



ПОЛИТЕХ

Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

На правах рукописи

Новоселов Михаил Викторович

**Технологическое обеспечение и повышение качества поверхности,
точности обработки деталей со сложным профилем поверхности методом
струйного электролитно-плазменного полирования**

2.5.6. Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2024

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель

Радкевич Михаил Михайлович, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Муратов Карим Равилевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры Инновационные технологии машиностроения ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (г. Пермь).

Батуев Виктор Викторович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технологии автоматизированного машиностроения» ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)» (г. Челябинск).

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева-КАИ», Казань.

Защита диссертации состоится «11» июня 2024 г. в 12:00 часов на заседании диссертационного совета федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, главный учебный корпус, аудитория 346.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте www.spbstu.ru федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Автореферат разослан «__» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук



Хрусталева Ирина Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Появление новых материалов и постоянный рост требований к поверхностям металлических изделий определяют актуальность развития технологий полирования криволинейных поверхностей.

Среди современных технологий, связанных с электрофизическими и электрохимическими методами, отдельную нишу занимают электролитно-плазменные технологии. Используются методы обработки с погружением в электролитической ванне и обработка электролитической струей. Метод обработки струей электролита заслуживает особого внимания в контексте выбранной темы, благодаря своей низкой температуре, экономичности и возможности обработки локальных областей сложных поверхностей изделий. К тому же данный метод имеет более высокую точность и производительность обработки за счет возможности локальной обработки поверхности и программирования перемещения области электролитной плазмы по поверхности изделия

Известные технологии имеют свои недостатки. В промышленности широко используются электрохимическое, химическое и механическое полирование. В сравнении с ними, электролитно-плазменный метод финишной обработки позволяет производить изделия с более благоприятными экологическими и экономическими характеристиками, особенно в случае обработки сложнопрофильных деталей. Электролитно-плазменная обработка часто способна заменить трудоемкие механические методы и потенциально опасные химические процессы в агрессивных кислотных средах. К тому же метод струйного электролитно-плазменного полирования выполняется на надежных установках, которые компактны и просты в эксплуатации.

Однако исследований, посвященных обработке поверхностей сложных форм методом электролитной плазмы, недостаточно. Электролитно-плазменное полирование может стать предпочтительным методом финишной обработки таких изделий как турбины, лопатки, корпусные детали, штампы, медицинские импланты, суставные детали и другие изделия; поэтому изучение технологической возможности обработки поверхностей сложных форм методом струйного электролитно-плазменного полирования представляет актуальную проблему.

Цель работы. Технологическое обеспечение и повышение качества поверхности, точности деталей сложного профиля при различных схемах струйного электролитно-плазменного полирования.

Задача работы. Обоснование выбора рациональных технологических схем метода струйного электролитно-плазменного полирования и определение

рациональных параметров режима технологического процесса обработки сложных поверхностей, обеспечивающие требуемые показатели шероховатости поверхности и точность деталей.

Для решения данной задачи и достижения цели необходимо:

1. Обосновать выбор основных параметров технологического процесса и рациональные технологические схемы электролитно-плазменного полирования.
2. Исследовать влияние основных параметров процесса СЭПП на достижение требуемого уровня шероховатости и точности поверхностей сложных форм.
3. Построить математические модели оценки параметров качества полирования – шероховатости (R_a) мкм; коэффициента равномерности (K); точности (Δ), мм в зависимости от режимов обработки – напряжения (U), В; скорости потока электролита – ($V_{эл}$), л/м; концентрация электролита (ω), % СЭПП фасонных поверхностей.
4. Экспериментально подтвердить предсказательную способность предложенной модели.
5. Разработать практические рекомендации по проектированию технологического процесса СЭПП изделий со сложной формой поверхности в производственных условиях.

Объектом исследования является процесс струйного электролитно-плазменного полирования деталей со сложным профилем поверхностей.

Предметом исследования является качество и эффективность обработки металлических деталей со сложным профилем поверхности при струйном электролитно-плазменном полировании.

Степень разработанности. Электролитно-плазменная обработка (ЭПО) была разработана в СССР в 1980-х гг. и с тех пор была широко применена в промышленности. Существует много ученых, которые внесли вклад в разработку теоретических и практических основ получения деталей с малой шероховатостью поверхности, способов повышения качества и эффективности обработки деталей со сложным профилем поверхности методом ЭПО.

Некоторые из ученых, которые внесли значительный вклад в развитие метода ЭПО, включают в себя: Н.Н. Kellogg, В. Н. Дураджи, С.Я. Грилихеса, И.С. Куликова, С.В. Ващенко, А.Ф. Гайсина, А.Я. Камнева, Б.А. Артамонова, В.В. Круглова, А.Д. Погребняка, А.И. Попова и др.

Наиболее подробно процессы электролитно-плазменной обработки изучены в работах Ф.М. Гайсина и Э.Е. Сона «Электрофизические процессы в разрядах с твердым и жидким электродами», появилось много публикаций по теме

струйной электролитно-плазменной обработки в авторитетных в научных периодических изданиях.

Методология и методика исследования. При выполнении диссертационной работы были выбраны стандартные методики исследования шероховатости, разных металлических материалов, использовались методы системного анализа, планирования эксперимента, аппроксимации кривых, корреляционного и статистического анализа. При экспериментальном исследовании использовался профилографический метод измерения шероховатости поверхности и оптическая микроскопия топографии поверхности. Обработка экспериментальных данных проводилась с использованием пакетов MATLAB.

Обработка производилась на опытной установке струйной электролитно-плазменной полировки при использовании различных схем обработки наружной и внутренней поверхности изделий (Рисунок 1).

Определен подходящий состав и оптимальные концентрации электролита с помощью серии экспериментов по электролитно-плазменному полированию в ванне.

Для анализа и настройки технологических режимов использовались разнообразные образцы материалов, включая пластины из нержавеющей стали AISI 304, медные пластины из металла МЗ, а также образцы, изготовленные из медицинского сплава L605.

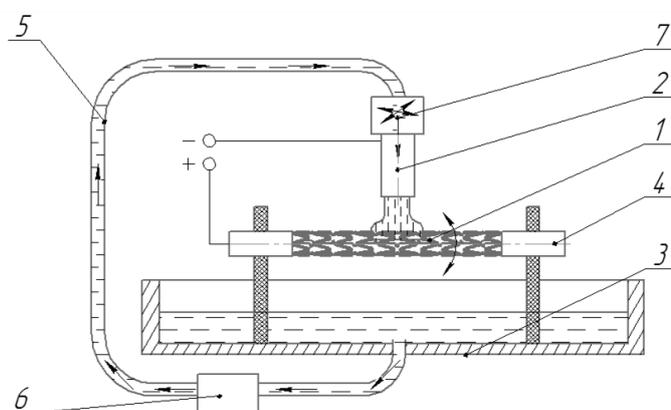


Рисунок 1 – Конфигурация экспериментальной системы, предназначенной для проведения струйной электролитно-плазменной обработки: 1 – заготовка, 2 – полый катод, 3 – ванна с электролитом, 4 – механизм фиксации и перемещения заготовки, 5 – система подачи электролита, 6 – модуль очистки, 7 – модуль перемещения катода.

