

На правах рукописи  
УДК 67.02

Краснова Екатерина Витальевна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ  
ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ СЕЛЕКТИВНЫМ  
ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫМ ПЛАВЛЕНИЕМ**

2.5.5 – Технология и оборудование механической и физико-технической  
обработки

2.5.6 – Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук



Москва – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский политехнический университет» на кафедре технологий и оборудования машиностроения.

Научный руководитель: **Саушкин Борис Петрович**  
доктор технических наук, профессор

Научный консультант: **Моргунов Юрий Алексеевич**  
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Щербаков Алексей Владимирович**  
доктор технических наук, доцент, профессор  
кафедры электроснабжения промышленных  
предприятий и электротехнологий ФГБОУ  
ВО «НИУ «МЭИ»

**Сотов Антон Владимирович**  
кандидат технических наук, ведущий  
научный сотрудник Института машиностроения,  
материалов и транспорта ФГАОУ ВО  
«СПбПУ»

Ведущая организация: **Московский авиационный институт**

Защита диссертации состоится «23» апреля 2025 г. на заседании диссертационного совета 24.2.331.02 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана (национального исследовательского университета)» по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д.5, к.1.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью организации, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по вышеуказанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (национального исследовательского университета)» [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru).

Автореферат разослан « \_\_\_ » \_\_\_ 20\_\_\_ г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
к.т.н., доцент



Богданов А.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Технологии аддитивного производства (АП), основанные на взаимодействии концентрированных потоков энергии с веществом, созданы в конце 90-х – начале 2000-х годов и интенсивно развиваются в индустриально развитых странах. Актуальной задачей АП является развитие аддитивных технологий (АТ) изготовления изделий из металлов и сплавов, темпы использования которых в последние годы значительно возросли. Установлена эффективность применения таких АТ в производстве наукоемкой авиационной и ракетно-космической техники, в которой широко применяются титановые сплавы. Из-за высокой химической активности этих материалов технология селективного электронно-лучевого плавления (СЭЛП), которая реализуется в вакууме, является перспективной.

АТ СЭЛП относится к передовым цифровым интеллектуальным производственным технологиям. Ее практическое применение сдерживается недостаточной изученностью протекающих физических и химических процессов, отсутствием, в ряде случаев, адекватных математических моделей, практическим отсутствием нормативно-справочной базы, ограниченным парком оборудования, недостаточным развитием технологических основ разработки процессов, обеспечивающих социально-экономическую эффективность.

Основным недостатком технологии СЭЛП является высокая шероховатость поверхности ( $Ra = 30-50$  мкм) и относительно низкая точность ( $IT = 13-14$ ) получаемых изделий. Этот недостаток существенно снижает конкурентоспособность метода и сдерживает его промышленное применение в связи с невозможностью выпуска на этапе АП конечной продукции современного машиностроения. Таким образом, этап аддитивного формообразования заканчивается получением заготовки АП, требующей дополнительной обработки, то есть, переходом на технологии аддитивно-субтрактивного производства (АСП) с соответствующим снижением технико-экономической эффективности в результате дополнительных ресурсозатрат.

В связи с этим знание механизма формирования микрогеометрии поверхности позволит систематизировать и упорядочить исследования по вопросу снижения шероховатости поверхности в процессе СЭЛП, а также по поиску эффективных методов и средств снижения шероховатости на стадии дополнительной обработки. Важной задачей является определение припуска на дополнительную обработку, величина которого определяет трудоемкость дополнительных работ и соответствующие затраты.

Исследование методологических вопросов технологической подготовки АП и АСП, в том числе разработка общего алгоритма организации АП, создание частных методик выполнения его отдельных этапов, позволят ускорить переход на АП и АСП, минимизировать издержки, повысить уровень организации и управления АП.

Построение и анализ физических и математических моделей, описывающих механизмы формирования микро- и макрогеометрии поверхностей, формируемых при построении заготовки АП методом СЭЛП, являются неотъемлемой частью при определении технологических характеристик, таких как показатели качества поверхностного слоя и точность изделия, производительность и себестоимость его изготовления.

Разработка рекомендаций по проектированию технологий СЭЛП изделий из металлов и сплавов, методов оценки показателей уровня качества этих технологий, а также расширение нормативно-справочной базы для проектирования необходимы для практического применения метода СЭЛП и получения изделий высокого качества с минимальными ресурсозатратами.

#### **Степень разработанности темы**

Большой вклад в развитие электронно-лучевых технологий внесли российские ученые: Н.Н. Рыкалин, А.А. Углов, И.В. Зуев, А.И. Рудской, Ю.А. Озеров, С.Ю. Кондратьев, В.К. Драгунов, А.В. Щербаков и другие. Следует отметить работы в области технологий СЭЛП таких зарубежных ученых, как A. Classen, C. Korner (Germany), L.E. Murr, Z. Wang, X. Wang (USA), S.J. Smith, S. Tammam-Williams, R.K. Leach (UK), M. Galati, G. Rizza (Italy).

Анализ опубликованных статей показывает, что основное направление исследований в этой области связано с проблемами микро-металлургии и материаловедения, то есть, получения заданного качества материала. Однако вопросы ТП АП и связанные с этим вопросы повышения уровня качества технологий АП мало исследованы. В силу того, что АП не всегда обеспечивает получение требуемых свойств изделий из металлов и сплавов и предполагает их дополнительную обработку, появилась и разрабатывается концепция АСП, многие аспекты которой требуют дальнейшей разработки.

**Цель работы:** разработка методологического и технологического обеспечения подготовки производства изделий из титановых сплавов методом СЭЛП

#### **Задачи работы:**

1. Разработка и анализ алгоритмической модели технологической подготовки АП (ТПП АП) методом СЭЛП и разработка частных методик реализации ее отдельных этапов.
2. Исследование физико-механических свойств исходных порошков для производства изделий, полученных методом СЭЛП.
3. Исследование процесса формирования и оценка основных показателей качества поверхностного слоя при СЭЛП: микрогеометрии поверхности, плотности материала, микроструктуры и микротвердости.
4. Разработка классификационной модели механизмов формирования шероховатости поверхности и применение модели для анализа шероховатости поверхностей различной пространственной ориентации в процессе СЭЛП.
5. Статистический анализ формирования шероховатости вертикальной боковой поверхности изделий и влияние на нее параметров режима штриховки.
6. Исследование процессов и сравнительная характеристика перспективных технологий дополнительной обработки (электрохимическая, электронно-лучевая) для повышения качества поверхностного слоя изделий АП, полученных методом СЭЛП.
7. Разработка практических рекомендаций по проектированию технологических процессов с применением метода СЭЛП, выявление особенностей технико-экономического обоснования АСП с применением заготовки, полученной СЭЛП, разработка и апробация технологии изготовления изделия ракетно-космической техники.

