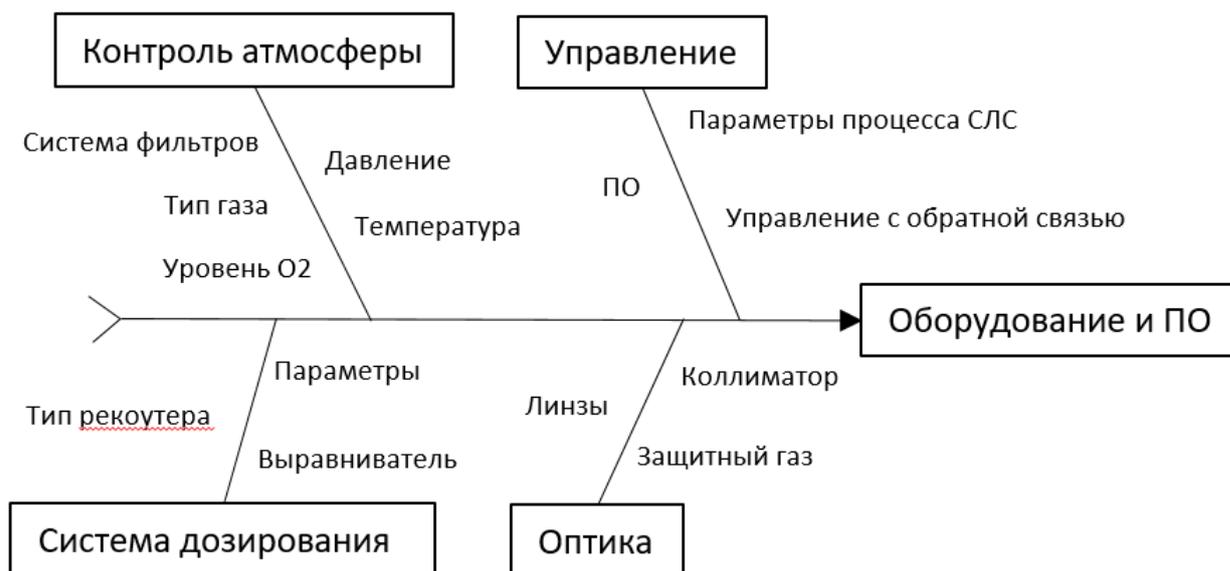


Рисунок 2.9 – Диаграмма Исикавы для технологии СЛС: оборудование ИПО

Главное требование к рекоутору: не оставлять полосы в процессе формирования слоя.

Оптическая система установки (система линз для фокусировки лазерного луча на платформу построения) влияет на процесс сплавления, испарения. Необходимо следить за чистотой зеркал и линз, поскольку это определяет их отражательную способность и стабильность СЛС процесса.

Процесс СЛС происходит в атмосфере аргона или азота для предотвращения образования оксидов и химических реакций с воздухом.

Параметры постобработки. Необходимость постобработки заключается в обеспечении требуемых показателей качества изделия. К сожалению, на сегодняшний день процесс СЛС относится к заготовительному производству и для обеспечения требований, предъявляемым к изделию, требуется доведение поверхности до необходимых характеристик, например, субтрактивными методами обработки.

2.3 Структурирование показателей качества заготовок, влияющих на эксплуатационные свойства

Согласно ГОСТ Р 57586-2017 «Изделия, полученные методом аддитивных технологических процессов. Общие требования» требование к изделию устанавливается в конструкторской документации, в техническом условии, в техническом задании на изготовление изделия. Основные требования к геометрическим параметрам, химическому составу и механическим свойствам изделия устанавливаются в зависимости от назначения изделия в эксплуатации (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Основные требования к изделию

Группа изделий	Назначение	Характеристика	Требование к изделию
1	Изделия общего назначения	Изделия, конфигурация и размеры которых определяются только конструктивными и технологическими требованиями	геометрическая точность; химический состав; пористость.
2	Изделия ответственного назначения	Изделия, рассчитываемые на прочность и работающие при статических нагрузках	геометрическая точность; химический состав; механические свойства; шероховатость.
3	Изделия особо ответственного назначения	Изделия, рассчитываемые на прочность и работающие при циклических и динамических нагрузках	геометрическая точность; химический и фазовый составы; механические свойства; физические свойства; шероховатость; свойства микро- и макроструктуры; эксплуатационные свойства.

Для каждой группы изделий определяется необходимое и достаточное количество показателей качества. Каждый из этих показателей качества зависит от технологических параметров печати, в том числе от свойств исходного и вторичного порошкового материала.

Данный подход является общим и не включает индивидуальные требования потребителей к техническим характеристикам продукции, которые могут существенно отличаться и включать дополнительные параметры.

Существует потребность в разработке подхода к сегментации изделий для обеспечения показателей качества, определяющий уровень значимости связей между требованиями потребителя к продукции и технологическими параметрами подготовки и реализации процесса СЛС.

Одним из методов преобразования потребностей и пожеланий потребителей сначала в технические требования к продукции, затем в технические требования к процессам и, наконец, в технические требования к производству (к оборудованию и способам контроля и управления производством) является методика поэтапного развертывания функции качества (QFD).

Наиболее популярным инструментом структурирования функции качества является «Дом качества» [98].

Показатели качества характеризуются ключевыми показателями – это те показатели, которые обеспечивают минимально допустимые функциональные свойства и степень удовлетворенности потребителем. Поэтому, в случае необходимости, представленный перечень может быть дополнен другими характеристиками или сокращен в соответствии с требованиями заказчика с учетом особенностей эксплуатации изделия.

Для развёртывания функций качества произведено определение степени корреляции между характеристиками продукции и технологическими параметрами процесса. Перечень основных характеристик материалов изделий аддитивного технологического процесса приведен в таблице 2.2 [99].

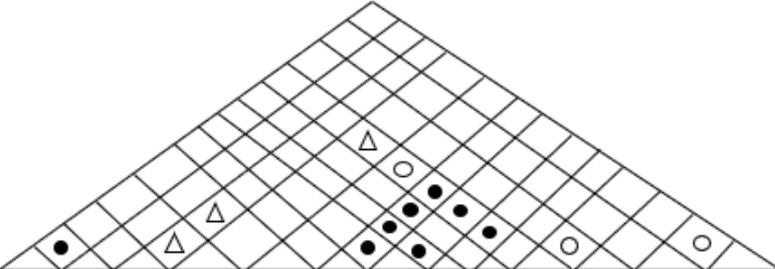
На рисунке 2.10 представлен «Дом качества», которые показывает связь между требованиями к продукции и требованиями к характеристикам процесса.

Таблица 2.2 – Перечень основных характеристик материалов исходных компонентов и материалов изделий

	Наименование характеристики продукции	Содержание требований к характеристике (требования потребителей)
1	Внешний вид	Требования к поверхности
2	Шероховатость	
3	Геометрические размеры	Требования к геометрическим размерам
4	Химический состав	Требование к химическому составу
5	Элементный состав структурных составляющих	
6	Однородность структуры	Требования к структуре
7	Характеристики структуры	
8	Плотность	Требования к физическим и теплофизическим свойствам
9	Теплопроводность	
10	Температурный коэффициент линейного расширения	
11	Твердость	Требования к механическим свойствам
12	Предел прочности, предел текучести и относительное удлинение при растяжении	
13	Предел прочности при сжатии	
14	Предел прочности при изгибе	
15	Сопротивление сдвигу	
16	Характеристики смятия	
17	Характеристики ползучести	
18	Статическая трещиностойкость	
19	Скорость роста усталостной трещины	
20	Ударная вязкость	
21	Предел выносливости	

Установлено, как технологические параметры процесса СЛС соотносятся с тем, что ожидают и хотят получить потребители. В рассматриваемом примере были определены технические характеристики продукции СЛС (см. рисунок 2.10), связанные с основными технологическими параметрами процесса, а именно: насыпная плотность, текучесть, качество 3D-модели, критический угол расположения, количество заготовок на платформе построения, мощность, скорость сканирования, шаг сканирования, толщина слоя, стратегия сканирования, количество лазеров, режим термообработки, режимы постобработки.

Качество изготовления продукции определяется правильным выбором значений этих технологических параметров.



Требования к продукции	Насыщенная плотность	Текущая	3D Качество модели	Критический угол расположения	Количество заготовок на платформе	Мощность	Скорость сканирования	Шаг сканирования	Толщина слоя	Стратегия сканирования	Количество лазеров	Режим термообработки	Режимы постобработки
Внешний вид	•	•	•	Δ	○						○	Δ	Δ
Шероховатость			•	•	○	•	•	•	•	○			•
Геометрические размеры	•	•	Δ	○	○	•	•	•	○			•	•
Химический состав	•	•											
Элементный состав структурных составляющих	•	•											
Однородность структуры	•	•				•	•	•			○	○	
Плотность	•	•				•	•	•		○		•	
Твердость	•	•				•	•	•		•		•	
Предел прочности, предел текучести и относительное удлинение при растяжении	•	•		•		•	•	•	•	•		•	•
Предел прочности при сжатии	•	•		•		•	•	•	•	•		•	•
Предел прочности при изгибе	•	•		•		•	•	•	•	•		•	•
Сложность реализации требований													

Рисунок 2.10 – Дом качества, устанавливающий связь между характеристиками продукции и требованиями к характеристикам процесса.

Посредством матрицы связей исследуется взаимосвязь между техническими характеристиками (параметрами) продукции и технологическими параметрами процесса. Пустая (незаполненная) строка в матрице связей означает отсутствие какой-либо связи между техническими характеристиками продукции и соответствующим ожиданием потребителя, записанным в этой строке (ни одна из технических характеристик продукции не может удовлетворить данное ожидание потребителей). В результате устанавливаются индикаторы (критерии) выполнения важнейших (критических) процессов.

2.4 Разработка модели оценки рисков, построенной на основе анализа видов, последствий и причин потенциальных несоответствий технологического процесса селективного лазерного сплавления (PFMEA)

Одной из основных задач системы менеджмента качества является обеспечение выявления потенциальных несоответствий (дефектов) и предотвращение их появления на всех стадиях жизненного цикла продукции. Метод анализа видов и последствий потенциальных дефектов (FMEA) (далее – метод FMEA) – это эффективный инструмент повышения качества разрабатываемых технических объектов, направленный на предотвращение дефектов или снижение негативных последствий от них. Это достигается благодаря предвидению дефектов и (или) отказов и их анализу, проводимому на этапах проектирования конструкции и производственных процессов. Метод может быть также использован для доработки и улучшения конструкций и процессов, запущенных в производство [100].

Метод FMEA позволяет проанализировать потенциальные дефекты, их причины и последствия, оценить риски их появления и обнаружения на предприятии и принять меры для устранения или снижения вероятности и ущерба от их появления. Это один из наиболее эффективных методов доработки конструкции технических объектов и процессов их изготовления на таких важнейших стадиях жизненного цикла продукции, как ее разработка и подготовка к производству.

Анализ видов и последствий дефектов процесса PFMEA представляет собой процедуру анализа первоначально разработанного и предложенного (процесса) производства и доработки этого процесса в ходе работы, соответствующей PFMEA-команды.

PFMEA проводят на этапе разработки производственного процесса и это позволяет предотвратить внедрение в производство недостаточно отработанных процессов.

Используя разработанную функциональную модель процесса СЛС (рисунок 2.1), составлено дерево структурного анализа ТП СЛС. Фрагмент дерева структурного анализа ТП СЛС представлен на рисунке 2.11.

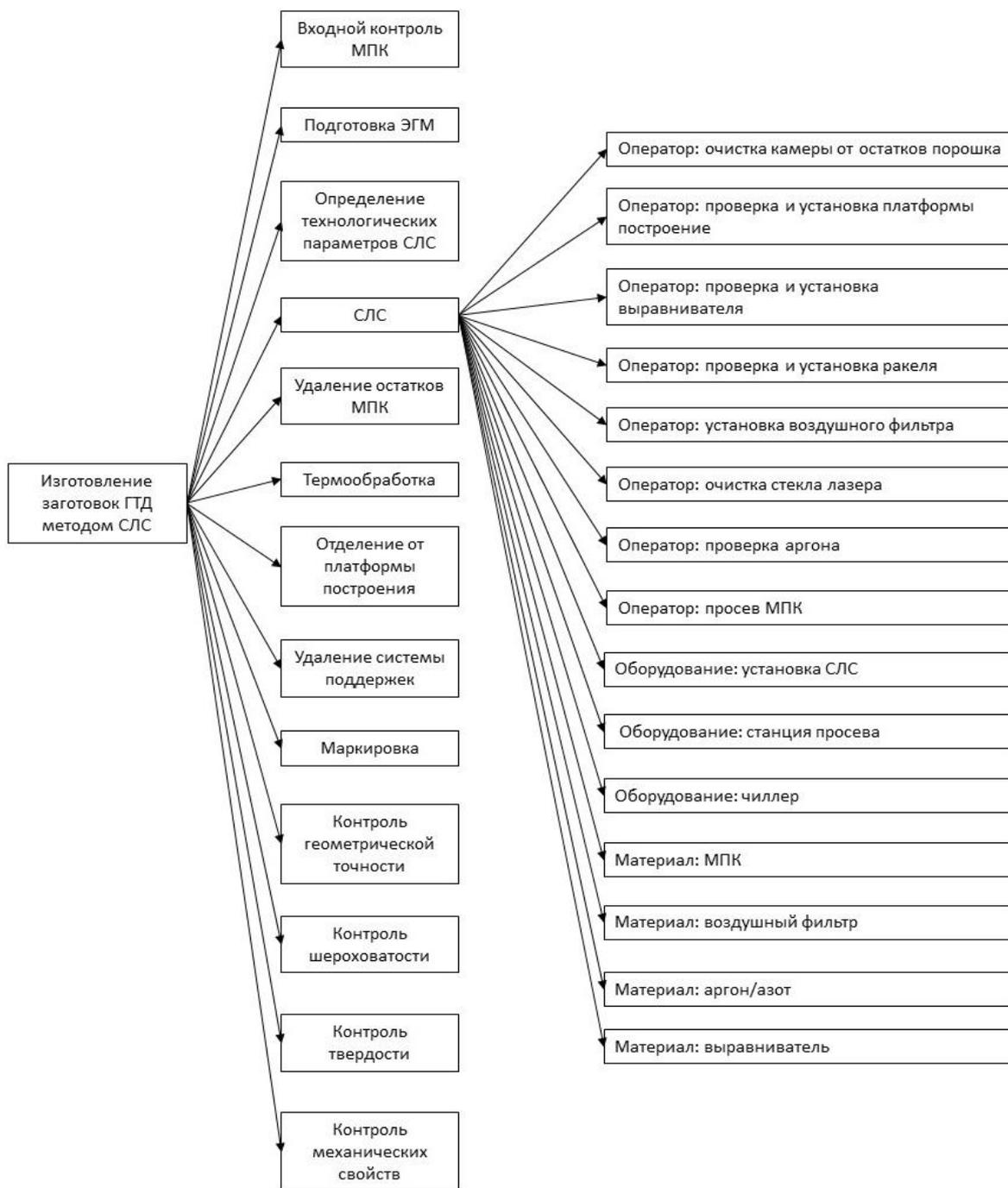


Рисунок 2.11 – Фрагмент дерева структурного анализа процесса изготовления заготовок технологией СЛС

На основе функционального анализа определены функции процесса, основных операций ТП СЛС и их элементов (рисунок 2.12).

Структурный и функциональный анализ технологического процесса селективного лазерного сплавления представлен в приложении Б.



Рисунок 2.12 – Фрагмент дерева функционального анализа процесса изготовления заготовок технологией СЛС

Изделия, полученные методом АП, неполностью изучены, особенно в отношении нежелательных дефектов, возникающих во время процесса СЛС. На основе теоретического анализа выделим возможные дефекты, возникающие в процессе изготовления заготовок технологией СЛС.

При изготовлении изделий ракетно-космической отрасли образуются следующие типы дефектов и несоответствия для процесса синтеза на подложке [101]:

- общее смещение слоев (искажение поверхности заготовки детали, выражающееся в смещении слоев относительно заданной модели, характерное для всех деталей и образцов, синтезированных за один технологический цикл)
- локальное смещение слоев (локальное искажение поверхности заготовки детали, выражающееся в смещении слоев на тонких сечениях детали относительно заданной модели, связанное с действием локальных напряжений при синтезе тонкостенных элементов детали в местах перехода в массивное сечение);

– неметаллические включения (наличие частиц инородных включений (керамики, шлака, размольных тел и т.п.), не являющихся армирующими добавками (для композиционных материалов)).

– пористость (единичная газовая или усадочная полость произвольной формы либо группа таких полостей, распределенных в металле изделия);

– несоответствие требуемым параметрам шероховатости;

– несплавление (несплошности и пустоты в металле, содержащие внутри частицы сырьевого материала).

В таблице 2.3 приведены виды дефектов в деталях, возникающих в процессе их производства и эксплуатации, даны количественные и качественные показатели дефектов и указаны причины их образования.

Таблица 2.3 – Виды дефектов в деталях, изготовленных по технологии СЛС

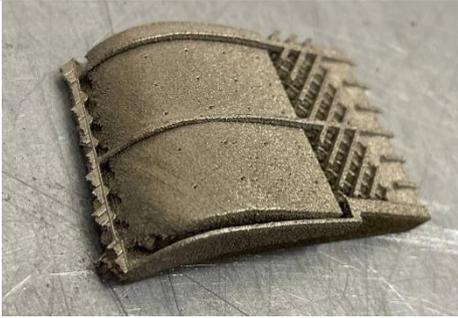
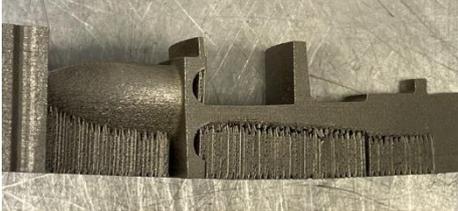
Классы дефектов по степени важности	Вид дефекта	Количественные и качественные показатели	Возможные причины образования
Первая	Несплавление – нарушение сплошности материала (трещины поверхностная, внутренняя, сквозная)	Размер дефекта в плане. Глубина и направление трещины. Расположение трещины на детали	Кристаллизационные напряжения Локальное несплавление слоя, нарушение дозировки порошка
Вторая	Пористость – раковина, скопления крупных пор)	Доля объема V_p , % Предел прочности σ_b , МПа	Локальное несплавление слоя, нарушение дозировки порошка Захват молекул (азот, аргон) в процессе синтеза
Третья	Общее и локальное смещение слоев	Геометрическая точность	Остаточные напряжения Усадочные процессы
Четвертая	Несоответствие требуемым параметрам шероховатости	Высота неровностей профиля по десяти точкам R_z , мкм	Узкий интервал оптимальных параметров лазерного синтеза
Пятая	Неметаллические включения	Наличие частиц инородных включений (керамики, шлака, размольных тел и т.п.), не являющихся армирующими добавками (для композиционных материалов).	

В таблице 2.4 представлены примеры дефектов технологии СЛС при изготовлении деталей ракетно-космической отрасли.

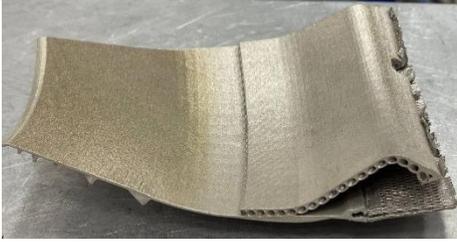
Таблица 2.4 – Примеры дефектов технологии СЛС при изготовлении деталей ракетно-космической отрасли

Номер класса	Фото изображение дефекта	Наименование дефекта
1 класс	 <p data-bbox="644 871 911 904">Материал: ВВ751П</p>	Трещина поверхностная
1 класс	 <p data-bbox="644 1288 911 1323">Материал: AlSi10Mg</p>	Трещина сквозная
1 класс	 <p data-bbox="644 1662 911 1700">Материал: AlSi10Mg</p>	Поверхностная трещина
1 класс	 <p data-bbox="644 2009 911 2042">Материал: AlSi10Mg</p>	Нарушение сплошности материала – раковина

Продолжение таблицы 2.4

1 класс	 <p>Материал: ВТ6</p>	Трещина поверхностная
1 класс	 <p>Материал: ВВ751П</p>	Трещина сквозная
1 класс	 <p>Материал: AlSi10Mg</p>	Нарушение сплошности материала
2 класс	 <p>Материал: In738</p>	Микропористость, распределенная во всем объеме материала
3 класс	 <p>Материал: ВВ751П</p>	Остаточные напряжения

Окончание таблицы 2.4

4 класс	 <p>Материал: ВЖ159</p>	Повышенная шероховатость
4 класс	 <p>Материал: AlSi10Mg</p>	Повышенная шероховатость
4 класс 1 класс	 <p>Материал: VT6</p>	Повышенная шероховатость Несплавление (Трещина сквозная)

Пористость, как правило, обуславливается недостаточной мощностью сплавления (недостатком энергии для полного сплавления). Характерным признаком такого несоответствия процесса является наличие в образцах, в порах или рядом с порами несплавленных частиц МПК.

Геометрическая точность печати, минимальный размер геометрических элементов определяется преимущественно размерами пятна лазерного пучка (размер, профиль, симметрия) и размерами частиц МПК. Минимальные размеры элементов и меньшая толщина слоя сплавления достигаются посредством косвенного (опосредованного) варьирования скорости застывания (охлаждения/осаждения) металла, за счёт управления подводом тепла посредством лазерного пучка. Получение протяжённых элементов конструкции изделия минимальной толщины возможно сплавлением одним проходом лазерного пучка, получение одиночных выступов – точечным касанием лазерного пучка.

Шероховатость поверхности по контуру изделия (боковым поверхностям), обуславливаемая послойным изготовлением изделия, может быть снижена посредством уменьшения толщины слоя.

Определены причины отказов и последствия возникновения отказов на каждой операции ТП СЛС (таблица 2.5).

