

На правах рукописи
УДК 621.923.9

Смирнов Александр Сергеевич

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА
ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ
СЕЛЕКТИВНЫМ ЛАЗЕРНЫМ СПЛАВЛЕНИЕМ**

2.5.5 – Технология и оборудование механической и физико-технической
обработки

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Научный
руководитель:

Галиновский Андрей Леонидович
доктор технических наук, профессор

Официальные
оппоненты:

Баурова Наталья Ивановна

доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры «Производство и ремонт автомобилей и
дорожно-строительных машин» ФГБОУ ВО
«Московский автомобильно-дорожный
государственный технический университет (МАДИ)»

Басов Андрей Александрович

кандидат технических наук, начальник отделения
систем терморегулирования ПАО «РКК «Энергия»
имени С.П. Королёва»

Ведущая организация: **Акционерное общество «Композит»**

Защита состоится «__» _____ 2025 г. на заседании диссертационного совета 24.2.331.02 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (национального исследовательского университета)» по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, дом 5, стр.1.

Телефон для справок 8-499-263-66-33 доб.3628

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 МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

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



Богданов А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Аддитивные технологии (АТ) в последние годы приобретают большую популярность во многих производственных и научно-технических сферах. Наиболее популярной является технология селективного лазерного сплавления (СЛС), с помощью которой путем послойного сплавления частиц порошка, возможно изготовление изделий сложной формы с использованием широкой номенклатуры металлов и сплавов.

Не смотря на большое количество преимуществ СЛС, данная технология имеет и ряд недостатков, одним из которых является высокая шероховатость изготавливаемых деталей, которая, в зависимости от режимов 3D-печати, оборудования и материала, может составлять от Ra 6 мкм до Ra 15 мкм, что сильно сужает область применения аддитивных изделий без постобработки. Решение этой проблемы является актуальной научно-технической задачей.

По этой причине разработка методов снижения шероховатости – это одно из ключевых направлений в аддитивном производстве (АП). Среди различных технологий особый интерес представляет электрохимическая обработка (ЭХО), сочетающая высокую производительность и минимальные ограничения на форму обрабатываемого изделия. Анализ научных работ (в том числе авторов А. Р. Лепешкина, А. Л. Светлакова, И. С. Вербанова, Л.Н. Кашапова) демонстрирует, что наибольшее внимание исследователей привлекает режим анодного электролитного нагрева, позволяющий уменьшить шероховатость изготовленных с помощью СЛС изделий до Ra 0,5 мкм. Данный режим реализуется путем применения высокого напряжения (150-400 В) и электролитов на основе низкоконцентрированных растворов солей, что приводит к образованию парогазового слоя, снижающего диффузию электролита к впадинам микронеровностей. Благодаря этому растёт разница между скоростями растворения вершин и впадин микрорельефа, усиливающая эффект сглаживания поверхности.

Внедрению технологии ЭХО в АП препятствует возникающее за счет краевых эффектов неравномерное растворение материала, ведущее к изменениям формы и размеров изделия, которые могут быть недопустимы и стать причиной брака. Для решения этой актуальной научно-технической задачи необходимо разработать технологический процесс (ТП) ЭХО, включающий в себя численное моделирование анодного растворения микронеровностей изделий, изготовленных с помощью СЛС. Такой подход позволяет прогнозировать результат обработки, по результатам которой проводится оценка эффективности ТП (на сколько точно параметры изделия удовлетворяют техническим требованиям ТТ), определяются оптимальные параметры режима обработки и рассчитываются технологические припуски, компенсирующие неравномерный металлоусъем.

Внедрение численного моделирования в ТП ЭХО изделий, полученных с помощью СЛС, позволяет не только повысить точность изготовления, но также решить и другие актуальные научно-технические задачи, а именно: снизить экономические и временные затраты на экспериментальную отработку ТП, рассчитать материальные затраты (объем электролита и электроэнергии) и

продолжительность ЭХО, провести оценку эффективности технологии ЭХО для конкретного изделия, полученного с помощью СЛС.

Целью диссертационной работы является разработка и внедрение технологического процесса ЭХО в АП, основанного на численном моделировании процесса анодного растворения микронеровностей обрабатываемой поверхности изделия, полученного с помощью СЛС.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

1. Провести анализ литературных источников по вопросам снижения шероховатости поверхностей аддитивных изделий, рассмотреть различные методы постобработки, используемые в АП, и провести их сравнительный анализ.

2. Определить достоверную современную физико-математическую модель ЭХО, учитывающую особенности режима анодного электролитного нагрева и структуру микрорельефа поверхности изделия, изготовленного с помощью СЛС.

3. Разработать основные этапы ТП ЭХО изготовленных с помощью СЛС изделий, с целью обеспечения в соответствии с конструкторской документацией (КД) и ТТ параметров качества, таких как, шероховатость поверхностей и точность изготовления изделий в пределах заданных отклонений формы и размеров.

4. Получить экспериментальные данные о влиянии ЭХО на изменение показателей шероховатости, размеры и форму изготовленных с помощью СЛС изделий из *AlSi10Mg* и стали *316L* с целью дальнейшей оценки адекватности и точности предложенной физико-математической модели ЭХО, применяемой в ТП на этапе численного моделирования анодного растворения микронеровностей.

5. Выполнить численное моделирование процесса анодного растворения микронеровностей для получения теоретических данных о влиянии ЭХО на изменение показателей шероховатости, размеров и формы изделий, изготовленных с помощью СЛС из *AlSi10Mg* и стали *316L*, с целью последующей оценки точности предложенной физико-математической модели, применяемой в ТП.

6. Провести оценку точности и адекватности предложенной физико-математической модели ЭХО, применяемой в ТП на этапе численного моделирования анодного растворения микронеровностей.

7. Определить основные ограничения на применение численного моделирования в ТП ЭХО изделий, полученных с помощью СЛС.

8. Апробировать разработанный ТП ЭХО изделий, полученных с помощью СЛС, и внедрить его основные этапы в процесс серийного производства с применением АТ.

Объект исследования: электрохимическая обработка полученных с помощью СЛС изделий.