**Объект исследования:** процессы и технологии АП методом СЭЛП.

**Предмет исследования:** методологическое и экспериментально-теоретическое

обеспечение технологической подготовки АСП изделий из титановых сплавов с применением заготовок АП (СЭЛП).

#### **Научная новизна работы:**

1. Разработана алгоритмическая модель процесса технологической подготовки АП, предложены и апробированы методика оценки инновационного потенциала предприятия, внедряющего АП, и оригинальная методика разработки номенклатурного перечня изделий АП, использование которых позволяет ускорить решение организационно-технических задач на ранних этапах проведения ТП АП.

2. Впервые проведен статистический анализ параметров шероховатости изделий, полученных при различных режимах СЭЛП. Установлено, что практические кривые распределения параметра шероховатости вертикальных стенок для различных режимов штриховки характеризуются коэффициентами асимметрии 0,13-0,2 (правая асимметрия). Различие между эмпирическим и теоретическим распределениями имеет статистически значимый характер. Это означает, что в процессе формирования микрогеометрии участвуют систематические факторы, которые выявлены и проанализированы в работе.

2.а. Предложена обобщенная модель формирования микрогеометрии поверхности изделия, полученного методом СЭЛП, которая адаптирована для анализа процессов построения поверхностей с различным пространственным расположением.

3. Впервые установлено влияние режима штриховки на параметр  $R_z$  шероховатости вертикальной стенки построения (до 19% номинальной величины  $R_z$ ) и обоснована гипотеза, поясняющая полученный результат.

4. Экспериментально обоснована гипотеза о том, что зависимость пористости  $Ti6Al4V$  от линейной плотности энергии пучка электронов имеет минимум в диапазоне значений линейной плотности энергии от 200 до 275 Дж/м.

5. Предложена и апробирована модель электрохимического выравнивания микрогеометрии поверхности, основанная на динамике поверхностной оксидной пленки в локальных условиях растворения впадины и выступа, позволяющая объяснить высокую скорость выравнивания (до 90% за 30 с электролиза) при отсутствии дефектов растравливания по границам зерен.

#### **Практическая значимость результатов работы:**

1. Разработаны технологические рекомендации по проектированию эффективных технологических процессов производства изделий ракетно-космической техники с применением технологий СЭЛП.

2. Получены экспериментальные данные по влиянию параметров режима на шероховатость поверхности изделий СЭЛП, установлено отсутствие специфического дефектного слоя в поверхностном слое объекта построения, что может служить основой формирования нормативно-справочной базы для аналитического расчета припусков на дополнительную обработку.

3. Выполнено сравнительное исследование различных методов дополнительной обработки (электрохимическая, электронно-лучевая) изделий СЭЛП из титанового сплава для выявления области их эффективного применения.

4. Созданы, апробированы и приняты к использованию (АО КБХА, г. Воронеж)

методические рекомендации по классификации, формированию и расширению номенклатуры изделий АСП предприятий авиационно-космической техники.

5. Разработаны, апробированы и приняты к использованию (АО «НПО Лавочкина», г. Москва) технологические рекомендации по изготовлению угловых волноводных переходов из титанового сплава Ti6Al4V методом СЭЛП. Разработан и обоснован маршрутный технологический процесс изготовления угловых волноводных переходов из титанового сплава Ti6Al4V методом СЭЛП.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Алгоритмическая модель организационно-технических мероприятий и методическое обеспечение малоизученных этапов и процедур при ТПП АП изделий из металлов и сплавов.

2. Закономерности, описывающие влияние режима построения на параметры микрогеометрии изделий, полученных методом СЭЛП.

3. Особенности формирования показателей качества поверхностного слоя изделий СЭЛП: шероховатости поверхности, пористости, микротвердости и микроструктуры материала.

4. Модель электрохимического выравнивания микрогеометрии поверхности, основанная на динамике поверхностной оксидной пленки в локальных условиях растворения выступа и впадины.

5. Сравнительные технологические характеристики различных методов дополнительной обработки (электрохимическая, электронно-лучевая) изделий СЭЛП из титанового сплава и области их эффективного применения.

6. Технологические рекомендации по проектированию эффективных технологических процессов производства изделий с применением технологий СЭЛП.

**Достоверность:** теоретические исследования основывались на теории теплопроводности с учетом плавления и испарения твердых тел. Результаты экспериментальных исследований получены на современных аттестованных приборах и оборудовании с использованием стандартных методик. Показана сходимость теоретических исследований и экспериментальных результатов. Достоверность разработанных практических рекомендаций подтверждается их производственной апробацией.

**Личный вклад:** проведен анализ факторов, сдерживающих практическое применение технологии СЭЛП. Разработана и проанализирована алгоритмическая модель ТПП АП методом СЭЛП, разработаны частные методики реализации ее отдельных этапов. Проведено исследование физико-механических свойств исходных порошков. Проведены исследование процесса формирования и оценка основных показателей качества поверхностного слоя при СЭЛП. Разработана классификационная модель механизмов формирования шероховатости поверхностей различной пространственной ориентации в процессе СЭЛП. Проведен статистический анализ формирования шероховатости вертикальной боковой поверхности изделий и влияние на нее параметров режима штриховки. Проведено исследование и выполнен сравнительный анализ перспективных технологий дополнительной обработки. Разработаны практические рекомендации по проектированию технологических процессов с применением метода СЭЛП. Разработана технология изготовления изделия ракетно-космической техники.

### **Реализация результатов работы:**

1. Созданы, апробированы и переданы для использования (АО КБХА, г. Воронеж) методические рекомендации по классификации, формированию и расширению номенклатуры изделий АСП предприятий авиационно-космической техники.

2. Разработаны, апробированы и переданы для использования (АО «НПО Лавочкина», г. Москва) технологические рекомендации по изготовлению угловых волноводных переходов из титанового сплава Ti6Al4V методом СЭЛП.

