



Захаров Сергей Владимирович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ МЕТОДОМ
ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОГО ПОЛИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ
ИОНИЗАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПАРОГАЗОВОЙ ОБОЛОЧКИ**

Специальность: 05.02.08 – Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2021 год

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

Научный руководитель

Коротких Михаил Тимофеевич, доктор технических наук, профессор, профессор Высшей школы машиностроения ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Официальные оппоненты:

Алексей Анатольевич Сафронов, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук», г. Санкт-Петербург

Самсонов Дмитрий Сергеевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук», г. Санкт-Петербург

Ведущая организация

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь.

Защита диссертации состоится «23» декабря 2021 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета У.05.02.08/09 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, 3-ий учебный корпус, аудитория 109.

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 «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук

Хрусталева Ирина Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Острая конкуренция в условиях современной экономики провоцирует оптимизацию технологических цепочек выпуска продукции, стимулирует разработку и применение новых методов обработки, также совершенствование уже имеющихся методов.

Разработанный и поставленный для решения промышленных задач более 30 лет назад метод электролитно-плазменного полирования (ЭПП) применяется в качестве альтернативы абразивным и электрохимическим методам финишной обработки. Очевидным преимуществом ЭПП перед абразивными финишными методами является скорость обработки, стабильность результата обработки и высокий потенциал к автоматизации. Преимуществом перед электрохимическим полированием является его производительность, экологичность и экономичность.

Однако существуют некоторые ограничения, которые затрудняют его широкое распространение. На сегодняшний день отсутствует общепринятая физическая модель ЭПП, что вызывает появление статей, монографий и патентов в данной области, не позволяющих делать обоснованные и применимые на практике рекомендации для реализации этих процессов.

В статьях и монографиях на эту тему, в основном, описываются эмпирические результаты, которые интерпретируются различным образом, строятся модели управления процессом, предлагаются режимные параметры с композициями растворов электролита (РЭ), не раскрывая физический принцип преобразования веществ и феноменологию процесса. Управляющие параметры процесса, такие как напряжение, плотность тока, время обработки, состав и концентрация компонентов, температура РЭ в таких работах исследуются без взаимосвязи и, как правило, обозначены в виде диапазонов для определенных групп изделий и материалов.

Таким образом, актуальность темы исследования обусловлена отсутствием разработанного научно-методического аппарата для электролитно-плазменного полирования, поскольку количество публикаций на тему прогрессивно увеличивается, а качественного перехода от эмпирики к теории не происходит. Прямым следствием этого является неизменность режимно-композиционных параметров обработки на промышленных предприятиях. В отсутствие единой теоретической основы, практики зачастую отказываются работать с другими материалами кроме нержавеющей стали, поскольку композиция и режим данной обработки известны и наиболее распространены.

Цель работы

Целью работы является повышение эффективности обработки методом электролитно-плазменного полирования за счёт:

- Разработки и обоснования ионизационной модели процесса ЭПП, описывающей закономерности возникновения физико-химических явлений в парогазовой оболочке, позволяющей выбирать технологические параметры процесса для широкого спектра условий, прогнозировать результаты обработки;
- Разработки метода формирования компонентного состава РЭ.

Задачи работы

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. На основании анализа известных физических моделей и современных представлений о протекании газовых разрядов сформулировать требования к новой физической модели электролитно-плазменного полирования
2. Предложить физическую модель процесса, описывающую наблюдаемые явления в парогазовой оболочке при ЭПП с учётом недостатков известных моделей, а также современных представлений о протекании газовых разрядов;
3. Определить взаимосвязь наблюдаемых физико-химических явлений с технологическими параметрами процесса и результатами обработки;
4. Практически подтвердить предсказательную способность предложенной модели и описать способ эффективного выбора технологических параметров процесса, позволяющий прогнозировать результаты обработки

Научная новизна

К основным научным результатам, полученным впервые и защищаемых автором, относятся:

1. **Сформулирована и экспериментально подтверждена ионизационная модель** воздействия на обрабатываемый материал компонентов электролита в парогазовой оболочке, **согласующая** наблюдаемые газоразрядные процессы при ЭПП с известными физико-химическими явлениями, **обеспечивающая** более высокую предсказательную способность по сравнению с известными физическими моделями процесса ЭПП, **позволяющая** применять известные физико-химические закономерности для обоснованного выбора условий реализации процесса ЭПП, в отличии от известных моделей процесса (*соответствует п. 4 и п. 8 паспорта специальности*);
2. На основании ионизационной модели **сформулирован и экспериментально подтвержден метод** формирования компонентного состава растворов электролита для ЭПП, **включающая в себя критерии** количественной

оценки эффективности составов растворов и технологических режимов обработки, **способы оценки** динамики изменения компонентного состава, **механизмы** формирования дефектов обработки при несоблюдении технологических режимов (соответствует п. 4 и п. 8 паспорта специальности);

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы обусловлена тем, что в работе решена актуальная научная задача разработки научно-методического аппарата повышения эффективности обработки методом электролитно-плазменного полирования и получены новые научные результаты, в достаточной степени опубликованные в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК. Разработанный научно-методический аппарат включает создание и обоснование новой ионизационной модели процесса ЭПП, позволяющей выбирать технологические параметры процесса ЭПП и метода формирования компонентного состава раствора электролита.

Практическая значимость работы обусловлена тем, что результаты, полученные в диссертационной работе, имеют опыт применения в технологии отделочной обработки отражательных поверхностей деталей машин и товаров народного потребления, что подтверждается актами о внедрении на промышленные предприятия.