Предмет исследования: технологический процесс ЭХО полученных с помощью СЛС изделий.

Научная новизна.

1. Разработана методика численного моделирования процесса ЭХО в режиме анодного электролитного нагрева, которая основана на физико-

математической модели анодного растворения металлов, учитывающей особенности процесса сглаживания сформированного путём СЛС микрорельефа.

2. Экспериментально подтверждено, что предложенная физико-математическая модель ЭХО изготовленных с помощью СЛС изделий, адекватно описывает процесс анодного растворения металлов, а результаты численных расчетов, полученных с её помощью, позволяют определить изменения размеров и формы изделия с точностью ± 8 мкм, а также спрогнозировать результат снижения шероховатости Ra с точностью $\pm 5\%$.

3. Экспериментально установлено, что ЭХО изделий, изготовленных из склонного к пассивации сплава $AlSi10Mg$, независимо от их размеров и формы ведёт к увеличению шероховатости Ra после 200 секунд обработки, что обусловлено процессом анодного оксидирования с образованием химически стойкого слоя из Al_2O_3 .

4. Определен временной интервал равный 300 секундам, после которого ЭХО изделий из стали $316L$, изготовленных с помощью СЛС, является неэффективной с точки зрения снижения шероховатости, а дальнейшая обработка ведет к снижению шероховатости Ra не более, чем на 5% от исходного значения (до ЭХО).

5. Установлено, что осредненные по площади значения показателей шероховатости Ra , R_{max} , t_{50} и S изделий, изготовленных с помощью СЛС и последующей ЭХО, не зависят от их формы и размеров, а на их изменения влияют исходный микрорельеф поверхностей, режим обработки и материал самих изделий.

Практическая значимость работы:

1. Выполнено сравнительное исследование различных технологий обработки, применяемых в АП для снижения шероховатости металлических изделий, изготовленных с помощью СЛС.

2. Спроектирована и изготовлена экспериментальная установка мощностью 4,8 кВт для ЭХО, поддерживающая режим анодного электролитного нагрева.

3. Получены экспериментальные данные о влиянии режима анодного электролитного нагрева ЭХО на показатели шероховатости, характеризующие размеры, форму и периодичность микронеровностей.

4. Определены временные интервалы ЭХО для обработки в режиме анодного электролитного нагрева изделий из $AlSi10Mg$ и стали $316L$, после которых снижается эффективность процесса сглаживания микронеровностей.

5. Разработаны, апробированы и приняты к использованию (ООО «МЕТИЗ ПРОИЗВОДСТВО», г. Щелково) этапы ТП ЭХО, включающие в себя определение времени обработки, необходимого для достижения требуемого уровня шероховатости, расчет технологических припусков и их учет в цифровых моделях изделий с целью компенсации неоднородного распределения скоростей растворения на поверхности аддитивного изделия.

6. Повышена точность изготовления изделий с помощью совместного применения технологий СЛС и ЭХО путем расчета технологических припусков, компенсирующих неравномерное растворение материала, и их учета в цифровых моделях изделий.

Положения, выносимые на защиту:

1. Алгоритмическая модель организационно-технических мероприятий и система рекомендаций по обеспечению этапов ТП ЭХО изделий, полученных с помощью СЛС.
2. Методика численного моделирования процесса ЭХО в режиме анодного электролитного нагрева, которая основана на физико-математической модели анодного растворения металлов, учитывающей особенности процесса сглаживания сформированного путём СЛС микрорельефа.
3. Результаты оценки точности и адекватности применения лежащего в основе численного моделирования ЭХО физико-математического описания режима анодного электролитного нагрева совместно с математической моделью процесса формирования микрорельефа поверхностей изделий, изготовленных с помощью СЛС.

Методы исследований

Теоретические исследования процесса ЭХО осуществлялись с применением элементов теории анодного растворения металлов. Для моделирования микрорельефа поверхностей изделий, изготовленных с помощью СЛС, применялся метод случайного осаждения частиц совместно с методом Монте-Карло. В качестве инструмента для численных моделирований использовался язык программирования *Python*, на котором была написана программа для решения с помощью метода конечных элементов (МКР) системы дифференциальных уравнений (ДУ), описывающей процесс ЭХО в режиме анодного электролитного нагрева.

Для экспериментальных исследований использовалась установка для ЭХО, разработанная и изготовленная на кафедре СМ-12 «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ имени Н.Э. Баумана. Также применялось поверенное и аттестованное метрологическое оборудования такое, как лазерный микроскоп, профилограф-профилометр и другое, в целях изучения влияния ЭХО на микрорельеф поверхностей изделий, изготовленных с помощью СЛС.

Достоверность полученных результатов исследований обоснована и подтверждена сходимостью и корреляцией теоретических и экспериментальных данных, а также соответствием результатов исследований существующим теоретическим основам и работам других исследователей. Практическая значимость и достоверность разработанного ТП ЭХО полученных с помощью СЛС изделий подтверждены его апробацией и внедрением в серийное производство изделий.

Личный вклад автора состоит в выполнении следующих этапов диссертационных исследований: анализ литературных источников по вопросу снижения шероховатости аддитивных изделий; определение достоверной физико-математической модели ЭХО, учитывающей режим анодного нагрева и микрорельеф СЛС-поверхностей; разработка этапов ТП ЭХО для изготовленных с помощью СЛС изделий; экспериментальное исследование влияния ЭХО на шероховатость и геометрию изготовленных с помощью СЛС изделий из *AlSi10Mg* и *316L*; численное моделирование режима анодного электролитного нагрева при ЭХО изделий, изготовленных с помощью СЛС; оценка адекватности и точности

выбранной физико-математической модели ЭХО полученных с помощью СЛС изделий; определение ограничений и разработка рекомендаций по применению численного моделирования в ТП ЭХО изделий, полученных с помощью СЛС; апробация и внедрение результатов диссертационного исследования в производство деталей компонентов протезов.

Реализация результатов работы:

1. Создан, апробирован и принят к использованию на серийном производстве протезов конечностей компании ООО «МЕТИЗ ПРОИЗВОДСТВО» (Московская обл., г. Щелково) ТП ЭХО полученных с помощью СЛС изделий, основанный на численном моделировании анодного растворения микронеровностей.