3. Материалы диссертации используются в учебном процессе кафедры технологий и оборудования машиностроения Московского политехнического университета в лекционном курсе «Основы аддитивных технологий».

**Апробация результатов исследования:** основные результаты работы доложены на Международных молодёжных научных конференциях «Гагаринские чтения» (Москва, XLV, 2019 г., XLVI, 2020 г., XLVII, 2021 г.); на Всероссийских межотраслевых молодёжных конкурсах научно-технических работ и проектов «Молодёжь и будущее авиации и космонавтики» (Москва, XI, 2019 г., XII, 2020 г.).

**Публикации:** по теме диссертационной работы опубликовано 15 научных статей, из них 6 - в журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России, 3 - в журналах, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science. Общий объем составляет: 9,98 п.л./3,25 п.л.

**Структура и объем работы:** диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов и заключения, списка литературы из 230 наименований, изложенных на 224 страницах, и приложения на 184 страницах. Диссертация включает 97 рисунков и 133 таблицы.

### **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** дана общая характеристика работы, обоснована актуальность ее темы. Сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы. Представлены положения, выносимые на защиту, апробация результатов исследований, публикации по теме диссертационной работы.

**В Главе 1** выполнен анализ состояния вопроса о применении АТ при изготовлении изделий из металлов и сплавов, а также выделены проблемы технологического и организационно-методического характера, препятствующие широкому внедрению этих технологий в промышленности. Рассмотрены особенности, преимущества и недостатки АТ СЭЛП и обоснована область ее эффективного применения в производстве авиационно-космической техники.

Выделена и обоснована конструктивно-технологическая проблема (КТП): разработка технологического обеспечения аддитивно-субтрактивного производства наукоемких изделий из современных и перспективных металлов и сплавов на стадии технологической подготовки производства. Эта проблема включает в себя методологический, научный, собственно технологический и технико-экономический аспекты.

В рамках этой проблемы выполнен анализ результатов исследований показателей качества поверхностного слоя изделий АП СЭЛП: микрогеометрии поверхности, плотности материала, микроструктуры и микротвердости.

Выделены наиболее значимые при формировании микрогеометрии параметры и стратегии сканирования. Обсуждаются возможные причины высокой шероховатости поверхности, и установлена необходимость выявления и систематизации первичных составляющих микрогеометрии, формирующих конечные параметры микрогеометрии. Отмечено отсутствие статистических исследований параметров шероховатости изделий АП СЭЛП.

Влияние параметров формирования контура изделий на шероховатость поверхности при СЭЛП исследовалось в ряде работ, в то время как влияние режима штриховки не исследовалось, и высказывалась гипотеза о том, что стадия штриховки не влияет на микрогеометрию наружной поверхности изделия. Однако из опубликованных работ следует, что любой параметр, влияющий на количество тепла, доступное для частичного плавления порошка, может влиять на шероховатость поверхности. Таким образом, механизм формирования микрогеометрии наружного слоя требует дополнительного изучения.

Проведен анализ исследований, посвященных способам получения порошковых материалов, их пористости, морфологии и микроструктуре. Несмотря на большое количество публикаций в данной области, объем информации о порошках все еще недостаточен, встречаются разноречивые экспериментальные данные, не решен ряд теоретических вопросов.

По мнению ряда исследователей, пористость материала является главным фактором, определяющим механические свойства изделий АП. На основании литературных источников классифицированы дефекты несплошности материала по причинам их возникновения и форме проявления. Представлен обзор работ, в которых исследовано влияние параметров режима обработки и стратегии на показатели качества изделий СЭЛП, в том числе, на механизмы формирования пористости. Разброс значений пористости в литературных источниках весьма широк (0,05-5%), что говорит о необходимости проведения дополнительных исследований для формирования единой базы данных по свойствам изделий СЭЛП.

Выполнен анализ работ, направленных на изучение микротвердости и механических характеристик изделий СЭЛП. Отмечено, что мнения авторов о значимости факторов, влияющих на величину микротвердости и механических свойств материала, противоречивы.

В целях повышения точности изготовления, уменьшения шероховатости рассмотрена возможность применения ряда методов и технологий дополнительной обработки заготовок АП СЭЛП. Технология электрохимической обработки (ЭХО) является перспективным, но мало изученным направлением обработки заготовок АП. Проведенный анализ литературы показал, что ЭХО обладает значительным потенциалом для применения в технологиях дополнительной обработки заготовок АП СЭЛП.

Применение электронно-лучевой обработки (ЭЛО) также представляет значительный интерес при разработке технологий дополнительной обработки заготовок АП СЭЛП, прежде всего, в связи с тенденцией создания интегрированного многооперационного оборудования. Анализ публикаций показал, что ЭЛО заготовок СЭЛП, имеющих высокую исходную шероховатость поверхности, непрерывным электронным пучком практически не исследована.

На основании проведенного обзора сформулированы задачи исследования.

**В Главе 2** разработана алгоритмическая модель создания (расширения) АП современного предприятия (Рис. 2.1., Глава 2 диссертации). На ее основе выявлены, обоснованы и частично решены задачи методологического аспекта ТПП АП: анализ инновационного потенциала предприятия (ИПП) применительно к созданию (расширению) на нем АП, разработка классификатора изделий АП и методики создания номенклатурного перечня изделий АП данного предприятия.

Анализ ИПП включает в себя оценку финансовой устойчивости предприятия, ресурсных составляющих ИПП, а также характеристику его возможностей. Предложенная алгоритмическая модель оценки ИПП позволяет обоснованно судить о состоянии его инновационного развития, возможности и готовности к работе над инновационным проектом внедрения или расширения АП. Оценка уровня ИПП позволяет выявить и спланировать общезаводские мероприятия по ТП АП.

При постановке новых изделий на производство на этапе технологической подготовки необходимо выделить изделия, которые целесообразно изготавливать по технологиям АП или АСП.

В работе предложена методика формирования номенклатурного перечня таких изделий, позволяющая формировать подмножества деталей, которые можно изготавливать одним и тем же методом АП на соответствующем оборудовании с учетом срока их запуска в производство. Это облегчает формирование структуры машинно-аппаратурного парка, непосредственно влияет на технико-экономическую эффективность АП, является базой для его организации и планирования.

В Главе 2 представлена также общая методика экспериментальных исследований. Приведено описание исследуемого материала и его свойств, а также ряда экспериментальных методик и оборудования, применяемых при изучении свойств заготовок АП СЭЛП.