На основании **ионизационной модели** и **метода** формирования компонентного состава разработан, экспериментально **подтвержден и внедрён универсальный технологический режим** обработки при ЭПП, позволяющий обрабатывать широкий диапазон металлов (конструкционные и легированные стали, сплавы меди, алюминия, цинка). С его помощью определен **характер взаимного влияния** управляющих параметров процесса ЭПП на выходные физические и технологические параметры процесса ЭПП, что **обеспечивает** повышение уровня качества выпускаемой продукции с уменьшением затрат (соответствует п. 2 и п. 4 паспорта специальности);

Разработана **эмпирическая модель** процесса ЭПП, **учитывающая** все управляющие параметры в широком диапазоне регулирования, **позволяющая** осуществлять **сравнение и назначение** рациональных технологических режимов обработки для имеющихся технологических мощностей, с высокой точностью **прогнозировать** результат обработки для широкого диапазона металлов, за счёт чего **обеспечивающая** повышение качества изделий и снижение их себестоимости (соответствует п. 2 и п. 7 паспорта специальности);

Методология и методы исследования

Для решения поставленных задач использовались методы системного анализа, планирования эксперимента, аппроксимации кривых, корреляционного и статистического анализа, частотного анализа с разложением по методу Фурье. При экспериментальном исследовании использовался профилографический метод измерения шероховатости поверхности и оптическая микроскопия топографии поверхности. Обработка экспериментальных данных проводилась с использованием пакетов *MATLAB*.

Положения, выносимые на защиту

1. **Ионизационная модель** воздействия на материал компонентов электролита в парогазовой оболочке, в результате протекания физико-химических реакций в газоразрядных процессах (*соответствует п. 4 и п. 8 паспорта специальности*);

2. **Метод** формирования компонентного состава растворов электролита и назначения управляющих параметров процесса (*соответствует п. 4 и п. 8 паспорта специальности*);

3. **Универсальный технологический режим** обработки для широкого диапазона металлов (*соответствует п. 2 и п. 4 паспорта специальности*);

4. **Эмпирическая модель ЭПП** как объекта управления с взаимосвязанными управляющими параметрами в широком диапазоне регулирования и высокой предсказательной способностью (*соответствует п. 2 и п. 7 паспорта специальности*);

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность полученных научных результатов обеспечена сходимостью результатов экспериментальных исследований с прогнозируемыми данными предложенной ионизационной модели для процессов, протекающих в парогазовой оболочке при электролитно-плазменном полировании. Результаты научной деятельности обсуждались на научно-технических конференциях в период с 2016 по 2021 г.:

Санкт-Петербургская ассамблея молодых ученых и специалистов. Комитет по науке и высшей школе (Санкт-Петербург, XX – 2015 г.);

Неделя Науки СПбПУ. Научно-практическая конференция с международным участием (Санкт-Петербург, XLV – 2016 г., XLIX – 2020 г.);

ЕММІ. Электрофизические методы обработки в современной промышленности. Международная научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов (Пермь, II – 2018 г., III – 2019 г., IV – 2020 г.);

INSECT. Международный симпозиум по технологии электрохимической обработке (Германия, Хемниц, 16th – 2020 г., 17th – 2021 г.);

MMESE. Современное машиностроение: Наука и образование. 10-ая международная научно-практическая конференция (Санкт-Петербург, 2021 г.);

I4SDG. Международный онлайн семинар для исследователей и разработчиков (Италия, 2021 г.);

ISPCIME. Инновации в машиностроении: XI Международная научно-практическая конференция (Новосибирск, 2021 г.).

Результаты работы используются в производстве на предприятиях: ООО «АЦИА», ООО «Научно-производственный комплекс «ХРОМ», ООО «Центр Актуальных Технологий» и в учебном процессе в ФГБОУ ВПО «СПбПУ».

Публикации

Результаты научной деятельности апробированы путем публикации в рецензируемых журналах и обсуждались на научно-технических конференциях в период с 2015 по 2021 г., что позволяет судить о полноте изложения материалов диссертации в данных публикациях. По теме диссертационной работы опубликовано 14 статей в рецензируемых журналах, из них 10 в РИНЦ, 3 в SCUPUS и 1 в ВАК.

Получен патент РФ № 2623555. Установка для электролитно-плазменной обработки турбинных лопаток. / Попов А.И., Радкевич М.М., Кудрявцев В.Н., Захаров С.В., Кузьмичев И.С. Кл. МПК: С25F7/00. 27.06.2017.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении описана актуальность работы, обозначены цели и задачи диссертационного исследования; показана практическая значимость и сформулирована научная новизна; раскрыты основные тезисы, выносимые на защиту, и структура научной работы.

Первая глава состоит из обзорной части – **параграфа 1.1**, в которой описан исторический процесс развития современной области электролитно-плазменной обработки (ЭПО) с конца 19 века до нашего времени, описан вклад исследователей на каждом историческом этапе исследований и каким образом внутри ЭПО развивались описательные модели процесса ЭПП.

В технической части – **параграфы 1.2-1.4** дана общая характеристика процесса ЭПП с её особенностями, отличающими ЭПП от других электрохимических процессов. Показаны значимые технологические параметры процесса, дано описание выявленных на данный момент случаев взаимного влияния технологических параметров. Показано наличие существенных противоречий в описании механизмов влияния тех или иных технологических параметров на протекающий процесс, показаны некоторые ограничения известных технологических режимов, показана необходимость определения всех закономерностей влияния тех или иных факторов на все технологические параметры ЭПП.

В **параграфах 1.4-1.7** показан исторический контекст создания, содержание, описательная ценность, достоинства и недостатки наиболее распространённых описательных моделей процесса ЭПП: эрозионно-искровой, стример-искровой, плазменно-кавитационной и адсорбционно-комплексной моделей.

В **параграфе 1.8** результаты изучения и сравнения описательных моделей собраны в таблицу, демонстрирующие основные ответы известных моделей ЭПП на вопросы о явлениях, протекающих при реализации процесса и механизме воздействия на поверхность. Сделан вывод о том, что у авторов моделей нет согласия во мнении, о том: какой принцип воздействия на обрабатываемую поверхность лежит в основе удаления материала, какие параметры процесса управляющие, в каких диапазонах они справедливы для ЭПП, не описаны причины возникновения наблюдаемых явлений, например, свечения парогазовой оболочки (ПГО).

Вторая глава посвящена теоретическому направлению исследования процесса ЭПП: постановке вопросов к новой модели процесса ЭПП и ответам на них, предложению новой ионизационной модели и её теоретическому и практическому обоснованию. Состоит из двух блоков: теоретического (**параграфы 2.1-2.2**) и практического (**параграфы 2.3-2.6**). Теоретический блок

описывает особенности наблюдаемых явлений и эффектов при ЭПП, а также, характер изменения прианодного слоя при повышении напряжения и характерные состояния системы катод-РЭ-ПГО-анод. На основании выше перечисленного ставятся вопросы, на которые должна отвечать новая ионизационная модель. Практический блок состоит из четырёх групп исследований, отвечающих на поставленные вопросы в рамках предложенной ионизационной модели.