2. Результаты диссертационных исследований внедрены в учебный процесс старших курсов кафедры СМ12 МГТУ им. Н.Э. Баумана: материалы диссертации вошли в содержание лекций по дисциплине «Аддитивные технологии», «Аддитивные технологии и постобработка», читаемых для студентов старших курсов кафедры СМ12; на кафедре СМ12 была спроектирована и собрана лабораторная установка для ЭХО, используемая учащимися в целях научно-исследовательских работ.

Апробация результатов исследования

Результаты исследований рассмотрены и доложены на XXII научно-технической конференции учёных и специалистов, посвящённой 60-летию полёта Ю.А. Гагарина, 75-летию ракетно-космической отрасли и основанию ПАО «РКК «ЭНЕРГИЯ» (Москва, 2021 г.); на XLV академических чтениях по космонавтике, посвящённых памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных учёных — пионеров освоения космического пространства" (Москва, 2021 г.); на международной научной конференции «XLII Гагаринские чтения» (Москва, 2021 г.); на XV всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «БУДУЩЕЕ МАШИНОСТРОЕНИЯ РОССИИ» (Москва, 2022 г.); на VI международной молодежной конференции МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2022 г.); на XLVI академических чтениях по космонавтике, посвящённых памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных учёных — пионеров освоения космического пространства" (Москва, 2022 г.); на VII международной молодежной конференции МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2023 г.); на всероссийской научно-технической конференции студентов «Студенческая научная весна: Машиностроительные технологии» (Москва, 2023 г.); на XLVIII академических чтениях по космонавтике, посвящённых памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных учёных — пионеров освоения космического пространства" (Москва, 2024 г.); на всероссийской научно-технической конференции студентов «Студенческая научная весна: Машиностроительные технологии» (Москва, 2025 г.).

Публикации

По теме диссертационной работы опубликовано 12 научных работ, в том числе 3 публикации – в рецензируемых научных журналах, рекомендованных Высшей Аттестационной Комиссии при Министерстве науки и высшего

образования Российской Федерации (ВАК), 1 публикация - в журнале, индексируемом в базах данных Scopus и Web of Science.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 129 наименований и 4 приложений. Общий объем диссертации составляет 147 страниц, 34 рисунка и 11 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена общая характеристика работы, обоснована актуальность исследований на тему применения ЭХО в АП для снижения шероховатости поверхностей изделий, изготовленных с помощью СЛС. Описаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, а также перечислены положения, выносимые на защиту. Представлены данные по апробации результатов исследования: внедрение в производственный и учебный процессы, доклады на конференциях и публикации по теме диссертации.

В первой главе выполнен литературный обзор различных работ по вопросам и современным проблемам применения АТ, в частности СЛС, которое в последнее десятилетие становится одним из наиболее популярных способов послойного синтеза объектов, изготовленных из металлов и их сплавов. Результаты исследований демонстрируют, что, не смотря на большое количество преимуществ, данная технология имеет и ряд недостатков, одним из которых является высокая шероховатость получаемых поверхностей (от Ra 6 мкм до Ra 16 мкм), препятствующая активному внедрению АТ в производственные процессы.

По результатам анализа научных работ на тему снижения шероховатости изделий, изготовленных с помощью СЛС, проведено сравнение технологий постобработки, которое демонстрирует, что лучшей технологией для снижения шероховатости изделий, изготовленных с помощью СЛС, является ЭХО, обладающая сочетанием важных для АП качеств:

- высокая эффективность – снижение шероховатости с Ra 6..16 мкм до Ra 0,5..2 мкм (при обеспечении режима анодного электролитного нагрева);
- низкие ограничения на форму обрабатываемого изделия – ЭХО не требует точного позиционирования детали, сложной оснастки и инструмента, требующего обеспечения контакта с обрабатываемой поверхностью, а снижение шероховатости происходит сразу по всей погруженной в электролит площади;
- высокая производительность – ЭХО позволяет снижать шероховатость сразу всех поверхностей одного или нескольких изделий, а площадь обрабатываемых поверхностей ограничивается лишь мощностью установки и габаритами её электролитной ванны.

Анализ исследований по вопросу ЭХО выявил противоречие между перспективностью применения данной технологии к изделиям, изготовленным с помощью СЛС, и рядом нерешенных проблем:

- неоднородность металла – неравномерное распределение потенциала вдоль обрабатываемой поверхности, вызванное краевыми эффектами, является причиной перепадов скоростей растворов, ведущих к изменению размеров и формы изделия;

- отсутствие контроля и прогнозируемости результата обработки – по причине отсутствия методов контроля результата ЭХО в режиме реального времени для достижения требуемой шероховатости при сохранении геометрических параметров в пределах конструкторских допусков выполняется экспериментальный подбор оптимальных режимов обработки, что требует значительных временных и финансовых затрат (изготовление образцов-свидетелей, проведение многофакторных экспериментов и метрологических исследований).

Существование этих недостатков обусловлено отсутствием этапов ТП обработки полученных с помощью СЛС изделий, включающих в себя математическое моделирование ЭХО, необходимое для установления соответствия между техническими характеристиками (свойствами изделия), и производственно-технологическими факторами, обеспечивающими получение заданных характеристик (свойств).

На основании проведенного обзора и анализа литературных источников на тему диссертации сформулированы цель исследования и необходимые для её достижения задачи.

Во второй главе приведены основанные на численном моделировании этапы ТП ЭХО изделий, полученных с помощью СЛС.

1. Подбор технологических режимов ЭХО. На основании анализа существующих патентов, а также рекомендаций по подбору режимов ЭХО определяются основные параметры обработки для материала, из которого будет изготовлена будущая деталь: напряжение между анодом (обрабатываемой деталью) и катодами; химический состав электролита; температура электролита; продолжительно обработки.

Наибольшее снижение шероховатости обеспечивает режим анодного электролитного нагрева (АЭН), известный как «электролитно-плазменное полирование». Это название связано с видимым свечением у анода, однако природа явления — не газовый разряд, а анодная люминесценция, вызванной релаксацией возбужденных частиц на поверхности анода.