Таблица 2.5 – Перечень отказов, причины и последствия отказа

Операция процесса	Отказ операции процесса	Причина отказа в элементах функционирования процесса	Последствие отказа элемента
Входной контроль МПК	Химический состав, гранулометрический состав, форма и микроструктура, насыпная плотность и текучесть МПК не соответствует требованиям ТД	Контроллер: ошибка оператора при проведении контроля	Несвоевременный запуск в производство Увеличение сроков производства
		Оборудование: оборудование не соответствует требованиям ТД, сбой в работе оборудования	
		Производственная среда: освещение не соответствует нормам НД	
Подготовка ЭГМ	ЭГМ не соответствует требованиям ТД	Технолог: ошибка технолога при оптимизации геометрии изделия	Исправимый брак. Увеличение сроков производства, за счет дополнительной трудоемкости на доработку
		Технолог: ошибка технолога при разработке 3D-модели заготовки	
		Производственная среда: освещение не соответствует нормам НД	
Определение технологических параметров СЛС	Точность геометрических параметров не соответствует требованиям ТД	Технолог: ошибка оператора при разработке УП	Исправимый или неисправимый брак. Увеличение сроков производства, за счет дополнительной трудоемкости на доработку
		Оператор: ошибка оператора при установке режимов СЛС	
	Шероховатость поверхности не соответствует требованиям ТД	Технолог: ошибка оператора при разработке УП	Исправимый брак. Увеличение сроков производства, за счет дополнительной трудоемкости на доработку
		Технолог: ошибка оператора при установке режимов СЛС	
	Несплавление (трещины и т.д.)	Технолог: ошибка оператора при установке режимов СЛС	Исправимый или неисправимый брак. Увеличение сроков производства, за счет дополнительной трудоемкости на доработку

СЛС	Точность геометрических параметров не соответствует требованиям ТД	Оператор: ошибка при проверке и установке платформы построения	Исправимый или неисправимый брак. Увеличение сроков производства, за счет дополнительной трудоемкости на доработку
		Оператор: ошибка при проверке и установке выравнителя	
		Оператор: ошибка при установке ракеля	
		Оператор: ошибка при установке фильтра	
		Оператор: грязное стекло лазера	
		Оператор: нехватка аргона	
		Оператор: несвоевременный просев МПК	
		Оборудование: сбой в работе установке СЛС и программного обеспечения	
		Оборудование: неисправность работы станции просева	
		Оборудование: неисправность работы чиллера	
		Материал: МПК не соответствует ТД	
		Материал: воздушный фильтр не соответствует ТД	
		Материал: аргон не соответствует ТД	
		Материал: выравнитель не соответствует ТД	
Шероховатость поверхности не соответствует требованиям ТД	Оператор: ошибка очистки камеры от остатков порошка	Исправимый брак. Увеличение сроков производства, за счет дополнительной трудоемкости на доработку	
	Оператор: ошибка при проверке и установке платформы построения		
	Оператор: ошибка при проверке и установке выравнителя		
		Оператор: ошибка при установке ракеля	
		Оператор: ошибка при установке фильтра	
		Оператор: грязное стекло лазера	
		Оператор: нехватка аргона	
		Оборудование: неисправность работы чиллера	
		Материал: МПК не соответствует ТД	
		Материал: воздушный фильтр не соответствует ТД	
		Материал: аргон не соответствует ТД	

		Материал: выравниватель не соответствует ТД	
Пористость не соответствует требованиям ТД		Оператор: ошибка при установке фильтра	Неисправимый брак. Увеличение сроков производства, за счет дополнительной трудоемкости на замену продукции
		Оператор: грязное стекло лазера	
		Оборудование: сбой в работе установки СЛС и программного обеспечения	
		Оборудование: неисправность работы станции просева	
		Оборудование: неисправность работы chillera	
		Материал: МПК не соответствует ТД	
		Материал: воздушный фильтр не соответствует ТД	
		Материал: аргон не соответствует ТД	
		Материал: выравниватель не соответствует ТД	
Несплавление		Оператор: ошибка при проверке и установке платформы построения	Исправимый или неисправимый брак. Увеличение сроков производства, за счет дополнительной трудоемкости на доработку
		Оператор: ошибка при проверке и установке выравнивателя	
		Оператор: ошибка при установке rackеля	
		Оператор: ошибка при установке фильтра	
		Оператор: грязное стекло лазера	
		Оператор: нехватка аргона	
		Оператор: несвоевременный просев МПК	
		Оборудование: сбой в работе установки СЛС и программного обеспечения	
		Оборудование: неисправность работы станции просева	
		Оборудование: неисправность работы chillera	
Материал: воздушный фильтр не соответствует ТД			
Материал: аргон не соответствует ТД			
Материал: выравниватель не соответствует ТД			

	Неметаллические включения	Материал: МПК не соответствует ТД	Брак продукции. Увеличение сроков производства
Удаление остатков МПК	Чистота удаления остатков МПК не соответствует ТД	Оператор: ошибка при удалении остатков МПК	Исправимый брак. Увеличение сроков производства, за счет дополнительной трудоемкости на доработку
		Оборудование: неисправность оборудования	
		Производственная среда: освещение не соответствует нормам НД	
		Давление воздуха не соответствует ТД	
Термообработка	Геометрические размеры заготовки не соответствуют требованиям ТД	Оператор: нарушение технологии термической обработки	Исправимый или неисправимый брак. Увеличение сроков производства, за счет дополнительной трудоемкости на доработку или замену на запасную продукцию
		Оборудование: неисправность оборудования	
Отделение от платформы построения	Геометрические размеры заготовки не соответствуют требованиям ТД	Оператор: ошибка оператора при установке заготовки	Исправимый или неисправимый брак. Увеличение сроков производства, за счет дополнительной трудоемкости на доработку
		Оборудование: неисправность электроэрозийного оборудования, сбой в работе программного обеспечения	
		Производственная среда: освещение не соответствует нормам НД	
Удаление системы поддержек	Геометрические размеры заготовки не соответствуют требованиям ТД	Оператор: ошибка оператора при удалении системы поддержек	Исправимый брак. Увеличение сроков производства, за счет дополнительной трудоемкости на доработку
		Оборудование: поломка слесарного оборудования	
		3. Производственная среда: освещение не соответствует нормам НД	
Маркировка	Маркировка не соответствует требованиям ТД	Оператор: ошибка оператора при нанесении маркировки	Увеличение сроков производства, за счет дополнительной трудоемкости на доработку
		Оборудование: сбой оборудования	
		Производственная среда: освещение не соответствует нормам НД	
Контроль геометрической точности	Точность геометрических параметров не соответствует требованиям ТД	Контроллер: ошибка оператора при проведении измерений	Исправимый брак. Увеличение сроков производства, за счет дополнительной
		Оборудование: сбой в работе СИ	

		Производственная среда: освещение и температура не соответствует нормам НД	трудоемкости на доработку
Контроль шероховатости	Шероховатость не соответствуют требованиям ТД	Контроллер: ошибка оператора при проведении измерений	Исправимый брак. Увеличение сроков производства, за счет дополнительной трудоемкости на доработку
		Оборудование: сбой в работе СИ	
		Производственная среда: освещение и температура не соответствует нормам НД	
Контроль твердости	Твердость не соответствуют требованиям ТД	Контроллер р: ошибка оператора при проведении измерений	Исправимый брак. Увеличение сроков производства, за счет дополнительной трудоемкости на доработку
		Оборудование: сбой в работе СИ	
		Производственная среда: освещение и температура не соответствует нормам НД	
Контроль механических свойств	Механические свойства не соответствуют требованиям ТД	Контроллер: ошибка оператора при проведении измерений	Неисправимый брак. Увеличение сроков производства, за счет дополнительной трудоемкости на производство запасной продукции
		Оборудование: сбой в работе СИ	
		Производственная среда: освещение и температура не соответствует нормам НД	

Оценка последствий отказов проводилась на основе критериев значимости *S*. [57]. Результаты оценки представлены в бланке протокола PFMEA анализа (приложение В, Г).

Анализ протокола выявил, что наиболее значимыми являются отказы на операции СЛС, которые приводят к высокому уровню последствий. Данные последствия являются трудоемкими для последующего устранения, а иногда просто невозможными. В этом случае продукция считается бракованной, что приводит к срыву сроков производства.

Определены меры по предупреждению причин возникновения отказов *O* на каждой из операций технологического процесса и действия по их обнаружению *D*. В ходе анализа выявлено, что высокая вероятность отказа вызвана человеческим фактором (действиями оператора, технолога, контролера).

Для каждого элемента операции ТП изготовления определен приоритет действий *H* (high), *M* (medium), *L* (low) для оценки и устранения рисков возникновения дефектов в процессе изготовления заготовок методом СЛС.

Отказу оборудования, применяемого в процессе операции СЛС, присвоен высокий приоритет действий (*H*). В большей степени это связано со стабильностью работы отечественного оборудования.

Отказу, вызванному низкой квалификацией операторов, присвоен средний уровень приоритета действий (*M*).

Низкий приоритет для рассмотрения и принятия мер (*L*) получили причины наименее значимых отказов на операциях удаления остатков МПК и отделения от платформы построения, где вероятность ошибки минимальная.

В результате анализа технологического процесса PFMEA определены мероприятия, направленные на повышение показателей качества технологического процесса изготовления заготовок ГТД методом СЛС:

- разработка рабочих инструкций для основных операций технологического процесса;
- разработка плана управления технологическим процессом;
- рекомендовано строгое соблюдение графиков поверки оборудования на каждой операции технологического процесса.

Заключение по главе 2

1. Разработана функциональная модель обеспечения показателей качества изделия, изготовленных технологией селективного лазерного сплавления с агрегированием ключевых этапов и артефактов процесса селективного лазерного сплавления для составления карты дефектов процесса с целью комплексного анализа потенциальных несоответствий. Выделено 13 ключевых этапов, установлены связи с этапами и агрегировано 6 групп дефектов, вошедших в разработанную карту дефектов.

2. Проведен структурный, функциональный анализ технологического процесса изготовления деталей технологией селективного лазерного сплавления. Определены ключевые операции технологического процесса, на которых контроль показателей процесса обеспечивает управления качеством продукции.

3. Проведен анализ потенциальных несоответствий и разработан научно обоснованный подход для создания и выполнения плана корректирующих действий, предотвращающих появление дефектов при реализации технологии селективного лазерного сплавления изготовления деталей.

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

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

3 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПОВЫШЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЕЙ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ

Процесс АП подвержен определенной изменчивости вследствие наличия большого количества воздействующих факторов. Поэтому наблюдаемые результаты работы процесса также непостоянны. Исследование этой изменчивости позволяет достичь понимания ее природы, что обеспечивает возможность управления процессом.

Стандартный статистический контроль ТП хорошо работает для определения состояния процесса. Для переменных данных, которые, как предполагается, следуют нормальному распределению, статистический контроль использует две контрольные карты для каждой характеристики качества. Одна диаграмма отслеживает центр процесса, а другая отслеживает дисперсию или вариабельность процесса. Для атрибутивных данных, которые обычно подчиняются либо пуассоновскому, либо биномиальному распределению, для наблюдения за процессом требуется только одна диаграмма. Это связано с тем, что среднее значение процесса и дисперсия процесса связаны друг с другом как для пуассоновского, так и для биномиального распределения.

Для нормального распределения среднее значение и дисперсия процесса не зависят друг от друга и, следовательно, необходимы две диаграммы. Кроме того, в целях соответствия, если характеристика качества имеет двусторонние допуски, требуется набор из четырех индексов возможностей для определения соответствия характеристики. Для одностороннего допуска требуется только один индекс возможностей для определения соответствия.

Очевидно, что, если стандартный статистический контроль используется для управления ТП сложной детали с большим количеством характеристик качества, количество контрольных карт и индексов воспроизводимости процесса становится очень большим. Эта ситуация распространена в аэрокосмической

промышленности, где детали, как правило, сложнопрофильные. Например, лопатка соплового аппарата имеет более 60 основных характеристик – 60 точек профиля пера, каждая координата которой должна находиться в допуске. В таком случае количество контрольных карт, необходимых для мониторинга процесса, будет больше 100, а количество индексов воспроизводимости будет больше 200, чтобы полностью охарактеризовать управляемость процесса, если бы все спецификации были двусторонними.

В целях управления ТП изготовления сложнопрофильной детали трудно отслеживать такое количество контрольных карт и индексов воспроизводимости. Стоит отметить, что стандартный статистический контроль подразумевает собственный набор диаграмм для каждой характеристики. В этом случае хронология обработки может быть потеряна, если производственная последовательность осуществляется по характеристикам показателей качества. В таких случаях каждая диаграмма будет отображать данные для определенного показателя качества в последовательности деталей, в то время как детали были изготовлены в последовательности показателей качества. При потере видимости хронологии обработки трудно обнаружить зависящие от времени сдвиги/дрейфы процесса.

Существует потребность в методологии для уменьшения количества диаграмм при сохранении хронологии процесса. Идея сокращения количества контрольных карт для анализа процесса не нова [90]. Краткосрочный статистический контроль – это устоявшаяся методология, позволяющая сократить количество контрольных карт до одной диаграммы для атрибутивных данных или до одного набора из двух диаграмм для переменных данных независимо от количества качественных характеристик на деталь [90]. Таким образом, если деталь имеет 10 характеристик качества переменного типа в стандартном статистическом контроле, для управления технологическим процессом требуется 10 наборов из двух диаграмм, по одному набору на показатель качества. При реализации краткосрочного статистического контроля количество контрольных карт может быть уменьшено до одного набора из двух карт. Однако каждая

подгруппа наносится на каждую диаграмму 10 раз, по одному разу для каждого показателя качества. Таким образом, при уменьшении количества графиков с 10 наборов до одного набора из двух, количество подгрупп в каждом краткосрочном графике увеличивается в десять раз. В зависимости от количества показателей качества на деталь краткосрочная диаграмма может очень быстро стать очень загруженной. Следует отметить, что краткосрочные диаграммы не сокращают количество индексов воспроизводимости.

Помимо увеличения длины, еще одним недостатком краткосрочных графиков является то, что они подвержены неправильному толкованию. Например, рассмотрим необычное событие, которое на обычной контрольной карте представляет собой одну подгруппу выше верхнего контрольного предела или ниже нижнего контрольного предела. Такое событие будет помечено как «вышедшее из-под контроля». Как объяснялось ранее, в краткосрочной схеме одна подгруппа деталей со многими характеристиками качества имеет столько же наборов средних и дисперсий подгруппы, каждый набор представляет показатель качества, и все они наносятся на диаграммы по отдельности. Следовательно, при возникновении необычного события возможно, что данные подгруппы, относящиеся ко всем характеристикам качества одной подгруппы деталей, попадают на одну и ту же сторону от центральной линии диаграммы. В этих условиях, если количество характеристик качества на подгруппу превышает семь, контрольная карта будет показывать более семи точек по одну сторону от средней линии. Это было бы ложно истолковано как изменение процесса, тогда как на самом деле это было необычное событие. Обратите также внимание на то, что подгруппа не должна выходить из-под контроля для ложного указания на сдвиг процесса. Если данные подгруппы находятся достаточно далеко от центральной линии диаграммы и между контрольными пределами, существует высокая вероятность того, что данные подгруппы для всех характеристик качества, принадлежащих одной подгруппе деталей, окажутся по одну сторону от центральной линии. Очевидно, это также было бы ложно истолковано как изменение процесса, когда в действительности процесс находился под контролем.

Характерными чертами аддитивного производства, в частности технологии СЛС, являются небольшой размер партии, короткое время выполнения заказа, частые настройки/переналадки и ограниченные данные процесса. Поэтому технология селективного лазерного сплавления на сегодняшний день относится к мелкосерийному производству, ближе к единичному [102].

В таких условиях традиционные методы статистического управления процессами не работают. Для возможности анализа технологического процесса статистическими методами контроля требуется их модификация.

Разработка методики комплексного применения статистического контроля в условиях мелкосерийного аддитивного производства является важной задачей. Она основан на критическом анализе имеющихся контрольных карт и индексов воспроизводимости процесса. Такой комбинированный анализ и применение статистического контроля, включая исследование возможностей краткосрочных процессов в аддитивном производстве, в профессиональной литературе пока не встречается.

3.1 Аналитический анализ существующих методов и подходов управления процессом

Наиболее исчерпывающий обзор методов статистических методов контроля для краткосрочных условий предложил P.F. Tang [79]. В аналитической части оценивались различные методы построения контрольных карт с использованием таких факторов, как степень зрелости, практическая применимость, относительная простота, преобладание преимуществ над недостатками [81].

Проанализировав различные подходы к индексам краткосрочных возможностей, разделили индексы воспроизводимости на 5 групп [81]:

1. Индексы воспроизводимости типа $A - C_p$, C_{pk} для процессов с постоянным изменением для всех продуктов, рассчитанных на основе преобразованных данных (отклонения от целевого значения).

2. Индексы воспроизводимости типа В – C_p , C_{pk} для процессов с постоянным изменением для всех продуктов, рассчитанные на основе исходных измерений.

3. Индексы воспроизводимости типа С – C_p , C_{pk} для процессов с неравномерным изменением всех продуктов. Эти оценки не часто базируются на достаточном объеме данных. По этой причине индексы способностей типа С не очень точны.

4. Индексы воспроизводимости типа D – C_p , C_{pk} с использованием унификации различных допусков на основе линейного преобразования измеряемых величин.

5. Индексы воспроизводимости типа E – C_{pm} и диаграмма производительности.

При выборе подходящих краткосрочных контрольных карт в некоторых случаях необходимо проверить предположение о том, что стандартное отклонение процесса примерно одинаково для всех частей [81]. В профессиональной литературе можно найти несколько методов оценки однородности дисперсии процесса: диаграмма средних диапазонов (R -бар), тест знакового ранга Уилкоксона, Критерий Фишера F -тест, тест Бартлетта, тест Левена, тест Брауна-Форсайта, тест Кохрена [102,103]. Эти методы были проанализированы с учетом их сложности, точности, чувствительности к конкретным предположениям и их доступности в обычных программных продуктах статистического анализа. Затем были определены преимущества и недостатки выбранных методов, чтобы предложить пользователям простую методологию их применения в связи с выбором подходящей контрольной карты краткосрочного периода (см. таблицу 3.1).

Из таблицы 3.1 видно, что для анализа выборок случайных величин (временных рядов) на предмет отсутствия тренда в характеристиках измеряемой величины в приложениях используется целый ряд параметрических и непараметрических критериев проверки гипотез.

Таблица 3.1 – Методы оценки однородности вариаций [81]

Метод	Преимущества	Недостатки
Диаграмма средних диапазонов (R-бар)	Графическое отображение всех оцениваемых продуктов Просто запрограммировать	Менее точная мера вариации
Тест знакового ранга Уилкоксона	Простой Четкое правило принятия решения	Менее точный
Критерий Фишера F-тест	Более точный Простой Стандартная часть большинства продуктов ПО	Подходит для сравнения только 2 образцов Чувствителен к отклонениям от нормальности
Критерий Барлетта	Подходит для k образцов Тест с высокой мощностью	Более сложный Чувствителен к отклонениям от нормальности
Leven тест	Подходит для k образцов Надежный тест	более сложный менее мощный
Тест Брауна-Форсайта	Подходит для k образцов Самый надежный тест	Отсутствует во многих ПО
Тест Кохрана	Подходит для k подгрупп Более простой	Подходит только для образцов одинакового размера. Чувствителен к отклонениям от нормальности Не стандартная часть каждого статистического продукта ПО.
Тест Хартли	Более простой метод Для k выборок одинакового размера	Меньше мощности Чувствителен к отклонениям от нормальности Не входит в стандартную комплектацию каждого продукта ПО.
Критерий Краскела-Уоллиса	Подходит для k образцов Стандартная часть большинства продуктов ПО	Простой менее мощный

Предпосылкой, обуславливающей применение параметрических критериев (критерий Фишера F -тест, критерий Бартлетта, тест Хартли), как правило, является предположение о принадлежности анализируемых данных нормальному закону.

Однако всесторонний анализ производственных процессов показывает, что процессы редко остаются в состоянии статистической управляемости в течение продолжительного времени. В этом случае необходимо использовать непараметрические методы.

3.2 Разработка алгоритма повышения показателей качества изготовления деталей технологией селективного лазерного сплавления с использованием статистических методов контроля

На основе аналитической части был предложен алгоритм практической комплексной реализации статистического контроля процесса, включающий модификацию контрольных краткосрочных карт номинального/целевого значения и доверительные интервалы индексов воспроизводимости (рисунок 3.1).

На первом этапе определяется показатель качества объекта контроля исходя из технических требований, предъявляемых к объекту. Далее проводится сбор экспериментальных данных для последующего статистического анализа. В качестве показателя качества может применяться отклонение от номинального значения.

На втором этапе с помощью критериев Краскела-Уоллеса проводится отсев тех выбросов отклонений от номинальных значений, которые вносят большие погрешности в дальнейшую оценку полезной составляющей процесса.

Следующим шагом проверяем выборки на нормальность распределения отклонений в каждой группе. Для переменных данных, которые, как предполагается, следуют нормальному распределению, метод статистического контроля использует две контрольные карты для каждой характеристики качества. Одна диаграмма отслеживает центр процесса, а другая отслеживает дисперсию или распространение процесса.

Обычные ограничения номинальных/целевых карт, заключающиеся в том, что дисперсия, связанная с каждой характеристикой качества, должна быть однородной, применимы и к модифицированной версии [90,104]. Поэтому следующим этапом является проверка однородности в группах. Одним из методов параметрической статистики является проверка однородности дисперсий по критерию Бартлетта.

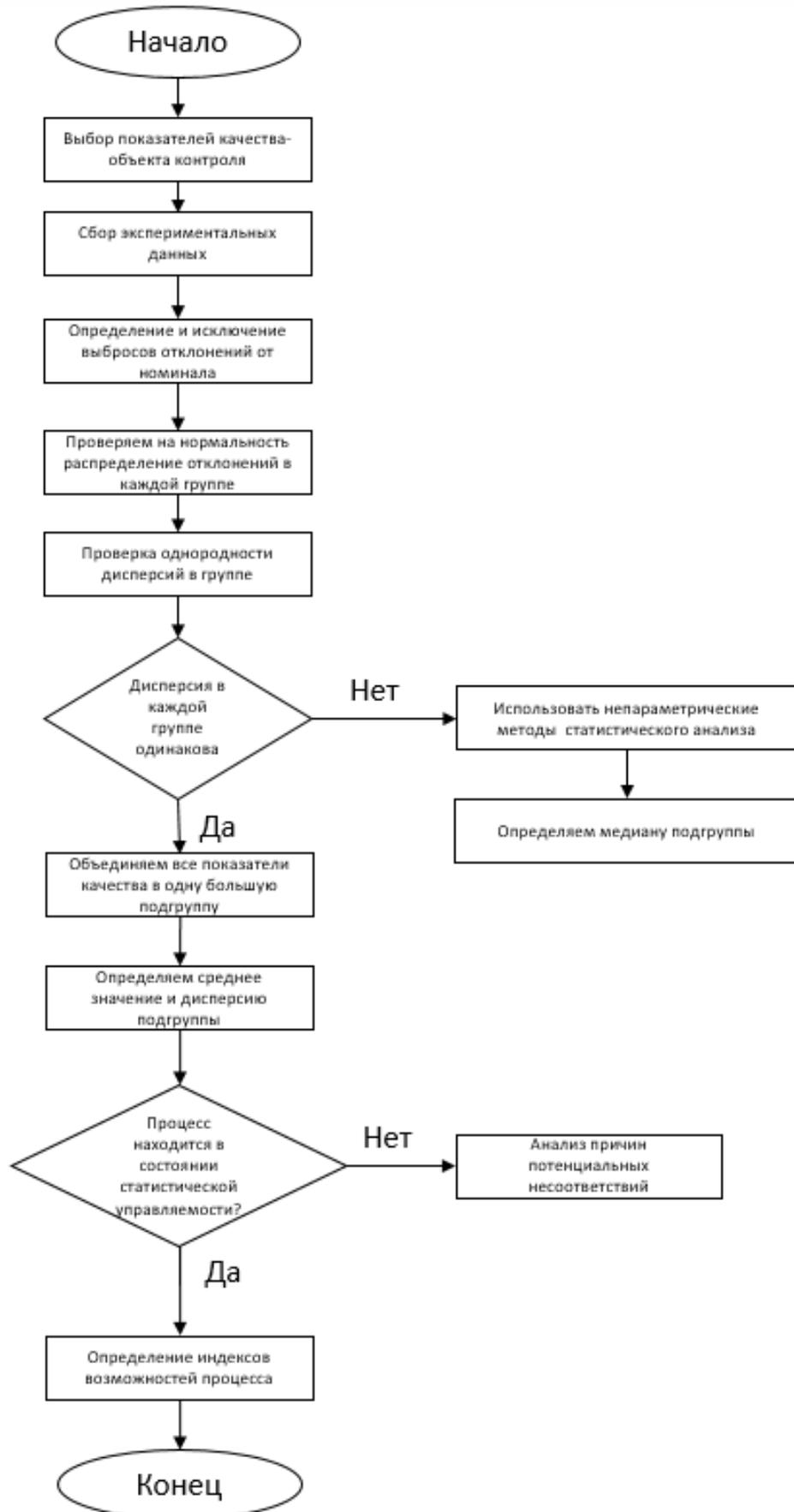


Рисунок 3.1 – Алгоритма повышения показателей качества изготовления деталей с использованием статистических методов контроля

Если дисперсия в каждой группе однородна, то объединяем все показатели качества в одну большую подгруппу для дальнейшего анализа. В случае неоднородности выборки, разделяем на подгруппы по однородности. Последующий анализ проводим для каждой подгруппы отдельно.

Определяем среднее значение и дисперсию подгруппы. Для анализа управляемости производственным процессом применяются контрольные карты, которые являются преобладающими инструментами статистического управления процессами.

При контроле однородности дисперсий отклонений размеров от номинальных значений при условиях равенства допусков на размеры, проводится анализ контрольных карт средних всех отклонений (по группам однородности).

В случае неоднородности данных для контроля отклонений в коротких сериях можно применить непараметрический статистический анализ. В этом случае для оценки смещения может быть использована медиана.

Последним этапом является определение индексов возможностей процесса и принятие решения о стабильности и управляемости технологического процесса

3.3 Разработка модифицированных целевых краткосрочных контрольных карт и определение индексов воспроизводимости

Количественное представление настройки процесса и его вариации – основа для понимания качества изделий в любом производстве. Для выяснения соотношений между параметрами процесса \bar{X} и стандартным отклонением σ , и инженерными требованиями, во многих ситуациях, можно использовать индексы воспроизводимости C_p , C_{PU} , C_{PL} , k и C_{pk} [105,106]. Известно, что эти индексы образуют полную систему показателей работы процесса и могут использоваться как с двусторонними, так и с односторонними допусками, а также с заданными номиналами и без них [105].