В рамках диссертационного исследования использовались такие изделия, как турбинные лопатки, медные электроды-инструменты, заготовки для стентов из стали L605 и коронарные стенты. Геометрические параметры этих образцов

были измерены с использованием микрометра Mitutoyo Digmatic для малых величин.

Собранные данные по напряжению, току и длительности импульсов были получены из осциллограмм, для чего также использовали двухканальный осциллограф Nantek с диапазоном 100МГц. Для соединения осциллографа были задействованы делители напряжения и делители тока, схемы которых продемонстрированы на рисунке 2.

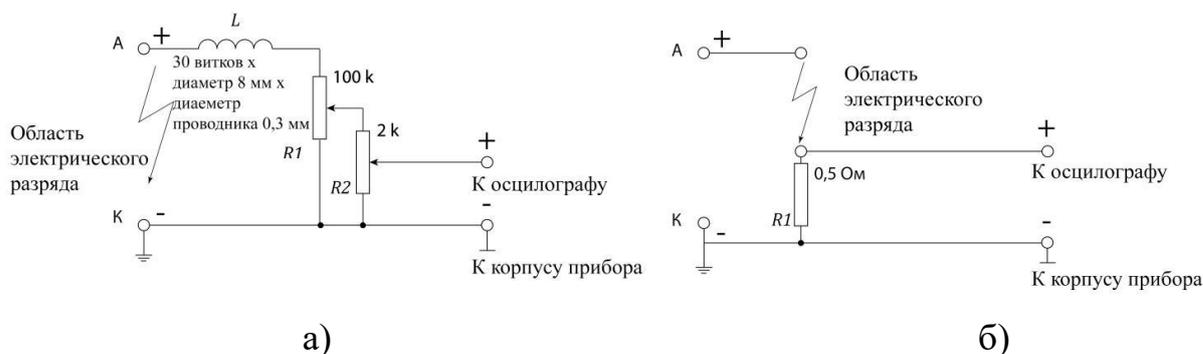


Рисунок 2 – Снятие частотно - импульсных характеристик разряда схемы:
а) делитель напряжения; б) делитель тока.

Научная новизна заключается в разработке научно обоснованных технологических решений по финишной обработке поверхностей сложных форм методом струйного электролитно-плазменного полирования.

1. Реализован технологический процесс струйного электролитно-плазменного полирования, получены вольт-амперные характеристики процесса для нержавеющей стали, меди и кобальт-хром-ванадиевых сплавов.
2. Изучен механизм и установлены закономерности влияния основных параметров процесса струйного электролитно-плазменного полирования на шероховатость и точность обработки деталей из различных сталей и сплавов.
3. Получены математические модели оценки шероховатости (R_a) мкм; коэффициента равномерности (K); точности (Δ), мм в зависимости от основных параметров режима– напряжения (U), В; скорости потока электролита – ($V_{эл}$), л/м; концентрации электролита (ω), % СЭПП фасонных поверхностей из различных сплавов.
4. Разработаны технологические схемы СЭПП, определены рациональные режимы обработки поверхностей сложных форм деталей, обеспечивающий шероховатость (до R_a 0,04 мкм) и точность (съем металла до 15 мкм при полировании стентов).
5. Спроектировано технологическое оборудование и разработаны специальные приспособления для реализации технологии струйного электролитно-плазменного полирования сложных форм.

6. Разработаны практические рекомендации по проектированию технологических процессов СЭПП деталей со сложной формой поверхности в условиях реального производства.

Практическая значимость полученных результатов:

1. Разработанная научно обоснованная технология струйного электролитно-плазменного полирования деталей со сложным профилем поверхности позволяет обеспечить низкий уровень шероховатости с требуемой точностью для таких изделий, как медицинские импланты, элементы суставных протезов, а также элементы штампов, турбинных лопаток и др.
2. Предложены методика проектирования технологического процесса электролитно-плазменного полирования изделий со сложной поверхностью и практические рекомендации по выбору составов электролитов для полирования различных материалов. Спроектировано технологическое оборудование и разработаны специальные приспособления для реализации технологии струйного электролитно-плазменного полирования.
3. Полученные математические модели процесса СЭПП позволяют прогнозировать достижимый уровень качества (шероховатость поверхности и точность размеров) в зависимости от выбранных технологических параметров режима полирования или по заданным значениям шероховатости и точности назначить рациональные режимы обработки деталей из нержавеющей стали.
4. Технология СЭПП расширяет возможности финишной обработки деталей со сложной конфигурацией поверхности. При этом обеспечивается снижение шероховатости поверхности до 0,04 мкм, а высокая точность полирования позволяет обрабатывать изделия с заданным припуском на ограниченном участке поверхности сложного профиля.
5. Результаты, диссертационной работы применяются для финишной обработки различных деталей на промышленных предприятиях, что подтверждается актом внедрения и используются в курсе «Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов» ВШМ.

На защиту выносятся следующие научные положения:

1. Методика проектирования технологического процесса струйного электролитно-плазменного полирования поверхностей изделий сложных форм и практические рекомендации по выбору составов электролитов для полирования различных материалов, обеспечивающие получение требуемой шероховатости поверхности.
2. Научно обоснованные рациональные технологические параметры (сила тока 0.22 А/см², напряжение 240 В, расход электролита до 4 л/час) режима

струйного электролитно-плазменного полирования поверхностей сложных форм, обеспечивающие шероховатость поверхности до $Ra = 0,04$ мкм и сьем металла не более 80 мкм.

3. Разработанные схемы струйного электролитно-плазменного полирования тонкостенных изделий из кобальт-хром-ванадиевых сплавов, обеспечивающие снижение шероховатости и удаление окалины после лазерной резки без нарушения геометрии изделия.
4. Технические решения и конструктивные особенности установки для полирования, а также наборного катодного модуля, обеспечивающего применение СЭПП для размерной обработки на операциях удаления микрорельефа поверхности после предварительного шлифования или чистовой фрезерной обработки.

Апробация работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (НИР «Исследование и прогнозирование градиентных полей прочности и пластических характеристик металлов в процессах холодной обработки давлением при сложном нагружении», FZWF-2024-0006).

Результаты научных исследований были представлены и получили признание на нескольких конференциях и симпозиумах: Научно-практическая конференция с международным участием (Санкт-Петербург, 2018); «Роль технических наук в развитии общества» III Международная научно-практическая очная конференция (Кемерово, 2018); IV Международная научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов «Электрофизические методы обработки в современной промышленности», Пермь 2018; Двенадцатая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов (с международным участием) (Москва, 2019); Международная научно-практическая конференция «Современное машиностроение: Наука и образование 2021 (ММЕSE-2021).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 12 работ. Из них 8 были опубликованы в изданиях, индексируемых Российским индексом научного цитирования (РИНЦ), 2 в международной базе данных цитирования и 2 в изданиях, рекомендованных ВАК. Получен патент № 2623555 на устройство «Установка для электролитно-плазменной обработки турбинных лопаток».

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведено обоснование актуальности исследования, определены цели и задачи, а также подчеркнута практическая значимость и научная новизна данной диссертационной работы.