Основными особенностями данного режима являются:

- возникновение парогазового слоя - высокая плотность тока на поверхности анода по закону Джоуля приводит к выделению тепла, кипению электролита и образованию парогазового слоя, который замедляет диффузию электролита к впадинам, снижая скорость их растворения и увеличивая эффект сглаживания выступов микронеровностей;

- состав электролита – для поддержания режима применяют нетоксичные и безопасные для человека и окружающей среды электролиты, являющиеся низкоконцентрированными растворами неорганических солей (массовая доля от 2% до 5%) с добавлением поверхностно-активных веществ (ПАВ);

- высокие значения напряжения – высокое напряжение (от 150 до 400 В) применяют с целью достижения плотности тока, необходимой для электролиза в низкоконцентрированных растворах неорганических солей.

Такой важный параметр режима, как время обработки, определить достаточно точно невозможно, поскольку он зависит от совокупности входных и

выходных данных, однако разработанная методика позволяет установить требуемое значение временного интервала ЭХО на следующем этапе.

2. Численное моделирование процесса ЭХО изделия, изготовленного с помощью СЛС. На данном этапе методом конечных разниц (МКР) выполняется трехэтапные итерационные вычисления системы дифференциальных уравнений (ДУ), лежащих в основе наиболее достоверной физико-математической модели ЭХО.

Анализ исследований показал, что сглаживание микронеровностей при АЭН связано с неоднородным распределением потенциала, вызывающим ускоренное растворение металла на выступах, а парогазовая пленка дополнительно замедляет диффузию электролита во впадины.

Процесс анодного растворения металла точно описывается уравнением электролиза Фарадея, демонстрирующим линейную зависимость скорости растворения металла от плотности электрического тока и физико-химических свойств электролита:

$$V_m = k \cdot I = \left(\frac{\mu}{zF} \right) \cdot (j \cdot S), \quad (1)$$

где V_m — массовая скорость растворения материала, [кг/с]; k — электрохимический эквивалент, [кг/Кл]; I — проходящая через поверхность анода сила тока [А]; $F = 96\,485$ — постоянная Фарадея, [Кл/моль]; μ — молярная масса иона, [кг/моль]; z — валентное число ионов вещества; j — плотность электрического тока, [А/м²]; S — погруженная в электролит площадь поверхности анода, [м²].

При использовании данной модели был принят ряд допущений:

- толщина парогазового слоя $\delta_{\text{пг}}$ принимается постоянной и равной 0,07 мкм для всей обрабатываемой поверхности – согласно исследованиям, при температуре электролита 60–80 °С и напряжении 200–300 В толщина парогазовой оболочки варьируется в узком диапазоне 0,07–0,10 мкм;

- скорость растворения микронеровностей, покрытых парогазовым слоем, принимается равной нулю – поскольку концентрация и подвижность носителей заряда в газе на порядок ниже, чем в жидкости, то проводимость $1/\rho$ парогазовой оболочки пренебрежимо мала в сравнении с жидким электролитом, а скорость анодного растворения практически равна нулю;

- физико-химические свойства электролита считаются постоянными – объем электролитной ванны для ЭХО на порядки превышает объем обрабатываемой детали, что позволяет пренебречь изменением концентрации раствора в процессе обработки, а принудительное перемешивание с подачей электролита к зоне обработки обеспечивает однородность его свойств вдоль поверхности.

На первом этапе численных расчетов проводится моделирование распределения потенциала в расчетной области:

- строится двумерная расчетная область, включающая в себя анод (обрабатываемое изделие), катод, границы электролита и межэлектродное пространство;

- расчётная область разбивается сеткой, расстояние Δs между узлами которой должно быть, как можно меньше, в сравнении с расчетной областью;

- в каждом узле сетки с помощью МКР решается система ДУ с граничными условиями (ГУ), описывающими распределение потенциала:

$$\Delta u = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0. \quad (2)$$

$$u = U - \eta_a \left(\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial u}{\partial n} \right) |_{S_a}; \quad (3)$$

$$u = U + \eta_k \left(\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial u}{\partial n} \right) |_{S_k}. \quad (4)$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial n} \right)_{S_{in}} = 0. \quad (5)$$

где U – разность потенциалов между электродами, [В]; S_k, S_a, S_{in} – границы раздела между катодом и электролитом, анодом и электролитом, электродом и изолятором (зеркало электролита, стенка ванны), соответственно; η_a, η_k – функции поляризации (перенапряжения) на аноде и катоде, соответственно, [В];

- для обеспечения высокой скорости моделирования процесса растворения микронеровностей (без потери точности расчетов) прианодная область, содержащая поверхность обрабатываемого изделия (анода) и прилегающую зону межэлектродного пространства, дискретизируется на N подобластей (рисунок 1, а) с уже известными значениями потенциала в узловых точках.

На втором этапе численных расчетов для каждой i -ой подобласти методом случайного осаждения частиц моделируется микрорельеф обрабатываемого изделия (модель поверхности имеет те же показатели шероховатости, что и реальное изделие), а также процесс сглаживания микронеровностей:

- расчетная подобласть шириной X_{\max} и высотой Y_{\max} , соответствующей истинному значению наибольшей высоты профиля неровности $R_{\max.изм}$, разбивается расчетной сеткой (рисунок 1, б);

- в ячейки каждого x -ого столбца сверху вниз случайным образом осаждаются частицы до тех пор, пока значение Ra_0 инициированной поверхности не будет больше измеренного значения $Ra_{изм}$ (рисунок 1, в);

- поочередно верхние частицы каждого x -ого столбца перемещаются случайным образом на вершину другого столбца, после чего определяется новое значение Ra_k , где k – номер итерации (рисунок 1, г).