Индекс C_{pk} использует нормированное расстояние между средним процесса и ближайшей границей допуска (рисунок 3.2).

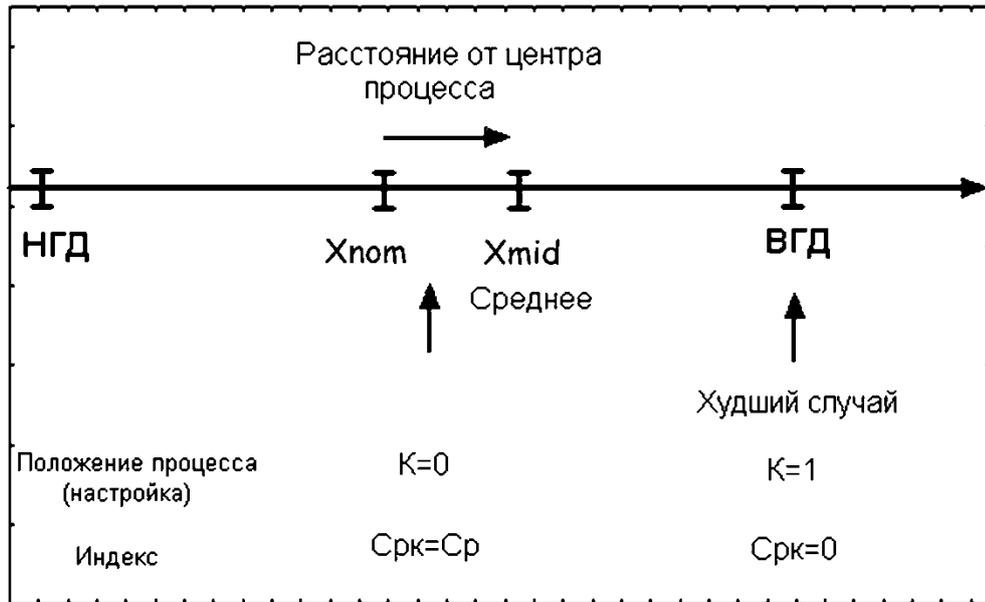


Рисунок 3.2 – Соотношение параметров C_{pk} .

Возможно снижение целевой величины индекса воспроизводимости C_p для процесса с помощью коэффициента $(1-k)$, нормированного расстояния, на которое процесс удален от центра [105]. Эта ситуация характерна, если допуск несимметричный, либо в процессе присутствует систематическая погрешность, например, если часть точек в характерной области лежит ниже середины поля допуска IT, а часть выше ввиду особенностей технологии. В этом случае целесообразно рассматривать C_p для каждой такой области отдельно.

Среднюю точку диапазона допуска, определяемого верхней ВГД и нижней НГД границами, находим по формуле:

$$X_{mid} = (ВГД + НГД) / 2 \quad (1)$$

Расстояние между средним значением процесса μ , и средней точкой X_{mid} , равно $X_{mid} - \mu$, когда мы предполагаем, что целевая функция процесса $\bar{X} \rightarrow X_{nom} \rightarrow X_{mid}$ и ВГД расположена как показано на рисунке 3.2.

Нормированное расстояние равно:

$$k = \frac{|X_{mid} - \mu|}{(ВГД - НГД) / 2} = \frac{2|X_{mid} - \mu|}{IT} \quad (2)$$

Знак к абсолютному значению добавляется в том случае, когда $ВГД < X_{mid} < \bar{X}$. Оценка k обозначается через \hat{k} и получается при замене μ на \bar{X} в последней формуле.

$$\hat{k} = \frac{2|X_{mid} - \bar{X}|}{IT} \quad (3)$$

Коэффициент k – показатель, описывающий величину, на которую процесс смещен от центра. Индекс C_p , скорректированный на k равен:

$$C_{pk} = C_p(1-k) \quad (4)$$

Выразим верхний индекс воспроизводимости через групповое среднее отклонение размеров от номинального значения $\bar{\delta}X$ для симметричного поля допуска IT:

$$\begin{aligned} C_{pku} &= \frac{ВГД - \bar{X}}{3\sigma} = \frac{\left[ВГД - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{inom} - \left(\bar{X} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{inom} \right) \right]}{3\sigma} = \\ &= \frac{\left[\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (ВГД_i - X_{inom}) \right) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - X_{inom}) \right]}{3\sigma} = \frac{IT/2 - \bar{\delta}X}{3\sigma}; \\ \bar{\delta}X &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta X_i \end{aligned} \quad (5)$$

Как видно из (5), индекс воспроизводимости можно рассчитывать вне зависимости от значения номинальных размеров, руководствуясь только средним отклонением группы размеров при условии равенства дисперсий.

Для несимметрично расположенного поля допуска при условии $\bar{X} \leq X_{mid} < ВГД$:

$$\begin{aligned} C_{pku} &= \frac{ВГД - \bar{X}}{3\sigma} = \frac{ВГД - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{imid} - \left(\bar{X} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{imid} \right)}{3\sigma} = \\ &= \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (ВГД_i - X_{imid}) - \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{inom} - X_{imid}) + \bar{\delta}X \right)}{3\sigma} = \frac{IT/2 - \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\mu_i - X_{imid}) + \bar{\delta}X \right)}{3\sigma} = \\ &= \frac{IT/2 - \bar{\delta}X}{3\sigma} + \frac{k_n}{6\sigma} IT \end{aligned} \quad (6)$$

где

$k_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_i = \frac{2}{IT \cdot n} \sum_{i=1}^n |X_{i \text{ mid}} - \mu_i|$ – среднее для всех размеров смещение номинальной величины размера от размера в середине поля допуска. $\mu_i = M(X_{i \text{ nom}}) \rightarrow X_{i \text{ nom}}$ – математическое ожидание номинальной величины i -го размера.

Для воспроизводимого (управляемого) процесса математическое ожидание номинальной величины всегда стремится к этой номинальной величине.

Откуда следует

$$C_{pku} = \frac{(1+k_n)IT/2 - \overline{\delta X}}{3\sigma} \quad (7)$$

Аналогично, для нижнего индекса воспроизводимости:

$$C_{pk} = C_{pkl} = \frac{(1-k_n)IT/2 - \overline{\delta X}}{3\sigma} \quad (8)$$

Рассмотрим математическое ожидание смещения среднего всех размеров от среднего размеров в середине поля допуска, если величина поля допуска равна IT .

$$\begin{aligned} M(\hat{k}_n) &= \frac{2}{IT} M\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{i \text{ mid}} - \bar{X}\right) = \frac{2}{IT} \left[M\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{i \text{ mid}})\right) - M\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{i \text{ nom}})\right) + M(\overline{\delta X}) \right] = \\ &= k_n + \frac{2}{IT} M(\overline{\delta X}) \end{aligned} \quad (9)$$

Из зависимости (9) следует, что для абсолютно воспроизводимого процесса

$$\begin{aligned} M(\hat{k}_n) &= k_n, \\ M(\overline{\delta X}) &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

Следовательно, для анализа воспроизводимости и управляемости процесса можно рассмотреть модифицированные контрольные карты для переменной $\frac{\overline{\delta X}}{IT/2}$.

Для оценки смещения отклонения, кроме среднего $\overline{\delta X}$, может быть также использована медиана отклонений $\tilde{\delta X}$ рассчитанная по формуле (11) [67].

$$\tilde{\delta X} = \delta X_{50\%} = \begin{cases} \delta X_{\left(\frac{n+1}{2}\right)}; & \text{если } n - \text{нечетное} \\ \frac{1}{2} \left[\delta X_{\left(\frac{n}{2}\right)} + \delta X_{\left(\frac{n}{2}+1\right)} \right]; & \text{если } n - \text{четное} \end{cases} \quad (11)$$

Для контроля отклонений в коротких сериях можно применить непараметрический статистический анализ.

Заключение по главе 3

1. Основным результатом данной главы является оригинальная разработка методики статистического анализа воспроизводимости технологического процесса изделий со сложной геометрией для коротких серий. Она основана на критическом анализе имеющихся методов построения контрольных карт и индексов возможностей для краткосрочных процессов.

2. При контроле однородности дисперсий отклонений размеров от номинальных значений при условиях равенства допусков на размеры, анализ контрольных карт средних всех отклонений (по группам однородности) позволяет выявить условия нарушения воспроизводимости процесса.

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

4. В случае неоднородности данных для контроля отклонений в коротких сериях можно применить непараметрический статистический анализ. В этом случае для оценки смещения может быть использована медиана \tilde{X} .

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

4 РАЗРАБОТКА И АПРОБАЦИЯ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯМИ КАЧЕСТВА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ СО СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ ТЕХНОЛОГИЕЙ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ

4.1 Разработка алгоритма управления показателями качества в технологических процессах изготовления изделий со сложной геометрией технологией селективного лазерного сплавления

Алгоритм управления показателями качества в ТП изготовления изделий со сложной геометрией технологией СЛС представлен на рисунке 4.1.

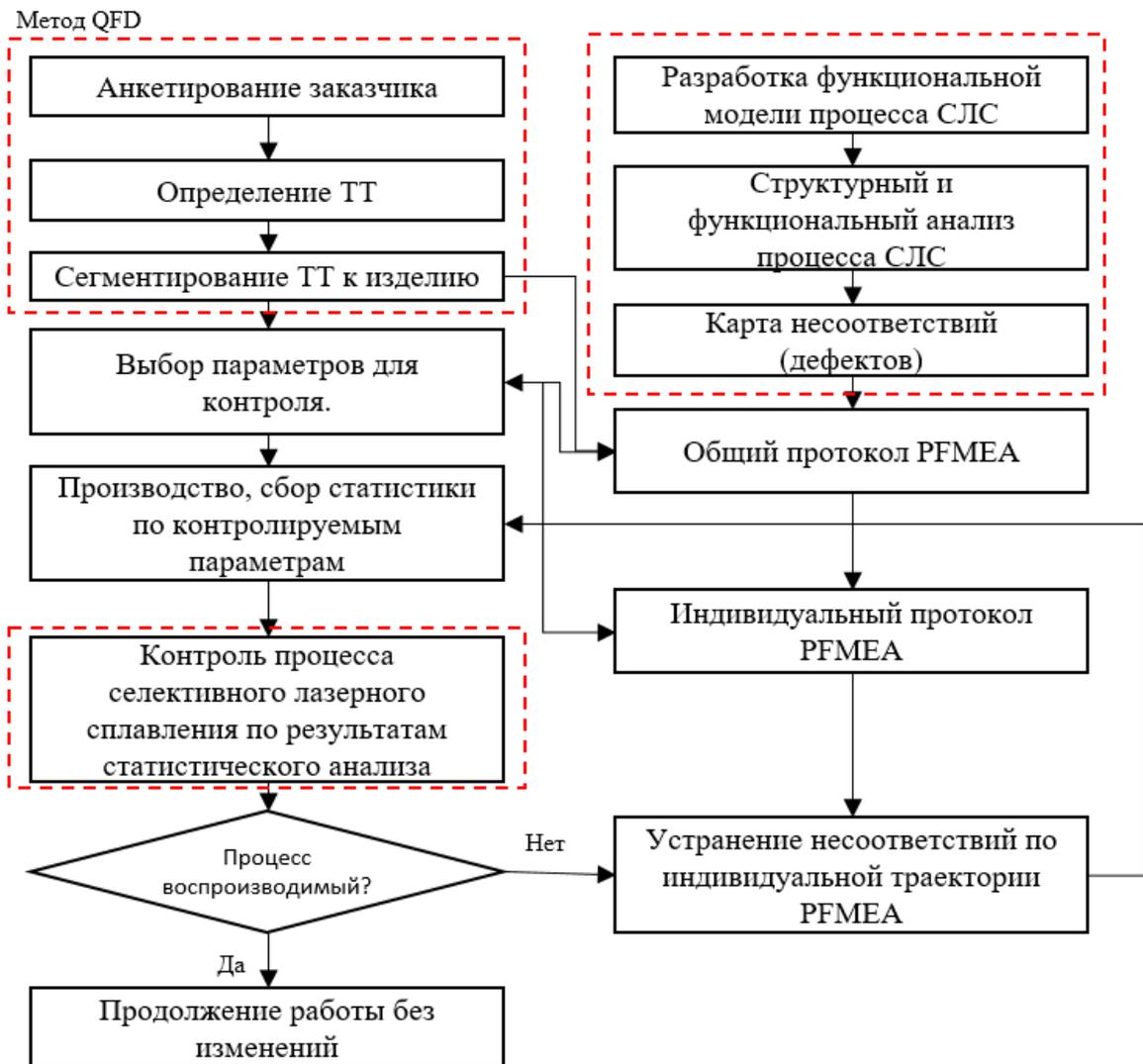


Рисунок 4.1 – Алгоритм управления показателями качества в ТП СЛС

На первом этапе, согласно подходу сегментации требований потребителя к изделиям для процесса селективного лазерного сплавления на основе метода функций развертывания качества (QFD), проводится анкетирование заказчика, определение технических требований и сегментация технических требований к изделию.

Отдельным этапом является разработка общего протокола по методологии PFMEA. 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 этапам ЖЦИ при их функциональном моделировании и накопленной статистикой по несоответствиям на основе разработанной карты классификации выявленных дефектов.

Далее на основе общего протокола PFMEA выбирается параметр для контроля и формируется индивидуальная траектория управления рисками на основе PFMEA (индивидуальный протокол PFMEA).

Далее следует производство и сбор статистики по контрольным параметрам.

На основе методики статистического анализа управления качеством СЛС, включающей анализ воспроизводимости процесса производства изделий со сложной геометрией малыми сериями, определяется воспроизводимость процесса.

Если процесс воспроизводимый, то продолжаем изготовление заготовок без изменений, в противном случае необходимо провести устранение несоответствий по индивидуальной траектории PFMEA.

Апробация алгоритма управления показателями качества в ТП изготовления изделий со сложной геометрией технологией СЛС проведена при изготовлении заготовок секции соплового аппарата турбины из порошка жаропрочного сплава ВЖ159 технологией СЛС.

4.2 Определение технических требований к заготовкам лопаток соплового аппарата турбины, изготовленных методом селективного лазерного сплавления

Качественную оценку технологичности детали производят по материалу, геометрической форме, качеству поверхностей, по простановке размеров и возможным способам получения заготовки. Количественную оценку производят по абсолютным и относительным показателям. В первую очередь устанавливают показатели базовой и рассматриваемой детали: коэффициенты использования материала, точность обработки, шероховатость поверхностей, трудоемкость изготовления, технологическую себестоимость [108,109].

Сопловые лопатки турбины ГТД являются массовыми деталями. Перо лопаток турбины имеет сложную пространственную аэродинамическую форму с переменными профилями поперечных сечений. В отличие от рабочих лопаток перо сопловых аппаратов турбины выполняется без закрутки с постоянными сечениями.

Рассматриваемая в работе лопатка соплового аппарата турбины ГТД относится к охлаждаемым лопаткам дефлекторного типа с конвективной поперечной системой охлаждения (рисунок 4.2).

При внутреннем конвективном охлаждении воздух проходит через систему каналов внутри лопатки, после чего отводится в проточную часть турбины. При поперечном охлаждении воздух подается внутрь полого дефлектора, после чего через большое количество отверстий выдувается на внутренние поверхности лопатки. Как правило, далее воздух движется по каналу, образуемому наружной поверхностью дефлектора и внутренней поверхностью канавки, после чего выбрасывается в проточную часть. Подобная организация движения воздуха приводит к значительному выравниванию поля температур лопатки и повышает параметр глубины охлаждения. К недостаткам таких систем относится сложность технологического исполнения при традиционных методах обработки.

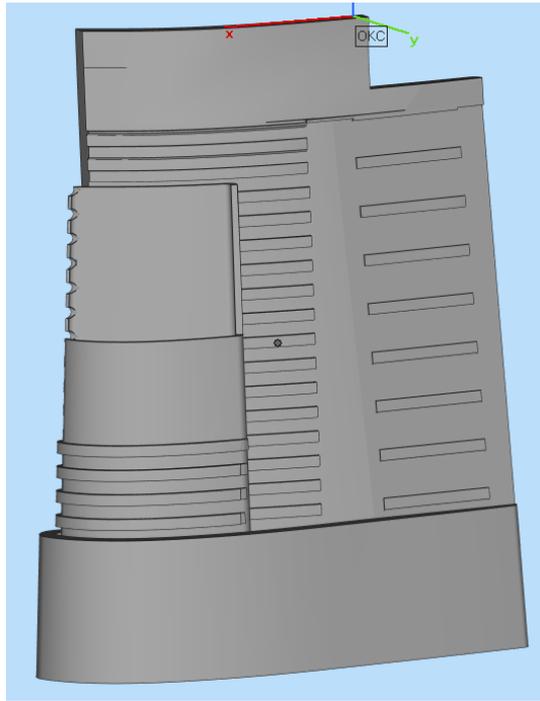


Рисунок 4.2 – 3D-модель лопатки соплового аппарата турбины

Использование аддитивных технологий (селективное лазерное сплавление (СЛС)) за счет перепроектирования конструкций деталей позволяет изготавливать за один технологический цикл лопатки соплового аппарата, содержащие во внутренней полости перфорированный дефлектор.

При разработке технологического процесса изготовления заготовок лопаток соплового аппарата турбины, а именно при задании оптимального расположения на платформе, построении материала поддержки, необходимо учесть требования по точности и шероховатости поверхности, предъявляемые к таким элементам соплового аппарата, как перо лопатки:

- отклонение профиля пера лопатки $\pm 0,1 \dots 0,3$ мм;
- допуск на толщину стенок пера охлаждаемых лопаток $\pm 0,3$ мм;
- допуск на диаметр перфорационных отверстий 0,05 мм;
- шероховатость пера лопатки $R_a = 0,08 \dots 0,63$ мкм;
- шероховатость внутри перфорационных отверстий $R_a = 0,15 \dots 2,5$ мкм;
- обеспечение требуемого массового расхода воздуха для охлаждения сопловых секций.

При анкетировании заказчика были определены технические требования к данному типу заготовок: геометрическая точность, механические свойства; шероховатость. Данный тип заготовок был отнесен к категории ответственных деталей.

В качестве регулирующего параметра выбран показатель – точность геометрии профиля пера лопаток соплового аппарат, который существенно влияет на эксплуатационные характеристики продукции.

4.3 Производство, сбор статистики по контролируемым параметрам

Изготовление заготовок лопаток соплового аппарата турбины производилось на установке СЛС SLM 280HL (рисунок 4.3). Установка имеет платформу построения размерами 280×280×350 мм [107].



Рисунок 4.3 – Установка СЛС SLM 280HL

Задание ориентации выращивания заготовок лопаток соплового аппарата относительно платформы реализуется с учетом точностных параметров процесса СЛС; оптимального расположения профиля пера лопатки с отсутствием или

минимальным количеством материала поддержки для создания бесприпусковых поверхностей; а также анизотропии механических свойств синтезируемого материала с учетом эксплуатационных свойств изделия.

Компоновка заготовки лопаток соплового аппарата турбины ГТД относительно платформы построения осуществлялась по торцевой поверхности лопаток с небольшим углом (рисунок 4.4). С нижнего торца лопаток были добавлены поддерживающие структуры и опоры для исключения возможных короблений. На платформе построения располагалось 10 заготовок лопаток соплового аппарата турбины ГТД, что составляет одну партию.

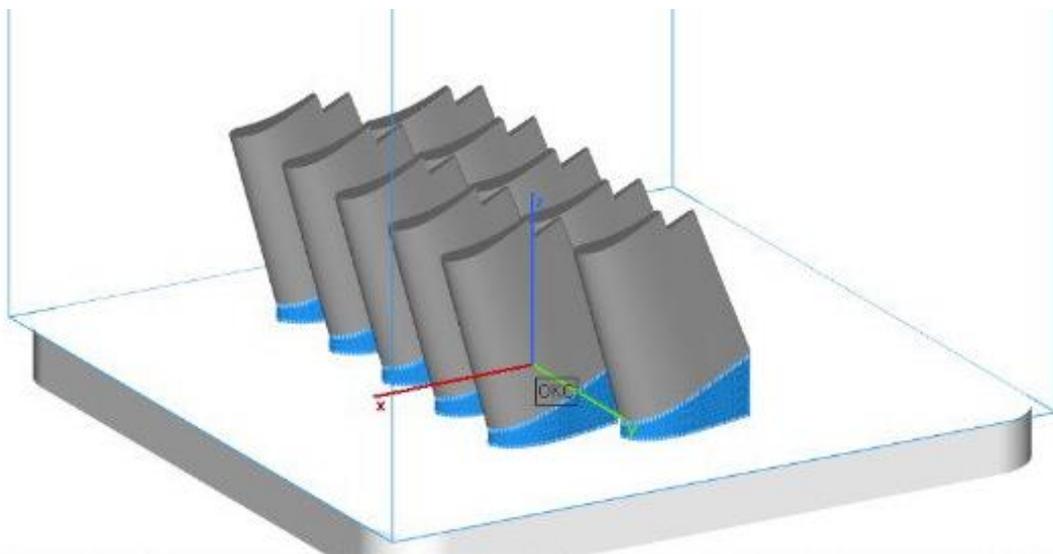


Рисунок 4.4 – Расположение заготовок лопаток соплового аппарата турбины ГТД на платформе построения

Управление технологическими параметрами осуществлялось с использованием модуля Build Processor программного продукта Magics RP. Значения технологических параметров сканирования: мощность лазерного излучения 250 Вт, скорость сканирования 600 м/мин, шаг сканирования 0,12 мм, толщина слоя 0,05 мм.

Перед запуском была проведена подготовка установки СЛС согласно рисунку 2.3. Изготовленные заготовки лопаток соплового аппарата турбины ГТД из металлического порошка жаропрочного сплава ВЖ159 представлены на рисунке 4.5.



Рисунок 4.5 – Партия заготовок лопаток секции соплового аппарата турбины, изготовленных технологией СЛС с образцами свидетелями

Контроль геометрии лопаток соплового аппарата турбины, изготовленной по технологии СЛС, производился в трех сечениях на 3D-сканере RangeVision PRO при температуре $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ и относительной влажности 80%. Результаты измерений одного сечения представлены на рисунке 4.6.

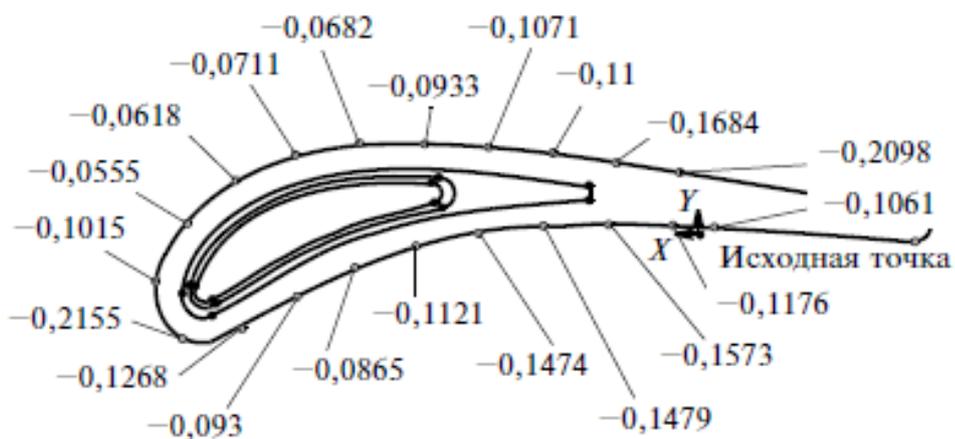


Рисунок 4.6 – Результаты измерения профиля пера в одном из сечений лопатки соплового аппарата

В качестве контролируемых геометрических параметров рассматривалось отклонение координат профиля сечения пера лопатки от номинальных значений (рисунок 4.6). Профиль пера измеряется в 20 контрольных точках в 3 сечениях. Каждое отклонение от номинального значения положения контрольной точки является отдельной характеристикой. Полученные 60 значений отклонений в первом приближении объединялись в одну подгруппу и использовались для расчета среднего значения подгруппы $\overline{\delta X}$ и несмещенного стандартного отклонения σ .