В параграфе 2.1 предложена ионизационная модель воздействия на обрабатываемую поверхность при ЭПП. В рамках модели показано, что механизм удаления материала при ЭПП связан с взаимодействием ускоренных в электромагнитном поле ионов РЭ и атомов поверхности анода. В зависимости от конечной энергии иона, его физико-химических свойств, а также физико-химических свойств атомов анода возникают процессы рекомбинации и уравнивания энергии взаимодействующего иона. Энергии первичного иона достаточно для протекания химической реакции между ионом и атомом анода, избыток энергии рекомбинации выделяется в виде тепловой энергии в паровую фазу.

Наиболее близкими аналогами процесса ЭПП по типу взаимодействий, напряжениям процесса и плотностям тока являются вакуумные процессы. В основе этих процессов лежит облучение поверхности анода частицами, в следствии чего, в зависимости от конечной энергии взаимодействия, на поверхности анода наблюдается комплекс явлений: рассеяния, десорбции, эмиссии и люминесценции.

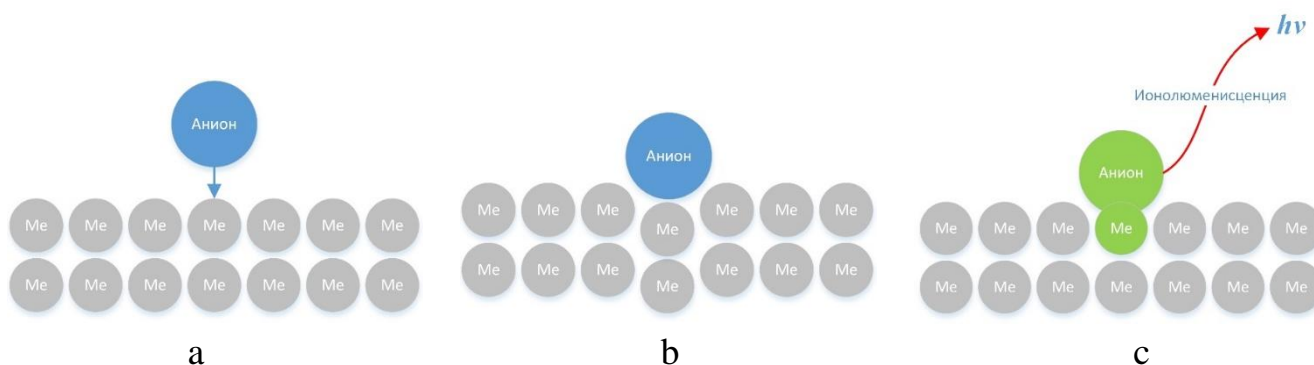


Рисунок 1 – Схематичное изображение воздействия компонентов РЭ на обрабатываемую поверхность при ЭПП

Первый этап – элементарный акт столкновения первичного иона с атомом твердого тела (Рисунок 1а). Движущиеся в электрическом поле к поверхности анода анионы с энергией, большей пороговой (~10 эВ), соударяясь с поверхностью анода взаимодействуют с ней. Второй этап – перераспределение энергии и импульса первичного иона между атомами анода (Рисунок 1б). По мере увеличения энергии первичного иона результатом этого этапа могут являться: рекомбинация, адсорбция, реакция, эмиссия, внедрение. Третий этап – ионно-фотонная эмиссия

(ИФЭ). ИФЭ – процесс испускания фотонов (Рисунок 1с) при взаимодействии первичных ионов с поверхностью анода.

В параграфе 2.2 описана методика проведения экспериментальных исследований, описано оборудование, используемое в работе.

Экспериментальный блок состоит из четырёх параграфов, в которых проведены направленные исследования наблюдаемых явлений и эффектов при ЭПП.

Параграф 2.3 посвящен исследованию влияния химического состава и концентрации на протекающий процесс, а также их влияния на количественное изменение компонентов раствора электролита.

В подразделе 2.3.1 показано, что химический состав раствора электролита при неизменных управляющих параметрах процесса, таких как напряжение и температура РЭ играет основную роль в формировании условий протекания процесса ЭПП и его результатов. Нитраты и хлориды, как соли кислот, образующих с обрабатываемым материалом растворимые соединения, обладают при ЭПП наиболее широким спектром действия. Разработанный универсальный РЭ (5 % KNO_3 , 3 % $C_6H_8O_7$), применяемый при соблюдении технологических параметров процесса ЭПП ($U=300$ В, $T=80$ °С) формирует универсальный технологический режим (УТР) обработки, который позволяет обрабатывать более широкий диапазон материалов, таких как различные стали, алюминиевые и медные сплавы, чем известные составы для ЭПП и ЭХП согласно ГОСТ 9.305-84.

В подразделе 2.3.2 показано, что в процессе осуществления обработки наблюдается количественное изменение химического состава РЭ в соответствии с положениями ионизационной модели. Скорость формирования растворимого продукта реакции (ПР) влияет на результат обработки: избыточная скорость формирования ПР на поверхности анода приводит к его термическому разложению в ненасыщенной низкотемпературной плазме газового разряда, что приводит к образованию более простых и устойчивых нерастворимых соединений. Предложенный метод формирования РЭ показывает, что изменение концентрации компонентов РЭ может быть оценено двумя способами: с помощью аналитического лабораторного исследования и в соответствии с ампер-часами обработки.

В подразделе 2.3.3 показано, что отступление от предложенной методики формирования раствора электролита для осуществления процесса ЭПП приводит к формированию различных дефектов обработки.

В подразделе 2.3.4 установлено, что условием, обеспечивающим поддержание стабильного газового разряда в парогазовой оболочке, является стабильное плёночное кипение для поддержания которого требуется достаточное количество энергии, выделяемой в прианодной области, переносимой

компонентами РЭ, что обеспечивается двумя параметрами: концентрацией компонентов РЭ и уровнем рабочего напряжения. Химические свойства аниона, такие как активность и молярная масса определяют минимальный уровень концентрации достаточный для возникновения стабильного газового разряда (Рисунок 2). Для универсального технологического режима определены минимальные значения концентрации компонентов РЭ: 3 % KNO_3 , 1 % $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$.