В первой главе рассматриваются известные и широко используемые методы финишной обработки поверхностей сложных форм, их преимущества и недостатки, а также технологические возможности. Отдельное внимание уделено технологиям электролитно-плазменного полирования. Рассмотрены процессы, возникающие в прианодной зоне, вольт-амперная характеристика, физика образования пароплазменной оболочки на полируемых поверхностях и применяемые электролиты. Определено современное состояние развития технологии электролитно-плазменного полирования. Дана сравнительная характеристика метода СЭПП. Изучены работы ученых, внесших свой вклад в исследование электролитно-плазменных технологий. Технологические аспекты ЭПП описаны в работах: А.Ф. Гайсина, Ал.Ф. Гайсина, Н.Н. Paulmier T., X. Nie, Kellogg, С.Я. Грилихеса, И.С. Куликова, С.В. Ващенко, А.Я. Камнева, Б.А. Артамонова, В.В. Круглова, А.Д. Погребняка, М. Cornelsen, А.И. Попова и др..

Вторая глава содержит описание используемых в работе оборудования, приспособлений, материалов и методик исследования, направленных на повышение качества поверхностей сложных форм.

Проектные, теоретические и экспериментальные работы, связанные с разработкой технологии струйного электролитно-плазменного полирования, производились с применением оборудования, разработанного в лаборатории, а также современных средств измерительной техники и компьютеризированного подхода.

Оборудование для электролитно-плазменного полирования и специальные приспособления для струйной электролитно-плазменной обработки проектировались в «SolidWorks» и «Компас-3D».

Параметр шероховатости поверхностного слоя R_a измерялся с помощью профилометра модели TR200. В установке электрохимически-плазменной обработки использовались полый цилиндрический токопровод и групповой токопровод специальной конструкции. Эксперименты проводились при атмосферном давлении с рабочим напряжением от 20 до 500 В с шагом 20 В. Вольт-амперные характеристики регистрировались цифровым милливольтметром с точностью измерения напряжения $\pm(0,5\%+1)$ и тока $\pm(1,5\%+3)$. В качестве электролитов были

выбраны разнообразные водные растворы, их состав продемонстрирован. Процесс нагрева электролита до заданной температуры, равной $80 \pm 3^\circ\text{C}$, подвергался контролю, для чего использовалась термопара с разрешающей способностью в $0,1^\circ\text{C}$. Расход (v , л/ч) электролита измеряли ротаметром с разрешающей способностью 2%.

В третьей главе представлены аналитические формулы расчетов скорости потока, получены регрессионные уравнения оценки параметров качества полирования исследуемым методом. Полученные формулы позволяют оценить влияние технологических параметров процесса на качество и точность обработки изделий из нержавеющей стали. Обоснован выбор основных технологических параметров и схем процесса. В рамках данного исследования, осуществлялся также анализ разрядных процессов. Были проведены вычисления силы тока, проходящего через систему в ответ на единичный импульс, а также расчеты мощности, переносимых данными импульсами. Получены математические модели оценки параметров качества полирования – шероховатости (R_a) мкм; коэффициента равномерности (K); точности (Δ), мм в зависимости от режимов обработки – напряжения (U), В; скорости потока электролита – ($V_{эл}$), л/с; концентрация электролита (ω), % СЭПП фасонных поверхностей из нержавеющей стали.

Уравнения регрессии были визуализированы в виде графиков зависимостей параметров R_a , K и Δ от напряжения, концентрации электролита и скорости потока (Рисунок 3).

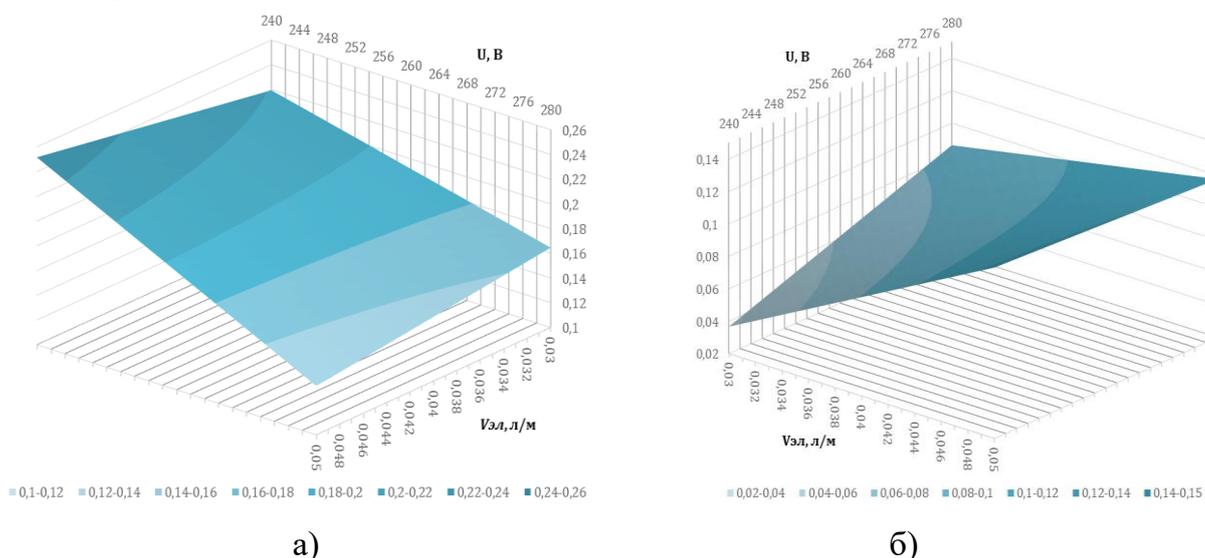


Рисунок 3 – Графики, демонстрирующие зависимость R_a , мкм от скорости потока V , л/с и напряжения U , В при следующей концентрации электролита для нержавеющей стали: а) 4 %; б) 6 %.

Уравнения регрессии для нержавеющей стали:

$$Ra = 0,14263 + 0,0158 \cdot V_{эл} - 0,05112 \cdot \omega - 0,028 \cdot U + 0,01413 \cdot V_{эл} \cdot \omega + 0,0261 \cdot \omega \cdot U - 0,0143 \cdot V_{эл} \cdot U$$

$$K = 0,6445 - 0,0785 \cdot V_{эл} - 0,0875 \cdot \omega + 0,04825 \cdot V_{эл} \cdot \omega - 0,036 \cdot V_{эл} \cdot U$$

$$\Delta = 0,1018 + 0,0298 \cdot V_{эл} + 0,0216 \cdot \omega - 0,0141 \cdot U.$$

В результате анализа тепловых процессов в межэлектродном зазоре, была разработана формула для расчета рабочей скорости электролита, что позволяет оптимизировать параметры процесса электролитно-плазменного полирования при использовании разных диаметров инструмента.

Исследования основных технологических режимов процесса проводились на опытных образцах из нержавеющей стали. Для отработки технологических режимов процесса использованы плоские образцы из нержавеющей стали AISI 304. Выяснено, что при струйной электролитно-плазменной обработке лучшее качество поверхности исследуемых образцов получено в пределах от 200-280В. При этом параметр шероховатости таких образцов находится в пределах Ra 0,1-0,05 мкм. Также были обработаны турбинные лопатки с использованием группового токоподвода. При полировании турбинных лопаток получена обобщенная зависимость скорости съема и энергоэффективности для стали 08X18H9T.