4.4 Статистический контроль процесса изготовления заготовок лопаток соплового аппарата турбины методом селективного лазерного сплавления

Аномальные значения, возникающие в процессе измерения и обработки экспериментальных данных, даже при небольшой частоте их появления, вносят большие погрешности при дальнейшей оценке полезной составляющей процесса. Поэтому первым этапом анализа случайных процессов является проверка его значений на достоверность, т.е. обнаружение и последующее устранение аномальных значений (выбросов). Не существует строгого и однозначного правила насчет того, следует ли удалять выбросы из набора данных перед проведением статистического анализа.

На первом этапе с помощью критериев Краскела-Уоллеса был проведен отсев тех выбросов отклонений от номинальных значений, которые вносят большие погрешности в дальнейшую оценку полезной составляющей процесса. На рисунке 4.7 представлена блочная диаграмма отклонений для первой партии заготовок лопаток соплового аппарата турбины до исключения выбросов, а на рисунке 4.8 – блочная диаграмма после исключения 6-и выбросов.

На диаграмме видно, что у лопаток имеются выбросы по отклонениям от номинала точек профиля. Выбросы отображаются в виде точек на прямоугольной диаграмме. Исходя из этого критерия, есть по одному потенциальному выбросу у шести лопаток.

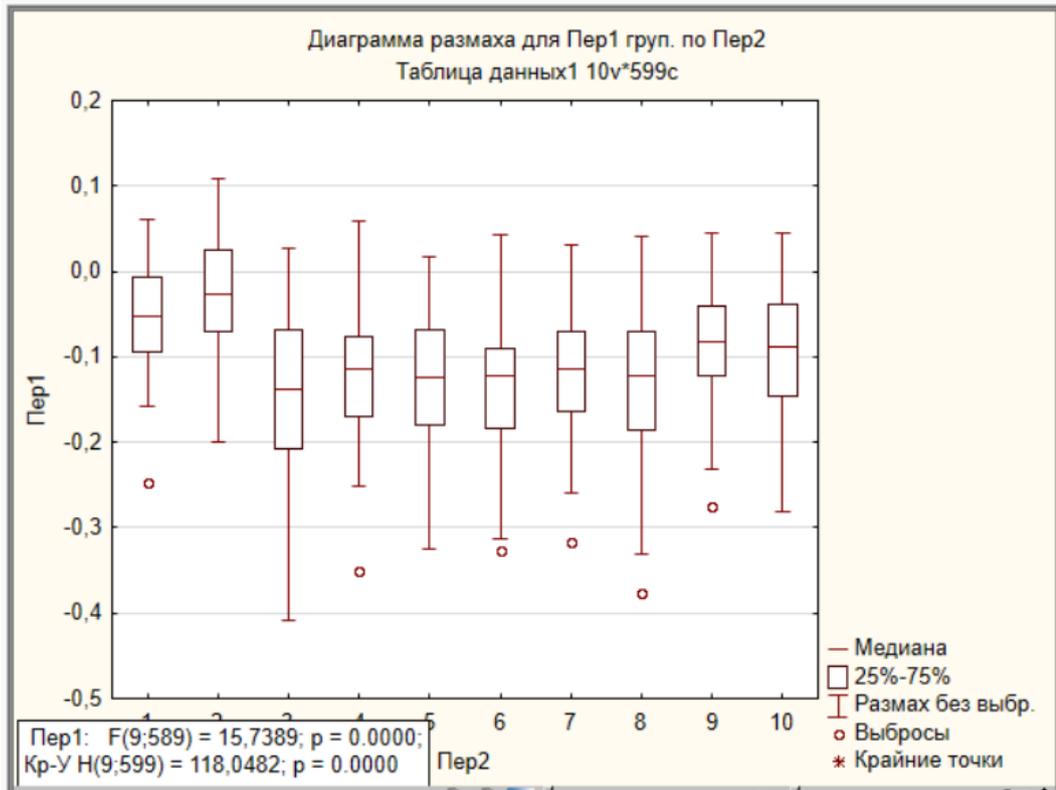


Рисунок 4.7 – Диаграмма размаха по первой партии из 10 заготовок лопаток

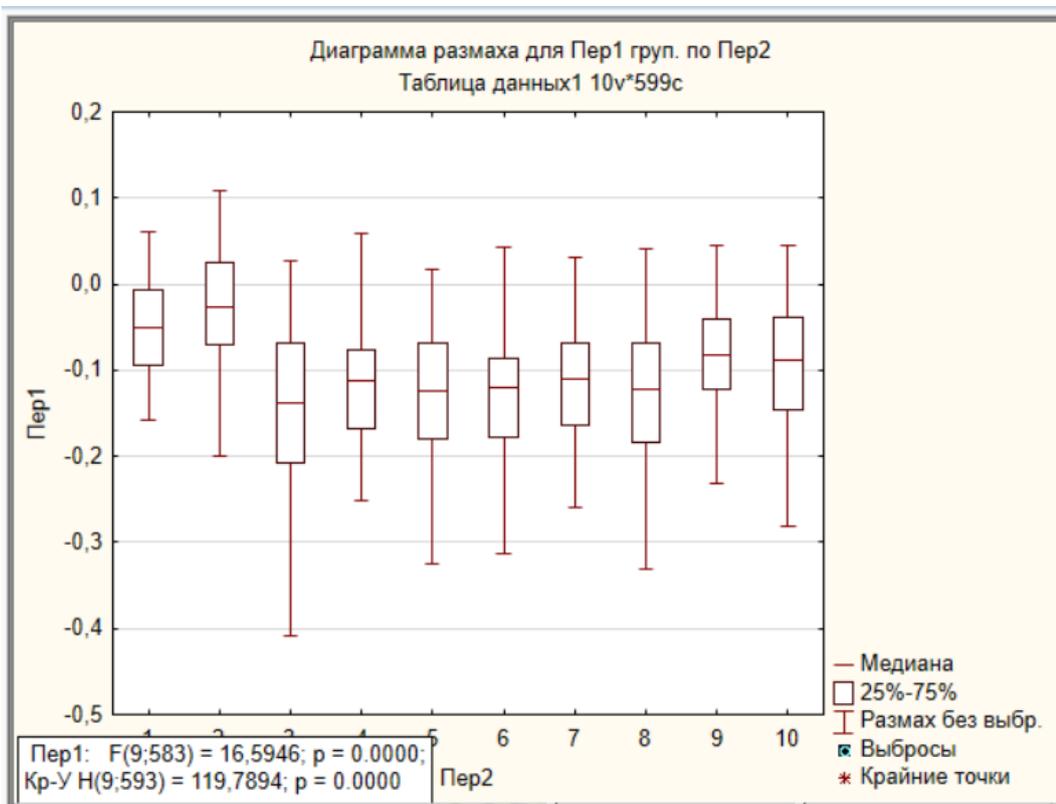


Рисунок 4.8 – Блочная диаграмма данных по первой партии из 10 заготовок лопаток после исключения потенциальных выбросов

Большинство краткосрочных контрольных карт предполагают, что данные процесса распределены нормально [60]. Нормальность распределения отклонений для каждой лопатки проверялась статистическими тестами Колмогорова-Смирнова и Шапиро-Уилка. Типовая гистограмма отклонений с наложенным графиком нормального распределения для одной из лопаток партии приведена на рисунке 4.9. Анализ данных показал, что распределение отклонений от номинальных значений координат точек профиля для всех лопаток во всех 6 партиях соответствует нормальному закону распределения по критерию Колмогорова-Смирнова со значением $p > 0,2$ и Шапиро-Уилка с $p > 0,3$ (критический уровень значимости, при котором гипотеза о нормальности распределения отвергается, $p=0,05$).

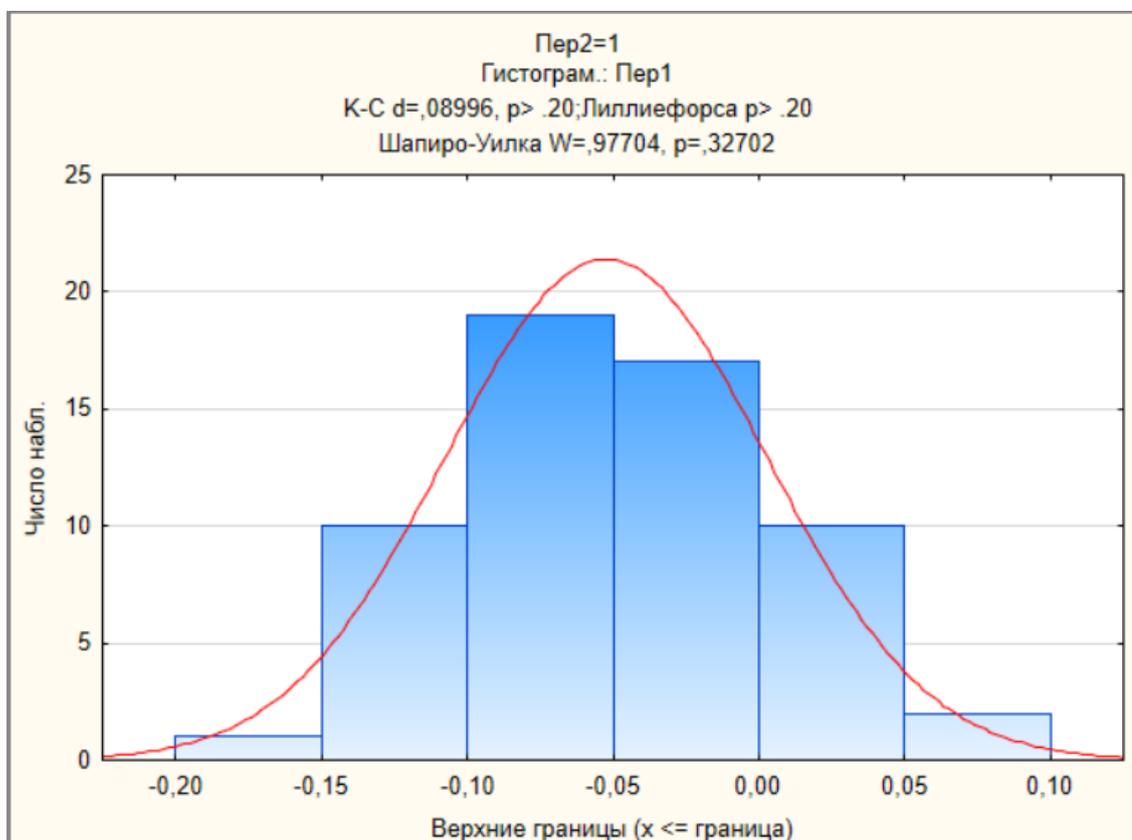


Рисунок 4.9 – Типовая гистограмма отклонений с наложенным графиком нормального распределения

Обычные ограничения номинальных/целевых карт, заключающиеся в том, что дисперсия, связанная с каждой характеристикой качества, должна быть однородной, применимы и к модифицированной версии [90, 104].

Одним из методов параметрической статистики является проверка однородности дисперсий по критерию Бартлетта. Следует отметить, что критерий Бартлетта очень чувствителен к нарушению нормальности распределения данных. Расчет критерия Бартлетта проводили средствами Microsoft Excel. В таблице 4.1 представлены результаты расчета уровня значимости по критерию Бартлетта. Поскольку значение $p = 0.058$ больше уровня критической значимости ($p=0.05$), мы не можем отвергнуть нулевую гипотезу о равных различиях между группами. Следовательно, поскольку дисперсии по критерию Бартлетта однородны, возможно объединение характеристик каждой заготовки из подгруппы в одну большую подгруппу.

Таблица 4.1 – Уровень значимости по критерию Бартлетта

№ партии	Уровень значимости p внутри партий	Среднее квадратическое отклонение внутри партий
1	0,09015	0,077
2	0,07141	0,077
3	0,0783	0,077
4	0,34250	0,070
5	0,19172	0,074
6	0,69973	0,081

При анализе данных измерений в каждой партии были обнаружены по две располагающиеся на краю платформы построения лопатки, однородность дисперсий отклонений которых не соответствовала критериям для общей выборки в подгруппе. Наиболее вероятная причина погрешностей связана с достижением критического угла луча при сканировании, при котором возникает отклонение фокусировки луча и, как следствие, изменение параметров ванны расплава, что, вероятнее всего, сказывается на геометрической точности заготовки. Для последующего анализа было принято решение провести анализ данных лопаток по партиям в отдельных подгруппах (8 лопаток отнесены к первой группе, 2 крайних лопатки – ко второй).

Контрольная карта выборочных средних или X-карта применяется для описания характеристики расположения центра, относительно которого

происходит разброс (группирование) значений показателя внутри выборок, и его изменчивости по мере протекания процесса во времени [107].

На рисунке 4.10 представлена модифицированная краткосрочная карта Шухарта среднего и скользящего размаха переменной $\frac{\overline{\delta X}}{IT/2}$ для первой подгруппы.

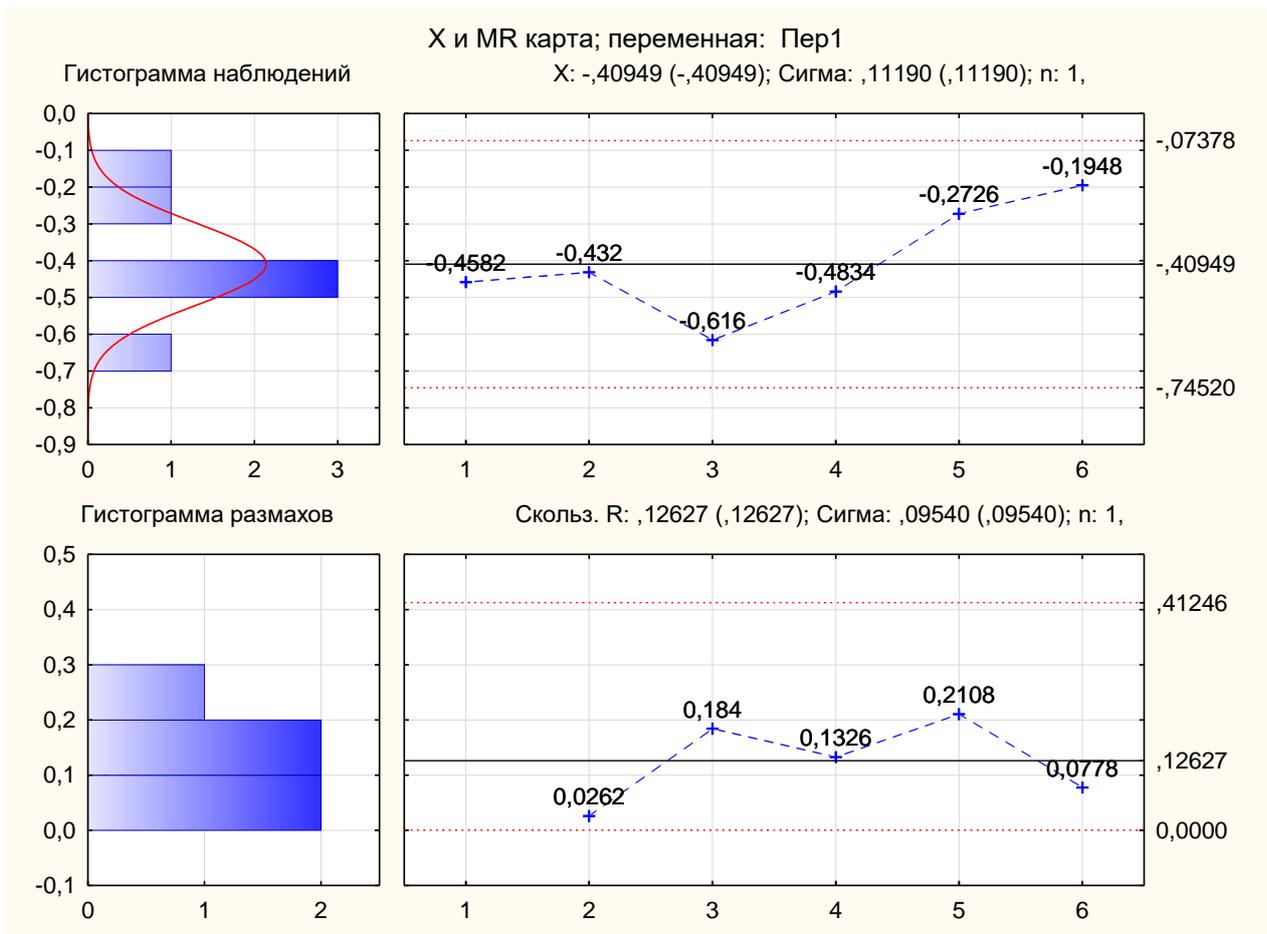


Рисунок 4.10 – Модифицированная краткосрочная карта Шухарта для средних значений

При анализе модифицированной контрольной карты для переменной $\frac{\overline{\delta X}}{IT/2}$ выявлено, что среднее значение переменной и ее размах колеблются случайным образом, а их значения находятся между контрольными границами, т.е. изменчивость процесса остается постоянной и выход за контрольные границы – маловероятное событие. Анализ R -карты показывает, что вариации внутри выборок однородны, отсутствуют нарушения контрольных границ, следовательно процесс

остается в статистически управляемом (стабильном по размахам) состоянии. Вместе с тем стоит отдельно обратить внимание на центрированность процесса, которая нарушается.

Воспроизводимость процесса СЛС для первой группы лопаток оценивалась с использованием индексов воспроизводимости, рассчитанных по формуле (5). Для отклонений точек поверхности пера лопатки от номинальных значений должно выполняться условие $k_n = const$. Наличие тренда k_n , который наблюдается по диаграмме средних (рис. 4.10) может свидетельствовать о нарушении воспроизводимости процесса. Расчет индексов воспроизводимости также указывает, что процесс «невоспроизводимый» ($C_p=0,96$), следовательно, существует вероятность появления брака в следующих партиях.

Гистограмма отклонений контрольных точек одной из лопаток, отнесенной ко второй группе, приведена на рисунке 4.11. Распределение отклонений подчиняется нормальному закону по критериям Колмогорова-Смирнова со значением $p > 0,2$ и Шапиро-Уилка $p > 0,3$.

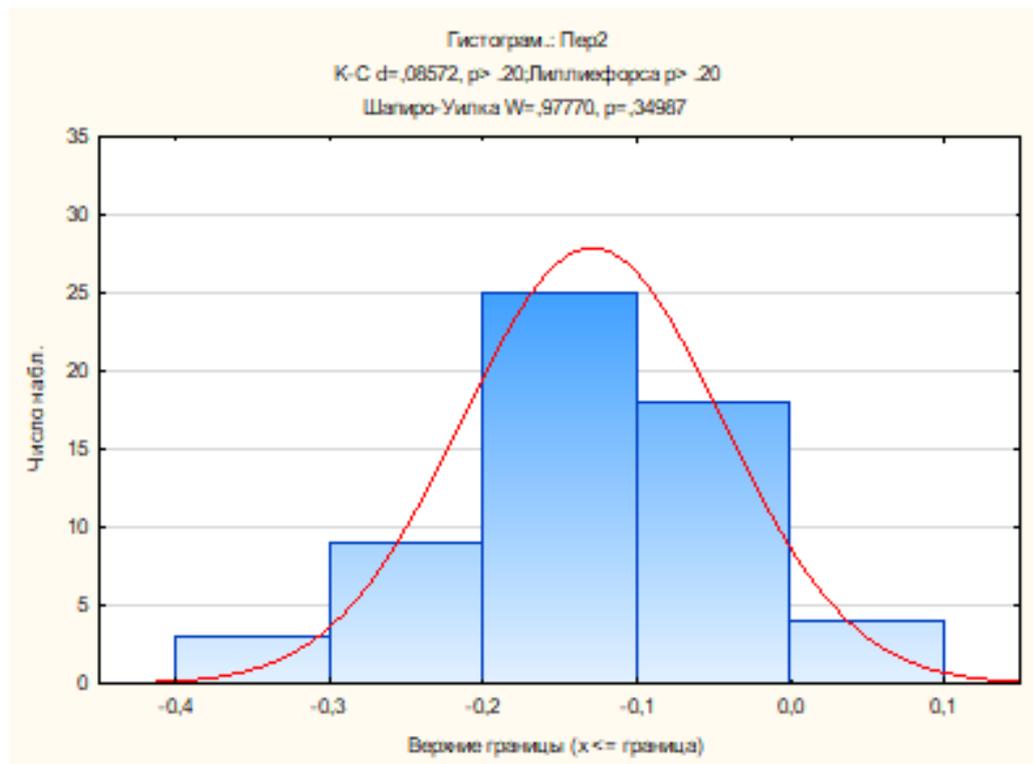


Рисунок 4.11 – Гистограмма отклонений контрольных точек одной из лопаток, отнесенной ко второй группе

Однородность дисперсий отклонений точек во второй группе оценивалась по критерию Бартлетта (таблица 4.2). Значение $p=0,133$ подтверждает гипотезу о однородности дисперсии отклонений.

Таблица 4.2 – Уровень значимости по критерию Бартлетта

№ партии	Уровень значимости p внутри партий	Среднее квадратическое отклонение внутри партий
1	0,295	0,093
2	0,730	0,104
3	0,391	0,091
4	0,644	0,084
5	0,056	0,111
6	0,383	0,104

Модифицированная краткосрочная карта Шухарта среднего и скользящего размаха

R переменной $\frac{\delta X}{IT/2}$ для точек второй группы приведена на рисунке 4.12.

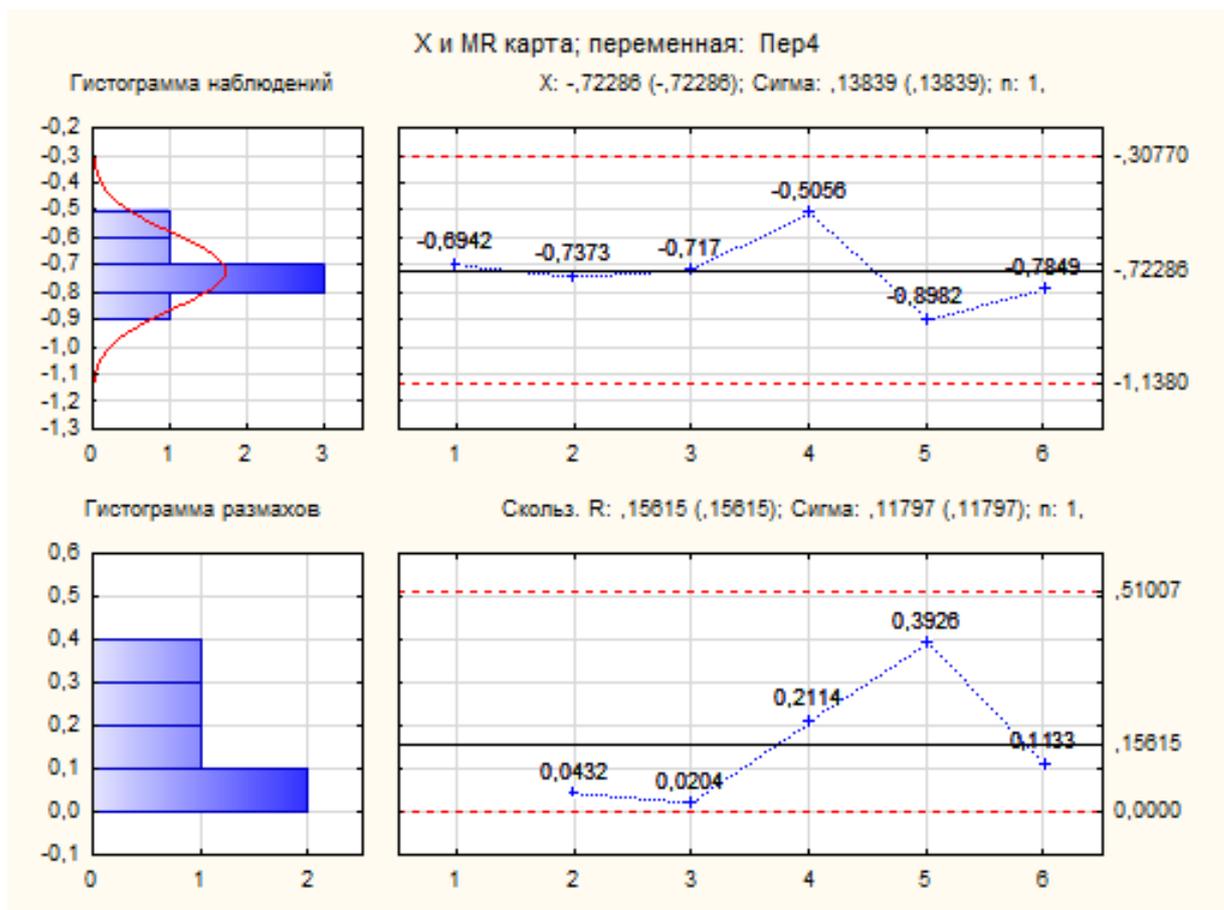


Рисунок 4.12 – Модифицированная краткосрочная карта Шухарта для медиан

Контрольные карты среднего и R -карты показывают, что процесс остается в статистически управляемом и стабильном состоянии.