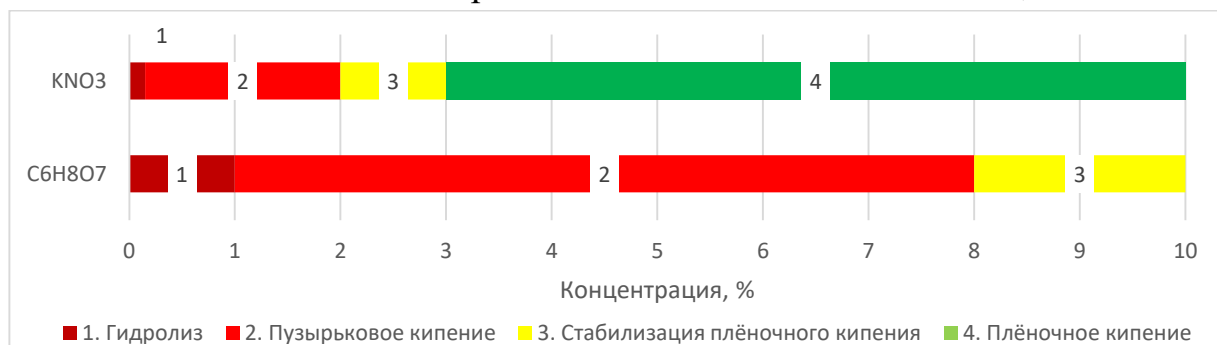


Рисунок 2 – Влияние концентрации компонентов РЭ на режим протекания процесса

Параграф 2.4 посвящен исследованию влияния температуры РЭ, плотности теплового потока и характеру плёночного кипения в ПГО.

В подразделе **2.4.1** показано, что температура раствора электролита, при неизменных управляющих параметрах процесса, таких как: напряжение, химический состав и концентрация раствора электролита, играет основную роль в формировании парогазовой оболочки, регулируя её размер, за счёт изменения величины давления водяного пара (Рисунок 3).

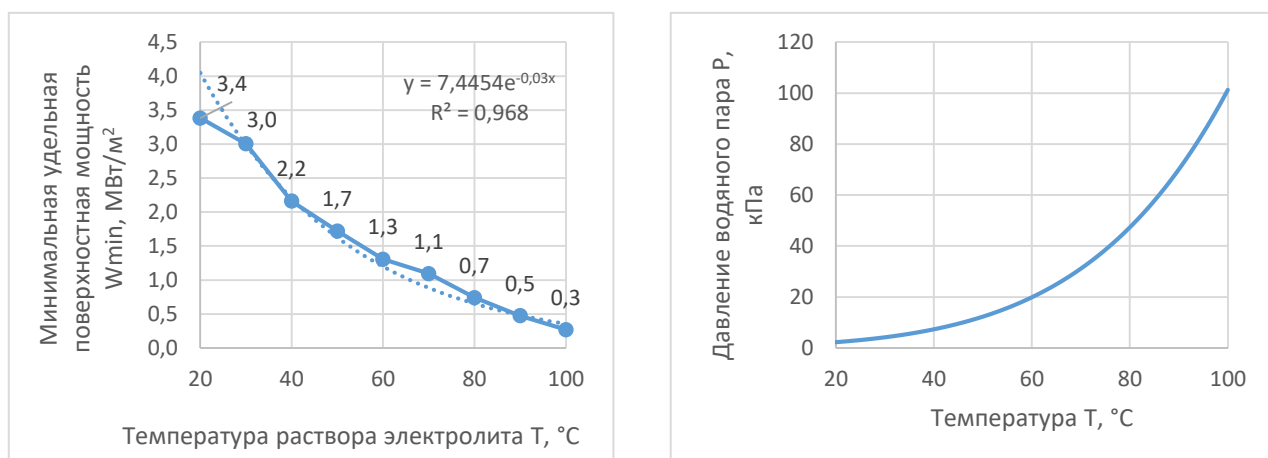


Рисунок 3 – Влияние температуры раствора электролита на давление водяного пара и удельной поверхностной мощности начала процесса ЭПП

Обратно пропорционально изменению давления водяного пара изменяется минимальная удельная поверхностная мощность необходимая для перехода в режим стабильного плёночного кипения, которая при самом низком значении 300 кВт/м^2 существенно выше второй критической точки кипения воды равной 25 кВт/м^2 , что может указывать на определение границы наиболее энергоэффективного режима обработки. Увеличение размера парогазовой

оболочки под действием давления водяного пара, приводит к увеличению пробега анионов раствора электролита, что в свою очередь приводит к уменьшению параметра плотность тока, подтверждая положения ионизационной модели ЭПП. Показано, что при минимальной удельной поверхностной мощности для всего исследуемого диапазона температур раствора электролита, температурный напор в области плёночного кипения находится в диапазоне температур 1000 - 4000°C (Рисунок 4), что соответствует низкотемпературной ненасыщенной плазме газового разряда, что подтверждает ионизированное состояние парогазовой оболочки в прианодной области, где протекают физико-химические реакции преобразования веществ согласно ионизационной модели ЭПП.