Для изготовления образцов использовали порошки сферической формы из сплава Ti-6Al-4V с размерами 45...106 мкм. Условия обработки: толщина слоя порошка - 50 мкм, ускоряющее напряжение - 60 кВ. Размеры стартовой пластины из коррозионно-стойкой стали 210x210x10 мм.

При исследовании влияния параметров построения внешнего контура на шероховатость поверхности варьируемыми параметрами режима являлись: сила тока  $I$ , мА (4-10); скорость сканирования  $v$ , мм/с (300-700); смещение фокуса  $\Delta f$ , мА (3-12). Смещение внешнего контура составляло 0,29, а внутренних - 0,17 мм. На различных режимах изготавливались образцы длиной 22 мм, высотой 22 мм и шириной 16 мм (Рис. 1, а-в). Параметры режима штриховки не изменялись (ток - 10 мА, скорость сканирования - 3000 мм/с).

При исследовании влияния параметров штриховки варьируемыми параметрами режима являлись: сила тока  $I$ , мА (5-20); скорость сканирования  $v$ , мм/с (1000-5000); смещение оси трека, мА (3-12). На каждом из 4 режимов изготавливали по 3 образца длиной 50 мм, высотой 35 мм и шириной 10 мм. Нумерация и расположение образцов на платформе построения показано на Рис. 1, г. Параметры режима контурирования для всех образцов одинаковы.

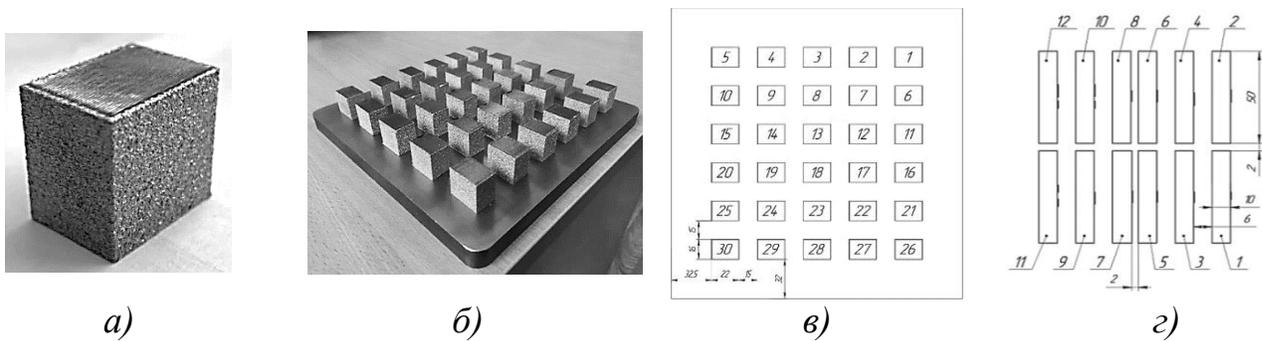


Рис. 1.

Построение образцов: конфигурация одного образца (а); образцы на стартовой пластине (б); нумерация и расположение образцов на стартовой пластине (в), (з)

**В Главе 3** проведено экспериментальное исследование показателей качества поверхностного слоя заготовок, полученных методом СЭЛП.

Качество исходного порошка сильно влияет на свойства материала изделий, полученных аддитивными методами, в частности СЭЛП. В связи с этим проведен анализ химического состава, распределения размеров, формы и дефектов исходного материала, его микротвердости и микроструктуры.

Основное внимание в работе уделено исследованию механизмов формирования микрогеометрии различно ориентированных поверхностей заготовок АП СЭЛП.

Изучено влияние параметров режима штриховки на микрогеометрию вертикальных поверхностей заготовок СЭЛП. Проведена статистическая обработка значений параметров шероховатости образцов, построенных при различных параметрах режима СЭЛП, получены практические и теоретические кривые распределения (Рис. 2).

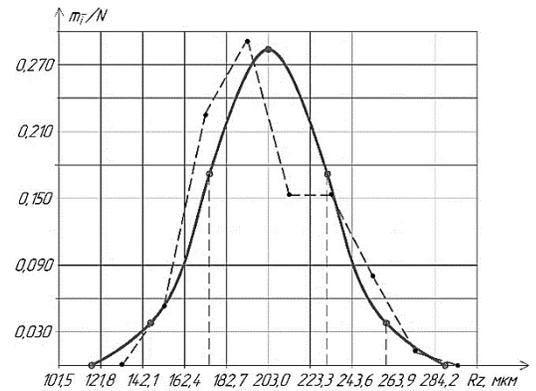


Рис. 2.

Практическое и теоретическое распределения значений  $Rz$  по результатам 150 измерений образцов 1-3-5

Практические кривые распределения имеют, как правило, правую асимметрию, то есть центр группирования значений шероховатости смещен в сторону меньших значений шероховатости по отношению к середине поля рассеяния.

Расчет критерия Пирсона подтвердил, что при доверительной вероятности 0,95 различие между эмпирическим и теоретическим распределениями имеет статистически значимый (неслучайный) характер.

Негауссовы законы распределения случайной величины  $X_t$  (кривые с асимметрией), образованной по схеме суммы большого числа слагаемых, называют распределениями с функцией  $a(t)$ , если, кроме независимых или слабо зависимых случайных слагаемых  $Y_t^i$  в правой части формулы суммирования имеется сумма  $C_t = \sum_s C_t^s$  неслучайных слагаемых  $C_s^t$ , число или значения которых систематически изменяются во времени, то есть, если

$$X_t = \sum_{i=1}^n Y_t^i + C_t. \quad (1)$$

Распределение величины  $X$  для момента времени  $t$  подчиняется закону Гаусса

$$\varphi_t(x) = \frac{1}{\sigma_0 \sqrt{2\pi}} \exp \frac{(x - a_0 - C_t)^2}{2\sigma_0^2}, \quad (2)$$

где  $a_0$  и  $\sigma_0$  – параметры гауссова распределения для суммы случайных слагаемых.

Закон распределения значений  $x$  величины  $X$  для промежутка времени  $[t_0, t_k]$ :

$$\varphi_{\Sigma}(x) = \frac{1}{t_k - t_0} \int_{t_0}^{t_k} \frac{1}{\sigma_0 \sqrt{2\pi}} \exp \left( -\frac{(x - a_0 - a(t))^2}{2\sigma_0^2} \right), \quad (3)$$

где  $a(t)$  - функция, описывающая изменение величины  $C_t$  в указанном промежутке времени.