Однако по результатам расчета индексов воспроизводимости можно определить, что процесс можно признать, как «невоспроизводимый», поскольку $C_p=0,53$ и, следовательно, можно прогнозировать вероятность появления брака.

Таким образом, изменение расположения заготовок лопаток со смещением к центру платформы построения, а также смешивание нового и вторичного порошков после 6-ой партии изготовленных заготовок позволит предотвратить брак последующих 60 шт. заготовок, что составляет 50% от общего объема заказа.

4.5 Анализ последствий и причин потенциальных несоответствий технологического процесса изготовления заготовок лопаток соплового аппарата турбины методом селективного лазерного сплавления

На основе разработанного общего протокола PFMEA технологического процесса СЛС проведем анализ причин отказа и их последствий ТП изготовления заготовок лопаток соплового аппарата турбины методом СЛС.

При изготовлении заготовок лопаток соплового аппарата турбины методом СЛС наблюдается отказ – несоответствие геометрической точности профиля пера лопатки.

На первом этапе, согласно протоколу, проанализировав операции ТП изготовления заготовок лопаток соплового аппарата турбины методом СЛС с высоким приоритетом действий Н, выявлена наиболее значимая операция – операция СЛС.

На данном этапе выделены причины отказа в элементах операции с высоким приоритетом риска: сбой в работе установки СЛС и программного обеспечения, неисправность работы станции просева и несоответствие МПК технологической документации.

В процессе изготовления заготовок лопаток соплового аппарата турбины методом СЛС ошибок установки СЛС и просеивающей станции не наблюдалось.

Наиболее вероятной причиной является ухудшение свойств МПК с каждым просевом.

Для исследования свойства новой и вторичной МПК жаропрочного сплава ВЖ159 использовалось следующее оборудование:

1. Весы лабораторные ВЛВТ-500.
2. Комплект сит для металлического порошка.
3. Прибор Холла.
4. Секундомер механический СОСпр-2б-2-010.
5. Стенд ЭС-21-12.

Анализ первичной и вторичной МПК ВЖ-159 проводился по следующим показателям:

- размер порошка основной фракции;
- текучесть;
- насыпная плотность;
- форма и микроструктура частиц.

Текучесть порошка была проверена в соответствии с ГОСТ 20899-98, насыпная плотность – в соответствии с ГОСТ 18317. Результаты анализа приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Текучесть и насыпная плотность порошков ВЖ-159

Измеряемый параметр	Фактические значения		Нормы сертификату соответствия
	Первичная МПК	Вторичная МПК	
Текучесть, с	19	14	17-19
Насыпная плотность, г/см ³	4,5	3,9	Не менее 4,1

Определение размеров частиц порошка проводилось методом сухого просеивания по ГОСТ 18318, а также в соответствии с ГОСТ 23402 в таблице 4.4 представлены результаты анализа

Таблица 4.4 – Результаты анализа технологических параметров МПК

Измеряемый параметр	Фактические значения первичной МПК	Фактические значения вторичной МПК	Нормы
Плюсовая фракция (остаток на сите 60 мкм), %	1	6	Не более 5
Минусовая фракция (проход через сито 10 мкм), %	10	4,2	Не более 10
Распределение порошка по фракциям			
Фракция, мкм	15-53	15-53	–
0-10	0	4,2	–
10-20	12,4	16	–
20-30	20	24	–
30-40	48	29	–
40-50	18,6	20,8	–
50-60	1	6	–

Определение формы частиц проведено в соответствии с ГОСТ 25849, описание дефектов в соответствии с ГОСТ Р 58418. Исследование микроструктуры порошка проводилось на электронно-растровом микроскопе TESCAN VEGA. Форма частиц первичной МПК, в основном, сферическая, на поверхности частиц обнаружены сателлиты. Результаты анализа представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Результаты исследования формы частиц порошка и наличия посторонних включений

	Первичная МПК	Вторичная МПК
Форма частиц	Сферическая	Округлая
Дефекты формы	–	Частицы стержневидной формы, брызгообразные
Дефекты поверхности	Сателлиты	Сателлиты
Поры	–	Присутствие пор
Твердые включения	Отсутствуют	Не обнаружены

Форма частиц первичной МПК, в основном сферическая, на поверхности частиц обнаружены сателлиты (рисунок 4.13).

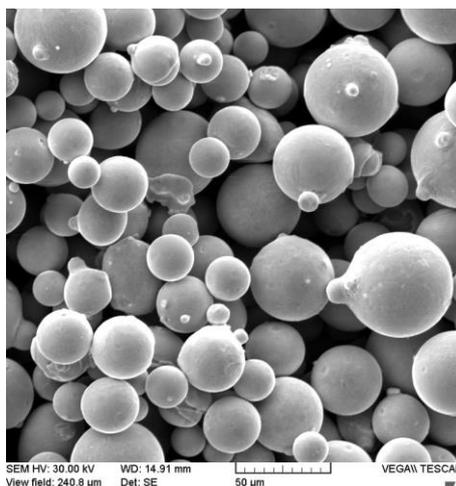


Рисунок 4.13 – Форма частиц нового порошка

Форма частиц вторичной МПК, в основном округлая (стержневая), на поверхности частиц обнаружены сателлиты (рисунок 4.14).

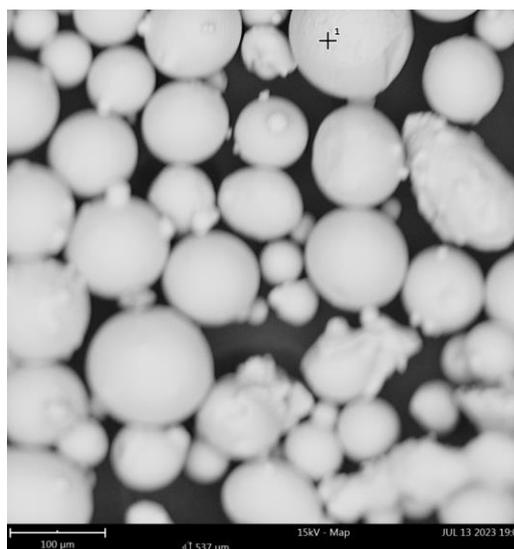


Рисунок 4.14 – Форма частиц вторичной МПК жаропрочного сплава ВЖ159

В результате исследования первичной и вторичной МПК жаропрочного сплава ВЖ159, выявлено, что с каждым циклом построения МПК теряет свои свойства, поэтому необходимо после 4-х циклов построения смешать используемый металлический порошок с новым в пропорции 1/3.

Для предотвращения выявленных несоответствий разработан план управления технологическим процессом изготовления заготовок методом СЛС (приложение Д). Акты внедрения результатов диссертационной работы представлены в приложении Е, Ж, З.

Заключение по главе 4

1. Проведена апробация разработанной методики статистического контроля качества с применением краткосрочных контрольных карт для малых серий на примере селективного лазерного сплавления заготовок лопаток соплового аппарата турбины газотурбинного двигателя.

2. 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.

3. Процесс селективного лазерного сплавления заготовок лопаток соплового аппарата пригоден для обеспечения заданных требований, но не обладает достаточным запасом возможностей, необходимым для эффективного управления ходом процесса: индекс воспроизводимости $C_p = 0,96$ – для первой группы контрольных точек и $C_p = 0,53$ – для второй группы.

4. Более высокие отклонения, объединенные во вторую группу контрольных точек, выявлены у двух крайних лопаток в каждой партии. Этот факт связан с достижением критического угла луча лазера при сканировании, при котором возникает отклонение фокусировки и, как следствие, изменение параметров ванны расплава. Последнее сказывается на геометрической точности заготовки. Данные лопатки необходимо исключить из производства в последующих партиях.

5. 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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении представлены основные результаты и выводы диссертационной работы.

В результате проведенного исследования решена важная научная задача в области повышения качества продукции в процессах производства деталей методом селективного лазерного сплавления, и достигнута цель диссертационного исследования на примере повышения качества изготовления заготовок лопаток соплового аппарата турбины технологией селективного лазерного сплавления:

1 Проведен теоретический анализ существующих подходов к обеспечению показателей качества заготовок, изготовленных технологией селективного лазерного сплавления. Анализ показал, что в силу специфики аддитивного производства, характеризуемого высокой вариабельностью процесса и небольшими партиями выпускаемой продукции, для обеспечения управляемости показателями качества и воспроизводимости параметров технологического процесса необходимо разработать адаптированные методики и подходы, базирующиеся на методах статистического анализа малых серий, анализе видов, последствий и причин потенциальных несоответствий технологического процесса.

2 Разработана функциональная модель обеспечения показателей качества изделия, изготовленных технологией СЛС с агрегированием ключевых этапов и артефактов процесса СЛС для составления карты дефектов процесса с целью комплексного анализа потенциальных несоответствий. Выделено 13 ключевых этапов, установлены связи с этапами и агрегировано 6 групп дефектов, вошедших в разработанную карту дефектов.

3 Разработан научно обоснованный подход для создания и выполнения плана корректирующих действий, предотвращающих появление дефектов при реализации технологии СЛС. Подход базируется на использовании адаптированной для процесса СЛС модели оценки рисков путем анализа видов, последствий и причин потенциальных несоответствий технологического процесса

(PFMEA). Оценка рисков производится по 11 выявленным и описанным потенциальным несоответствиям.

4 В результате критического анализа существующих методов построения контрольных карт и определения индексов воспроизводимости применительно к краткосрочным процессам (коротким сериям) была разработана методика статистического анализа управляемостью технологического процесса изделий со сложной геометрией для коротких серий на основе модифицированных карт Шухерта и новых зависимостей для индексов воспроизводимости. Методика обеспечивает анализ пригодности и воспроизводимости технологического процесса для множества отклонений размеров криволинейных поверхностей в пределах равновеликих допусков в разрезе каждой партии и в динамике производства нескольких партий.

5 Проведена комплексная апробация предложенных решений, что подтверждено актами внедрений. Предложенная методика статистического анализа для обеспечения показателей качества изготовления заготовок методом СЛС внедрена в учебный процесс Самарского университета.

6 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.

Перспективы дальнейшей разработки темы: в будущих исследованиях планируется развивать процессный подход и статистические методы управления качеством, в частности углубленный факторный анализ с целью выявления проблем на системном уровне при мониторинге процессов аддитивного производства, что предполагает разработку обоснованных рекомендаций для оптимизации процессов и приводит в итоге к улучшению качества продукции и услуг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследование структуры и механических свойств образцов, полученных с использованием технологии селективного лазерного сплавления из металлического титанового порошка марки ВТ6 / А.В. Агаповичев, А.В. Сотов, В.Г. Смелов, И.О. Зайцев // Аддитивные технологии: настоящее и будущее: Материалы IV Международной конференции, Москва, 30 марта 2018 года / ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов». – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, 2018. – С. 9-17.

2. Исследование точности и стабильности изготовления секций соплового аппарата турбины методом селективного лазерного сплавления на основе контрольных карт качества / В.П. Алексеев, А.И. Хаймович, В.Г. Смелов [и др.] // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2020. – Т. 22, №5(97). – С. 28-35.

3. Отчет Wohlers Report 2024. URL: <https://wohlersassociates.com/product/wr2024/> (дата обращения: 06.05.2024).

4. Possibilities and limitations of titanium alloy additive manufacturing / A.V. Agapovichev, A.V. Sotov, V. Kokareva etc. // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Vol. 224.

5. Агаповичев, А.В. Разработка методики проектирования технологических процессов изготовления заготовок моноколес ГТД из титановых сплавов селективным лазерным сплавлением: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.05 / Агаповичев Антон Васильевич. – Самара, 2020. – 212 с.

6. Multiresponse Optimization of Selective Laser Melting Parameters for the Ni-Cr-Al-Ti-Based Superalloy Using Gray Relational Analysis / A.V. Agapovichev, A.I. Khaimovich, V.G. Smelov etc. // Materials 2023. – Vol. 16. Issue 5. №5.

7. Петрухин, А.Г. Оптимизация конструкции горелки МЭКС для двигателей НК-36СТ, НК-37 и разработка технологии ее изготовления методом СЛС из жаропрочного сплава ВЖ159 / А.Г. Петрухин, В.П. Алексеев // Перспективы

развития двигателестроения: материалы международной научно-технической конференции имени Н.Д. Кузнецова, Самара, 21–23 июня 2023 года / Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева. Том 1. – Самара: Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 2023. – С. 359–360.

8. Петрухин, А.Г. Модификация конструкции горелки МЭКС двигателей НК-14ст, НК-36ст и разработка технологии СЛС ее изготовления из жаропрочного сплава ВЖ159 / А.Г. Петрухин, А.В. Агаповичев // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: сборник докладов Международной научно-технической конференции, Самара, 23–25 июня 2021 года. Том 1. – Самара: Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 2021. – С. 286–288.

9. Линейка турбореактивных двигателей (ТРД) тягой до 500 Н. URL: <http://microjet.su/razrabotano> (дата обращения: 04.05.2024)

10. Селективное лазерное сплавление URL: <https://www.hisour.com/ru/selective-laser-melting-40644> (дата обращения: 06.05.2024).

11. Иванов, И.Р. Моделирование и исследование лазерного плавления в методе 3D-печати на примере порошка алюминия / И.Р. Иванов, В.Д. Селезнёв // Физика. Технологии. Инновации: сборник научных трудов. – Екатеринбург: УрФУ, 2015. – Вып. 1. – С. 89–95.

12. Определение рациональных технологических параметров селективного лазерного сплавления порошка алюминиевого сплава AlSi10Mg / А.В. Агаповичев, А.И. Хаймович, В.В. Кокарева [и др.] // Перспективные материалы. – 2021. – №10. – С. 65–73.

13. Караваев, А.К.А. Исследование структуры и свойств сплава AlSi10Mg, полученного методом селективного лазерного сплавления / А.К. Караваев, Ю.А. Пучков // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2020. №5 – С. 71–85.

14. Шишковский, И.В. Создание объемных изделий из никелида титана методом послойного лазерного плавления / И.В. Шишковский, И.А. Ядроитцев, И.Ю. Смуров // Письма в ЖТФ. – 2013. – Том 39, вып. 24. – С. 15–21.

15. Yadroitsev, I. Selective laser melting of Ti6Al4V alloy for biomedical applications: Temperature monitoring and microstructural evolution / I. Yadroitsev, P. Krakhmalev, I. Yadroitsava // Journal of Alloys and Compounds. – 2014. – V. 583. – P. 404–409.

16. Jia, Q. Selective laser melting additive manufactured Inconel 718 superalloy parts: High-temperature oxidation property and its mechanisms / Q. Jia, D. Gu // Optics & Laser Technology. – 2014. – V. 62. – P. 161–171.

17. Kanagarajah, P. Inconel 939 processed by selective laser melting: Effect of microstructure and temperature on the mechanical properties under static and cyclic loading / P. Kanagarajah, F. Brenne, T. Niendorf, H.J. Maier // Materials Science & Engineering: A. – 2013. – V. 588. – P. 188–195.

18. Investigation of the IN-738 superalloy microstructure and mechanical properties for the manufacturing of gas turbine engine nozzle guide vane by selective laser melting / A.V. Sotov, A.V. Agapovichev, V.G. Smelov etc. // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2020. – Vol. 107. Issue 5–6. – P. 2525–2535.

19. Исследование структуры и механических свойств образцов, полученных технологией селективного лазерного сплавления из порошка жаропрочного сплава Inconel 738 / А.В. Агаповичев, В.В. Кокарева, В.П. Алексеев, В.Г. Смелов // Черные металлы, №1 (1069), январь 2021 г.

20. Riemer, A. On the fatigue crack growth behavior in 316L stainless steel manufactured by selective laser melting / A. Riemer, S. Leuders, M. Thöne, H.A. Richard, T. Tröster, T. Niendorf // Engineering Fracture Mechanics. – 2014. – V. 120. – P. 15–25.

21. Грязнов, М.Ю. Эффект мезоструктурного упрочнения стали 316l при послойном лазерном сплавлении / М.Ю. Грязнов, С.В. Шотин, В.Н. Чувильдеев // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2012. – №5 (1). – С. 43–50.

22. Смелов, В.Г. Исследование структуры и механических свойств изделий, полученных методом селективного лазерного сплавления из порошка стали 316L / В.Г. Смелов, А.В. Сотов, А.В. Агаповичев // Черные металлы. – 2016. – №9(107). – С. 61-65.

23. Статистическое управление процессами: Оптимизация бизнеса с использованием контрольных карт Шухарта / Дональд Уилер, Дэвид Чамберс; пер. с англ. – 2-е изд. – М.: Альпина Паблишер, 2016.

24. Characterization and comparison of materials produced by Electron Beam Melting (EBM) of two different Ti-6Al-4V powder fractions / J. Karlsson, A. Snis, H. Engqvist, J. Lausmaa // J Mater Process Technol 2013; 213(12):2109–18.

25. Study on microstructure and mechanical properties of laser rapid forming Inconel 718 / X.M. Zhao, J. Chen, X. Lin, W.D. Huang // Mater Sci Eng A 2008;478 (1–2):119–24.

26. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing / W.J. Sames, F.A. List, S. Pannala, R.R. Dehoff, S.S. Babu // Int Mater Rev 2016;61 (5):315–60.

27. Патент №2751161 С2 Российская Федерация, МПК В22F 9/08. Способ производства металлических порошков посредством газового распыления и установка для производства металлических порошков в соответствии с таким способом: №2019132820: заявл. 12.04.2018: опубл. 08.07.2021 / Ф. Мемоли, М. Боккадоро.

28. Numerical simulation of high-pressure gas atomization of two-phase flow: Effect of gas pressure on droplet size distribution / К.Н. Arachchilage, М. Haghshenas, S. Park, L. Zhou, Y. Sohn, B. McWilliams, K. Cho, R. Kumar. // Advanced Powder Technology 30 (2019): 2726-2732.

29. Champagne, B. REP (Rotating Electrode Process) atomization mechanisms / B. Champagne, R. Angers // Powder Metall Int 1984;16(3):125–8.

30. Ozols, A. Segregation in Stellite powders produced by the plasma rotating electrode process / A. Ozols, H.R. Sirkin, E.E. Vicente. // Mater Sci Eng A 1999; 262(1–2):64–9.

31. Seki, Y. Effect of atomization variables on powder characteristics in the high-pressured water atomization process / Y. Seki, S. Okamoto, H. Takigawa, N. Kawai // *Met Powder Rep* 1990;45(1):38–40.
32. Pinkerton, A.J. Direct additive laser manufacturing using gas- and water-atomised H13 tool steel powders / A.J. Pinkerton, L. Li // *Int J Adv Manuf Technol* 2005; 25(5–6):471–9.
33. Schade, C.T. Development of atomized powders for additive manufacturing / C.T. Schade, T.F. Murphy, C. Walton // In: *Powder metallurgy word congress.* – 2014.
34. Effect of process control and powder quality on Inconel 718 produced using electron beam melting / W. Sames, F. Medina, W. Peter, S. Babu, R. Dehoff // In: *Proceedings of the 8th international symposium on superalloy 718 and derivatives*; 2014. p. 409.
35. Investigation the effect of particle size distribution on processing parameters optimisation in selective laser melting process / B. Liu, R. Wildman, C. Tuck, I. Ashcroft, R. Hague // In: *International solid freeform fabrication symposium: an additive manufacturing conference.* University of Texas at Austin; 2011. p. 227–238.
36. Studies of standard heat treatment effects on microstructure and mechanical properties of laser net shape manufactured Inconel 718 / H. Qi, M. Azer, A. Ritter // In: *Metall Mater Trans*, Vol. 40; 2009. p. 2410–2422.
37. Additive Manufacturing of Metallic Components / T. DebRoy et al. // *Process, Structure and Properties.* Progress in Materials Science. – 2018, 92. – 112-224.
38. Carlton, H.D., Damage evolution and failure mechanisms in additively manufactured stainless steel / A. Haboub, G.F. Gallegos, D.Y. Parkinson, A.A. MacDowell // *Mater Sci Eng.* – 2016. – 651:406–14.
39. King, W.E. Observation of keyhole-mode laser melting in laser powder-bed fusion additive manufacturing / W.E. King, H.D. Barth, V.M. Castillo, G.F. Gallegos, J.W. Gibbs, D.E. Rubenchik, A. M. // *Journal of Materials Processing Technology*, 214(12), 2915–2925.

40. Mukherjee, T. Printability of alloys for additive manufacturing / T. Mukherjee, J.S. Zuback, A. De, T. DebRoy // *Sci Rep*. 2016 Jan 22;6:19717. doi: 10.1038/srep19717. PMID: 26796864; PMCID: PMC4726422.

41. Elmer, J.W. The effect of Ar and N₂ shielding gas on laser weld porosity in steel, stainless steels, and nickel / J.W. Elmer, J. Vaja, H. Carlton, R. Pong // *Welding J*. – 2015; 94(10). – pp. 313-325.

42. Elmer, J.W. The effect of reduced pressure on laser keyhole weld porosity and weld geometry in commercially pure titanium and nickel / J.W. Elmer, J. Vaja, H. Carlton // *Weld J*. – 2016; 95(11). – pp. 419–430.

43. Mukherjee, T. Printability of alloys for additive manufacturing / T. Mukherjee, J.S. Zuback, A. De, T. DebRoy // *Sci Rep* – 2016; 1-6. – Article No. 9717.

44. Thijs, L. A study of the micro structural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V / L. Thijs, F. Verhaeghe, T. Craeghs, J. Van Humbeeck, J.P. Kruth // *Acta Mater* – 2010; 58(9). – pp. 3303–3312.

45. Aboulkhair, N.T. Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting / N.T. Aboulkhair, N.M. Everitt, I. Ashcroft, C. Tuck // *Additive Manufacturing*, 2014, no. 1. – Pp. 77–86.

46. Bauereiß, A. Defect generation and propagation mechanism during additive manufacturing by selective beam melting / A. Bauereiß, T. Scharowsky, C. Körner // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2014, no. 214(11). – Pp. 2522–2528.

47. Сотов, А.В. Разработка методики проектирования технологических процессов изготовления жаровых труб ГТД методом селективного лазерного сплавления: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.05 / Сотов Антон Владимирович. – Самара, 2017. – 219 с.

48. Система менеджмента качества технологии селективного лазерного сплавления отечественных порошковых композиций / А.И. Хаймович, В.Г. Смелов, В.В. Кокарева, А.В. Сотов // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – 2018. – Т. 20, №6(86). – С. 33–40.

49. Gu, D.D, Balling phenomena in direct laser sintering of stainless steel powder: metallurgical mechanisms and control methods / D.D. Gu, Y.F. Shen // Mater Des 2009; 30(8):2903–10.
50. Mumtaz, K. Top surface and side roughness of Inconel 625 parts processed using selective laser melting / K. Mumtaz, N. Hopkinson // Rapid Prototyp J. – 2009; 15(2). – pp. 96–103.
51. Савич, Е.К. Совершенствование модели обеспечения качества изделий, получаемых с использованием специальных процессов, на примере покрытий, нанесенных плазменным напылением: дис... канд. техн. наук: 05.02.23 / Савич Екатерина Константиновна. – Самара, 2021. – 166 с.
52. Проблемы управления качеством сложной технической продукции / В.А. Васильев, Г.М. Летучев, С.В. Александрова, М.Н. Александров // Качество. Инновации. Образование. – 2016. – №11(138). – С. 36–42.
53. Анализ видов и последствий потенциальных отказов. FMEA. Ссылочное руководство / пер. с англ. – Н. Новгород: ООО СМЦ «Приоритет», 2012. – 282 с.
54. ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования. – М.: Стандартиформ, 2015. – 32 с.
55. AIAG & VDA FMEA Handbook-2019 FMEA Handbook: Failure Mode and Effects Analysis (Reference Manual).
56. ГОСТ Р ИСО 7870-1-2011 Статистические методы. Контрольные карты. Часть 1. Общие принципы. 2012. – 20 с.
57. Антипов, Д.В. Статистические методы управления качеством продукции: учебное пособие / Д.В. Антипов, И.П. Васильева, Е.В. Еськина. – Самара: Издательство Самарского университета, 2022. – 88 с.
58. Клячкин В.Н. Проблема многомерного статистического контроля показателей качества в технологическом процессе. – URL: <https://www.quality.eup.ru/DOCUM/pmsk.htm> (дата обращения: 03.09.2024).
59. Ширяев А.Н. Статистический последовательный анализ. – М.: Наука, 1976. – 272 с.