- если $Ra_k < Ra_{k-1}$, то сформированная поверхность принимается для дальнейшего моделирования с вероятностью:

$$P = \exp \left(\frac{Ra_{k-1} - Ra_k}{\tau} \right), \quad (6)$$

где τ – квазitemпературный параметр, значение которого уменьшается на 1 мкм после каждой 1000-ой итерации. Перемешивание выполняется до тех пор, пока не будет достигнута шероховатость моделируемого рельефа $Ra_{изм}$;

- в каждой подобласти производится итерационный расчет распределения потенциала u , плотности тока j , скорости растворения материала V_m и толщины слоя материала δ , растворенного с поверхности анода за время итерации.

- расчет останавливается, когда шероховатость Ra_k становится равной или меньшей требуемого значения $Ra_{эхо}$.

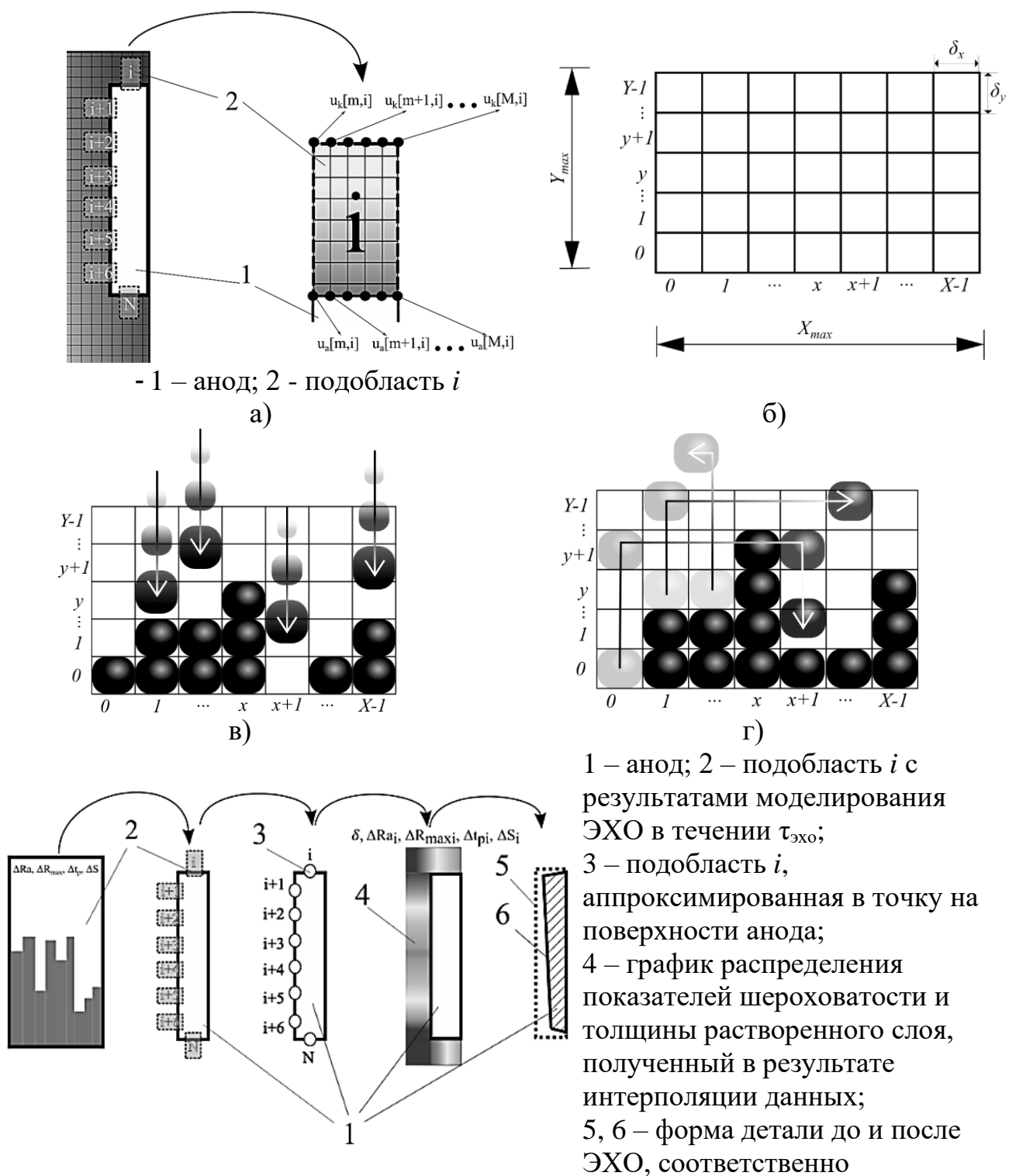


Рисунок 1 - Схема описания численного моделирования ЭХО: (а) – дискретизация прианодной области на расчётные подобласти; (б) – генерация расчетной области; (в) – осаждение частиц; (г) – перестроение поверхности; (д) – третий этапа численного моделирования

На третьем этапе численных расчетов проводится вторичное моделирование с целью определения результата ЭХО изделия (рисунок 1, д):

- определив на втором этапе моделирования количество итераций расчета k_i , и, зная время итерации t для каждой i -ой области, определяется время обработки $\tau_{\text{ЭХО}}$, необходимое для достижения требуемого уровня шероховатости:

$$\tau_{\text{ЭХО}i} = k_i \cdot t. \quad (7)$$

- среди полученных значений $\tau_{\text{ЭХО}i}$ для каждой i -ой подобласти определяется максимальное значение времени $\tau_{\text{ЭХО}max}$, характеризующее продолжительность обработки, при которой шероховатость всех поверхностей будет не ниже заданного значения $Ra_{\text{ЭХО}}$;

- для каждой i -ой подобласти проводится повторное моделирование ЭХО за время $\tau_{\text{ЭХО}max}$;

- по результатам моделирования для каждой i -ой подобласти определяются среднеарифметические значения показателей шероховатости $Ra_{\text{ЭХО}i}$, $Rmax_{\text{ЭХО}i}$, $t_{p\text{ЭХО}i}$, $S_{\text{ЭХО}i}$ толщины растворенного слоя δ_i ;

- полученные в каждой i -ой подобласти среднеарифметические значения $Ra_{\text{ЭХО}i}$, $Rmax_{\text{ЭХО}i}$, $t_{p\text{ЭХО}i}$, $S_{\text{ЭХО}i}$, δ_i аппроксимируются в точки, лежащие на поверхности изделия (анода), по которым в результате интерполяции строится графики распределения показателей шероховатости $Ra_{\text{ЭХО}}$, $Rmax_{\text{ЭХО}}$, $t_{p\text{ЭХО}}$, $S_{\text{ЭХО}}$ и толщины растворенного слоя δ ;

- исходя из картины распределения толщины растворенного слоя δ , определяется форма и размеры детали в результате ЭХО в течении $\tau_{\text{ЭХО}max}$ (рисунок 1, д).