В большинстве технических приложений функция  $a(t)$  представляется в виде степенной функции времени. Для правой асимметрии эта функция вогнутая, то есть,  $d^2a/dt^2 > 0$ .

Таким образом, установлено, что на процесс формирования шероховатости поверхности при построении вертикальных стенок методом СЭЛП, помимо случайных факторов, влияют факторы систематические. Выполнен анализ таких факторов, и выявлено, что их появление связано с изменением условий отвода тепловой энергии от слоя построения с увеличением высоты его расположения, а также с расположением образцов на стартовой пластине.

Экспериментально установлено влияние параметров режима штриховки на шероховатость вертикальных стенок построения. Изменение высоты неровностей  $R_z$  в зависимости от режима штриховки может достигать 19% от среднего значения этой величины. Обоснована гипотеза о том, что обнаруженный эффект обусловлен течением микропотоков в ванне расплава, возникающих под действием термокапиллярной силы и силы отдачи паров в зоне перекрытия штриховки с контуром. Отмечается также возможность попадания расплава из ванны штриховки на внешнюю стенку через поры в контуре.

Особенностью построения горизонтальных поверхностей заготовок СЭЛП является наличие выраженной периодической текстуры и прикромочного эффекта, который выражается в завышении прикромочных областей относительно средней части построенной поверхности (Рис. 3). Этот эффект, по-видимому, вызван изменением размеров и температуры ванны расплава в результате изменения кинематических параметров движения пятна контакта электронного пучка с поверхностью порошкового слоя в период разгона и торможения при сканировании.

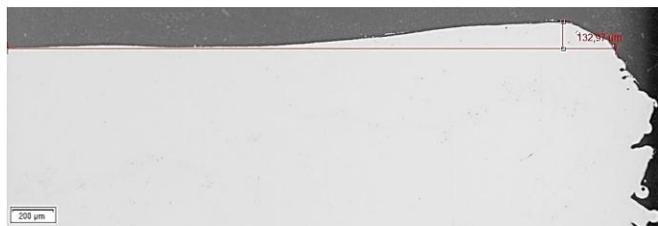


Рис. 3.

Завышение высотой 133 мкм на выходном участке трека (шлиф в плоскости, параллельной направлению сканирования)

При снижении скорости сканирования формируется градиент температур, вызывающий течение поверхностных слоев жидкости в результате проявления термокапиллярного эффекта. Кроме того, возрастание массы испаряемого материала и повышение давления отдачи паров приводят к выраженной периодической текстуре поверхности в результате формирования канавок на ней, образующих характерный микрорельеф (Рис. 4,

а). Подтверждением этому является изменение величины шероховатости по длине образца в результате изменения скорости движения пятна контакта электронного пучка с поверхностью образца (Рис. 4, б).



Рис. 4.

Микрофотографии центральной, переходной и крайней областей (слева направо) верхней горизонтальной поверхности образца (а); зависимость шероховатости от координаты перемещения пятна по поверхности образца в направлении перпендикулярном сканированию (б)

При исследовании поверхностей, профиль образующей которых содержит участки, касательная к точкам которых наклонена по отношению к стартовой пластине, формируется систематическая погрешность микрогеометрии, обусловленная послойным характером построения. Предложена модель, описывающая параметр  $Rz$  шероховатость поверхности профиля в виде дискретной функции порядкового номера слоя, включающая в себя алгоритм определения локального значения высоты микронеровностей  $Rz_n$  на уровне  $n$ -го слоя при любой криволинейной образующей (не имеющей особых точек). Частным случаем разработанной модели является формула для расчета параметра шероховатости наклонной плоскости, которая определяется высотой слоя построения и углом наклона этой плоскости к плоскости построения. Экспериментально полученные данные подтвердили теоретические исследования. Установлена сходимость экспериментально найденных и рассчитанных значений в пределах 18%.

На основании результатов проведенных исследований и литературных данных по микрогеометрии различно ориентированных поверхностей заготовок АП разработана классификационная модель механизма формирования микрогеометрии поверхности при СЭЛП (Таблица 1).

Таблица 1.

Первичные составляющие микрогеометрии (ПСМ) поверхности и их характеристика

| Характер проявления ПСМ |   | Причина появления ПСМ   |
|-------------------------|---|---|
| 1                       | Кусочно-линейное приближение поверхности построения (эффект лестничной ступеньки) | Послойный характер построения наклонной или криволинейной поверхности                 |
| 2                       | На поверхности присутствуют не оплавленные частицы порошка                        | Адгезия частиц порошка на внешней поверхности в температурном поле области построения |
| 3                       | Впадины сферической или нерегулярной формы  | Наличие дефектов типа пор   |

Таблица 1 (окончание)

| Характер проявления ПСМ |   | Причина появления ПСМ  |
|-------------------------|---|--|
| 4                       | Частично оплавленные элементы порошка на внешней границе  | Разброс размеров частиц порошка (в пределах фракции) и неравномерное температурное поле на границе построения  |
| 5                       | Шероховатость обращенной вверх и обращенной вниз поверхностей наклонного конструктивного элемента различна              | Влияние гравитационной силы на форму ванны расплава  |
| 6                       | Влияние положения изделия на плите построения на шероховатость поверхности  | Неравномерное температурное поле области построения. Различные условия и интенсивность отвода тепла  |
| 7                       | Анизотропия параметров микрогеометрии горизонтальных поверхностей построения  | Стратегия штриховки наружного слоя, коэффициент перекрытия соседних треков штриховки, изменение кинематических параметров движения луча                        |
| 8                       | Наличие сферических частиц на горизонтальной поверхности построения   | Конденсация паров металла (1 мкм и менее), адгезия порошка или кристаллизация жидко-капельных выбросов   |
| 9                       | Высокочастотные и низкоамплитудные ПСМ  | Колебания центра пятна контакта пучка, нестабильность диаметра пятна контакта, погрешность позиционирования точек линии контура                                |
| 10                      | Наличие в большинстве случаев, периодической составляющей микрогеометрии поверхности                                    | Послойный характер построения с постоянной толщиной слоя (вертикальная поверхность), наложение дорожек (треков) постоянной ширины (горизонтальная поверхность) |
| 11                      | На поверхности характерные следы течения жидкости (струйность), обтекающей частицы порошка с последующим затвердеванием | Генерация микропотоков расплава от центра к периферии слоя построения под действием сил различного происхождения   |

Таким образом, из представленной модели следует, что при электронно-лучевом построении изделий шероховатость формируемых поверхностей может быть представлена в виде

$$R = f(Y(x), Y^*(x)), \quad (4)$$

где  $R$  – высотный показатель микрогеометрии,  $Y$ ,  $Y^*$  – детерминированная и случайная компоненты,  $x$  – координата вдоль трассы измерения.