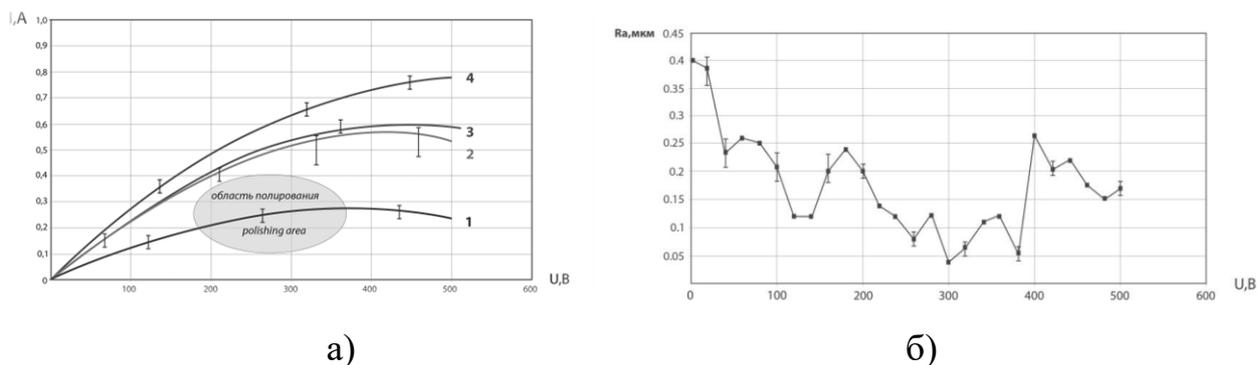


Рисунок 4 – Вольт-амперная характеристика процесса для нержавеющей стали (а) с графиком изменения шероховатости (б).

Для второй серии опытов взяты образцы из листовой меди МЗ размерами 25x25 мм. Установлено наилучшее качество обработки в диапазоне 220-280В, достигнутый средний параметр шероховатости составил Ra 0,08 мкм. В качестве обрабатываемого изделия использованы медные электрод-инструменты из меди МЗ, которые обработаны с применением двух типов финишной фрезерной обработки: с шагом инструмента 1 мм, и с шагом инструмента 0,1 мм.

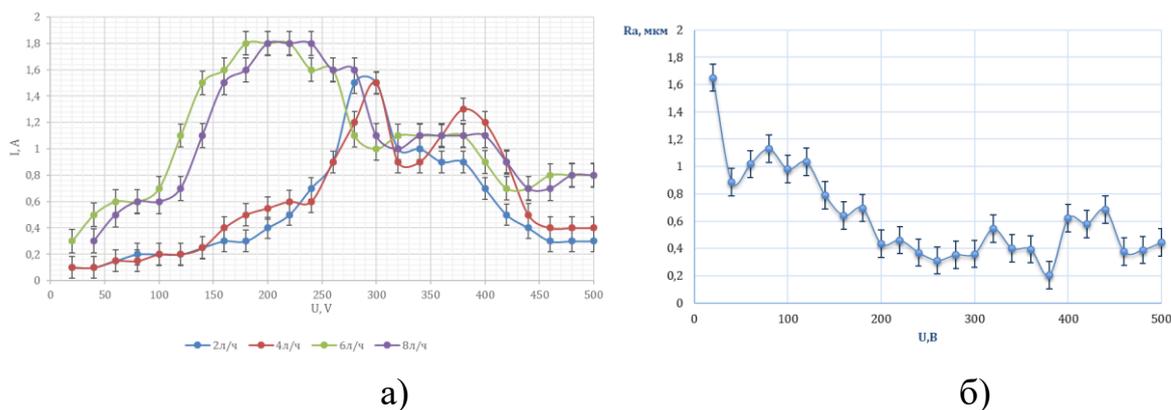


Рисунок 5 – Вольт-амперная характеристика процесса для меди (а) с графиком изменения шероховатости (б)

В ходе третьей серии экспериментов был выбран материал в виде трубок из стали L605, которые представляли собой исходные заготовки и коронарные стенты диаметром 1,8 мм с толщиной стенки 0,1 мм.

Проведено измерение внешних диаметров образцов до и после полировки с использованием нового метода и схем СЭПП, а также показана вольт-амперная характеристика для данного материала. Для оценки состояния поверхности коронарных стентов до и после электролитно-плазменного полирования применили микроскопический анализ.

В рамках исследования было проведено несколько экспериментов с целью определения оптимальных схем обработки, используя метод струйной электролитно-плазменной обработки, в каждом из которых использованы различные конфигурации приспособлений. Была рассмотрена обработка с фиксацией стента по торцам без использования специализированных приспособлений, а также полировка с использованием приспособлений фиксации. Также рассмотрены варианты схем с частичным погружением изделия в ванну с электролитом.

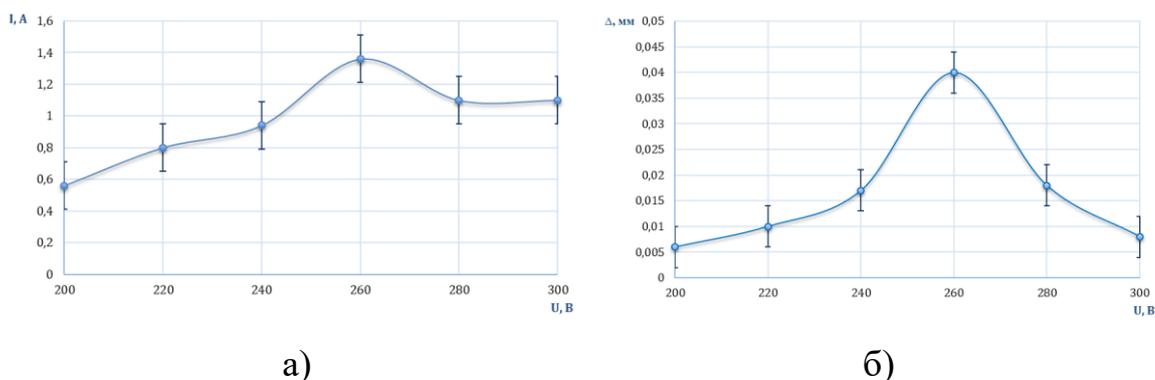


Рисунок 6. – График вольт-амперной характеристики процесса для стали L605 (а) и график изменения геометрии образца (б)

Исследованы импульсные характеристики процесса. Тонкие и точные изделия, такие как коронарные стенты, часто имеют сложную геометрию и малые размеры. Неправильное или неравномерное полирование может привести к повреждению или деформации изделия. Контроль импульсных характеристик позволяет оптимизировать параметры обработки, чтобы минимизировать риски повреждения изделий и наоборот, если необходимо получить максимально большую разницу шероховатостей до и после обработки. Оптимизация этих параметров помогает улучшить производительность и экономическую эффективность процесса полирования любых изделий.

