

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» на кафедре технологий производства двигателей.

Научный руководитель:

Хаймович Александр Исаакович, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», кафедра технологий производства двигателей, заведующий кафедрой.

Официальные оппоненты:

Айдаров Дмитрий Васильевич, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Самарский государственный технический университет", кафедра "Техносферная безопасность и управление качеством", профессор;

Пантюхин Олег Викторович, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет», кафедра промышленной автоматизации и робототехники, профессор.

Ведущая организация:

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

Защита состоится 16 декабря 2024 года в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.379.05, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» и на сайте https://ssau.ru/storage/pages/6547/file_6704b46f9fa470.66542266.pdf

Автореферат разослан «__» октября 2024 года

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.379.05,
доктор технических наук, доцент

Ерисов Я.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

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 (СЛС) металлического порошка. Основная проблема технологии СЛС заключается в том, что этот процесс 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. Преобладающим инструментом отслеживания изменений в процессе и обеспечения того, чтобы он находился в контролируемом состоянии, являются контрольные карты статистического управления процессами (SPC), учитывающие характерные черты аддитивного производства.

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 СЛС 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 возможностях для его совершенствования, необходимо применять краткосрочные контрольные карты.

В настоящее время повышением качества изготовления изделий технологией СЛС занимаются ведущие мировые 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 параметров качества и их стабильности в технологических процессах изготовления деталей технологией СЛС необходимо обеспечить управление процессом СЛС.

Следовательно, актуальность диссертационной работы определяется тем, что повышение качества изделий, получаемых технологией СЛС, 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: Ф.Б. Кросби, У. Э. Шухарт, К. Исикава, Тагути Г., У.Э. Деминг, В.В. Бойцов, Б.В. Бойцов, В.Г. Версан, В.А. Барвинок, Д.В. Антипов, В.Я. Белобрагин, В.А. Васильев, В.Н. Козловский, Панюков Д.И., В.Н. Азаров, Ю.П. Адлер, В.А. Лапидус, Г.П. Воронин, Б.С. Мигачев, Дж. Джуран др.

Решением вопросов, связанных с технологическими процессами селективного лазерного сплавления, занимались многие отечественные и зарубежные ученые: В.М. Довбыш, Зленко М.А., И.В. Шишковский, М.Д. Кривилев, С.П. Мурзин, А.П. Назаров, А.А. Попович, Сапрыкин А.А., И.Ю. Смуров, В.Ш. Суфияров, Е.В. Харанжевский, В.Г. Смелов, А.В. Сотов, С.Д. Boley, Chee Kai Chua, С. Coddet, A.V. Gusarov, K. Zeng, S.A. Khairallah, J.P. Kruth, M.V. Elsen, T. Ozel, A. Riemer, A.M. Rubenchik, J. Sienz, E.M. Weissman и другие.

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

- классификации возможных несоответствий для процесса СЛС в разрезе этапов жизненного цикла изделий (ЖЦИ);
- апробированных подходов к сегментации рынка продукции СЛС для обеспечения требуемых потребителем групп показателей качества;
- моделей оценки рисков для технологического процесса СЛС, построенных на основе методики PFMEA (анализа видов, последствий и причин потенциальных);
- 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 изделий методом селективного лазерного сплавления.

Предметом исследования являются методы и модели обеспечения 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 жизненного цикла изделий 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 и 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.

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 этапами 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.

Степень достоверности

Достоверность научных положений, выводов и результатов исследования обеспечивается анализом существующих подходов к обеспечению качества изделий, изготовленных технологией селективного лазерного сплавления, валидацией предложенных моделей и методов, практикой их применения для отдельных организаций.

Апробация работы

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).

Публикации. По теме исследования опубликовано 14 научных работ, из них 5 статей - в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК России; 1 статья - в журнале, индексируемом в базе данных Scopus; получено 3 патента на изобретения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформирована цель и задачи исследования, определен объект и предмет исследования, указана научная новизна положений, выдвигаемых на защиту, а также практическая ценность и достоверность результатов.

В первом разделе проведен анализ особенностей технологии СЛС. Установлено, что 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.

Проведен анализ теоретических подходов к обеспечению показателей качества изделий, изготовленных технологией СЛС. Установлено, что планирование качества с применением инструментов системы менеджмента качества остается без внимания. Установлено отсутствие информации о том, какие отказы, несоответствия и риски, возникают при проектировании технологического процесса СЛС, также отсутствует описание последствий и причин возникновения данных отказов и действий, необходимых для их уменьшения.