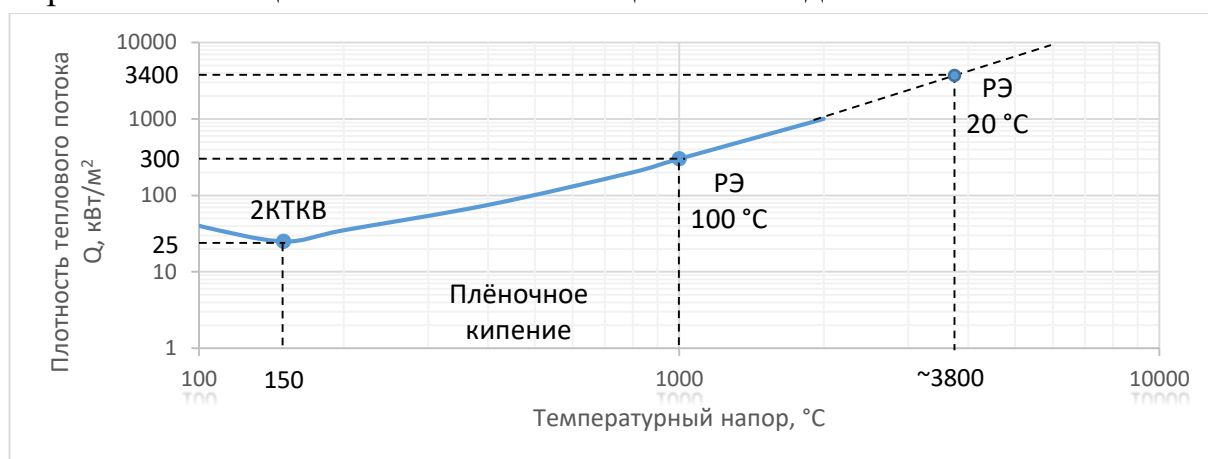


Рисунок 4 – Ориентировочные значения температурного напора в зависимости от плотности теплового потока

В подразделе 2.4.2 показано, что изменение температуры РЭ через изменение давления водяного пара приводит к изменению плотности тока, что в свою очередь приводит к изменению скорости удаления материала. Таким образом, температура раствора электролита нелинейно управляет скоростью удаления материала. Плотность тока, при неизменных управляющих параметрах процесса, таких как: напряжение, температура, химический состав и концентрация раствора электролита не зависит от обрабатываемого материала.

На скорость удаления материала оказывает влияние коэффициент выхода массы по току, который не зависит от температуры раствора электролита. Параметры скорость удаления материала и выход массы по току зависят от обрабатываемого материала. Выход массы по току для исследованных материалов показывает нормальные значения в диапазоне 70-90 %, что свидетельствует о выполнении закона Фарадея.

Энергоэффективность обработки зависит от уровня начальной шероховатости поверхности – чем выше начальная шероховатость, тем выше энергоэффективность обработки. Режим максимальной энергоэффективности уменьшения шероховатости поверхности достигается при максимальной

температуре раствора электролита, равной температуре кипения воды, что доказывает анионную природу удаления материала, поскольку, анионы ускоренные в электромагнитном поле и имеющие достаточно энергии для преодоления парогазовой оболочки максимальных размеров, в первую очередь, движутся в сторону концентраторов напряженности электромагнитного поля (острых кромок, выступов шероховатости). Режим максимальной энергоэффективности является наименее производительным режимом, поскольку при максимальной температуре раствора электролита, равной температуре кипения воды, наблюдается наименьшая плотность тока, а соответственно и наименьшая скорость удаления материала.

В подразделе **2.4.3** определены закономерности и разработана эмпирическая модель взаимного влияния температуры раствора электролита и рабочего напряжения на плотность тока и удельную поверхностную мощность (Рисунок 5).

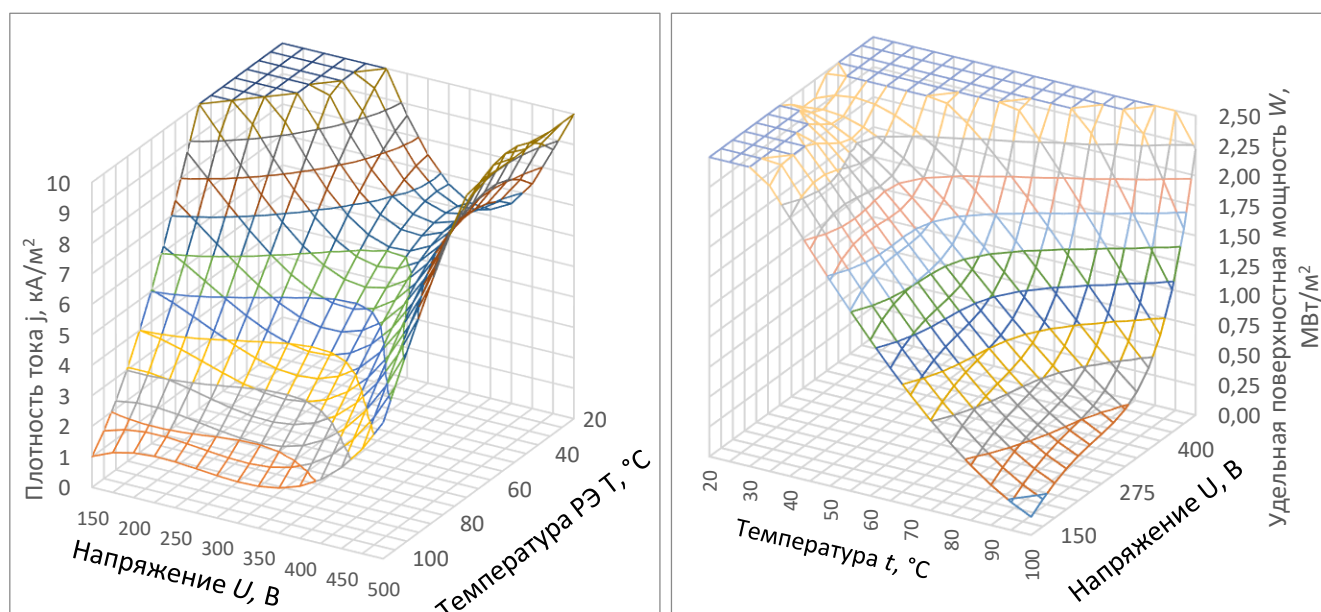


Рисунок 5 – Влияние температуры и напряжения на плотность тока и удельную поверхностную мощность

Для всего диапазона температур РЭ диапазон напряжений с наименьшим уровнем плотности тока и удельной поверхностной мощности находится в интервале от 320 до 380 В. В качестве критерия оценки избыточных энергозатрат, предложен безразмерный коэффициент избыточной мощности K (Рисунок 6).