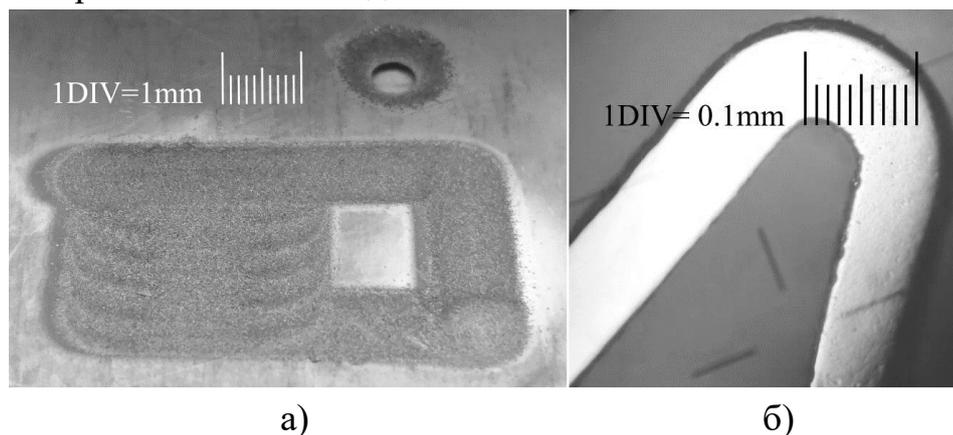


Рисунок 7. – Результаты обработки: а) размерная обработка полим катодом при скорости потока до 28 л/ч; б) финишная обработка кардиохирургического стента проводилась в диапазоне 2 - 4 л/ч.

Таблица 1. Исходные, полученные и расчетные данные

Исходные данные		Выходные данные		Расчетные данные		
$U_{раб.}, В$	$I_{раб.}, А$	$t_{имп.}, нс$	$U_{имп.}, В$	$I_{имп.}, А$	$W_{имп.}, Вт$	$Q_{имп.}, Дж$
225	0.8-5.6	9-80	300-400	0.14-0.80	0.01-0.32	$1 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-4} Дж$

Выяснено, что тонкая обработка методикой СЭПП прежде всего характеризуется низким съемом материала, который составляет менее 1 мкм, и низким параметром шероховатости, равным или большим Ra 0,03 мкм.

В четвертой главе исследовано влияние электролитно – плазменного полирования на качество поверхностей сложных форм. Произведен анализ качества поверхности, зафиксирована шероховатость и изменения размеров обработанной локальной области поверхности изделия.

В данном исследовании в качестве образца были выбраны турбинные лопатки, изготовленные из жаропрочной стали. Процесс полировки проводился в несколько этапов, с применением как полого, так и группового токоподвода.

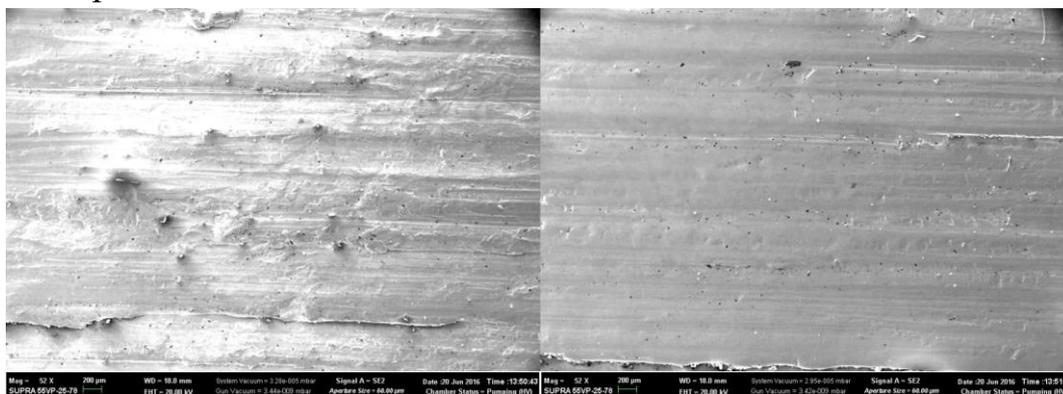
Перед полировкой были измерены параметры шероховатости поверхности турбинных лопаток. До начала обработки параметры составили соответственно Ra 0,718 и Rz 5,304. После полирования шероховатость снизилась до Ra 0,202...0,273.

Эти результаты подчеркивают эффективность разработанного оборудования и схем полировки и подтверждают способность значительно улучшить качество поверхности турбинных лопаток, что является важным фактором в обеспечении эффективной работы турбинных механизмов и увеличения срока службы.



Рисунок 8. – Турбинная лопатка из стали 20X13 после полирования методом СЭПП.

В ходе данного исследования провели анализ поверхности изделий, изготовленных из стали 20X13 до и после обработки методом электролитно-плазменной обработки. Для выполнения анализа был использован электронный микроскоп модели Supra 40VP.



а)

б)

Рисунок 9. – Морфология поверхности образцов из стали 20X13: а – образец после пиления ленточной пилой; б – образец после обработки методом СЭПП.

Показана принципиальная возможность качественной обработки поверхности сложного профиля большой площади нержавеющей стали с помощью метода СЭПШ обработки в лабораторных условиях с возможной перспективой использования полученных результатов в металлургии, промышленности и турбинном производстве.

Исследование влияния метода СЭПО также проведено для медных электрод-инструментов. По результатам измерения шероховатости, было выявлено, что наилучший результат достигается при обработке электрода с шагом инструмента 0,01 мм. На электроде, обработанном с этим шагом, шероховатость улучшилась с Ra 0,22 до Ra 0,1. Значение параметров шероховатости электродов, изготовленных с шагом инструмента 1 мм, уменьшилось с Ra 1,06 до Ra 0,29.

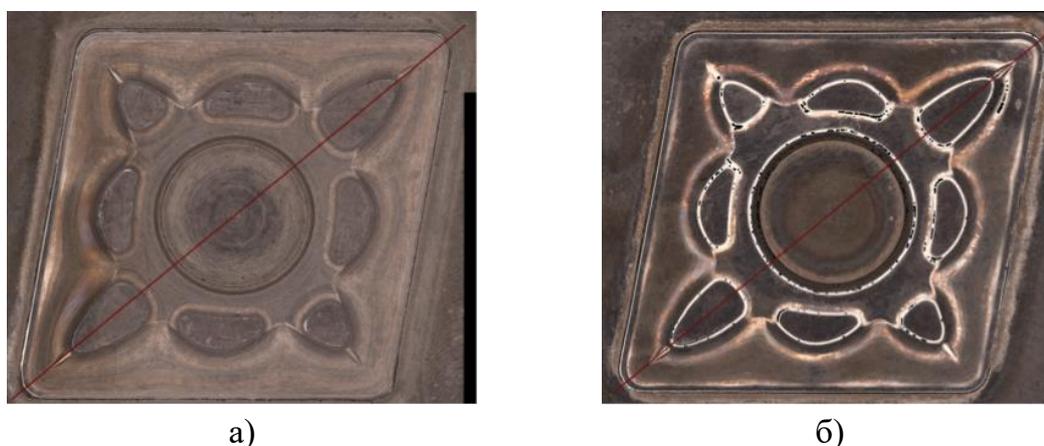


Рисунок 10. Поверхность инструмента: а) до полирования; б) после полирования.