3. Обработка результатов моделирования. По результатам численного моделирования процесса ЭХО выполняются следующие действия:

- проводится оценка эффективности ЭХО - анализ параметров шероховатости $Ra_{\text{ЭХО}}$, $Rmax_{\text{ЭХО}}$, $t_{p\text{ЭХО}}$, $S_{\text{ЭХО}}$ и времени обработки $\tau_{\text{ЭХО}max}$, последующей оценкой степени удовлетворения изделия требованиям КД и ТТ;

- в 3D-модель, по которой будет изготовлена деталь, вносятся технологические припуски Δl равные толщине растворённого слоя δ , которая, как показывают исследования, обычно не превышает десятых долей миллиметра, что обеспечивает незначительное влияние на распределение потенциала у поверхности и сохраняет корректность моделирования ЭХО для изделия с учётом припусков;

- проводится оценка объема части материальных затрат, а именно требуемое количество электроэнергии и объем электролита, необходимых на обработку одной детали.

4. Проведение ЭХО изделия, полученного с помощью СЛС. На основании обработки результатов численного моделирования для изделия, изготовленного с помощью СЛС, проводится ЭХО, для которого были определены технологические припуски, параметры режима и продолжительность обработки.

5. Контроль качества изделия на соответствие требованиям КД и ТТ. По результатам ЭХО проводится контроль отклонений размеров, формы изделий и шероховатости его поверхностей, на основании которого делается заключение о соответствии изделия требованиям КД и ТТ.

В третьей главе приведено описание экспериментальных исследований ЭХО, выполненных с целью получения опытных данных для оценки адекватности и точности выбранный физико-математической модели.

Приведено описание материально-технической базы, задействованной в рамках проведения экспериментальных исследований:

- разработанная и изготовленная в рамках диссертационной работы экспериментальная установка для ЭХО мощностью 4,8 кВт с диапазоном регулирования напряжения от 200 В до 300 В, с электролитной ванной объемом 2 литра, имеющей систему перемешивания и терморегуляции электролита в диапазоне температур от 20° С до 100° С;
- изготовленные с помощью СЛС-принтера EOS M290 образцы из сплавов *AlSi10Mg* и *316L* с типичными для машиностроения формами (трубки, пластины, криволинейные поверхности);
- используемые для измерения показателей шероховатости микроскоп конфокальный лазерный измерительный *Olympus LEXT OLS5100*, двойной микроскоп Линника и профилограф-профилометр БВ-7669.

В результате экспериментальной ЭХО образцов, обработанных на режимах, параметры которых приведены в таблице 1, были получены данные о влиянии АЭН на толщину растворенного слоя и изменение среднеарифметических значений показателей шероховатости.

Установлено, что эффективность снижения шероховатости образцов из *AlSi10Mg* падает после 200 с обработки, а дальнейшая ЭХО увеличивает *Ra* из-за образования процесса пассивации с образованием оксидного слоя Al_2O_3 . Эффективность ЭХО образцов из *316L* снижается после 300 с, а дальнейшее уменьшение *Ra* не превышает 5% от исходного значения из-за выравнивания скоростей растворения на вершинах и во впадинах микронеровностей.

Таблица 1 - Режимы экспериментально ЭХО для образцов из *AlSi10Mg* и *316L*

Параметры режима	<i>AlSi10Mg</i>	<i>316L</i>
Электролит	$KCl - 3\%$; $H_2C_2O_4 - 2\%$; $C_3H_5(OH)_3 - 1,5\%$	$(NH_4)SO_4 - 3\%$; $C_6H_{14}O_6$ (сорбит) -1%
Температура электролита	85 °С	85 °С
Напряжение	250 В	240 В

В главе представлены результаты измерений распределения показателей шероховатости и толщины растворенного слоя вдоль обрабатываемой поверхности, которые демонстрируют влияние краевых эффектов на однородность результата обработки. На краях и острых углах наблюдается резкое снижение шероховатости и увеличение толщины растворенного слоя, что говорит о высоком значении плотности тока, вызванного ростом разности потенциалов вблизи их поверхности.

В четвертой главе приведены результаты теоретических исследований ЭХО изготовленных с помощью СЛС изделий и их сопоставление с экспериментальными данными, проведенное с целью оценки адекватности и точности физико-математической модели, применяемой в ТП на этапе численного моделирования анодного растворения микронеровностей.

Описаны условия проведения численных расчетов, моделирующих ЭХО образцов, изготовленных и обработанных в рамках экспериментальной части диссертационной работы.

В главе перечислены принятые в рамках численного моделирования допущения:

- ширина подобласти (для 2-ого этапа моделирования) равна базовой длине $l = 2,5$ мм, на которой проводились измерения шероховатости экспериментального образца;
- высота подобласти (для 2-ого этапа моделирования) равна значению наибольшей высоты профиля неровности R_{\max} для соответствующего образца;
- моделирование производилось для двумерной расчетной области, а с целью нивелирования краевых эффектов от граней образца, непопадающих в сечение расчетной области, измерения на экспериментальных образцах и моделирование процесса ЭХО проводились в плоскостях симметрии, равноудаленных от этих граней.

Приведено графическое сопоставление теоретических и экспериментальных данных, для которых были установлены следующие доверительные интервалы: $\pm 5\%$ - для распределения показателей шероховатости Ra , R_{\max} , t_{50} , Sm ; ± 8 мкм – для распределения толщины растворенного слоя материала δ .