Суммарная шероховатость поверхности при СЭЛП формируется в результате наложения первичных составляющих микрогеометрии, генерирующихся при протекании конкретных физических и химических процессов в области построения и характеризующихся собственной амплитудно-частотной характеристикой. Влияние параметров режима построения на шероховатость поверхности проявляется в результате усиления или ослабления отдельных механизмов формирования первичных составляющих микрогеометрии, перераспределения их роли и значимости в балансе суммарной микрогеометрии

поверхности.

Исследовано влияние параметров режима на пористость заготовок СЭЛП методами оптической микроскопии и микро рентгеноструктурной томографии. Выполнен анализ морфологии и механизма образования характерных пор и пространственных пустот (Рис. 5, а). Рассмотрено влияние параметров режима штриховки на образование пор и пустот. Установлено равномерное распределение пористых включений как в объеме материала, так и в поверхностном слое. Полученная зависимость пористости образца от линейной плотности энергии (Рис. 5, б) указывает на наличие минимума пористости в диапазоне от 200 до 275 Дж/м.

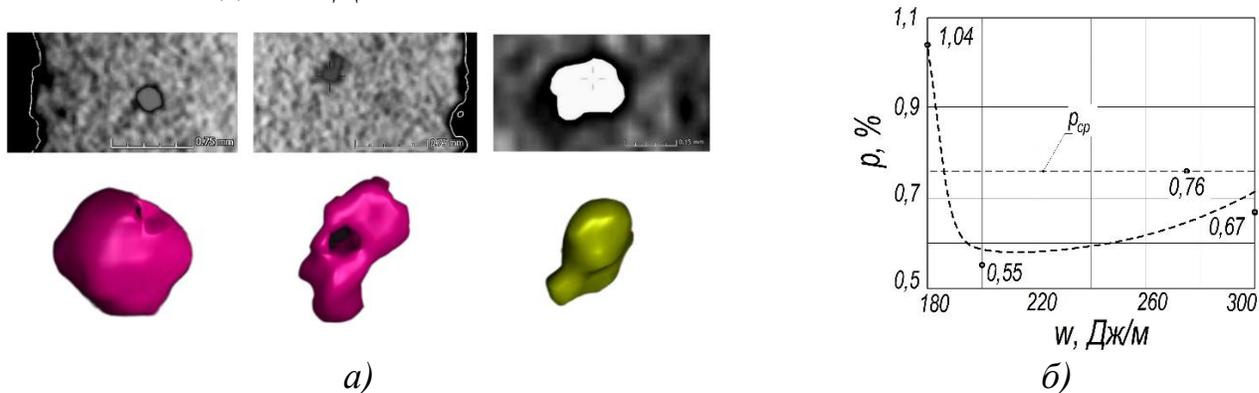


Рис. 5.

Характерные поры в исследуемом материале (вверху) и их трехмерное изображение (внизу) (а); зависимость величины пористости от линейной плотности энергии (б)

Исследованы микротвердость и микроструктура заготовок СЭЛП, проведена оценка их механических свойств. Эффект разупрочнения материала поверхностного слоя заготовок СЭЛП не обнаружен: микротвердость практически не изменяется по его глубине. Образцы имеют ( $\alpha+\beta$ )-структуру «корзиночного плетения». Изменение микроструктуры материала образцов в зависимости от режима не выявлено. По экспериментальным данным механические свойства образцов СЭЛП сопоставимы с коваными и литыми изделиями из того же материала.

**В Главе 4** исследованы перспективные методы дополнительной обработки заготовок СЭЛП. Рассмотрены электрохимическая (ЭХО) и электронно-лучевая (ЭЛО) технологии обработки. Выявлена эффективная область применения каждого из этих методов.

Выполнено сравнительное исследование выравнивания исходной шероховатости поверхности  $Ra = 35$  мкм ( $Rz = 180$  мкм) в моно- и бисолевых растворах минеральных солей  $NaCl$ ,  $NaNO_3$ ,  $NaClO_4$  при ЭХО образцов из сплава Ti-6Al-4V в прямочной ячейке при типичных значениях параметров режима. Графическое представление кинетики выравнивания исходной шероховатости поверхности ( $Ra$ ,  $Rz$ ) в различных электролитах показано на Рис. 6.

Наилучшие результаты достигнуты в перхлоратном электролите, причем электролиз на постоянном токе дает несколько лучшие результаты, чем на постоянном напряжении. Показано, что при ЭХО за 30 с в хлоридном и хлорнокислом растворах солей коэффициент выравнивания достигает 80% и 90% соответственно, а параметр  $Ra$  снижа-

ется с 35 мкм до 7,6 мкм и 3,5 мкм. Низкие значения степени выравнивания характерны для ЭХО в растворах  $NaNO_3$ — 44 - 46% при времени электролиза 30 с.

Для объяснения полученных результатов предложена модель электрохимического выравнивания микрогеометрии поверхности, основанная на динамике поверхностной оксидной пленки в локальных условиях растворения выступа и впадины.

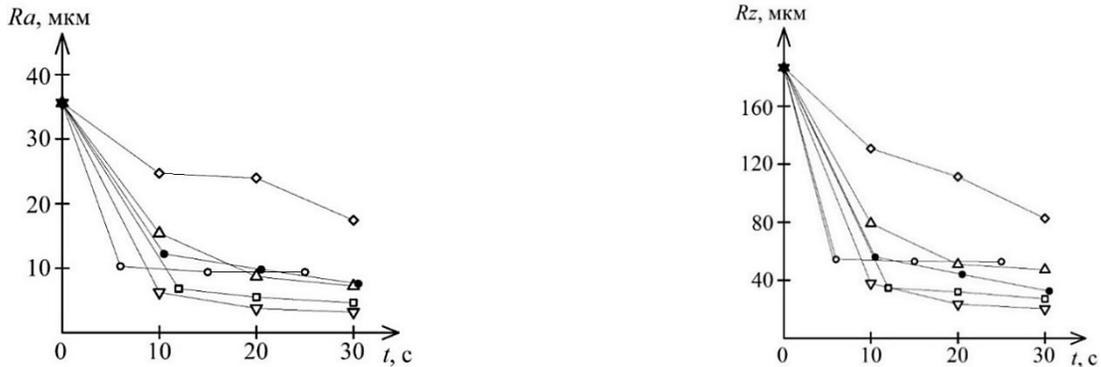


Рис. 6.