Проведен анализ статистических методов управления качеством. Установлено, что контрольные карты являются преобладающими инструментами статистического управления процессами, используемыми для отслеживания изменений и обеспечения того, чтобы процесс находился в контролируемом состоянии. Выявлено, что для статистического анализа аддитивного производства, в частности, технологии СЛС, необходимо использовать краткосрочные контрольные карты, которые различаются для повторяющихся и неповторяющихся процессов. Для аддитивного производства, относящегося к повторяющимся процессам, подходы требуют преобразования объединенных данных о разных продуктах или различных деталях с использованием одной и той же карты с разными номинальными размерами и допусками.

Во втором разделе разработана функциональная модель процесса СЛС (рисунок 1), включающая ключевые этапы и артефакты, которые далее связываются отношениями принадлежности с картой дефектов, выявленных в процессе СЛС, с целью комплексного анализа потенциальных несоответствий. Технологический процесс СЛС декомпозирован на основные этапы и операции, на каждом этапе указаны входные данные, механизмы, элементы управления и выходные данные.

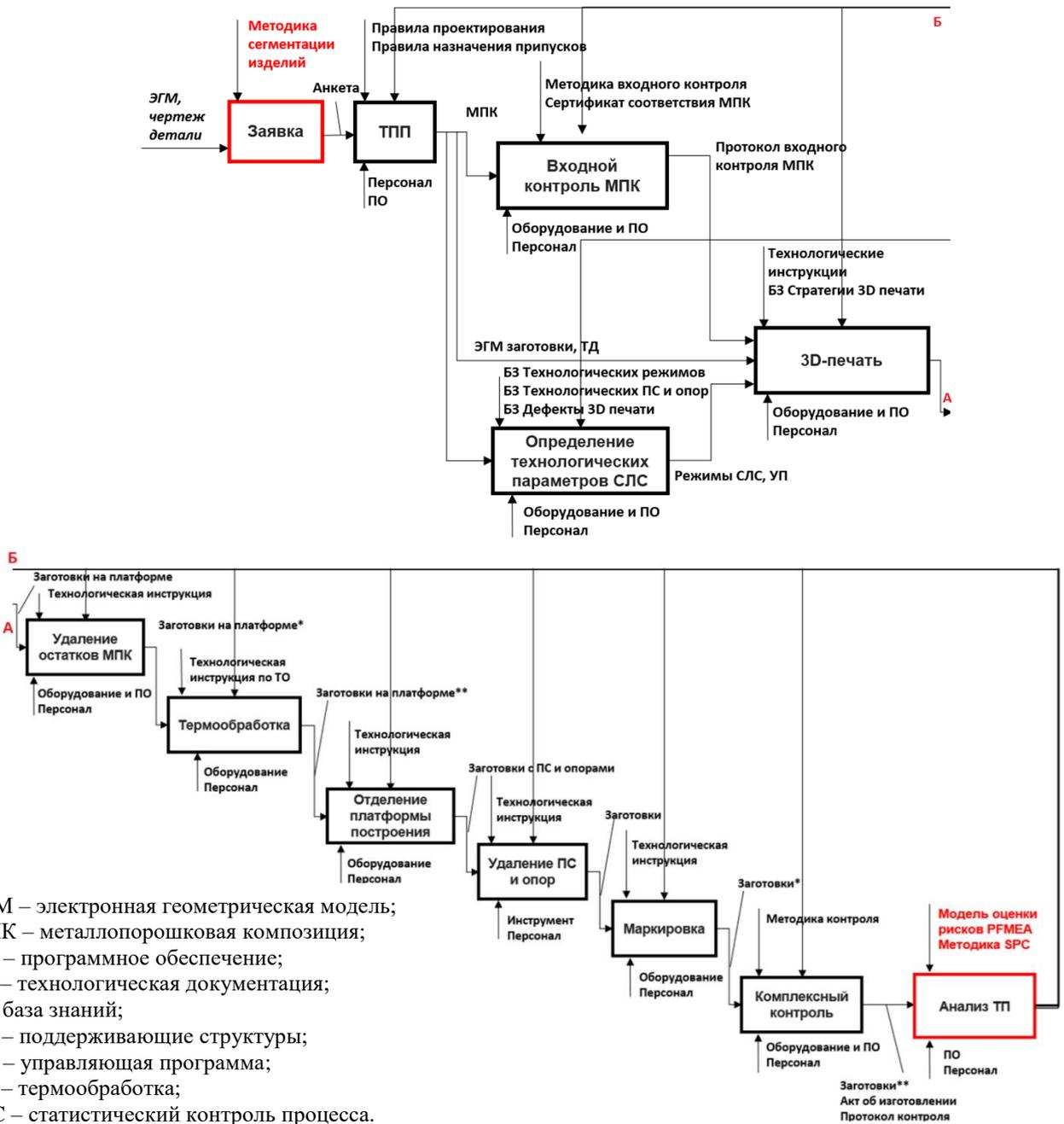


Рисунок 1 – Функциональная модель технологического процесса СЛС

Определены основные группы факторов, оказывающие влияние на качество заготовок в процессе СЛС и построена причинно-следственная диаграмма Исикавы (рисунок 2).

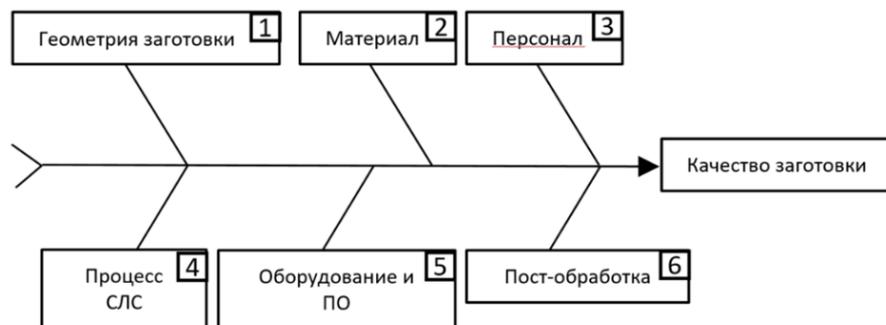