60. ГОСТ Р ИСО 7870-2-2015 Статистические методы. Контрольные карты. Часть 2. Контрольные карты Шухарта. 2016. – 46 с.
61. Клячкин, В.Н. Модели и методы многомерного статистического контроля технологического процесса: автореф. дис. на соис. уч. ст. д.т.н.: 05.13.18 / Клячкин Владимир Николаевич. – Ульяновск, 2004. – 43 с.
62. Srinivasu, R. Utility of quality control tools and statistical process control to improve the productivity and quality in an industry / R. Srinivasu, G.S. Reddy and, S.R. Rikkula // *International Journal of Reviews in Computing*. – 2011, vol. 5, no. 3. – Pp.15–20.
63. Shewhart, W.A. *Economic Control of Quality of Manufactured Product* / W.A. Shewhart. – Van Nostrand Company, New York, 1931.
64. Woodall, W.H. Research issues and ideas in statistical process control /, W.H. Woodall, D.C. Montgomery // *Journal of Quality Technology*. – 1999, vol. 31, no. 4. – Pp.376–386.
65. Hachicha, W. A survey of control-chart pattern-recognition literature (1991–2010) based on a new conceptual classification scheme / W. Hachicha, A. Ghorbel. – *Computers & Industrial Engineering*. 2012, vol. 63, no. 1, pp. 204–222.
66. Montgomery, D.C. *Statistical Quality Control: A Modern Introduction* / D.C. Montgomery – 7th ed., John Wiley & Sons, Singapore, 2013.
67. Cascos, I. Control charts based on parameter depths / I. Cascos, M. López-Díaz // *Applied Mathematical Modelling*. 2018, vol. 53. – Pp.487–509.
68. Madanhire, I. Application of statistical process control (SPC) in manufacturing industry in a developing country / I. Madanhire, C. Mbohwa // *Procedia CIRP*. 2016, vol. 40. – Pp. 580–583.
69. Nelson, L.S. Standardization of Shewhart control chart / L.S. Nelson / *Journal of Quality Technology*. – 1989, vol. 21, no. 4. – Pp. 287–289.
70. A single X chart outperforming the joint X & R and X & S charts for monitoring mean and variance / S. Haridy, Y. Ou, Z. Wu, M.B.C. Khoo // *Quality Technology & Quantitative Management*, 2016, Vol. 13, No. 3, pp.1–20.

71. A review of statistical process control for short run manufacturing systems / E. Del Castillo, J.M. Grayson, D.C. Montgomery, G.C. Runger // *Communications in Statistics – Theory and Methods*. 1996, vol. 25, no. 11. – Pp. 2723–2737.
72. Del Castillo, E. Short-run statistical process control: Q-chart enhancements and alternative methods / E. Del Castillo, D.C. Montgomery // *Quality and Reliability Engineering International*. – 1994, vol. 10, no. 2. – Pp. 87–97.
73. Khoo, M.B.C. A study on Q chart for short runs production / M.B.C. Khoo, N.H. Moslim // in *Proceedings of the Regional Conference on Statistical Sciences 2010 (RCSS'10)*. – June 2010, pp.1–8.
74. Chen, G. The mean and standard deviation of the run length distribution of X charts when control limits are estimated / G. Chen // *Statistica Sinica*. – 1997, vol. 7. – Pp.789–798.
75. Short runs multivariate control chart for process dispersion / M.B.C. Khoo, S.H. Quah, H.C. Low, C.K. Ch'ng, // *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*. – 2005, vol. 12, no. 2. – Pp. 127–147.
76. On estimating control limits of X chart when the number of subgroups is small / T.R. Tsai, J.J. Lin, S.J. Wu, H.C. Lin // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2005, vol. 26, no. 9–12. – Pp. 1312–1316.
77. Al-Salti, M. A review of the literature on the use of SPC in batch production / M. Al-Salti, A. Statham // *Quality and Reliability Engineering International*. – 1994, vol. 10, no. 1. – Pp.49–61.
78. Acosta-Meijia, C.A. A comparison of control charting procedures for monitoring process dispersion / C.A. Acosta-Meijia, Jr., J.J. Pignatiello, B.V. Rao // *IIE Transactions* – 1999, vol. 31, no. 6. – Pp.569–579.
79. Tang, P.F. Statistical Process Control with Special Reference to Multivariable Processes and Short Runs / P.F. Tang. – PhD thesis, Victoria University of Technology, Melbourne, 1996. – Pp. 4–5 and 9–40.
80. E. Del Castillo, E. A review of statistical process control for short run manufacturing systems / E. Del Castillo, J.M. Grayson, D.C. Montgomery,

G.C. Runger // *Communications in Statistics – Theory and Methods*. – 1996, vol. 25, no. 11. – Pp.2723–2737.

81. Noskievičová, D. Design of methodology for application of statistical control on short run process in metallurgy / D. Noskievičová, B. Woska // *METABK*. – 2014, vol. 53, no. 1. – Pp.81–84.

82. Koons, G.F. in low-volume manufacturing: a case study / G.F. Koons, J.J. Luner // *Journal of Quality Technology*. – 1991, vol. 23, no. 4. – 3p.287–295.

83. Cullen, J.M. The use of statistical process control in one-off and small batch production' / J.M. Cullen // in *Proceedings of 8th International Conference on Automated Inspection and Product Control*. Chicago, June 1987. – Pp.63–68.

84. Chang, C.W. Monitoring the software development process using a short-run control chart / C.W. Chang // *Software Quality Journal*. – 2013, vol. 21. – Pp.479–499.

85. Bothe, D.R. SPC for short production runs / D.R. Bothe // *Quality*, 1988, vol 27, no. 12. – P.58.

86. Wheeler, D.J. *Short Run SPC* / D.J. Wheeler // SPC Press, Inc., Knoxville, 1991.

87. Montgomery, D.C. *Introduction to Statistical Quality Control* / D.C. Montgomery. – 2nd ed. – John Wiley & Sons, New York, 1991.

88. Farnum, N.R. Control charts for short runs: nonconstant process and measurement error / N.R. Farnum // *Journal of Quality Technology*. – 1992, vol. 24, no.2. – Pp. 138–144.

89. Lin, S.L. Short run statistical process control: multicriteria part family formation / S.L. Lin, S.Y. Lin, Y.J. Lai, S.I. Chang // *Journal of Quality and Reliability Engineering*. – 1997, vol. 13, no. 1. – Pp. 9–24.

90. Vermani, S.K. Modified nominal/target control charts – a case study in supplier development / S.K. Vermani // *The Quality Management Journal*. – 2003, vol. 10, no. 4. – Pp. 8–16.

91. Noskievičová, D. Complex application of statistical process control in conditions of profile bars production / D. Noskievičová, E. Jarošová // in *Proceedings of METAL2013*, Brno, Czech Republic, May 2013.

92. Moore, S.S. Process visualization in medical device manufacture: an adaptation of short run SPC techniques / S.S. Moore, E. Murphy // *Quality Engineering*, 2013, Vol. 25, No. 3, pp.247–265.

93. Carbone, P. Management of measurement uncertainty for effective statistical process control / Carbone, P., Macii, D., Petri, D. //in *Proceedings of the 19th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, (IEEE Cat. No.00CH37276), Anchorage, AK, USA, May 2002, pp.629–633.

94. Macii, D. Management of measurement uncertainty for effective statistical process control / Macii, D., Carbone, P. and Petri, D. // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2003, Vol. 52, No. 5, pp.1611–1617.

95. ГОСТ Р 59036-2020. Аддитивные технологии. Производство на основе селективно лазерного сплавления металлических порошков. Общие положения. – М.: Стандартинформ, 2020. – 22 с.

96. Разработка технологии изготовления деталей селективным лазерным сплавлением с использованием математического моделирования в САЕ системах: методические указания / А. В. Сотов, В. Г. Смелов, А. В. Агаповичев. – Самара: Изд-во Самар. ун-та, 2017. – 40 с.

97. Смелов, В.Г. Основные показатели качества титановых образцов, полученных аддитивными технологиями. – Текст : электронный / В.Г. Смелов, А.В. Митрянин // *Проблемы и перспективы развития двигателестроения : материалы докл. : сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф. 23–25 июня 2021 г.:* – Т. 1. – С. 297-299.

98. Исследование точности и стабильности изготовления секций соплового аппарата турбины методом селективного лазерного сплавления на основе контрольных карт качества / В.П. Алексеев, А.И. Хаймович, В.Г. Смелов [и др.] // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук.* – 2020. – Т. 22, №5(97). – С. 28-35.

99. ГОСТР 57910-2017. Материалы для аддитивных технологических процессов. Методы контроля и испытаний металлических материалов сырья и продукции. – М.: Стандартинформ, 2018. – 7 с.

100. Савич, Е.К. Управление качеством процесса нанесения покрытий с использованием метода PFMEA / Е.К. Савич, Д.В. Антипов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – Выпуск 5. – С. 531–536.

101. ГОСТ Р 58600-2019 Аддитивные технологии. Неразрушающий контроль металлических изделий, изготовленных методами аддитивных технологий. Основные положения. – 2019. – 11 с.

102. D. Wheeler, Short Run SPC, SPC Press Inc., Knoxville, Tennessee, 1991, pp. 1-32 and 9-10.

103. G. K. Griffith, Statistical Process Control Methods For Long and Short Runs, ASQC Quality Press, Milwaukee, Wisconsin, 1996. pp. 39-58 and 121-145.

104. Разработка модифицированных целевых краткосрочных контрольных карт и определение индексов воспроизводимости для анализа управляемости процессом производства изделий малыми сериями / В.П. Алексеев, А.И. Хаймович, В.Г. Смелов, В.В. Кокарева // СТИН 10-2024.

105. Виктор Э. Кейн Индексы воспроизводимости процессов. URL: <https://stom-vest.ru/standart/cp.htm> (дата обращения: 28.08.2024).

106. ГОСТ Р ИСО22514-2-2015 Статистические методы. Управление процессами. Часть 2. Оценка пригодности и воспроизводимости процесса на основе модели его изменения во времени.

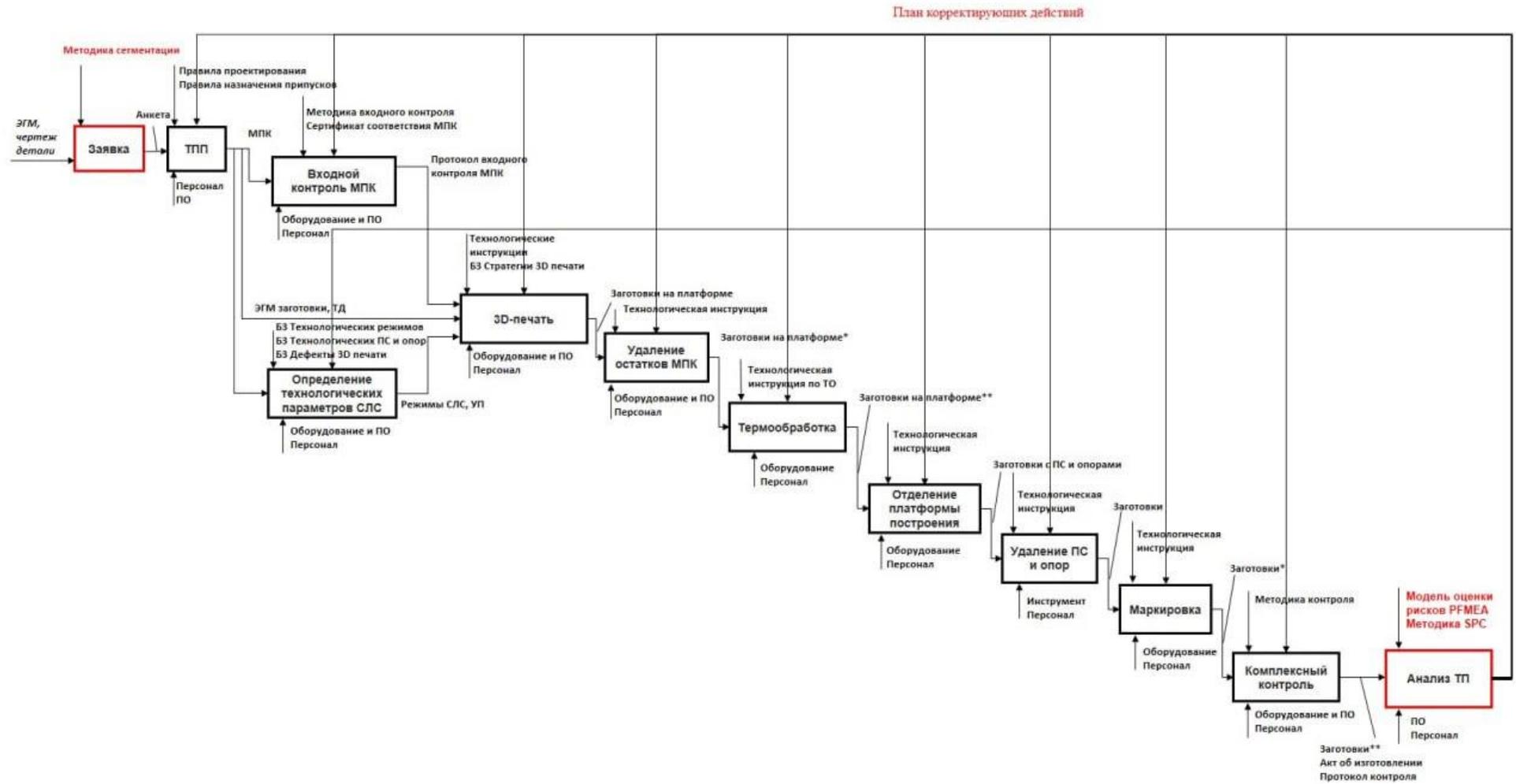
107. Апробация методики статистического контроля качества с применением краткосрочных контрольных карт для малых серий на примере селективного лазерного сплавления заготовок лопаток газотурбинного двигателя / В.П. Алексеев, А.И. Хаймович, В.Г. Смелов, В.В. Кокарева // СТИН 10-2024.

108. Риденко, П.А. Основы технологии производства газотурбинных двигателей: учебное пособие / П.А. Риденко. – Киев: Вища школа (Головное изд-во), 1985. – 255 с.

109. Филонов, И.П. Проектирование технологических процессов в машиностроении: учебное пособие для вузов / И.П. Филонов [и др.]; под общ. ред. И.П. Филонова. – Минск: УП «Технопринт», 2003. – 910 с.

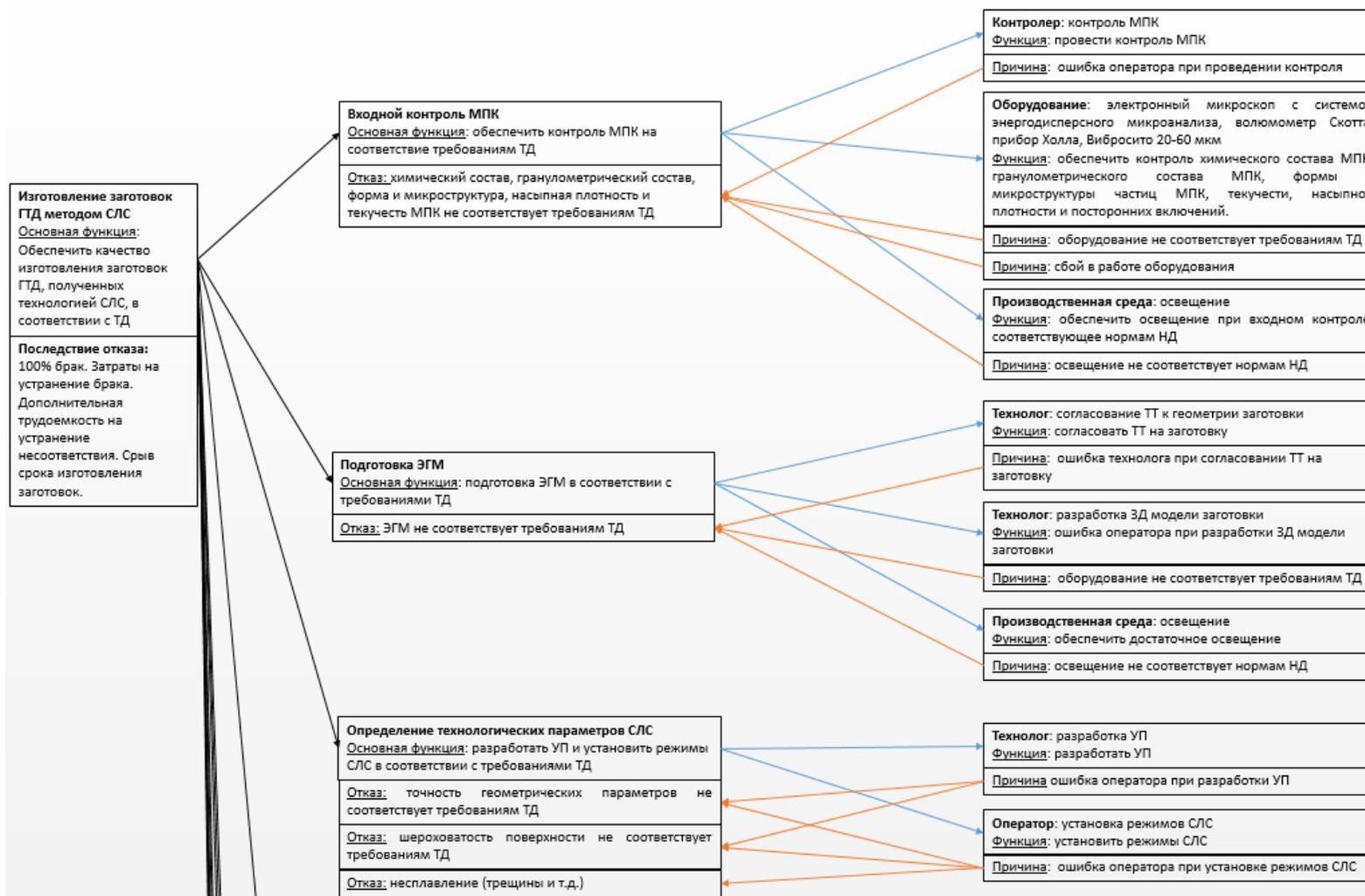
ПРИЛОЖЕНИЕ А

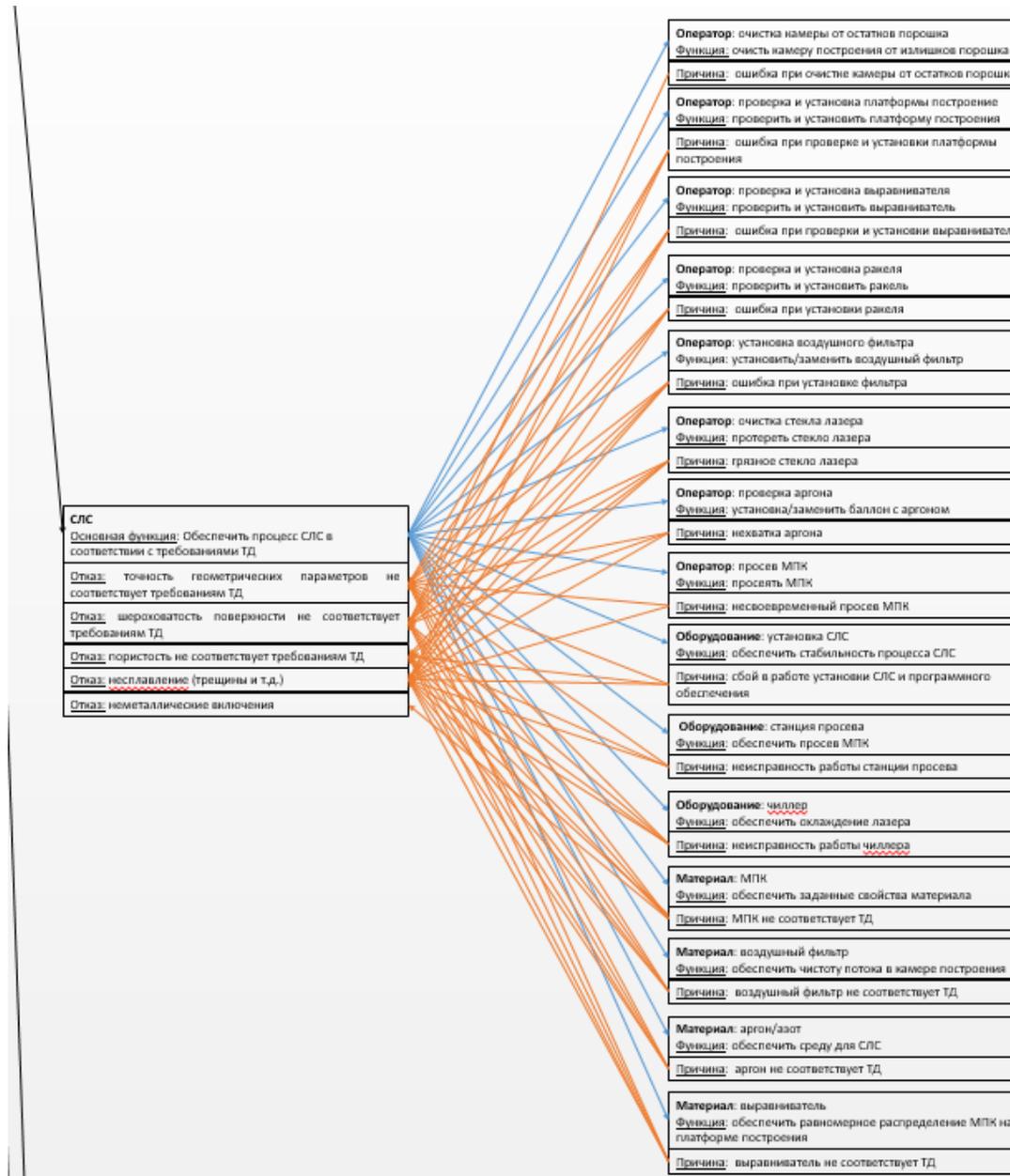
Функциональная модель процесса селективного лазерного сплавления