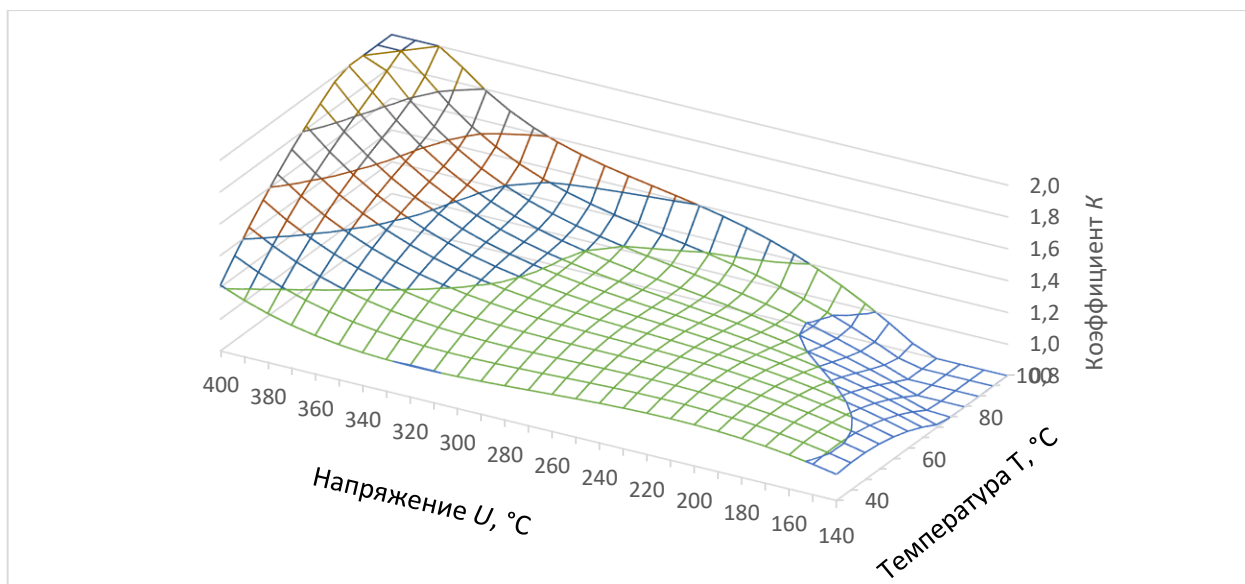


Рисунок 6 – Значения коэффициента избыточной мощности K

Наиболее стабильно процесс ЭПП протекает при коэффициенте K в диапазоне от 1,3 до 1,4. Диапазон напряжений от 260 до 320 В является наиболее энергоэффективным, поскольку значение коэффициента избыточной мощности K находится в диапазоне значений 1,1-1,4 для различных температур РЭ. При этом наиболее рациональным напряжением процесса, с точки зрения энергоэффективности, плотности тока, удельной поверхностной мощности и запаса напряжения при высоких нагрузках на источник питания является диапазон напряжений от 310 до 330 В для различных температур РЭ.

Параграф 2.5 посвящен исследованию процесса ЭПП с точки зрения газоразрядных процессов. В подразделе **2.5.1** показано, что ток через электролит идет по обычным законам электрохимии, а через ПГО на основе тлеющего разряда с переносом зарядов анионами электролита. Это подтверждается в подразделе **2.5.2** результатами анализа спектров частот колебаний величины тока с разложением Фурье для диапазона напряжений 150-500 В и температур РЭ 20-100 °С (Рисунок 7).

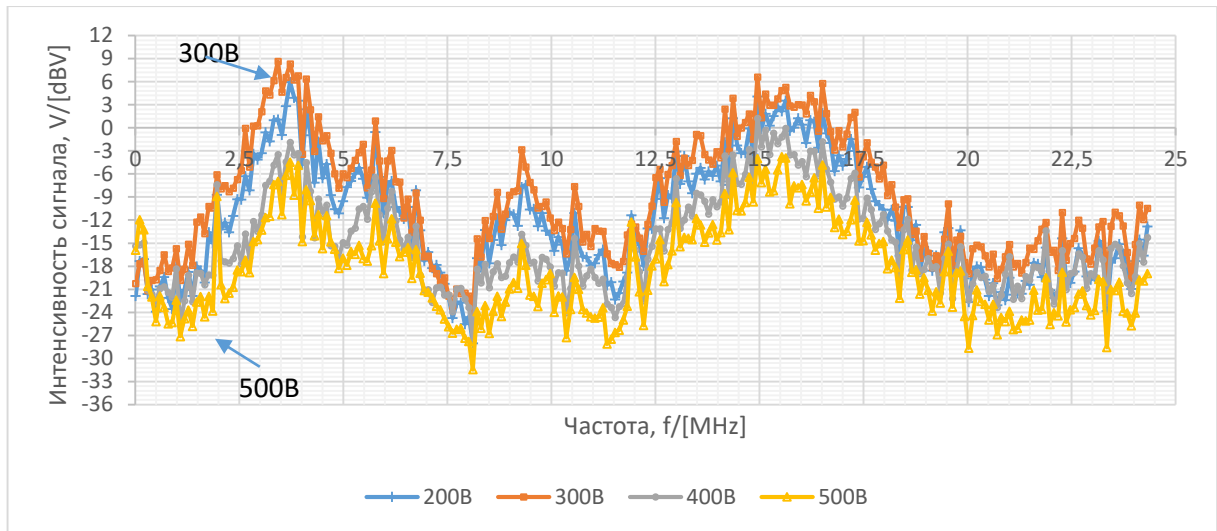


Рисунок 7 – Частотные диапазоны ЭПП

Ток протекающий в системе при ЭПП больше соответствует физико-химическим процессам, связанным с формированием нестационарной ненасыщенной плазмы тлеющего разряда:

- частота находится в диапазоне собственных колебаний электропроводности плазменной оболочки;
- частота не зависит от обрабатываемого материала;
- частота не зависит от площади обрабатываемой поверхности;
- частота не зависит от температуры РЭ.

Изменение температуры РЭ и напряжения процесса ЭПП не вносит заметного влияния на основные частотные диапазоны, характерные для ЭПП. Наиболее ярко выраженная частотная характеристика получена для напряжения 300 В, в диапазоне напряжений, с наиболее низкой плотностью тока. Наименее выраженная частотная характеристика получена для напряжения 500 В, где возрастает роль паразитных явлений, выраженных через коэффициент избыточной мощности K .