На острых краях электрода появились радиусы до 1 мм, а внешние радиусы увеличились с 0,1 мм до 1 мм. Однако, в целом геометрия рабочей поверхности электрод-инструмента осталась в пределах допуска.

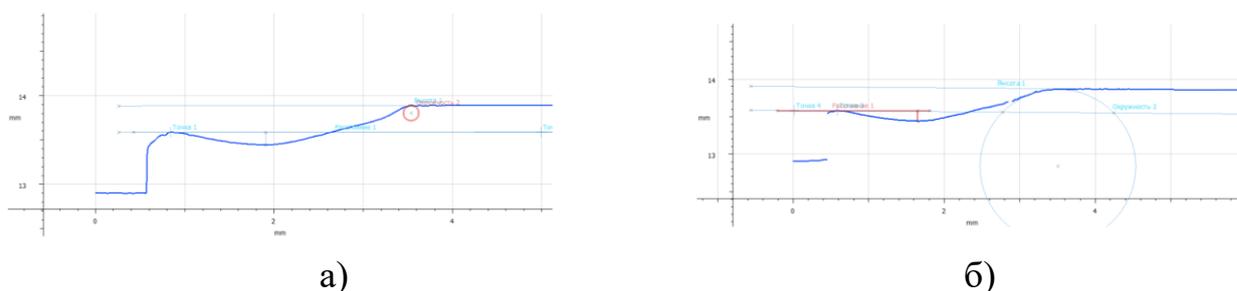


Рисунок 11. – Результаты измерения рабочей поверхности изделий: а) до обработки; б) после обработки.

Проведенные измерения рабочих поверхностей обработанных электрод-инструментов выяснено, что в процессе полирования медных электродов произошли изменения относительных размеров геометрии изделия. Однако, несмотря

на эти изменения, значения размеров оставались в пределах допустимого диапазона, поверхность электродов после полирования не имеет значимых дефектов или недостатков.

Также проведен анализ морфологии поверхности коронарных стентов на основе обнаруженных зависимостей. Исследуемые образцы изготовлены по технологии лазерной резки и отполированы электролитно-плазменным методом. В результате показано, как эволюционирует морфология изогнутых стенок поверхностей коронарных стентов на различных этапах обработки, проанализировано влияние метода на точность криволинейных поверхностей.

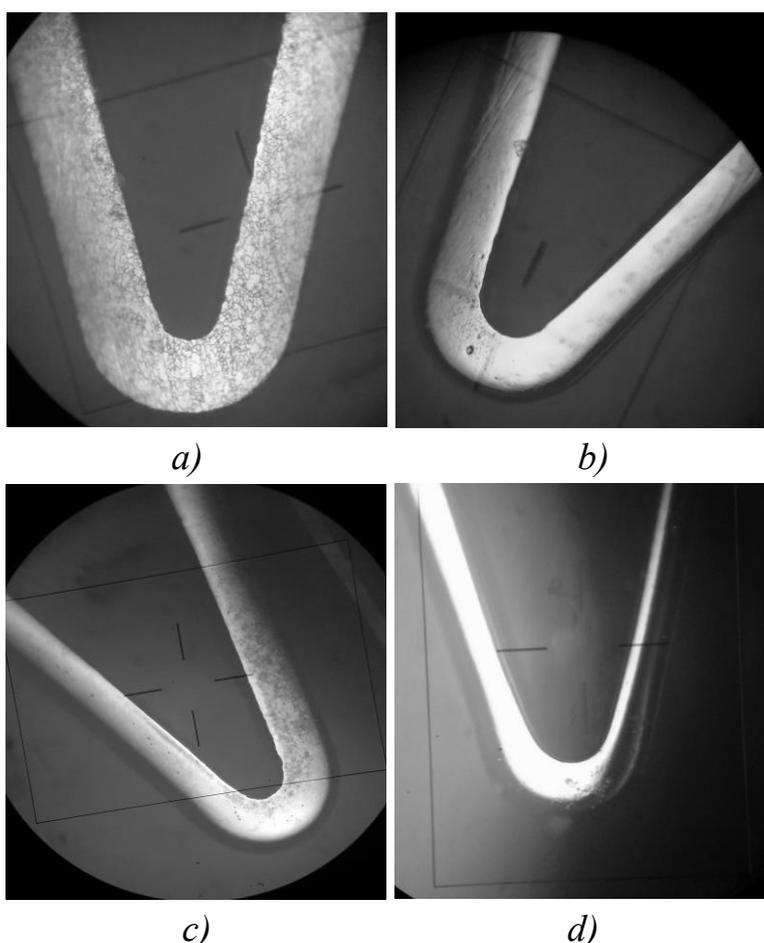


Рисунок 12. – Состояние поверхности стента до обработки (а), после 30 сек. (b), 60 сек (с) и 120 сек (d) электролитно-плазменной полировки.

После операции лазерной резки наблюдается появление оплавленных металлических частиц и деформированных, шероховатых поверхностей на краях стентов. Обычно для устранения этих дефектов требуется предварительная химическая обработка. В рамках нашего исследования методом струйной электролитно-плазменной обработки позволил нам достичь скругления краев и обеспечить достаточное качество поверхности без необходимости дополнительной обработки.

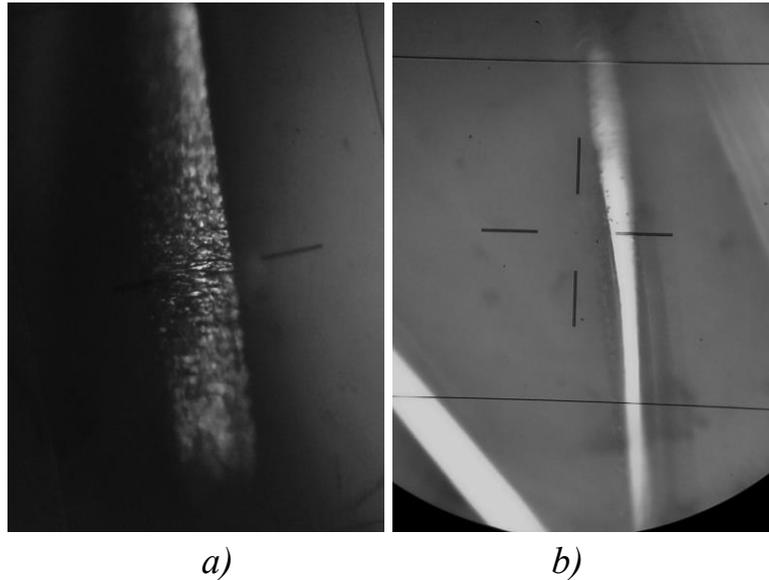


Рисунок 13. – Состояние кромки секции стента до (а), и после (b) электролитно-плазменной полировки.

Исследование геометрии изделия показало, что в ходе проведения электролитно-плазменной обработки полирование стента происходило равномерно и форма соединительных перемычек осталась неизменной. После обработки с соблюдением технологических режимов и контроля импульсных характеристик, стент не потерял свою целостность, не было замечено появления дефектов.