Рисунок 2 – Диаграмма Исикавы для технологии СЛС

Факторы, оказывающие влияние на показатели качества технологического процесса СЛС, были сопоставлены (связаны отношениями принадлежности) с основными операциями СЛС (рисунок 3).



Рисунок 3 – Факторы, оказывающие влияние на показатели качества процесса СЛС в разрезе основных операций

Разработана методика сегментации требований потребителя к изделиям для процесса СЛС 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 СЛС (Рисунок 4). Метод QFD позволяет определить ключевые показатели качества по результатам анкетирования Заказчика (потребителя), согласовать требования к продукции СЛС и отнести изделие, получаемое технологией СЛС к определенному сегменту, что позволяет для каждого сегмента разработать свою траекторию управления рисками на основе подходов PFMEA.

Определены основные виды дефектов в деталях, изготовленных по технологии СЛС. На основе основных дефектов определены отказы, причины и последствия отказа на каждой из операций технологического процесса СЛС.

Разработана модель оценки рисков на основе анализа видов и последствий потенциальных несоответствий процесса по методологии PFMEA. Определены структурные элементы процесса изготовления заготовок технологией СЛС и установлены их основные функции (рисунок 5). Выявлены возможные отказы структурных элементов, определены их последствия и потенциальные причины возникновения (рисунок 6). После проведения анализа видов и последствий потенциальных отказов определены действия по предотвращению и устранению отказов.