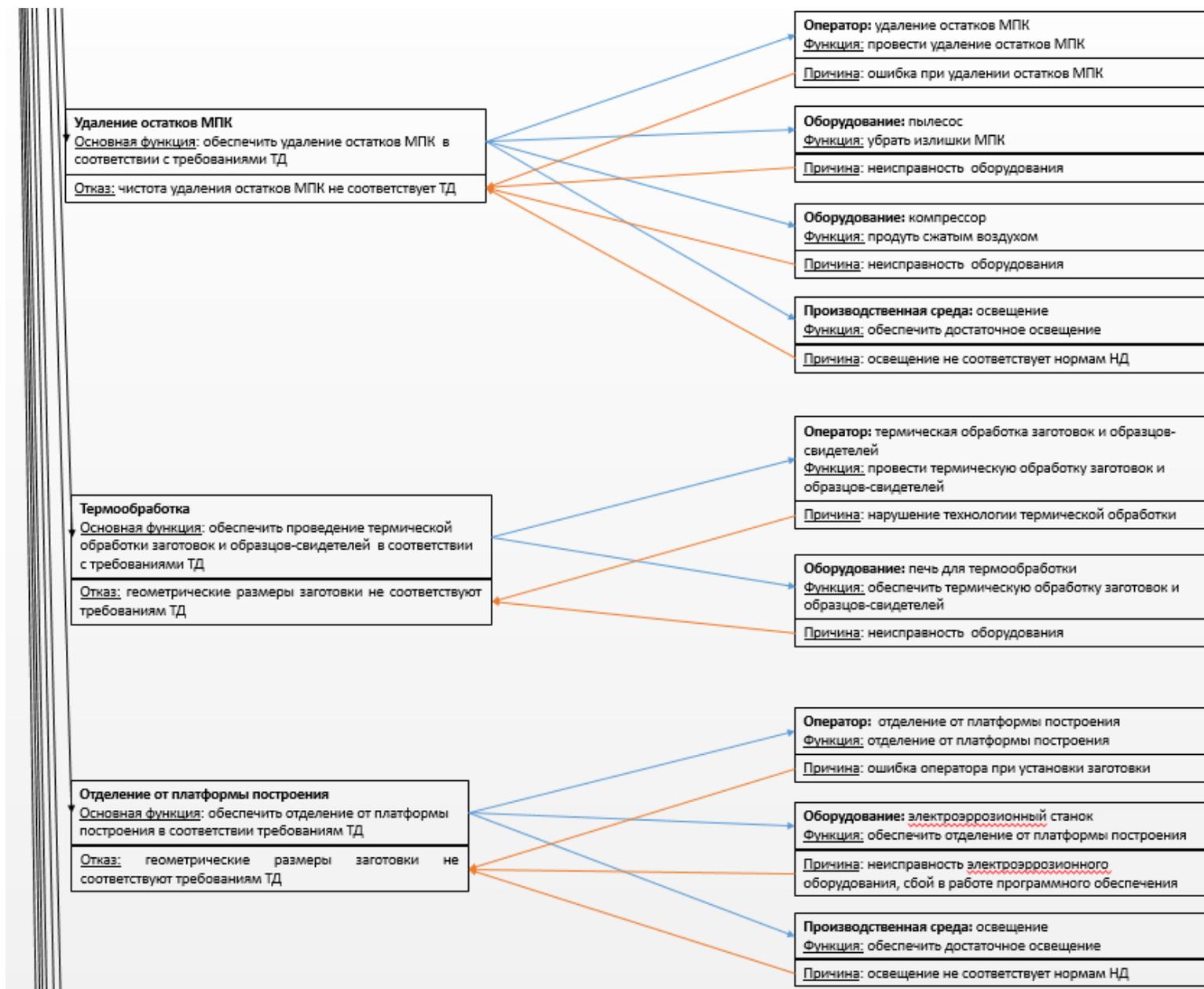


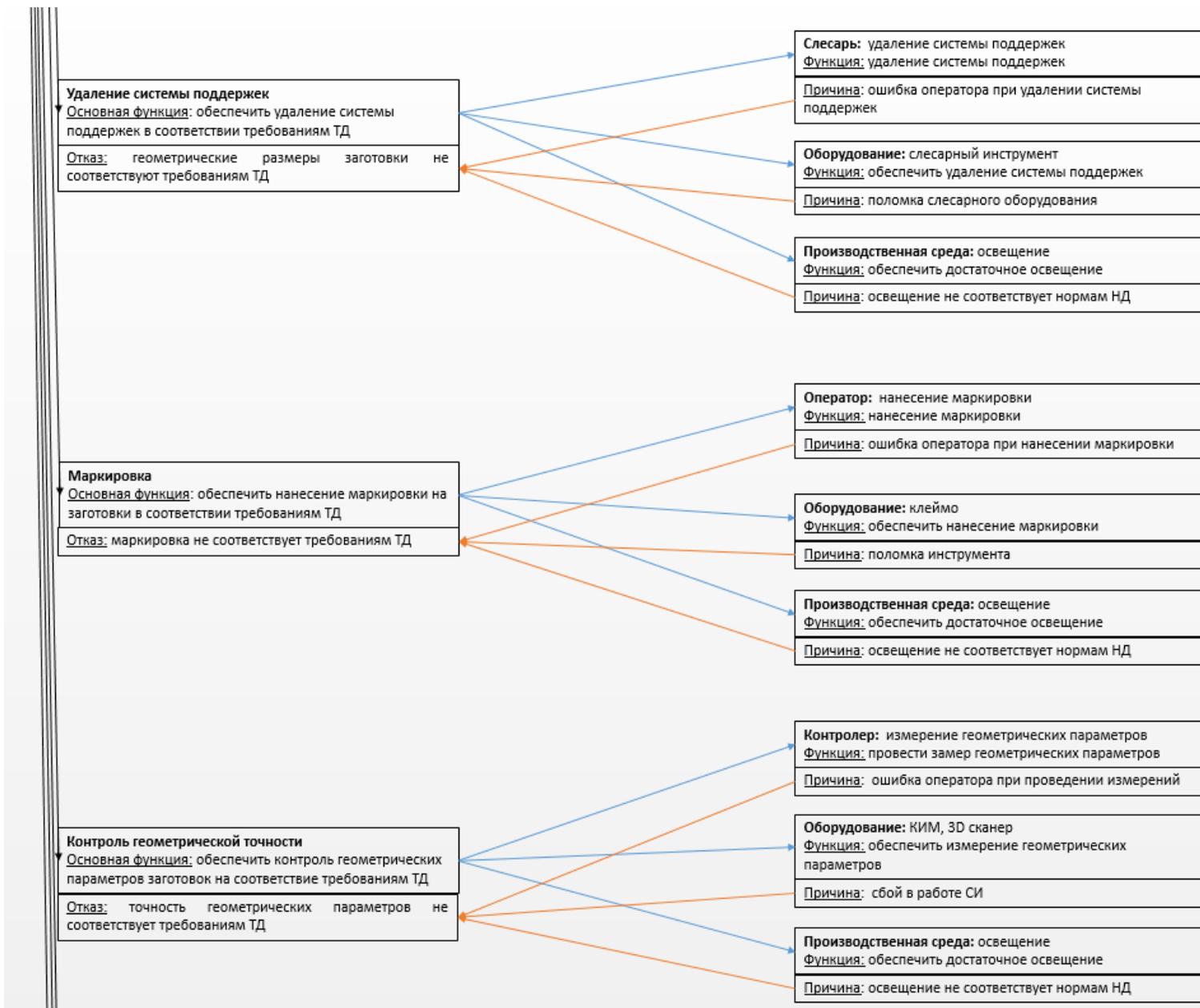
ПРИЛОЖЕНИЕ Б

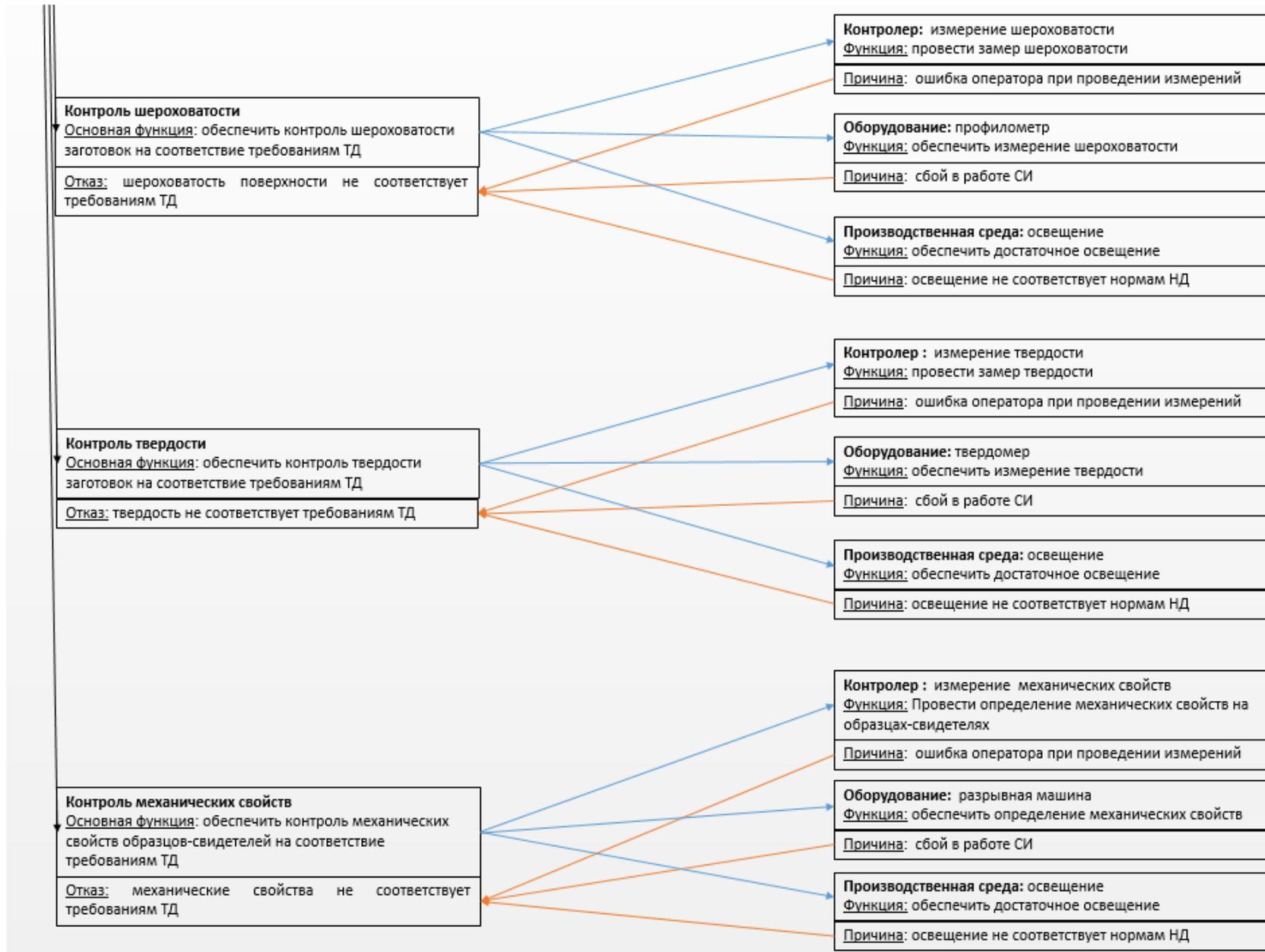
Структурный и функциональный анализ технологического процесса селективного лазерного сплавления











ПРИЛОЖЕНИЕ В

Этап 2 и 3 бланка протокола PFMEA

Структурный анализ (Этап 2)			Функциональный анализ (Этап 3)		
1. Процесс создания системы, подсистемы, компонента, или наименование процесса	2. Операция процесса, номер участка и наименование рассматриваемого элемента	3. Элемент функционирования процесса (4M: оператор, оборудование, материал, окружающая среда)	1. Функция процесса. Функция системы, подсистемы, компонента или процесса	2. Функция операции, процесса и характеристики продукции (количественные значения при необходимости)	3. Функция элемента процесса и параметры процесса
Изготовление заготовок ГТД методом СЛС	Входной контроль МПК	1. Контролер: контроль МПК	Обеспечить качество изготовления заготовок ГТД, полученных технологией СЛС, в соответствии с ТД	Обеспечить контроль МПК на соответствие требованиям ТД	1. Провести контроль МПК
		2. Оборудование: электронный микроскоп с системой энергодисперсного микроанализа, волюмометр Скотта, прибор Холла, Вибросито 20-60 мкм			2. Обеспечить контроль химического состава МПК, гранулометрического состава МПК, формы и микроструктуры частиц МПК, текучести, насыпной плотности и посторонних включений
		3. Производственная среда: освещение			3. Обеспечить освещение при входном контроле, соответствующее нормам НД
Изготовление заготовок ГТД методом СЛС	Подготовка ЭГМ	1. Технолог: согласование ТТ к геометрии заготовки	Обеспечить качество изготовления заготовок ГТД, полученных технологией СЛС, в соответствии с ТД	Подготовка ЭГМ в соответствии с требованиями ТД	1. Согласовать ТТ на заготовку
		2. Технолог: разработка 3Д модели заготовки			2. Разработать 3Д модель заготовки
		3. Производственная среда: освещение			3. Обеспечить достаточное освещение
Изготовление заготовок ГТД методом СЛС	Определение технологических параметров СЛС	1. Технолог: разработка УП	Обеспечить качество изготовления заготовок ГТД, полученных технологией СЛС, в соответствии с ТД	Разработать УП и установить режимы СЛС в соответствии с требованиями ТД	1. Разработать УП
		2. Оператор: установка режимов СЛС			2. Установить режимы СЛС

Изготовление заготовок ГТД методом СЛС	СЛС	<ol style="list-style-type: none"> 1. Оператор: очистка камеры от остатков порошка 2. Оператор: проверка и установка платформы построения 3. Оператор: проверка и установка выравнивателя 4. Оператор: проверка и установка ракель 5. Оператор: установка воздушного фильтра 6. Оператор: очистка стекла лазера 7. Оператор: проверка аргона 8. Оператор: просев МПК 9. Оборудование: установка СЛС 10. Оборудование: станция просева 11. Оборудование: чиллер 12. Материал: МПК 13. Материал: воздушный фильтр 14. Материал: аргон/азот 15. Материал: выравниватель 	Обеспечить качество изготовления заготовок ГТД, полученных технологией СЛС, в соответствии с ТД	Обеспечить процесс СЛС в соответствии с требованиями ТД	<ol style="list-style-type: none"> 1. Очисть камеру построения от излишков порошка 2. Проверить и установить платформу построения 3. Проверить и установить выравниватель 4. Проверить и установить ракель 5. Установить/заменить воздушный фильтр 6. Протереть стекло лазера 7. Установка/заменить баллон с аргоном 8. Просеять МПК 9. Обеспечить стабильность процесса СЛС 10. Обеспечить просев МПК 11. Обеспечить охлаждение лазера 12. Обеспечить заданные свойства материала 13. Обеспечить чистоту потока в камере построения 14. Обеспечить среду для СЛС 15. Обеспечить равномерное
Изготовление заготовок ГТД методом СЛС	Удаление остатков МПК	<ol style="list-style-type: none"> 1. Оператор: удаление остатков МПК 2. Оборудование: компрессор 3. Производственная среда: освещение 4. Материал: сжатый воздух 	Обеспечить качество изготовления заготовок ГТД, полученных технологией СЛС, в соответствии с ТД	Обеспечить удаление остатков МПК в соответствии с требованиями ТД	<ol style="list-style-type: none"> 1. Провести удаление остатков МПК 2. Подать сжатый воздух 3. Обеспечить достаточное освещение 4. Обеспечить продувку
Изготовление заготовок ГТД методом СЛС	Термообработка	<ol style="list-style-type: none"> 1. Оператор: термическая обработка заготовок и образцов-свидетелей 2. Оборудование: печь для термообработки 	Обеспечить качество изготовления заготовок ГТД, полученных технологией СЛС, в соответствии с ТД	Обеспечить проведение термической обработки заготовок и образцов-свидетелей в соответствии с требованиями ТД	<ol style="list-style-type: none"> 1. Провести термическую обработку заготовок и образцов-свидетелей 2. Обеспечить термическую обработку заготовок и образцов-свидетелей
Изготовление заготовок ГТД методом СЛС	Отделение от платформы построения	<ol style="list-style-type: none"> 1. Оператор: отделение от платформы построения 2. Оборудование: электроэрозионный станок 3. Производственная среда: освещение 	Обеспечить качество изготовления заготовок ГТД, полученных технологией СЛС, в соответствии с ТД	Обеспечить отделение от платформы построения в соответствии с требованиями ТД	<ol style="list-style-type: none"> 1. Отделение от платформы построения 2. Обеспечить отделение от платформы построения 3. Обеспечить достаточное освещение

Изготовление заготовок ГТД методом СЛС	Удаление системы поддержек	1. Слесарь: удаление системы поддержек	Обеспечить качество изготовления заготовок ГТД, полученных технологией СЛС, в соответствии с ТД	Обеспечить удаление системы поддержек в соответствии требованиям ТД	1. Удаление системы поддержек
		2. Оборудование: слесарный инструмент			2. Обеспечить удаление системы поддержек
		3. Производственная среда: освещение			3. Обеспечить достаточное освещение
Изготовление заготовок ГТД методом СЛС	Маркировка	1. Оператор: нанесение маркировки	Обеспечить качество изготовления заготовок ГТД, полученных технологией СЛС, в соответствии с ТД	Обеспечить нанесение маркировки на заготовки в соответствии требованиям ТД	1. Нанесение маркировки
		2. Оборудование: клеймо			2. Обеспечить нанесение маркировки
		3. Производственная среда: освещение			3. Обеспечить достаточное освещение
Изготовление заготовок ГТД методом СЛС	Контроль геометрической точности	1. Контролер: измерение геометрических параметров	Обеспечить качество изготовления заготовок ГТД, полученных технологией СЛС, в соответствии с ТД	Обеспечить контроль геометрических параметров заготовок на соответствие требованиям ТД	1. Провести замер геометрических параметров
		2. Оборудование: КИМ, 3D сканер			2. Обеспечить измерение геометрических параметров
		3. Производственная среда: освещение			3. Обеспечить достаточное освещение при проведении измерения
Изготовление заготовок ГТД методом СЛС	Контроль шероховатости	1. Контролер: измерение шероховатости	Обеспечить качество изготовления заготовок ГТД, полученных технологией СЛС, в соответствии с ТД	Обеспечить контроль шероховатости заготовок на соответствие требованиям ТД	1. Провести замер шероховатости
		2. Оборудование: профилометр			2. Обеспечить измерение шероховатости
		3. Производственная среда: освещение			3. Обеспечить достаточное освещение при проведении измерения
Изготовление заготовок ГТД методом СЛС	Контроль твердости	1. Контролер: измерение твердости	Обеспечить качество изготовления заготовок ГТД, полученных технологией СЛС, в соответствии с ТД	Обеспечить контроль твердости заготовок на соответствие требованиям ТД	1. Провести замер твердости
		2. Оборудование: твердомер			2. Обеспечить измерение твердости
		3. Производственная среда: освещение			3. Обеспечить достаточное освещение при проведении измерения
Изготовление заготовок ГТД методом СЛС	Контроль механических свойств	1. Контролер: измерение механических свойств	Обеспечить качество изготовления заготовок ГТД, полученных технологией СЛС, в соответствии с ТД	Обеспечить контроль механических свойств образцов-свидетелей на соответствие требованиям ТД	1. Провести определение механических свойств на образцах-свидетелях
		2. Оборудование: разрывная машина			2. Обеспечить определение механических свойств
		3. Производственная среда: освещение и температура			3. Обеспечить достаточное освещение и температуру при проведении измерения

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Этап 4, 5 и 6 бланка протокола PFMEA

Анализ отказов (этап 4)				Анализ риска (Этап 5)						Оптимизация (Этап 6)	
1. Последствия отказов для следующего верхнего уровня/или конечного потребителя	Значимость (S)	2. Отказ операции процесса	3. Причина отказа в элементах функционирования процесса	Текущие действия по предупреждению	Возникновение	Текущие действия по обнаружению	Обнаружение	PFMEA AP	Специальная характеристика	Действия по предупреждению	Действия по обнаружению
Несвоевременный запуск в производство Увеличение сроков производства	8	Химический состав, гранулометрический состав, форма и микроструктура, насыпная плотность и текучесть МПК не соответствует требованиям ТД	1. Контролер: ошибка оператора при проведении контроля	Повысить квалификацию оператора	2	-	2	M		Разработка рабочей инструкции (РИ) на входной контроль	Определить квалификацию и опыт работы оператора
			2. Оборудование: оборудование не соответствует требованиям ТД, сбой в работе оборудования	Периодическая поверка и профилактика оборудования	2	Контроль состояния оборудования	2	M		Поверка оборудования согласно графику	Организовать поверку оборудования
			3. Производственная среда: освещение не соответствует нормам НД	-	2	Контроль среды процесса	2	L		Проверка среды процесса непосредственно перед проведением операции	-
Исправимый брак. Увеличение сроков производства, за счет дополнительной трудоемкости на доработку	8	ЭГМ не соответствует требованиям ТД	1. Технолог: ошибка технолога при согласовании ТТ	Повысить квалификацию технолога	5	-	4	M		Выбор технолога согласно матрице компетенций	Определить квалификацию и опыт работы оператора
			2. Технолог: ошибка технолога при разработке 3Д модели заготовки	Повысить квалификацию технолога	5	-	4	M		Выбор технолога согласно матрице компетенций	Определить квалификацию и опыт работы оператора
			3. Производственная среда: освещение не соответствует нормам НД	-	2	Контроль среды процесса	2	L		Проверка среды процесса непосредственно перед проведением операции	-

Исправимый или неисправимый брак. Увеличение сроков производства, за счет дополнительной трудоемкости на доработку	7	1. Точность геометрических параметров не соответствует требованиям ТД	1. Технолог: ошибка технолога при разработки УП	Повысить квалификацию технолога	4	-	4	M	Выбор оператора согласно матрице компетенций	Определить квалификацию и опыт работы оператора
			2. Оператор: ошибка оператора при установки режимов СЛС	Повысить квалификацию оператора	4	-	4	M	Выбор оператора согласно матрице компетенций	Определить квалификацию и опыт работы оператора
Исправимый брак. Увеличение сроков производства, за счет дополнительной трудоемкости на доработку	7	2. Шероховатость поверхности не соответствует требованиям ТД	1. Технолог: ошибка технолога при разработки УП	Повысить квалификацию технолога	3	-	3	M	Выбор оператора согласно матрице компетенций	Определить квалификацию и опыт работы оператора
			2. Оператор: ошибка оператора при установки режимов СЛС	Повысить квалификацию оператора	3	-	3	M	Выбор оператора согласно матрице компетенций	Определить квалификацию и опыт работы оператора
Исправимый или неисправимый брак. Увеличение сроков производства, за счет дополнительной трудоемкости на доработку	7	3. Несплавление (трещины и т.д.)	2. Оператор: ошибка оператора при установки режимов СЛС	Повысить квалификацию оператора	3	-	4	M	Выбор оператора согласно матрице компетенций	Определить квалификацию и опыт работы оператора

Исправимый или неисправимый брак. Увеличение сроков производства, за счет дополнительной трудоемкости на доработку	8	1. Точность геометрических параметров не соответствует требованиям ТД	2. Оператор: ошибка при проверке и установки платформы построения	Повысить квалификацию оператора	2	-	4	L	Проверка и установка платформы согласно РИ	Организовать работу в соответствии с РИ
		3. Оператор: ошибка при проверке и установки выравнителя	Повысить квалификацию оператора	2	-	5	M	Проверка и установка выравнителя согласно РИ	Организовать работу в соответствии с РИ	
		4. Оператор: ошибка при установки ракеля	Повысить квалификацию оператора	2	-	6	M	Проверить и установить ракель согласно РИ	Организовать работу в соответствии с РИ	
		5. Оператор: ошибка при установке фильтра	Повысить квалификацию оператора	2	-	5	M	Установить/заменить воздушный фильтр согласно РИ	Организовать работу в соответствии с РИ	
		6. Оператор: грязное стекло лазера	Повысить квалификацию оператора	2	-	4	M	Протереть стекло согласно РИ	Организовать работу в соответствии с РИ	
		7. Оператор: нехватка аргона	Повысить квалификацию оператора	2	-	3	L	Установка/заменить баллон с аргоном согласно РИ	Организовать работу в соответствии с РИ	
		8. Оператор: несвоевременный просев МПК	Повысить квалификацию оператора	3	-	4	M	Просеять МПК согласно графику	Организовать работу в соответствии с РИ	
		9. Оборудование: сбой в работе установки СЛС и программного обеспечения	Периодическая профилактическая проверка оборудования	3	Входной контроль	6	H	Определить график проверки оборудования	Организовать поверку оборудования	
		10. Оборудование: неисправность работы станции просева	Периодическая профилактическая проверка оборудования	3	Входной контроль	6	H	Определить график проверки оборудования	Организовать поверку оборудования	
		11. Оборудование: неисправность работы чиллера	Периодическая профилактическая проверка оборудования	2	Входной контроль	4	M	Определить график проверки оборудования	Организовать поверку оборудования	
		12. Материал: МПК не соответствует ТД	-	2	Входной контроль	2	L	-	-	
		13. Материал: воздушный фильтр не соответствует ТД	-	2	Входной контроль	2	L	-	-	
		14. Материал: аргон не соответствует ТД	-	2	Входной контроль	2	L	-	-	
		15. Материал: выравнитель не соответствует ТД	-	2	Входной контроль	2	L	-	-	