Параграф 2.6 посвящен оценке энергетического баланса наиболее распространенной искровой модели и предлагаемой ионизационной модели.

В результате калориметрирования процесса ЭПП с целью сравнения предсказательной способности рассматриваемых моделей было определено, что искровая модель удаления материала недостаточно обоснована, поскольку не учитывает достаточно большое количество энергии, затрачиваемой в процессе обработки.

Таблица 1 – Сравнение энергетических балансов по различным моделям

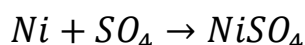
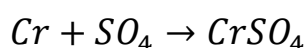
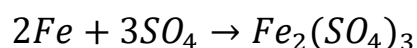
Материал	Энергия	Модель	
		Ионизационная	Искровая
АМг5	Общая	99,9	96,8
	Удаления	97,1	12,5
У12	Общая	100,1	96,6
	Удаления	101,3	27,5
НПА-1	Общая	100	98,1
	Удаления	98,5	12,3
М1	Общая	100,2	96,5
	Удаления	102,7	20,1
Л63	Общая	100,1	96,7
	Удаления	102,8	18,2

Ионизационная модель обладает более высокой предсказательной способностью, что подтверждается балансом энергетических потоков при проведении ЭПП.

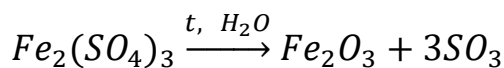
Третья глава посвящена прикладному направлению исследования процесса ЭПП в рамках предложенной ионизационной модели. Состоит из двух блоков: теоретического (**параграфы 3.1-3.2**) и практического (**параграфы 3.3-3.5**). Теоретический блок описывает параллели и различия в механизме сглаживания поверхности и удаления материала при ЭПП и электрохимического полирования (ЭХП). Практический блок посвящен определению влияния технологических параметров на механизмы сглаживания поверхности, удаления материала и конечный результат обработки поверхности.

Рассматривая механизм сглаживания поверхности в **параграфе 3.1** показано, что при протекании анодного растворения при ЭХП металлов, как ближайшего аналога ЭПП, скорость уменьшения шероховатости имеет экспоненциальную зависимость, зависящую от начальной шероховатости поверхности и времени обработки. В **параграфе 3.2** выдвигается предположение, что процесс анодного растворения при ЭПП может осуществляться с протеканием следующих химических реакций:

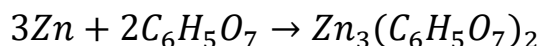
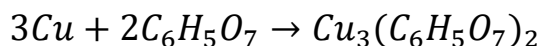
- для хромоникелевой стали марки 08X18H10T и состава РЭ 5 % $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$:



Под действием водяного пара и высокой температуры, может протекать дальнейшее преобразование продуктов реакции, уносимых в раствор. На примере железа, как наиболее объёмного компонента в составе сплава, рассмотрим возможно протекающие реакции:



- для медного сплава Л63 в водном растворе цитратов:



Параграф 3.3 подтверждает положения ионизационной модели: плотность тока для всех обработанных материалах при постоянном составе РЭ находится на одном уровне (Рисунок 8а), а выход массы по току для всех обрабатываемых материалов уменьшается с увеличением рабочего напряжения (Рисунок 8б).

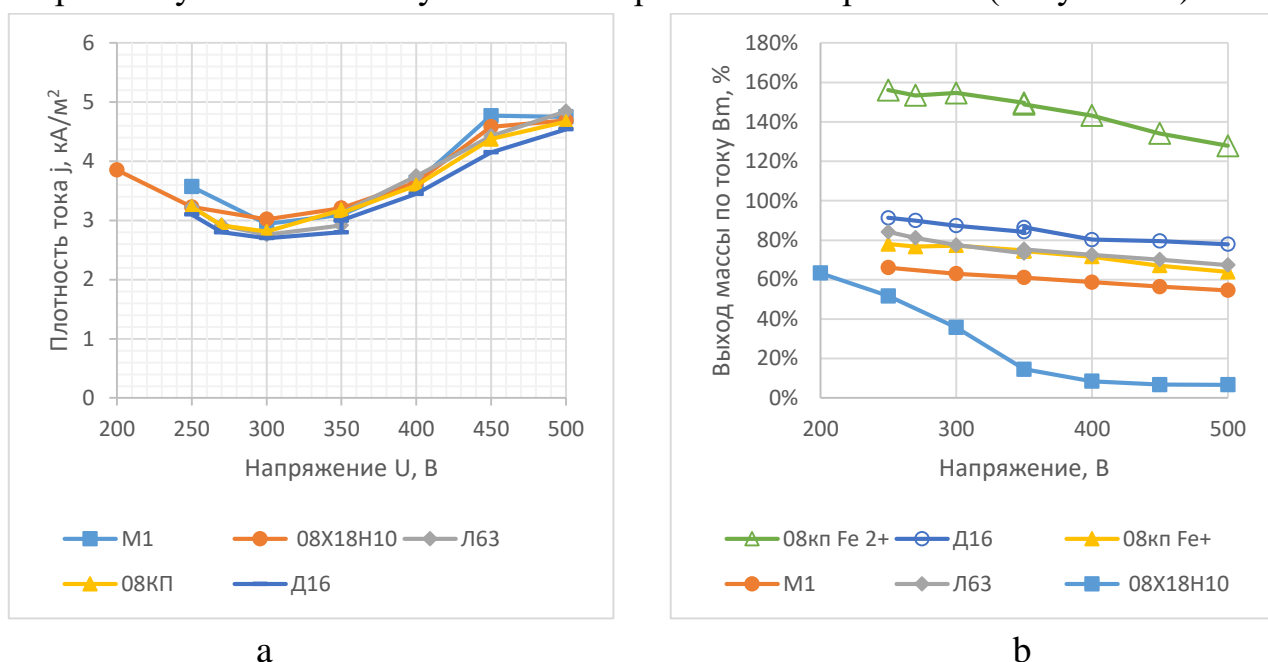


Рисунок 8 – Влияние напряжения на плотность тока и выход массы по току

Характер уменьшения зависит от режима анодного растворения в диапазоне от 250 до 500 В:

- для активного анодного растворения на 2-3 % каждые 50 В;
- для пассивного анодного растворения на 15-20 % каждые 50 В;

Активное растворение характеризуется хорошей растворимостью металла анода, так как при этом побочные реакции, кроме основной — анодного растворения, не протекают. При пассивном растворении часть электрической энергии расходуется на побочные реакции, обеспечивающие удаление с поверхностей анода труднорастворимых оксидных пленок.