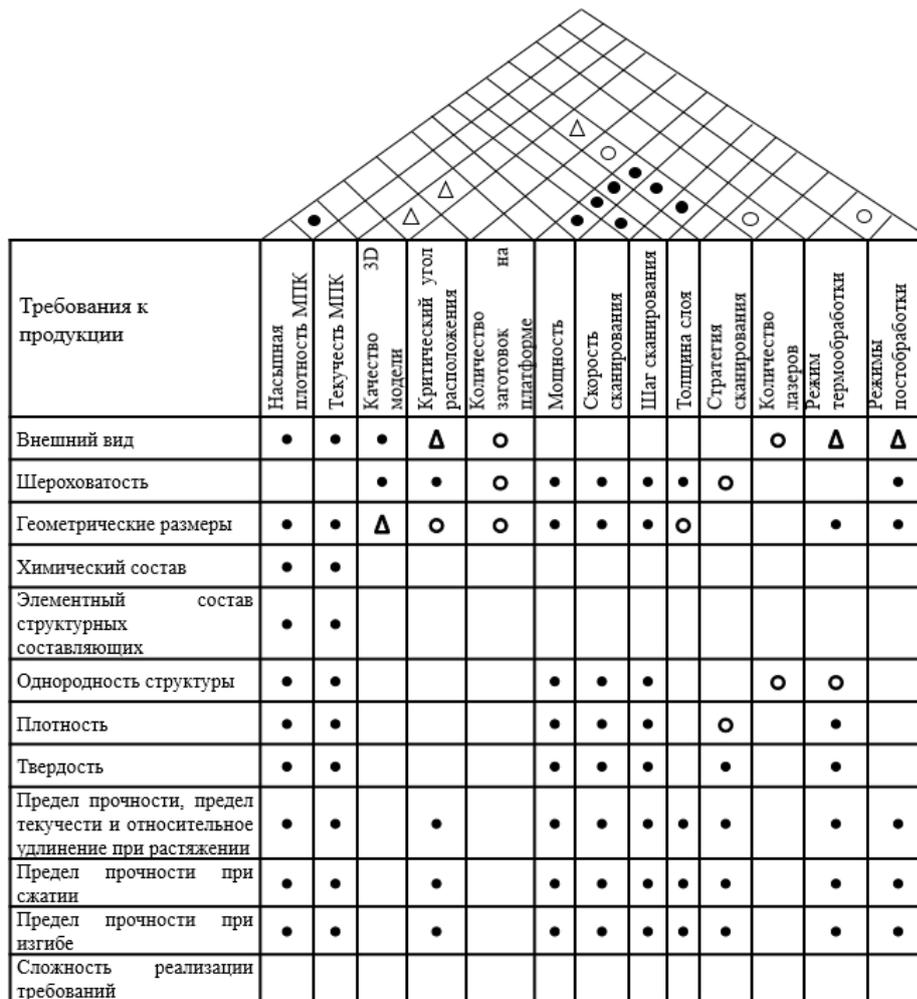


Рисунок 4 – Дом качества, устанавливающий связь между характеристиками продукции и требованиями к характеристикам процесса



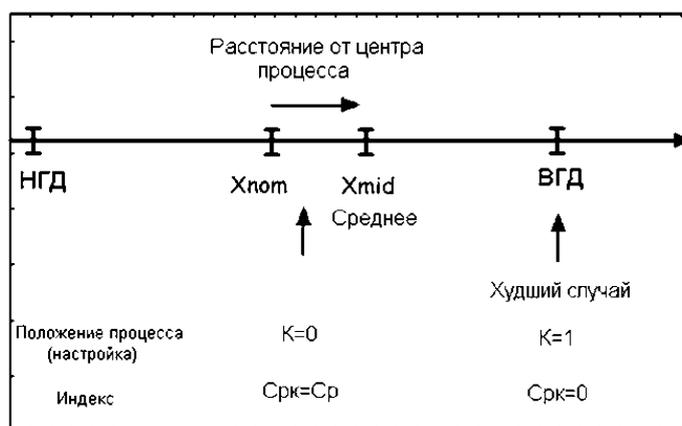
Рисунок 5 – Фрагмент дерева функционального анализа процесса изготовления заготовок технологией СЛС

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 3D 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	-

Рисунок 6 – Фрагмент бланка протокола PFMEA

В третьем разделе представлена методика статистического анализа воспроизводимости процесса производства изделий со сложной геометрией малыми сериями, отличающаяся разработкой модифицированных целевых краткосрочных контрольных карт и определением индексов воспроизводимости. Она основана на критическом анализе имеющихся методов построения контрольных карт и индексов возможностей для краткосрочных процессов. 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. К метрикам воспроизводимости и управляемости процессом для коротких серий также к следует отнести индексы воспроизводимости C_p , C_{pk} , C_{pu} , C_{pl} рассчитанные по отклонениям и наличие (отсутствие) тренда смещения среднего отклонений от центра поля допуска.

Индекс налаженности C_{pk} использует нормированное расстояние между средним процессом и ближайшей границей допуска (рисунок 7)



Среднюю точку диапазона допуска находим по формуле:

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

где ВГД – верхняя граница допуска, НГД – нижняя граница допуска.

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 7.