Кинетика выравнивания микронеровностей при электролизе в электролитах: ● –  $NaCl$ , ◇ -  $NaNO_3$ , ▽ -  $NaClO_4$  ( $I = const$ ), □ –  $NaClO_4$  ( $U = const$ ), ○ –  $NaClO_4 + NaCl$ , Δ –  $NaCl+NaNO_3$

Рассмотрена возможность применения технологии ЭЛО непрерывным пучком электронов для снижения высокой исходной шероховатости заготовок СЭЛП. Диапазон выбранных параметров режима позволил варьировать энергетические характеристики в пределах: плотность потока мощности,  $q = (0,14-1,72) \cdot 10^4$  Вт/см<sup>2</sup>; плотность энергии,  $e = 3,0-54,0$  Дж/мм<sup>2</sup>; линейная плотность энергии,  $w = 12-108$  кДж/м. Внешний вид треков, микрофотографии их поверхностей и полученные значения параметров шероховатости после ЭЛО приведены в Таблице 2, где показаны характерные режимы с точки зрения наиболее (режим 13) и наименее (режим 5) эффективного снижения шероховатости и образования трещин.

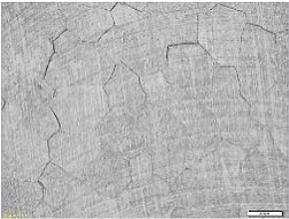
Установлено, что ЭЛО при определенных режимах обеспечивает достижение степени выравнивания шероховатости поверхности свыше 90% (без учета эффекта перекрытия треков).

Выполненные оценки показали, что критическое значение плотности потока мощности,  $q_{кр}$ , при котором возможно взрывное вскипание материала равно  $3,9 \cdot 10^4$  Вт/см<sup>2</sup>. По мере повышения энерговода роль испарения в процессе эволюции поверхности трека возрастает, что предопределяет выброс части материала и ухудшение параметров шероховатости.

Выявлены дефекты поверхностного слоя, присущие ЭЛО. К ним относятся: сетка поверхностных трещин по границам зерен, отдельные трещины, расположенные в основном в плоскости оси симметрии трека. Отмечены краевые дефекты, связанные с кинематикой движения электронного пучка, преимущественно на завершающем участке трассы трека.

Таблица 2.

## Результаты электронно-лучевой полировки построенных образцов

| Режим  | Внешний вид поверхности трека   | Микрофотографии поверхности трека (100x)   | Шероховатость после ЭЛО  |
|--|---|--|--|
| <b>13</b><br>$P = 180 \text{ Вт}$ ,<br>$I = 3 \text{ мА}$ ,<br>$v = 10 \text{ мм/с}$ ,<br>$q = 1,4 \cdot 10^3 \text{ Вт/см}^2$ ,<br>$w = 18 \text{ кДж/м}$ |  |  | $Ra = 2,59 \text{ мкм}$<br>$Rz = 8,35 \text{ мкм}$<br>$\epsilon_{Ra} = 93\%$   |
|  | $L = 40 \text{ мм}, b = 3,9 \text{ мм}$   |  |  |
| <b>5</b><br>$P = 360 \text{ Вт}$ ,<br>$I = 6 \text{ мА}$ ,<br>$v = 10 \text{ мм/с}$ ,<br>$q = 1,2 \cdot 10^4 \text{ Вт/см}^2$ ,<br>$w = 36 \text{ кДж/м}$  |  |  | $Ra = 12,33 \text{ мкм}$<br>$Rz = 69,36 \text{ мкм}$<br>$\epsilon_{Ra} = 65\%$ |
|  | $L = 40 \text{ мм}, b = 3,1 \text{ мм}$   |  |  |

В Главе 5 представлены практические рекомендации по проектированию эффективных технологических процессов построения заготовок АП методом СЭЛП. Выявлены особенности технико-экономического обоснования АСП с применением заготовки СЭЛП, обсуждаются детали расчета основных технологических характеристик: производительности, трудоемкости, себестоимости.

Разработан технологический процесс изготовления деталей типа угловых волноводных переходов из титанового сплава Ti6Al4V методом СЭЛП (Рис. 7, Таблица 3), состоящий из этапа получения заготовки АП и этапа дополнительной обработки ответственных поверхностей и элементов конструкции с применением операций электрохимической обработки. Маршрутный технологический процесс изготовления волновода представлен в Таблице 3.



Рис. 7.

Заготовки угловых волноводных переходов из сплава Ti6Al4V, полученные СЭЛП

Таблица 3.

## Маршрутный технологический процесс изготовления волновода

|     |   |
|-----|---|
| 005 | Заготовительная. Построение заготовки АП методом СЭЛП   |
| 010 | Слесарная. Пневмо-абразивная обдувка. Снятие заусенцев  |
| 015 | Электроэрозионная проволочно-вырезная. Отделение изделий от стартовой пластины                  |
| 020 | Электроэрозионная проволочно-вырезная. Удаление поддержек                                       |
| 025 | Контроль заготовки АП   |
| 030 | Плоскошлифовальная. Обработка торцов сопряжения до $Ra \leq 2,5 \text{ мкм}$ , припуск - 0,3 мм |
| 035 | Вертикально-сверлильная. Сверление 8-ми отверстий $\varnothing 4,5 \text{ мм}$                  |

Таблица 3 (окончание)

|                    |   |
|--------------------|---|
| 040                | Электрохимическая полировка наружного контура до $Rz \leq 40$ мкм в водно-органическом электролите*   |
| 045                | Электрохимическая калибровочная. Электрохимическая обработка канала волноводного перехода до $Ra \leq 2,5$ мкм при средней плотности импульсного тока, $i_{cp} = 30 \text{ А/см}^2$ в электролите – водный раствор 150-200 г/л $\text{NaClO}_4$ , время обработки, $t_m = 20$ с, $t_{ш.к} = 4,7$ мин, длительность импульса 500 мкс, скважность 4. Припуск на обработку $z = 0,15$ мм |
| 050                | Контроль изделия  |
| *При необходимости |   |

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТЫ

По результатам работы сделаны следующие выводы:

1. Разработана алгоритмическая модель процесса технологической подготовки АП, предложены методика анализа и оценки инновационного потенциала предприятия, внедряющего АП, и оригинальная методика разработки номенклатурного перечня изделий АП, использование которых позволяет ускорить решение организационно-технических задач на ранних этапах проведения ТП АП.