В главе представлены результаты оценки адекватности и точности выбранной физико-математической модели, применяемой в ТП ЭХО на этапе численного моделирования анодного растворения микронеровностей:

- кривые распределения показателей шероховатости, построенные на основе результатов моделирования, хорошо согласуются с экспериментальными данными, попадая в диапазон погрешности $\pm 5\%$;
- кривые распределения толщины растворенного слоя материала δ , построенные на основе результатов моделирования, хорошо согласуются с экспериментальными данными, попадая в диапазон погрешности ± 8 мкм;
- коэффициент детерминации R^2 для всех теоретических кривых находится в диапазоне значений от 0,8 до 0,95, что говорит о достаточной точности выбранной физико-математической модели;
- по результатам F -теста на основании критерия Фишера установлено, что методика численного моделирования ЭХО изделий, изготовленных с помощью СЛС, может быть принята, как достоверная с вероятностью 95%;
- возникшие погрешности и несоответствия между экспериментальными и теоретическими данными связаны с погрешностью измерений, принятыми при численном моделировании допущениями, отсутствия контроля химического состава электролитов и материала деталей.

В пятой главе представлены результаты апробации и внедрения в серийное производство протезов конечностей ООО «МЕТИЗ Производство» этапов ТП ЭХО полученных с помощью СЛС изделий.

Описана технологическая задача, в рамках которой необходимо было изготовить деталь «Шкив ведущий» ременной передачи диаметром $\varnothing 36,5$ мм и высотой 6,3 мм (рисунок 2, а) под зубчатый ремень шириной 1,5 мм. Деталь входит

в состав коленного модуля, являющегося основным компонентом протеза бедра, и имеет следующие основные технические требования:

- заусенцы и острые кромки на зубьях «Шкива ведущего» не допускаются;
- общая шероховатость всех поверхностей не выше $Ra\ 2,5\ \mu\text{м}$;
- посадочный размер квадратного отверстия $\square 10\text{H}10\ +0,058\ \text{мм}$;
- материал – алюминиевый сплав (с целью минимизации массы изделия).

Описан ранний опыт производства «Шкива ведущего» обработкой резанием в ООО «МЕТИЗ Производство». Конструкция «Шкива ведущего» состояла из двух деталей, изготовленных из Д16Т: Шкив с зубьями (рисунок 2, б), который напрессовывался на Втулку шкива (рисунок 2, в). При сборке конструкции материал на острых кромках зубьев Шкива заминался об торцевую поверхность Втулки, образуя в пространстве между зубьями заусенцы, приводящие к слету ремня в процессе работы ременной передачи (рисунок 2, г). Удаление притупление острых кромок Шкива на фрезерном станке с числовым программным управлением (ЧПУ) приводило к образованию слишком больших фасок, формирующих между зубьями Шкива и торцом Втулки зазор, в котором зубья ремня могли застрять. Альтернативный метод слесарной обработки кромок оказался чрезмерно трудоемким и повышал процент брака в производстве.

Представлено решение задачи по изготовлению «Шкива ведущего», которое включает в себя изготовление изделия одной целой деталью из $AlSi10Mg$ с помощью СЛС и последующей ЭХО (рисунок 2, д, е), ТП которой включал в себя разработанные этапы моделирования анодного растворения микронеровностей.

По результатам технического контроля «Шкива ведущего», изготовленного с помощью СЛС и последующей ЭХО (рисунок 2, е), было установлено, что изделие полностью удовлетворяет предъявленным техническим требованиям.

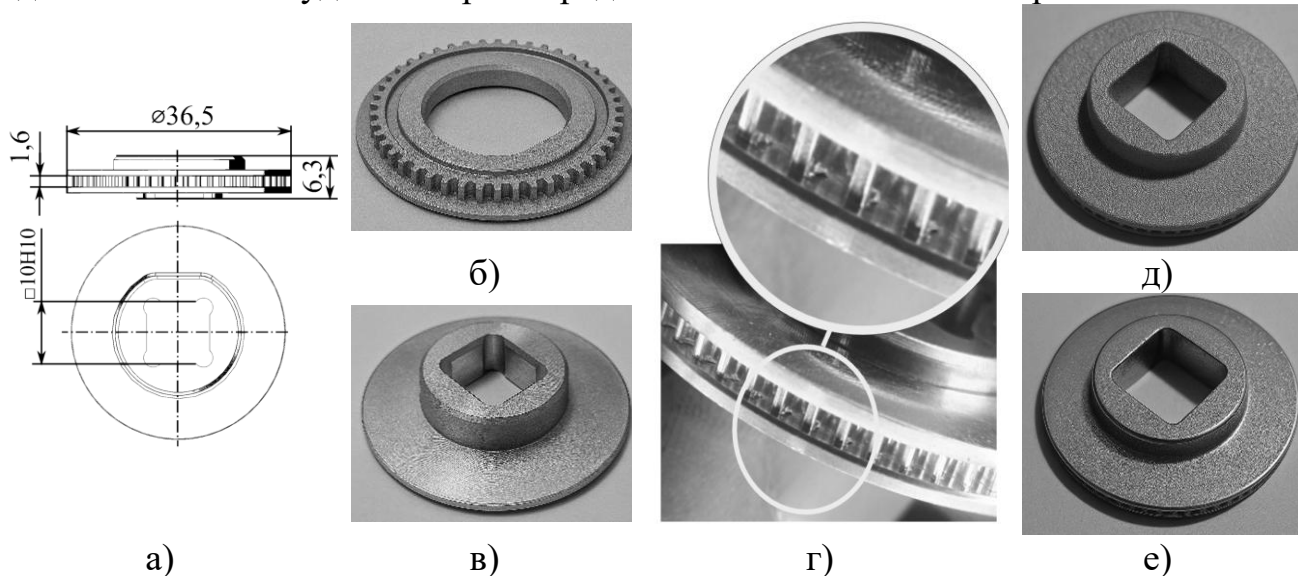


Рисунок 2 – «Шкив ведущий»: (а) – 3D-модель Шкива; (б), (в) – Шкив и Втулка, изготовленные обработкой резанием, соответственно; (г) – заусенцы после напрессовывания Шкива на Втулку; (д), (е) – «Шкив ведущий», изготовленный с помощью СЛС до и после ЭХО, соответственно

ОБЩИЕ ВЫВОД ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТЫ

По результатам диссертационной работы сделаны следующие выводы:

1. По результатам проведенного анализа литературных источников по вопросам снижения шероховатости поверхностей аддитивных изделий выявлено противоречие между эффективностью применения технологии ЭХО к полученным с помощью СЛС изделиям и низким спросом на её применение в АП.