Нормированное расстояние равно:

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

где IT – поле допуска. Знак к абсолютному значению добавляется в том случае, когда $НГД < X_{mid} < \bar{X}$. 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 δX для симметричного поля допуска IT :

$$C_{pku} = \frac{ВГД - \bar{X}}{3\sigma} = \frac{ВГД - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{inom} - (\bar{X} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{inom})}{3\sigma} = \frac{[(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (ВГД - X_{inom})) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - X_{inom})]}{3\sigma} = \frac{\frac{IT}{2} - \delta X}{3\sigma} \quad (5)$$

$$\delta X = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta X_i.$$

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

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

$$C_{pku} = \frac{ВГД - \bar{X}}{3\sigma} = \frac{ВГД - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{imid} - (\bar{X} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{imid})}{3\sigma} = \frac{[(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (ВГД - X_{imid})) - (\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{inom} - X_{imid}) + \delta X)]}{3\sigma} = \frac{\frac{IT}{2} - (\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\mu_i - X_{imid}) + \delta X)}{3\sigma} = \frac{IT - \delta X}{3\sigma} + \frac{k_n}{6\sigma} IT, \quad (6)$$

где $k_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_i = \frac{2}{IT \cdot n} \sum_{i=1}^n |X_{imid} - \mu_i|$ - среднее для всех размеров смещение номинальной величины размера от размера в середине поля допуска, $\mu_i = M(X_{i nom}) \rightarrow X_{i nom}$ - математическое ожидание номинальной величины i -го размера. Для воспроизводимого (управляемого) процесса математическое ожидание номинальной величины всегда стремится к этой номинальной величине. Откуда следует

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

Аналогично для нижнего индекса воспроизводимости:

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

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

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

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

$$M(\hat{k}_n) = k_n, \quad M(\bar{\delta X}) = 0. \quad (10)$$

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

Для оценки смещения отклонения, кроме среднего $\bar{\delta X} = 0$, может быть также использована медиана отклонений $\delta \tilde{X}$ рассчитанная по формуле:

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

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

В четвертой главе разработан алгоритм управления показателями качества в технологических процессах изготовления изделий со сложной геометрией методом СЛС (рисунок 8).

Алгоритм апробирован при изготовлении заготовок лопаток соплового аппарата турбины ГТД методом СЛС из порошка жаропрочного сплава ВЖ159. На платформе построения располагалось 10 заготовок, что является одной партией. Проведено изготовление лопаток на установке СЛС SLM280HL.

Контроль геометрии лопаток производился в трех сечениях на 3D сканере RangeVision PRO. В качестве контролируемых геометрических параметров рассматривалось отклонения координат профиля сечения пера лопатки от номинальных значений. Профиль пера измеряется в 20 контрольных точках в 3 сечениях. Каждое отклонение от номинального значения положения контрольной точки является отдельной характеристикой.

В соответствии с разработанной методикой были определены и исключены выбросы отклонений от номинала точек профиля, проверена однородность дисперсий в группе, проведена проверка на нормальность распределение отклонений в каждой группе, проведен непараметрический анализ для проверки различия в группах.

При анализе результатов измерений в каждой партии были обнаружена по две располагавшиеся 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 – ко второй).