2. Разработана классификационная модель механизма формирования микрогеометрии поверхности при СЭЛП, позволяющая прогнозировать значения шероховатости при различной ориентации поверхности построения в пространстве.

3. Показано, что значения шероховатости вертикальных поверхностей описывается распределением с функцией  $a(t)$ , что указывает на наличие систематически изменяющихся погрешностей. Установлено, что систематические погрешности обусловлены влиянием температурного поля в области построения на процесс формирования микрогеометрии.

4. Экспериментально установлено влияние параметров режима штриховки на шероховатость вертикальных стенок построения. Изменение высоты неровностей  $Rz$  в зависимости от режима штриховки может достигать 19% от среднего значения этой величины. Обоснована гипотеза о том, что обнаруженный эффект обусловлен влиянием микропотоков в ванне расплава в зоне перекрытия штриховки с контуром.

5. Определена зависимость значений пористости от линейной плотности энергии. Минимальное значение пористости находится в интервале 200–275 Дж/м.

6. Изменение микротвердости материала поверхностного слоя по отношению к сердцевине не обнаружено, что свидетельствует об отсутствии зон упрочнения или разупрочнения в материале. Показано, что величина микротвердости не зависит от режима построения. Показано, что исследуемый сплав Ti6Al4V, полученный методом СЭЛП, характеризуется  $(\alpha+\beta)$ -структурой, а механические свойства образцов, сопоставимы со свойствами кованных и литых изделий.

7. Получена сравнительная характеристика методов и технологий выравнивания микрогеометрии (ЭХО и ЭЛО), позволяющих значительно снизить шероховатость поверхности изделий, полученных методом СЭЛП. Показано, что при ЭХО за 30 с в хлоридном и хлорнокислом водных растворах солей коэффициент выравнивания достигает 80% и 90%, а параметр  $Ra$  снижается с 35 мкм до 7,6 мкм и 3,5 мкм соответственно.

Установлено, что при ЭЛО в непрерывном режиме степень выравнивания шероховатости поверхности может достигать 93-96%.

8. Разработаны рекомендации по проектированию и выявлены особенности технико-экономического обоснования технологических процессов с применением СЭЛП. Разработан и апробирован технологический процесс изготовления изделия АП, состоящий из этапа получения заготовки АП и этапа дополнительной обработки ответственных элементов конструкции. Результаты исследований в виде методических и технологических рекомендаций переданы для использования на предприятия ракетно-космической отрасли.

#### ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Краснова Е.В., Моргунов Ю.А., Саушкин Б.П. Микрогеометрия поверхности изделий электронно-лучевого аддитивного производства. Селективное электронно-лучевое плавление // Упрочняющие технологии и покрытия, 2021. Т. 17. №9. С. 408–418. (0,69 п.л./0,23 п.л.)

2. Свойства порошков из сплава Ti-6Al-4V для селективного электронно-лучевого построения изделий аддитивного производства / Е.В. Краснова [и др.] // Электromеталлургия, 2023. №7. С. 21–30. DOI: 0.31044/1684-5781-2023-0-7-21-30. (0,6 п.л./0,15 п.л.)

Версия: Properties of Ti-6Al-4V Alloy Powders for Selective Electron Beam Additive Manufacturing of Products / E.V. Krasnova [et al.] // Russian Metallurgy (Metally), 2023. No. 12. P. 1952–1959. DOI: 10.1134/S0036029523120169. (0,5 п.л./0,12 п.л.)

3. Краснова Е.В., Моргунов Ю.А., Саушкин Б.П. Морфология пор и пространственных пустот в образцах из сплава Ti-6Al-4V, полученных селективным электронно-лучевым плавлением // Электromеталлургия, 2024. №2. С. 29–39. (0,69 п.л./0,23 п.л.)

Версия: Krasnova E.V., Morgunov Yu.A., Saushkin B.P. Morphology of pores and spatial voids in Ti-6Al-4V alloy samples obtained by selective electron beam melting // Russian Metallurgy (Metally), 2024. No. 2. P. 29–39. DOI: 10.1134/S0036029524701076 (0,5 п.л./0,15 п.л.)

4. Электрохимическая финишная обработка изделий аддитивного производства из сплава Ti-6Al-4V / Е. В. Краснова [и др.] // Вестник машиностроения, 2024. №5. С. 409–418. (0,6 п.л./0,12 п.л.)

Версия: Electrochemical Machining of Additively Manufactured Products Made of Ti-6Al-4V Alloy / E.V. Krasnova [et al.] // Russian Engineering Research, 2024. Vol. 44. No. 7. P. 951-960. DOI: 10.3103/S1068798X2470165X. (0,62 п.л./0,12 п.л.)

5. Krasnova E.V., Saushkin B.P., Shandrov B.V. Preproduction Engineering in Additive Manufacturing // Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2022. Vol. II. P. 261–268. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-85230-6\\_31](https://doi.org/10.1007/978-3-030-85230-6_31) (0,5 п.л./0,15 п.л.)

6. Krasnova E.V., Morgunov Yu.A., Saushkin B.P. Statistical Analysis of Surface Roughness of Ti-6Al-4V Products Manufactured by Selective Electron Beam Melting // Surface Engineering and Applied Electrochemistry, 2023. Vol. 59. No. 4. P. 401–411. DOI:10.3103/S1068375523040063 (0,68 п.л./0,22 п.л.)

7. Porosity of Additive Manufacturing Products Obtained by Selective Electron Beam Melting / E.V. Krasnova [et al.] // Surface Engineering and Applied Electrochemistry, 2024. Vol. 60. No. 6. P. 772–780. DOI: 10.3103/S1068375524700352. (0,56 п.л./0,14 п.л.)