В пятой главе приводятся основные рекомендации по проектированию технологических процессов полирования изделий со сложной формой поверхности, на основе выявленных ранее зависимостей.

Для осуществления технологического процесса СЭПП в производственных условиях была спроектирована установка, которая состоит из нескольких основных технологических модулей, схема которой продемонстрирована на рисунке 14.

Модуль 1 – представляет собой конструкцию, которая включает в себя изолированный корпус с возможностью подключения изоляционной цепи, внутри корпуса размещена трубка, через которую электролит направляется в локальную область обработки. Рабочий катодный участок, расположенный внутри корпуса, играет ключевую роль в создании заданного уровня напряженности электрического поля.

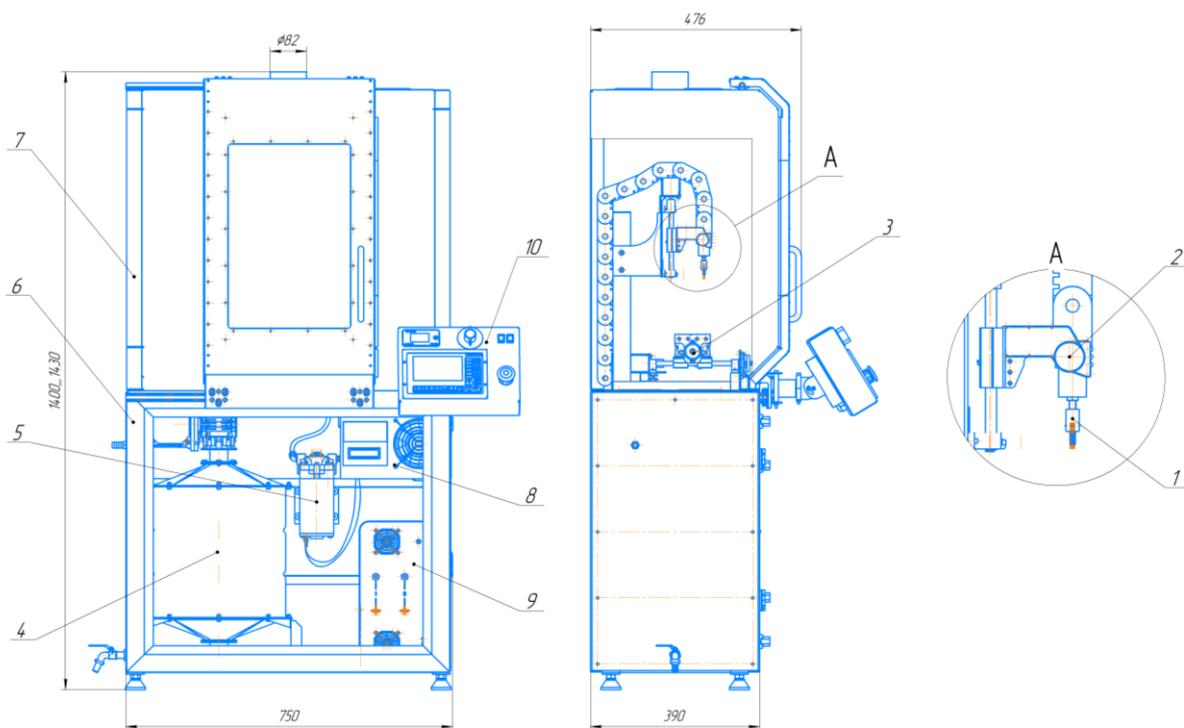


Рисунок 14. – Общий вид установки СЭПП: 1 – инструмент-катод, 2 – модуль перемещения токоподвода, 3 – модуль крепления и перемещения детали, 4 – модуль хранения, нагревания и перемешивания электролита, 5 – модуль подачи электролита, 6 – станина, 7 – рабочая камера, 8 – блок питания низковольтный, 9 – источник питания, 10 – модуль управления установкой.

Модуль 2 – модуль вертикального позиционирования и закрепления токоподвода. Позволяет производить обработку локальной области с заданным межэлектродным зазором.

Модуль 3 – пятикоординатный модуль позиционирования изделия и локального участка обработки в пространстве.

Модуль 4 – система хранения электролита обеспечивает надежное хранение, перемешивание и нагрев электролита.

Модуль 5 – гидросистема проектируемой установки обеспечивает подачу электролита в локальную зону обработки через полое основание электрода-аноды и через корпус группового катода.

Модуль 6 – основание установки обеспечивает размещение всех элементов установки, базирование элементов перемещения и закрепления изделия и установку защитного кожуха. К основанию подведено заземление для защиты персонала от возможного поражения электрическим током высокой мощности.

Модуль 7 – защитный кожух с возможностью присоединения вентиляции обеспечивает герметичность зоны обработки, защищая персонал от вредных испарений, возникающих в процессе струйного электролитно-плазменного полирования.

Модуль 8 – блок питания систем управления установки, способен преобразовывать питающее напряжение до величин электрических параметров подключённых потребителей – шаговых электродвигателей, системы управления установкой и системы перемешивания и нагревания электролита.

Модуль 9 – лабораторный источник питания мощностью 6 кВт, обеспечивающий непосредственно процесс электролитно-плазменного полирования. Источник постоянного тока имеет регулировку по напряжению в диапазоне 0 – 400 В и обеспечивает выходной ток до 50А.

Модуль 10 – пульт управления установкой. Содержит основные элементы управления системами установки.

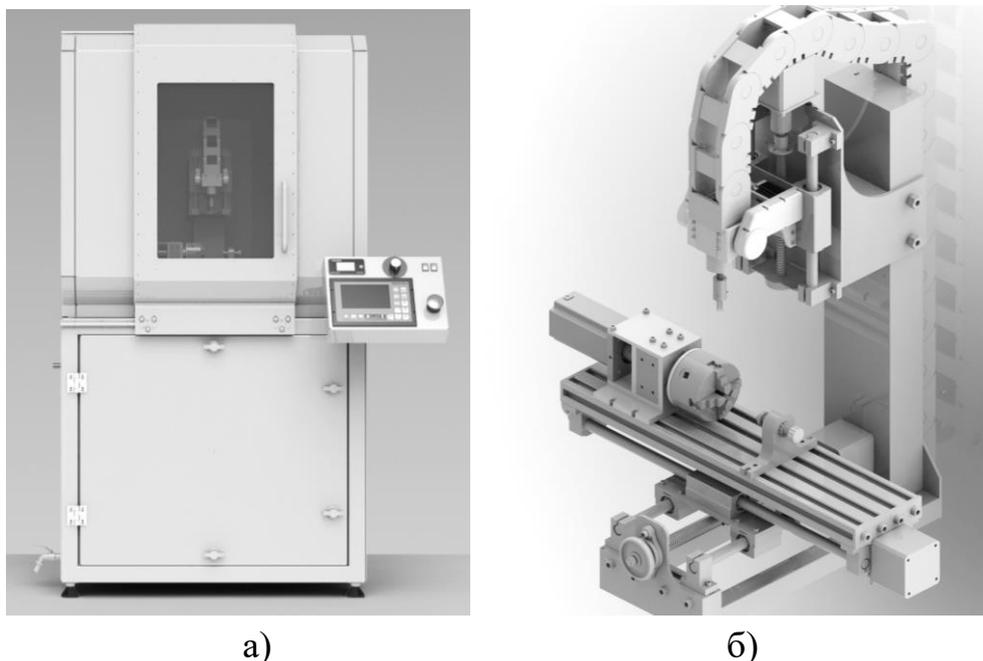


Рисунок 15. – Модель установки СЭПП (а) и модуль закрепления и перемещения заготовки в 3-ех координатах с дополнительной поворотной осью.