Исправимый брак. Увеличение сроков производства, за счет дополнительной трудоемкости на доработку	6	2. Шероховатость поверхности не соответствует требованиям ТД	1. Оператор: ошибка очистки камеры от остатков порошка	Повысить квалификацию оператора	2	-	2	L	Очисть камеру построения от излишков порошка согласно РИ	Организовать работу в соответствии с РИ
			2. Оператор: ошибка при проверке и установки платформы построения	Повысить квалификацию оператора	2	-	2	M	Установить платформу построения согласно РИ	Организовать работу в соответствии с РИ
			3. Оператор: ошибка при проверки и установки выравнивателя	Повысить квалификацию оператора	2	-	5	M	Проверка и установка выравнивателя согласно РИ	Организовать работу в соответствии с РИ
			4. Оператор: ошибка при установки ракеля	Повысить квалификацию оператора	2	-	6	M	Проверить и установить рапель согласно РИ	Организовать работу в соответствии с РИ
			5. Оператор: ошибка при установке фильтра	Повысить квалификацию оператора	2	-	5	M	Установить/заменить воздушный фильтр согласно РИ	Организовать работу в соответствии с РИ
			6. Оператор: грязное стекло лазера	Повысить квалификацию оператора	2	-	4	M	Протереть стекло согласно РИ	Организовать работу в соответствии с РИ
			7. Оператор: нехватка аргона	Повысить квалификацию оператора	2	-	3	L	Установка/заменить баллон с аргоном согласно РИ	Организовать работу в соответствии с РИ
			11. Оборудование: несиравность работы чиллера	Периодическая профилактическая проверка оборудования	2	Входной контроль	5	M	Определить график проверки оборудования	Организовать поверку оборудования
			12. Материал: МПК не соответствует ТД	-	2	Входной контроль	2	L	-	-
			13. Материал: воздушный фильтр не соответствует ТД	-	2	Входной контроль	2	L	-	-
			14. Материал: аргон не соответствует ТД	-	2	Входной контроль	2	L	-	-
			15. Материал: выравниватель не соответствует ТД	-	2	Входной контроль	2	L	-	-

Неисправимый брак. Увеличение сроков производства, за счет дополнительной трудоемкости на замену продукции	8	3. Пористость не соответствует требованиям ТД	5. Оператор: ошибка при установке фильтра	Повысить квалификацию оператора	2	-	3	M	Проверить и установить фильтр согласно РИ	Организовать работу в соответствии с РИ
			6. Оператор: грязное стекло лазера	Повысить квалификацию оператора	3	-	4	H	Протереть стекло согласно РИ	Организовать работу в соответствии с РИ
			9. Оборудование: сбой в работе установки СЛС и программного обеспечения	Периодическая профилактическая проверка оборудования	2	Входной контроль	6	H	Определить график проверки оборудования	Организовать поверку оборудования
			10. Оборудование: неисправность работы станции просева	Периодическая профилактическая проверка оборудования	2	Входной контроль	5	H	Определить график проверки оборудования	Организовать поверку оборудования
			11. Оборудование: несиправность работы чиллера	Периодическая профилактическая проверка оборудования	2	Входной контроль	6	H	Определить график проверки оборудования	Организовать поверку оборудования
			12. Материал: МПК не соответствует ТД	-	2	Входной контроль	2	H	-	-
			13. Материал: воздушный фильтр не соответствует ТД	-	2	Входной контроль	2	L	-	-
			14. Материал: аргон не соответствует ТД	-	2	Входной контроль	2	L	-	-
			15. Материал: выравниватель не соответствует ТД	-	2	Входной контроль	2	L	-	-

Исправимый или неисправимый брак. Увеличение сроков производства, за счет дополнительной трудоемкости на доработку	8	4. Несплавление	2. Оператор: ошибка при проверке и установки платформы построения	Повысить квалификацию оператора	2	-	2	L	Установить платформу построения согласно РИ	Организовать работу в соответствии с РИ
		3. Оператор: ошибка при проверке и установки выравнителя	Повысить квалификацию оператора	2	-	2	M	Проверить и установить выравнитель согласно РИ	Организовать работу в соответствии с РИ	
		4. Оператор: ошибка при установки ракеля	Повысить квалификацию оператора	2	-	2	M	Проверить и установить ракель согласно РИ	Организовать работу в соответствии с РИ	
		5. Оператор: ошибка при установке фильтра	Повысить квалификацию оператора	2	-	3	M	Установить/заменить воздушный фильтр согласно РИ	Организовать работу в соответствии с РИ	
		6. Оператор: грязное стекло лазера	Повысить квалификацию оператора	2	-	5	M	Протереть стекло согласно РИ	Организовать работу в соответствии с РИ	
		7. Оператор: нехватка аргона	Повысить квалификацию оператора	2	-	3	M	Установка/заменить баллон с аргоном согласно РИ	Организовать работу в соответствии с РИ	
		8. Оператор: несвоевременный просев МПК	Повысить квалификацию оператора	3	-	4	M	Просев порошка согласно графику	Организовать работу в соответствии с РИ	
		9. Оборудование: сбой в работе установки СЛС и программного обеспечения	Периодическая профилактическая проверка оборудования	4	Входной контроль	6	H	Определить график проверки оборудования	Организовать поверку оборудования	
		10. Оборудование: неисправность работы станции просева	Периодическая профилактическая проверка оборудования	2	Входной контроль	6	H	Определить график проверки оборудования	Организовать поверку оборудования	
		11. Оборудование: неисправность работы чиллера	Периодическая профилактическая проверка оборудования	2	Входной контроль	6	H	Определить график проверки оборудования	Организовать поверку оборудования	
		12. Материал: МПК не соответствует ТД	-	2	Входной контроль	2	L	-	-	
		13. Материал: воздушный фильтр не соответствует ТД	-	2	Входной контроль	2	L	-	-	
		14. Материал: аргон не соответствует ТД	-	2	Входной контроль	2	L	-	-	
		15. Материал: выравнитель не соответствует ТД	-	2	Входной контроль	2	L	-	-	

Брак продукции. Увеличение сроков производства	8	5. Неметаллические включения	12. Материал: МПК не соответствует ТД	-	2	Входной контроль	4	M	-	-
Исправимый брак. Увеличение сроков производства, за счет дополнительной трудоемкости на доработку	5	Чистота удаления остатков МПК не соответствует ТД	1. Оператор: ошибка при удалении остатков МПК	Повысить квалификацию оператора	3	-	3	L	Удаление остатков МПК согласно РИ	Организовать работу в соответствии с РИ
			2. Оборудование: неисправность оборудования	Периодическая проверка оборудования	2	Контроль состояния оборудования	2	L	Определить график проверки оборудования	Организовать проверку оборудования
			3. Оборудование: неисправность оборудования	Периодическая проверка оборудования	2	Контроль состояния оборудования	2	L	Определить график проверки оборудования	Организовать проверку оборудования
			4. Производственная среда: освещение не соответствует нормам НД	-	2	-	2	L	Проверка среды процесса непосредственно перед проведением операции	-
Исправимый или неисправимый брак. Увеличение сроков производства, за счет дополнительной трудоемкости на доработку или замену на запасную продукцию	5	Геометрические размеры заготовки не соответствуют требованиям ТД	1. Оператор: нарушение технологии термической обработки	Повысить квалификацию оператора	4	-	4	M	Разработка методики термической обработки заготовок и образцов-свидетелей	Организовать работу в соответствии с методикой
			2. Оборудование: неисправность оборудования	Периодическая проверка оборудования	2	Контроль состояния оборудования	2	L	Проверка оборудования согласно графику	Организовать проверку оборудования
Исправимый или неисправимый брак. Увеличение сроков производства, за счет дополнительной трудоемкости на доработку	3	Геометрические размеры заготовки не соответствуют требованиям ТД	1. Оператор: ошибка оператора при установки заготовки	Повысить квалификацию оператора	4	-	2	L	Отделение от платформы построения согласно РИ	Организовать работу в соответствии с РИ
			2. Оборудование: неисправность электроэрозийного оборудования, сбой в работе программного обеспечения	Периодическая проверка оборудования	2	Контроль оборудования	2	L	Определить график проверки оборудования	Организовать проверку оборудования
			3. Производственная среда: освещение не соответствует нормам НД	-	2	Контроль среды проце	2	L	Проверка среды процесса непосредственно перед проведением операции	-

<p>Организация: 100% брак. Срыв срока изготовления</p> <p>Внутренний потребитель: Частичная забраковка изделия. Затраты на замену забракованных деталей. Увеличение времени производственного цикла</p> <p>Внешний потребитель: Снижение надежности и срока эксплуатации изделия. Затраты на ремонт изделия</p>	8	5. Неметаллические включения	12. Материал: МПК не соответствует ТД	-	2	Входной контроль	4	M	-	-
<p>Организация: Дополнительная трудоемкость на доработку и устранение несоответствия. Срыв срока изготовления</p> <p>Внутренний потребитель: отсутствует</p> <p>Внешний потребитель: отсутствует</p>	5	Чистота удаления остатков МПК не соответствует ТД	1. Оператор: ошибка при удалении остатков МПК	Повысить квалификацию оператора	3	-	3	L	Удаление остатков МПК согласно РИ	Организовать работу в соответствии с РИ
			2. Оборудование: неисправность оборудования	Периодическая проверка оборудования	2	Контроль состояния оборудования	2	L	Определить график проверки оборудования	Организовать поверку оборудования
			3. Оборудование: неисправность оборудования	Периодическая проверка оборудования	2	Контроль состояния оборудования	2	L	Определить график проверки оборудования	Организовать поверку оборудования
			4. Производственная среда: освещение не соответствует нормам НД	-	2	-	2	L	Проверка среды процесса непосредственно перед проведением операции	-
<p>Организация: частичная забраковка заготовки. Срыв срока изготовления</p> <p>Внутренний потребитель: увеличение времени производственного цикла</p> <p>Внешний потребитель: отсутствует</p>	5	Геометрические размеры заготовки не соответствуют требованиям ТД	1. Оператор: нарушение технологии термической обработки	Повысить квалификацию оператора	4	-	4	M	Разработка методики термической обработки заготовок и образцов-свидетелей	Организовать работу в соответствии с методикой
			2. Оборудование: неисправность оборудования	Периодическая проверка оборудования	2	Контроль состояния оборудования	2	L	Проверка оборудования согласно графику	Организовать поверку оборудования

Исправимый брак. Увеличение сроков производства, за счет дополнительной трудоемкости на доработку	2	Геометрические размеры заготовки не соответствуют требованиям ТД	1. Слесарь: ошибка слесаря при удалении системы поддержек	Требования к опыту и квалификации	3	-	3	L	Удаление согласно РИ	Организовать работу в соответствии с РИ
			2. Оборудование: поломка слесарного оборудования	Периодическая поверка оборудования	2	Контроль оборудования	2	L	Определить график проверки оборудования	Организовать поверку оборудования
			3. Производственная среда: освещение не соответствует нормам НД	-	2	Контроль среды процесса	2	L	Проверка среды процесса непосредственно перед проведением операции	-
Увеличение сроков производства, за счет дополнительной трудоемкости на доработку	2	Маркировка не соответствует требованиям ТД	1. Оператор: ошибка оператора при нанесении маркировки	Повысить квалификацию оператора	2	-	2	L	Нанесение маркировки согласно РИ	Организовать работу в соответствии с РИ
			2. Оборудование:: поломка инструмента	Периодическая поверка оборудования	2	Контроль оборудования	2	L	Определить график проверки оборудования	Организовать поверку оборудования
			3. Производственная среда: освещение не соответствует нормам НД	-	2	Контроль среды проце	2	L	Проверка среды процесса непосредственно перед проведением операции	-
Исправимый брак. Увеличение сроков производства, за счет дополнительной трудоемкости на доработку	8	Точность геометрических параметров не соответствует требованиям ТД	1. Контролер: ошибка контролера при проведении измерений	Повысить квалификацию контролера	5	-	5	M	Определение точности геометрических параметров согласно РИ	Организовать работу в соответствии с РИ
			2. Оборудование: сбой в ра	Периодическая поверка и профилактика оборудования	2	Контроль оборудования	2	L	Определить график поверки СИ	Организовать поверку СИ
			3. Производственная среда: освещение и температура не соответствует нормам НД	-	2	Контроль среды процесса	2	L	Проверка среды процесса непосредственно перед проведением операции	-

Исправимый брак. Увеличение сроков производства, за счет дополнительной трудоемкости на доработку	3	Шероховатость поверхности не соответствуют требованиям ТД	1. Контролер: ошибка контролера при проведении измерений	Требования к опыту и квалификации	3	-	3	M	Определение шероховатости согласно РИ	Организовать работу в соответствии с РИ
			2. Оборудование: сбой в работе СИ	Периодическая поверка средств измерений	2	-	2	L	Определить график поверки средства измерения	Организовать поверку СИ
			3. Производственная среда: освещение не соответствует нормам НД	-	2	Контроль среды процесса	2	L	Проверка среды процесса непосредственно перед проведением операции	-
Исправимый брак. Увеличение сроков производства, за счет дополнительной трудоемкости на доработку	7	Твердость не соответствуют требованиям ТД	1. Контролер: ошибка контролера при проведении измерений	Требования к опыту и квалификации	4	-	4	M	Определение твердости согласно РИ	Организовать работу в соответствии с РИ
			2. Оборудование: сбой в работе СИ	Периодическая поверка средств измерений	2	-	2	L	Определить график поверки средства измерения	Организовать поверку СИ
			3. Производственная среда: освещение не соответствует нормам НД	-	2	Контроль среды процесса	2	L	Проверка среды процесса непосредственно перед проведением операции	-
Неисправимый брак. Увеличение сроков производства, за счет дополнительной трудоемкости на производство запасной продукции	8	Механические свойства не соответствуют требованиям ТД	1. Контролер: ошибка контролера при проведении измерений	Требования к опыту и квалификации	4	-	4	M	Определение механических свойств согласно РИ	Организовать работу в соответствии с РИ
			2. Оборудование: сбой в работе СИ	Периодическая поверка средств измерений	2	-	2	L	Определить график поверки средства измерения	Организовать поверку СИ
			3. Производственная среда: освещение не соответствует нормам НД	-	2	Контроль среды процесса	2	L	Проверка среды процесса непосредственно перед проведением операции	-

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

План управления технологическим процессом селективного лазерного сплавления

ФИРМА		ПЛАН УПРАВЛЕНИЯ				ПУ 001.001			Лист 1				
ЗАКАЗ 001		ОБОЗНАЧЕНИЕ ДЕТАЛИ, СБ. ЕДИНИЦЫ ЛСА001.001		НАИМЕНОВАНИЕ ДЕТАЛИ, СБ. ЕДИНИЦЫ Лопатка соплового аппарата		ОБОЗНАЧЕНИЕ ПЛАНА УПРАВЛЕНИЯ							
Операция		Характеристики				Опытный образец		Установочная серия		Серийная продукция			
Номер	Описание	Оборудование, приспособление, оснастка для производства	№	продукта	процесса	Специальные свойства/ключевые характеристики	Технические требования/допуски	Оценка/техника измерения	Методы		Тех. обслуживание	План корректирующих действий	
									Выборка	Методы управления			
								Объем	Периодичность				
005	Входной контроль МПК	Рабочее место контролера	1	Целостность упаковки	-	-	Не допускается наличие повреждений	Визуально	100%	Каждая партия	Сертификат входного контроля	-	При отклонении от ТТ не допускать в производство. Несоответствующую продукцию вернуть поставщику через отдел закупок
		Сканирующий электронный микроскоп Tescan Vega3. Tescan Vega3. ГОСТ Р ИСО 22309-2015	2	Химический состав	-	-	Сертификат качества	Инструментально	100%			-	
		Вибросито 40-200 мкм. ГОСТ 23402-78, ГОСТ 25849-83	3	Гранулометрический состав	-	-	Сертификат качества	Инструментально	100%			-	
		Сканирующий электронный микроскоп Tescan Vega3. ГОСТ Р ИСО 22309-2015	4	Форма частиц	-	-	Сертификат качества	Инструментально	100%			-	
		Волюмометра Скотта. ГОСТ 19440-94	5	Насыпная плотность	-	-	Сертификат качества	Инструментально	100%			-	
		прибора Холла. ГОСТ 20899-98	6	Текучесть	-	-	Сертификат качества	Инструментально	100%			-	
		Сканирующий электронный микроскоп Tescan Vega3	7	Посторонние включения	-	-	Сертификат качества	Инструментально	100%			-	

010	Подготовка ЭГМ	Рабочее место конструктора	1	Целостность ЭГМ	-	-	Не допускается нарушение целостности ЭГМ и грубой поверхности ЭГМ	Визуально	100%	Каждая ЭГМ	Рабочая инструкция	-	При нарушении целостности ЭГМ и качества поверхности ЭГМ не допускать в производство. Несоответствующую ЭГМ вернуть поставщику	
			2	Припуск	-	-	2 мм	Инструментально	100%			-		
015	Определение технологических параметров СЛС	Рабочее место технолога	1	-	Расположение на платформе	-	-	Визуально	100%	Каждая ЭГМ	Рабочая инструкция	-	-	
			2	-	Компоновка на платформе	-	-	Визуально	100%			Каждая партия	-	-
			3	-	Режимы СЛС	-	-	Мощность 350 Вт, Скорость сканирования 600 мм/сек, Шаг сканирования 0,12 мм, толщина слоя 0,05 мм	Визуально	100%	Каждая партия	-	-	При нарушении режимов СЛС не допускать в производство
020	Селективное лазерное плавление	Рабочее место оператора, SLM 280HL, просева, чиплер, пылесос, платформа построения	1	Внешний вид	-	-	Не допускается наличие дефектов в виде трещин, сколов, расслоений	Визуально	100%	Каждая заготовка	-	-	При наличии дефектов заготовку изолировать с ярлыком несоответствия в тару красного цвета, сообщить мастеру для принятия решения и корректирующих действий	
				Свойства вторичной МПК	-	-	Не несоответствие характеристик вторичной МПК от ТТ	Инструментально	100%	Каждая 4 просева	Сертификат входного контроля	-		
			2		Толщина, шероховатость	-	-	не менее 20 мм, Ra = 3,2	Инструментально	100%	Каждая платформа	-		-
			3		Герметичность камеры	-	-	Содержание O ₂ =0,05, давления P=11-13 Па	Инструментально	100%	Каждая печать	-		-
			4		Объем аргона	-	-	не менее 5 кгс/см ²	Визуально	100%	Каждая печать	-		-
025	Удаление остатков МПК	Пылесос, сжатый воздух	1	Отсутствие МПК в заготовке	-	-	Не допускать наличие МПК в заготовке	Визуально	100%	Каждая заготовка	-	-	Отправить на доработку	
030	Термообработка	Печь Nabertherm N200	1	-	Температура и время выдержки	-	T=1180°C, время выдержки (t=4 часа	Инструментально	100%	Каждая заготовка	Рабочая инструкция	-	При нарушении режимов ТО партию изолировать с ярлыком несоответствия в тару красного цвета, сообщить мастеру для принятия решения и корректирующих действий	

035	Отделение от платформы построения	Электроэрозионный станок ДК77МЕ	1	Высота лопатки	-	-	70 мм±0,2 мм	Инструментально	100%	Каждая заготовка	-	-	При повышении допуска в производство не допускать
040	Удаление системы поддержек	Кусачки, напильник, штангенциркуль	1	Высота лопатки	-	-	70 мм±0,2 мм	Инструментально	100%	Каждая заготовка	-	Метрологическая проверка по графику	При повышении допуска в производство не допускать
			2	Частота поверхности	-	-	Наличие грубой поверхности не допускается	Визуально	100%	Каждая заготовка	-	Проверка оборудования	При наличии грубой поверхности вернуть заготовку на доработку с соответствующей записью в журнал
045	Маркировка	Клеймо	1	Текст маркировки	-	-	001.НН	Визуально	100%	Каждая заготовка	-	Проверка оборудования	При нарушении текста маркировки вернуть заготовку на доработку с соответствующей записью в журнал
050	Комплексный контроль	Профилограф, профилометр	1	Шероховатость	-	-	не более Ra 6,3	Инструментом	100%	Каждая заготовка	-	Метрологическая проверка по графику	При повышении допуска в производство не допускать
		3D сканер Rang Vision Pro	2	Отклонение профиля пера			± 0,2 мм	Инструментом					
		Испытательная машина	3	Предел прочности			не менее 900 МПа	Инструментом					
			4	Предел текучести			не менее 600 МПа	Инструментом					
			5	Относительное удлинение			не менее 20%	Инструментом					
		Рабочее место контролера	6	Индексы воспроизводимости			-	Ср>1, Срк>1, к-0					

ПРИЛОЖЕНИЕ Е**Акт внедрения результатов диссертационной работы
(АО «Лазерные системы»)**

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «ЛАЗЕРНЫЕ СИСТЕМЫ» (АО «ЛАЗЕРНЫЕ СИСТЕМЫ»)
ОКПО 33939347 / ОГРН 1187847309913 / ИНН 7819039902 / КПП 781901001
198515, Г. САНКТ-ПЕТЕРБУРГ, ВН. ТЕР. Г. ПОСЕЛОК СТРЕЛЬНА,
УЛ. СВЯЗИ, Д. 28, КОРП. 2, СТР. 1
ТЕЛ. +7 812 612-02-88 / ФАКС +7 812 612-02-89
OFFICE@LSYSTEMS.RU / LSYSTEMS.RU

**Акт о внедрении результатов диссертационной работы
«Совершенствование инструментов повышения качества продукции
в процессах производства деталей методом селективного лазерного
сплавления»**

Настоящий акт составлен в том, что результаты диссертационной работы Алексеева В.П., направленные на решение важной научной задачи в области совершенствования инструментов повышения качества изготовления заготовок сложной формы методом селективного лазерного сплавления, используются в производстве АО «Лазерные системы».

Разработанная Алексеевым В.П. методика PFMEA внедрена в производственный процесс изготовления деталей сложной геометрии методом селективного лазерного сплавления в Центра аддитивных технологий АО «Лазерные системы». Методика позволила сократить количество брака производимой продукции по несоответствию характеристик изделий до 10-15%.

С уважением,
Генеральный директор



Д.Н. Васильев

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж**Акт внедрения результатов диссертационной работы
(ООО НПО «БМ»)****БАЗОВОЕ
МАШИНОСТРОЕНИЕ****НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ
«БАЗОВОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ»**

625019, г. Тюмень, ул. 2-й км Старого Тобольского тракта, д.8, стр.8, оф.201
e-mail: office@npobazmash.ru

**Акт о внедрении результатов диссертационной работы
«Совершенствование инструментов повышения качества продукции в процессах
производства деталей методом селективного лазерного сплавления»**

Настоящий акт составлен в том, что результаты диссертационной работы Алексеева В.П., направленные на решение важной научной задачи в области повышения качества заготовок лопаток соплового аппарата турбины, изготовленных технологией СЛС, используются в производстве ООО Научно-производственное объединение «Базовое машиностроение». Наибольшую практическую значимость для предприятия представляет 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, тем самым уменьшить вероятность появления брака при изготовлении.

Разработанные инструменты повышения качества изготовления заготовок лопаток соплового аппарата турбины технологией СЛС позволили для нашего производства предотвратить брак последующих 60 шт. заготовок, что составляет 50% от общего объема заказа.

С уважением,
Генеральный директор
ООО НПО «БМ»



П.В. Гончаров

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Акт внедрения результатов диссертационного исследования в учебный процесс



УТВЕРЖДАЮ
 Проректор по учебной работе
 Самарского университета
 Гаврилову А.В.
 10 2024 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационного исследования в учебный процесс

Результаты диссертационного исследования по теме: «Совершенствование инструментов повышения качества продукции в процессах производства деталей методом селективного лазерного сплавления»,

выполненного на кафедре технологий производства двигателей,

внедрены в учебный процесс на кафедре технологий производства двигателей

на основании решения кафедры (протокол № 1 от «26» 08 2024 г.),

Указанные результаты включены в курс «Аддитивные технологии в машиностроении», направления подготовки 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств».

Заведующий кафедрой

«02» 10 2024 г. /Хаймович А.И.

Соискатель ученой степени

«02» 10 2024 г. /Алексеев В.П.

Начальник методического отдела
 учебно-методического управления
 к.т.н., доцент

«02» 10 2024 г. /Вдовин Р.А.

Начальник отдела сопровождения
 Научных исследований
 к.т.н., доцент

«02» 10 2024 г. /Родионов Л.В.