2. Установлено, что физико-математическая модель, применяемая в ТП ЭХО полученных с помощью СЛС изделий, адекватно описывает процесс анодного растворения металлов, а результаты численных расчетов, полученных с её помощью, позволяют определить изменения размеров и формы изделия с точностью ± 8 мкм, а также спрогнозировать результат снижения шероховатости Ra с точностью $\pm 5\%$.

3. Разработаны основные этапы ТП ЭХО изготовленных с помощью СЛС изделий, которые позволяют проводить оценку эффективности процесса снижения шероховатости, определять время обработки, необходимое для достижения требуемого уровня шероховатости, повышать точность изготовления путем учета технологических припусков в 3D-модели изделия, рассчитывать материальные затраты и сокращать их путём исключения экспериментальной отработки ЭХО.

4. Разработана и апробирована методика численного моделирования ЭХО полученных с помощью СЛС изделий, применяемая в ТП на этапе численного моделирования анодного растворения микронеровностей.

5. Установлено, что в процессе ЭХО деталей из сплава $AlSi10Mg$, склонного к пассивации, по истечении 200 секунд обработки происходит увеличение шероховатости вследствие анодного оксидирования с образованием стойкого оксидного слоя Al_2O_3 . Данный эффект не зависит от размеров и формы изделий.

6. Экспериментально-теоретический анализ выявил, что для изделий, изготовленных с помощью СЛС из стали $316L$, максимальная эффективность снижения шероховатости с помощью ЭХО достигается во временном интервале до 300 секунд. Увеличение продолжительности операции приводит к незначительному уменьшению Ra (не более 5% от исходного уровня), что делает дальнейшую обработку нецелесообразной.

7. В рамках экспериментально-теоретических исследований установлено влияние продолжительности ЭХО в режиме анодного электролитного нагрева не только на размерные параметры шероховатости Ra, R_{max} , но также на их форму t_p , и периодичность S .

8. Доказана эффективность повышения точности изготовления с помощью СЛС и последующей ЭХО изделий за счет моделирования процесса анодного растворения для оптимизации технологических припусков и предварительной коррекции 3D-модели, компенсирующей неравномерность электрохимического съема материала.

9. Разработаны, апробированы и приняты к использованию (ООО «МЕТИЗ ПРОИЗВОДСТВО», г. Щелково) этапы ТП ЭХО, включающие в себя определение времени полирования, необходимого для достижения требуемого уровня шероховатости, расчет технологических припусков и их учет в цифровых

моделях изделий с целью компенсации неоднородного распределения скоростей растворения на поверхности аддитивного изделия.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Смирнов А. С., Галиновский А. Л., Мартысюк Д. А. Влияние первичного распределения электрического тока на скорость растворения металла при обработке изделия методом электролитно-плазменного полирования // Электromеталлургия. 2023. № 7. С. 12–20. (0,56 п.л./0,3 п.л.)
2. Смирнов А. С., Галиновский А. Л., Мартысюк Д. А. Снижение шероховатости поверхностей аддитивных изделий электрохимическими методами обработки // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2022. № 7 (748). С. 16–23. (0,5 п.л./0,3 п.л.)
3. Смирнов А. С., Галиновский А. Л., Мартысюк Д. А. Эрозия изделия при электролитно-плазменном полировании // Справочник. Инженерный журнал. 2022. № 6 (303). С. 3–7. (0,31 п.л./0,15 п.л.)
4. Смирнов А. С. Прогнозирование съема металла при электролитно-плазменной обработке изделий, изготовленных с помощью аддитивных технологий // Будущее машиностроения России 2022 : сб. докл. XV Всерос. конф. молодых ученых и специалистов (с междунар. участием), Москва, 21–24 сент. 2022 г. Т. 1. Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2023. С. 34–37. (0,25 п.л./0,25 п.л.)
5. Smirnov A. S. Comparison of Technologies Used in Additive Manufacturing to Reduce the Roughness of Metal and Alloy Products Made by the Selective Laser Melting // Science, Engineering and Business : coll. materials V Interacademic Conf. for Graduate Students and Young Researchers, Moscow, 18–19 Apr. 2023. Moscow : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2023. Р. 236–243. (0,5 п.л./0,5 п.л.)
6. Смирнов А. С., Галиновский А. Л. Доводка размеров металлических изделий с помощью электролитно-плазменного полирования // VII Междунар. науч.-техн. конф. «Новые материалы, подходы и технологии проектирования, производства и эксплуатации ракетно-космической техники» : материалы конф., Москва, 17 нояб. 2023 г. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2023. С. 15–19. (0,31 п.л./0,19 п.л.)
7. Смирнов А. С., Галиновский А. Л., Мартысюк Д. А. Неравномерность изменения линейных размеров и уровня шероховатости поверхностей изделия, обработанного методом электролитно-плазменного полирования // VI Междунар. науч.-техн. конф. «Новые материалы, подходы и технологии проектирования, производства и эксплуатации ракетно-космической техники» : материалы конф., Москва, 18 нояб. 2022 г. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2022. С. 16–19. (0,25 п.л./0,1 п.л.)
8. Смирнов А. С., Вакарчук Д. А. Методика снятия заусенцев и притупления кромок с помощью электролитно-плазменного полирования // XLVIII Академ. чтения по космонавтике, посвящ. памяти акад. С. П. Королёва и др. отечеств. ученых — пионеров освоения косм. пространства. Королёвские чтения 2024 : XLVIII Академ. чтения по космонавтике, Москва, 23–26 янв. 2024 г. Т. 3. Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2024. С. 9–10. (0,13 п.л./0,08 п.л.)