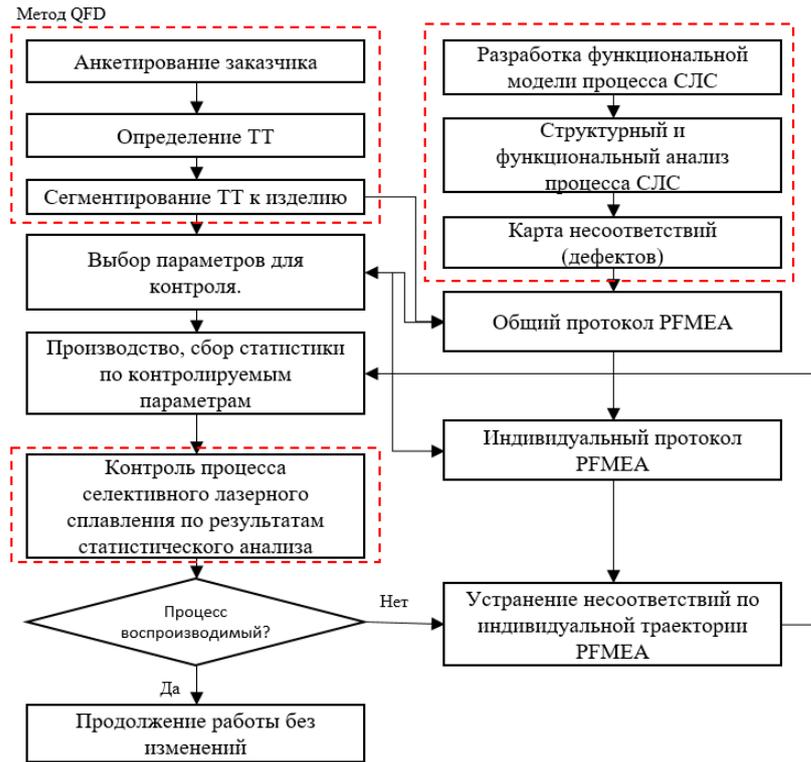


Рисунок 8 - Алгоритм обеспечения показателей качества ТП СЛС

Модифицированные краткосрочные карты Шухарта среднего и скользящего размаха переменной $\frac{\delta X}{IT/2}$ для первых и вторых подгрупп представлены на рисунке 9,а и 9,б соответственно.

Воспроизводимость процесса СЛС для первой группы лопаток оценивалась с использованием индексов воспроизводимости. Для отклонений точек поверхности пера лопатки от номинальных значений должно выполняться условие $k_n = const$. Наличие тренда k_n , который наблюдается по диаграмме средних (рисунок 9,а) может свидетельствовать о нарушении воспроизводимости процесса.

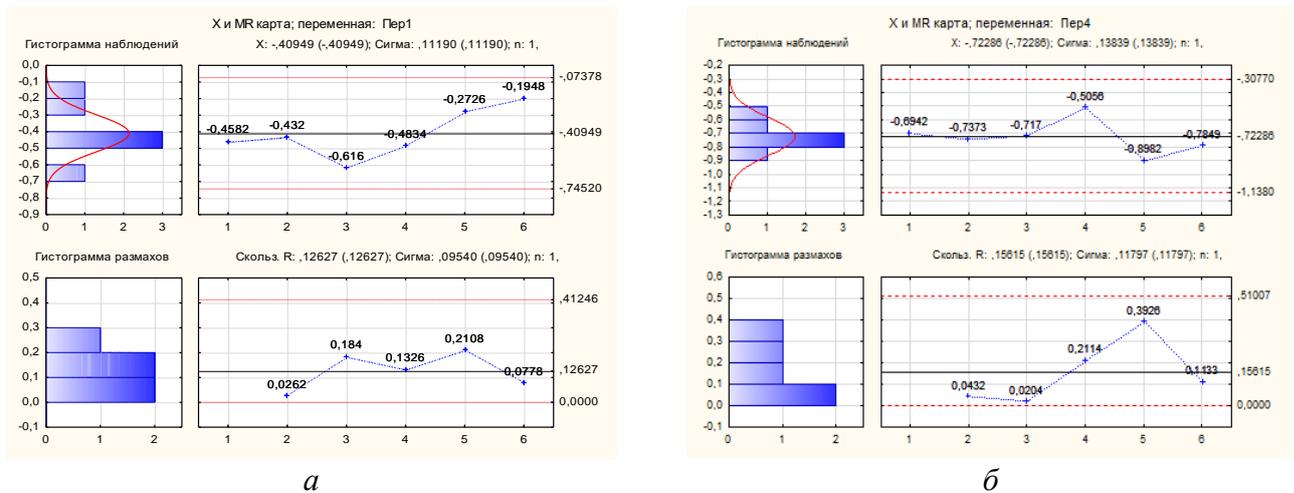


Рисунок 9 - Модифицированные краткосрочные карты Шухарта для средних значений отклонений

Расчета индексов воспроизводимости также указывает, что процесс «невоспроизводимый» ($C_p=0,96$), следовательно существует вероятность появления брака в следующих партиях.

Модифицированная краткосрочная карта Шухарта среднего и скользящего размаха R переменной $\frac{\bar{\delta X}}{IT/2}$ для точек второй группы приведена на рисунке 9,б. 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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении представлены основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. Проведен теоретический анализ существующих подходов к обеспечению показателей качества заготовок, изготовленных технологией СЛС. 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, изготовленного технологией СЛС с агрегированием ключевых этапов и артефактов процесса для составления его карты дефектов с целью комплексного анализа потенциальных несоответствий в соответствии с сегментированием требований потребителя. 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 Шухарта 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. Разработан и апробирован алгоритм управления показателями качества в технологических процессах изготовления изделий со сложной геометрией методом СЛС. 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 НАУЧНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России:

1. **Алексеев, В.П.** Исследование точности изготовления заготовок соплового аппарата турбины, изготовленных технологией селективного лазерного сплавления на основе краткосрочных контрольных карт качества / **В.П. Алексеев**, А.И. Хаймович, В.Г. Смелов, В.В. Кокарева // Известия Самарского научного центра РАН. — 2023. — Т. 25. № 6. — С. 5-11.
2. **Алексеев, В.П.** Исследование структуры и механических свойств образцов, полученных методом селективного лазерного сплавления из металлического порошка жаропрочного сплава ВЖ-159 / **В.П. Алексеев**, Р.Р. Кяримов, А.И. Хаймович, В.Г. Смелов // Известия Самарского научного центра РАН. — 2023. — Т. 25. № 4. — С. 36-46.
3. **Алексеев, В.П.** Адаптация рабочих параметров процесса селективного лазерного сплавления при замене оборудования / **В.П. Алексеев**, И.С. Степаненко // Известия Самарского научного центра РАН. — 2023. — Т. 25. № 6. — С. 12-16.
4. **Алексеев, В.П.** 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, В.В. Кокарева // Известия Самарского научного центра РАН. — 2020. — Т. 22. № 5 (97). — С. 28-35.
5. **Алексеев, В.П.** Разработка модели оценки рисков, построенной на основе анализа видов, последствий и причин потенциальных несоответствий технологического процесса селективного лазерного сплавления (PFMEA) / **В.П. Алексеев** // Известия Тульского государственного университета. – 2024. – Вып. 9. – С.600-606

Публикации в научных изданиях, индексируемых базой Scopus:

6. Agapovichev, A. Study of the structure and mechanical properties of samples obtained by the selective laser alloying technology from the Inconel 738 heat-resistant alloy powder / A.A. Agapovichev, V.V. Kokareva, **V.P. Alekseev**, V.G. Smelov // Chernye Metally. – 2021. — Vol. 2021. Issue 1. — P. 67-71.

Патенты:

7. Патент № 2782192, Российская Федерация, МПК В33У 10/00, В33У 70/00, В23К 26/342. Способ получения деталей из алюминиевого сплава системы Al-Mg-Sc технологией селективного лазерного сплавления: № 2022100321: заявлено 11.01.2022; опубликовано 24.10.2022 / В. Г. Смелов, А. И. Хаймович, А. В. Агаповичев, **В.П. Алексеев** [и др.]; заявитель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева".
8. Патент № 2824784, Российская Федерация, МПК В22F 10/64, В22F 3/105, В33У 10/00. Способ получения деталей из жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ технологией селективного лазерного сплавления: № 2023102911: заявлено 08.02.2023; опубликовано 22.01.2024 / В. Г. Смелов, А. И. Хаймович, Р. А. Вдовин, **В.П. Алексеев** [и др.]; заявитель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева".
9. Патент № 2812102, Российская Федерация, МПК В23К 26/342, В22F 3/105, В33У 10/00. Способ получения деталей из конструкционной стали 38Х2МЮА технологией селективного лазерного сплавления: № 2023111516: заявлено 03.05.2023; опубликовано 22.01.2024 / В. Г. Смелов, А. И. Хаймович, Р. А. Вдовин, **В.П. Алексеев** [и др.]; заявитель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева".

Статьи и материалы конференций

10. **Алексеев, В.П.** 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. - С. 37-41.
11. **Алексеев, В.П.** 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. – С. 25-28.

12. **Алексеев, В. П.** Повышение точности заготовок, изготавливаемых селективным лазерным сплавлением / **В. П. Алексеев**, В. Р. Хупутдинов, Н. А. Сивишкин // 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. 357-358.

13. **Алексеев, В. П.** Экспериментальное исследование стабильности изготовления цилиндрических образцов из порошка жаропрочного сплава методом селективного лазерного сплавления / **В. П. Алексеев**, А. В. Агаповичев // Молодежь. Техника. Космос: Труды четырнадцатой общероссийской молодежной научно-технической конференции: в 4 томах, Санкт-Петербург, 23–27 мая 2022 года. – Санкт-Петербург: Балтийский государственный технический университет "Военмех", 2022. – С. 118-120.

14. **Алексеев, В. П.** Исследование точности изготовления лопаток соплового аппарата турбины методом селективного лазерного сплавления / **В. П. Алексеев**, А. В. Агаповичев, В. В. Кокарева // 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. 311-312.