Подача электрода-инструмента должна осуществляться равномерно с соблюдением межэлектродного зазора в заданном промежутке. Скорость подачи можно определить по формуле (S):

$$S = \frac{d \cdot k_{\text{п}}}{\tau},$$

где, d – диаметр электрода-катода, [мм];

$k_{\text{п}}$ – количество проходов на диаметр инструмента;

τ - время обработки локального участка, [мин].

Общее время обработки детали ($\tau_{\text{обр}}$) можно вычислить по формуле:

$$\tau_{\text{обр}} = \frac{(L_{\text{п}} + L_1) \cdot n_{\text{п}}}{S},$$

где, $L_{\text{п}}$ – длина прохода, L_1 – величина перебега [мм];

$n_{\text{п}}$ – количество проходов;

S – скорость подачи, [мм/мин].

Таким образом, реализована технология струйного электролитно-плазменного полирования поверхностей сложных форм, спроектировано специальное технологическое оборудование и инструмент – катод. Спроектированное оборудование обеспечивает струйное электролитно-плазменное полирование широкой номенклатуры деталей с поверхностями сложных форм с соблюдением заданной точности.

Основные результаты и выводы

1. Изучен механизм и установлены закономерности влияния основных параметров процесса струйного электролитно-плазменного полирования на шероховатость и точность обработки деталей из различных сталей и сплавов. Получены вольт-амперные характеристики процесса для полирования нержавеющей стали, меди и кобальт-хром-ванадиевых сплавов.

2. Получены математические модели оценки шероховатости (R_a) мкм; коэффициента равномерности (K); точности (Δ), мм в зависимости от основных параметров режима– напряжения (U), В; скорости потока электролита – ($V_{\text{эл}}$), л/м; концентрации электролита (ω), % СЭПП фасонных поверхностей из различных сплавов.

3. Получены аналитические формулы математическая модель расчета теплового баланса энергии в зоне полирования, позволившая определить формулу расчета рабочей скорости и расхода электролита в межэлектродном зазоре, а также представлена формула расчета энергии единичного разряда.

4. Разработаны технологические схемы СЭПП и определены рациональные режимы обработки деталей со сложным профилем поверхности, обеспечивающие шероховатость (до $R_a 0,04$ мкм) и точность (съем металла до 15 мкм при полировании стентов).

5. Спроектировано технологическое оборудование и сконструированы специальные вспомогательные приспособления для реализации технологии струйного электролитно-плазменного полирования деталей со сложным профилем поверхности.

6. Разработана методика и даны практические рекомендации по проектированию технологических процессов СЭПП деталей со сложной формой поверхности в условиях реального производства.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Публикации в изданиях, рецензируемых ВАК

1. Оценка возможности полирования нержавеющей стали струйной электролитно-плазменной обработкой / М. В. Новоселов, Н. Г. Шиллинг, А. А. Рудакин [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2018. – Т. 20, № 1. – С. 94-102.
2. Новоселов М. В. Научное обоснование режимов струйного электролитно-плазменного полирования поверхностей сложных форм. *Металлообработка*, 2024, № 1, с. 10–15. DOI 10.25960/mo.2024.1.10

Публикации в других изданиях

Публикации SCOPUS:

3. Processes of Contact Interaction of an Electrolyte Plasma Jet with a Surface / A. I. Popov, A. I. Popova, S. V. Zakharov [et al.] // *Advances in Mechanical Engineering*, Saint Petersburg, Russia, 01 июня 2021 года. – Cham: Springer, 2022. – P. 176-184.
4. High-Speed Dimensional Processing of Metallic Materials with an Environmentally Friendly Jet Electrolyte-Plasma Method / A. Popov, A. Popova, A. Fumin [et al.] // *Mechanisms and Machine Science (book series)*. – 2022. – Vol. 108 MMS. – P. 481-489.

Публикации РИНЦ:

5. Попов, А. И. Особенности электролитно-плазменного полирования стентов / А. И. Попов, М. М. Радкевич, М. В. Новоселов // *Технология металлов*. – 2019. – № 5. – С. 24-29.
6. Повышение качества поверхностей сложного профиля методом струйной электролитно-плазменной обработки / М. В. Новоселов // *Модели и методы развития технологий машиностроения в условиях цифровизации экономики России: Сборник статей / Под редакцией А.А. Поповича, Д.П. Гасюка*. – Санкт-Петербург : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023. – С. 93-97.
7. Новоселов, М. В. Электролитно-плазменное полирование коронарных стентов / М. В. Новоселов, А. И. Попов, М. М. Радкевич // *Современное машиностроение. Наука и образование*. – 2021. – № 10. – С. 623-635.
8. Струйная обработка внутренних поверхностей / В. С. Петрович, Д. А. Левин, И. П. Грибанов, М. В. Новоселов // *Неделя науки СПбПУ : Материалы научной конференции с международным участием. В 2-х частях, Санкт-Петербург, 18–23 ноября 2019 года. Том Часть 2*. – Санкт-Петербург: Политех-Пресс, 2020. – С. 221-223.
9. Колесин, К. Г. Влияние струйного электролитно-плазменного полирования на точность выполнения размеров / К. Г. Колесин, Е. С. Берестенников, М.

- В. Новоселов // Неделя науки СПбПУ : Материалы научной конференции с международным участием. В 2-х частях, Санкт-Петербург, 18–23 ноября 2019 года. Том Часть 2. – Санкт-Петербург: Политех-Пресс, 2020. – С. 211-214.
10. Петрович, В. С. Струйная электролитно-плазменная обработка сплайновых поверхностей / В. С. Петрович, Д. А. Левин, М. В. Новоселов // Наука и инновации в технических университетах : материалы Тринадцатого Всероссийского форума студентов, аспирантов и молодых ученых, Санкт-Петербург, 23–25 октября 2019 года. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2019. – С. 55-57.
 11. Применение струйной электролитно-плазменной обработки для изготовления металлографических образцов / В. С. Петрович, В. Г. Теплухин, М. В. Новоселов, А. И. Попов // Инновационные идеи в машиностроении : Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, Санкт-Петербург, 24–26 мая 2022 года / Под редакцией А.А. Поповича, Д.П. Гасюка. – Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – С. 591-595.

Патент:

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЭЛЕКТРОЛИТНО - ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ / Попов А.И., Радкевич М.М., Медко В.С., Новоселов М.В. Патент на изобретение RU 2681239 С1, 05.03.2019. Заявка № 2018121549 от 13.06.2018.