Соответственно, скорость удаления материала изменяется в соответствии с изменением плотности тока и выхода массы по току.

Выдвинуто предположение, что наблюдаемое превышение 100 % выхода по току для железа в углеродистых сталях связано с тем, что валентность железа при активном анодном растворении на режимах ЭПП равняется +1.

Выход массы по току для марки стали 08X18N10 обрабатываемую в растворе электролита, применяемого в универсальном технологическом режиме, показывает наименьшие значения, в сравнении с остальными обработанными материалами – 52 % при 250 В является наибольшим практически достижимым стабильным значением. При потребности в обработки только хромоникелевых сталей и наличии состава раствора электролита, обеспечивающего существенно большее значение выхода массы по току, стоит отдавать такому составу раствора электролита приоритет.

Скорость уменьшения шероховатости при обработке всех исследуемых материалов уменьшается с увеличением напряжения для активного и пассивного режима анодного растворения.

Учитывая, что энергоэффективность уменьшения шероховатости зависит от величины уровня начальной шероховатости, наиболее энергоэффективный режим обработки достигается при предельных температурах раствора электролита в диапазоне от 90 до 100 °С и наименьших уровнях рабочего напряжения в диапазоне от 200 до 250 В.

В параграфе 3.4 приведены зависимости изменения скорости уменьшения шероховатости от времени обработки и уровня начальной шероховатости для активного (Рисунок 9а) и пассивного (Рисунок 9б) режима анодного растворения.

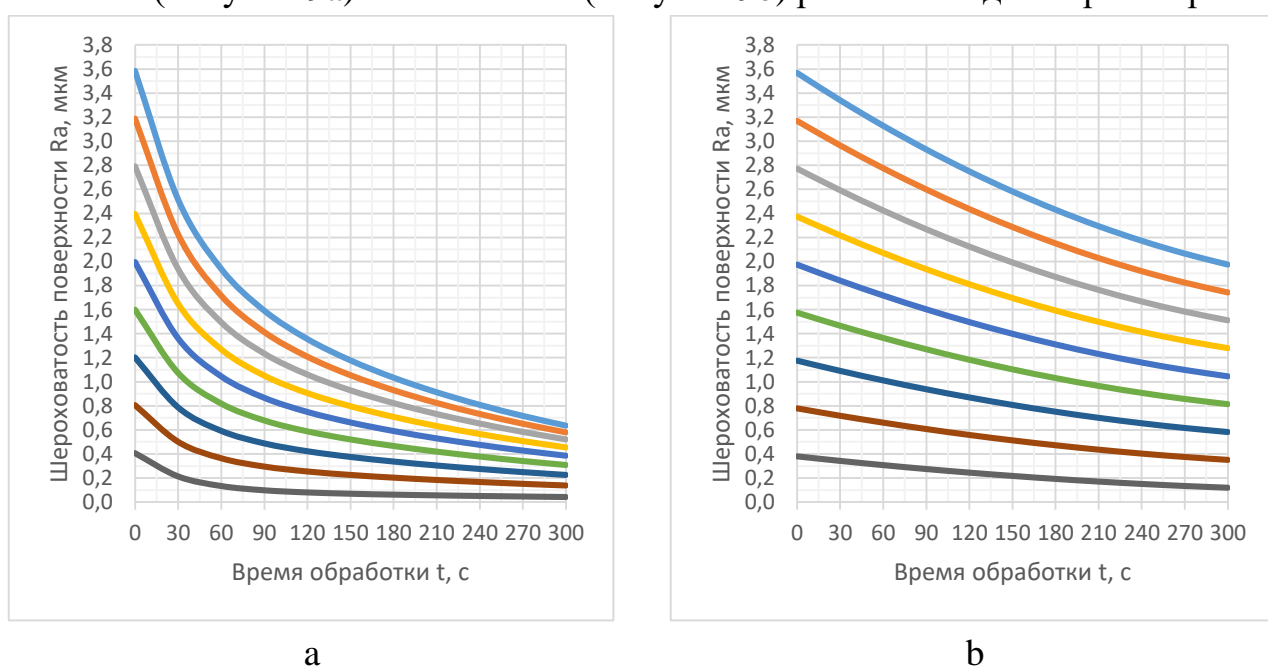


Рисунок 9 – Шероховатость Ra в зависимости от начальной шероховатости и времени обработки для активного и пассивного режима анодного растворения

Полученные уравнения позволяет прогнозировать уровень шероховатости поверхности в зависимости от начальной шероховатости поверхности и времени обработки.

Для М1, Л63, 15ХНФШ, 08КП и Д16 на УТР:

$$Ra_k = (371 \cdot 10^{-3} \cdot Ra_H + 152 \cdot 10^{-3}) \cdot \exp((1,3 \cdot 10^{-3} \cdot Ra_H - 32 \cdot 10^{-3}) \cdot t) + (621 \cdot 10^{-3} \cdot Ra_H - 142 \cdot 10^{-3}) \cdot \exp((-3 \cdot 10^{-4} \cdot Ra_H - 29 \cdot 10^{-4}) \cdot t)$$

Для 08Х18Н10 на УТР:

$$Ra_k = (2,04 \cdot 10^{-3} \cdot Ra_H + 4,86 \cdot 10^{-4}) \cdot t^2 - (2,174 \cdot 10^{-6} \cdot Ra_H + 5,677 \cdot 10^{-7}) \cdot t + Ra_H$$

Однако для уровня шероховатости ниже 0,4 наблюдается отклонение прогнозируемого значения от результата эксперимента как для М1, Л63, 15ХНФШ, 08КП и Д16 (Рисунок 10), так и для 08Х18Н10 (Рисунок 11).

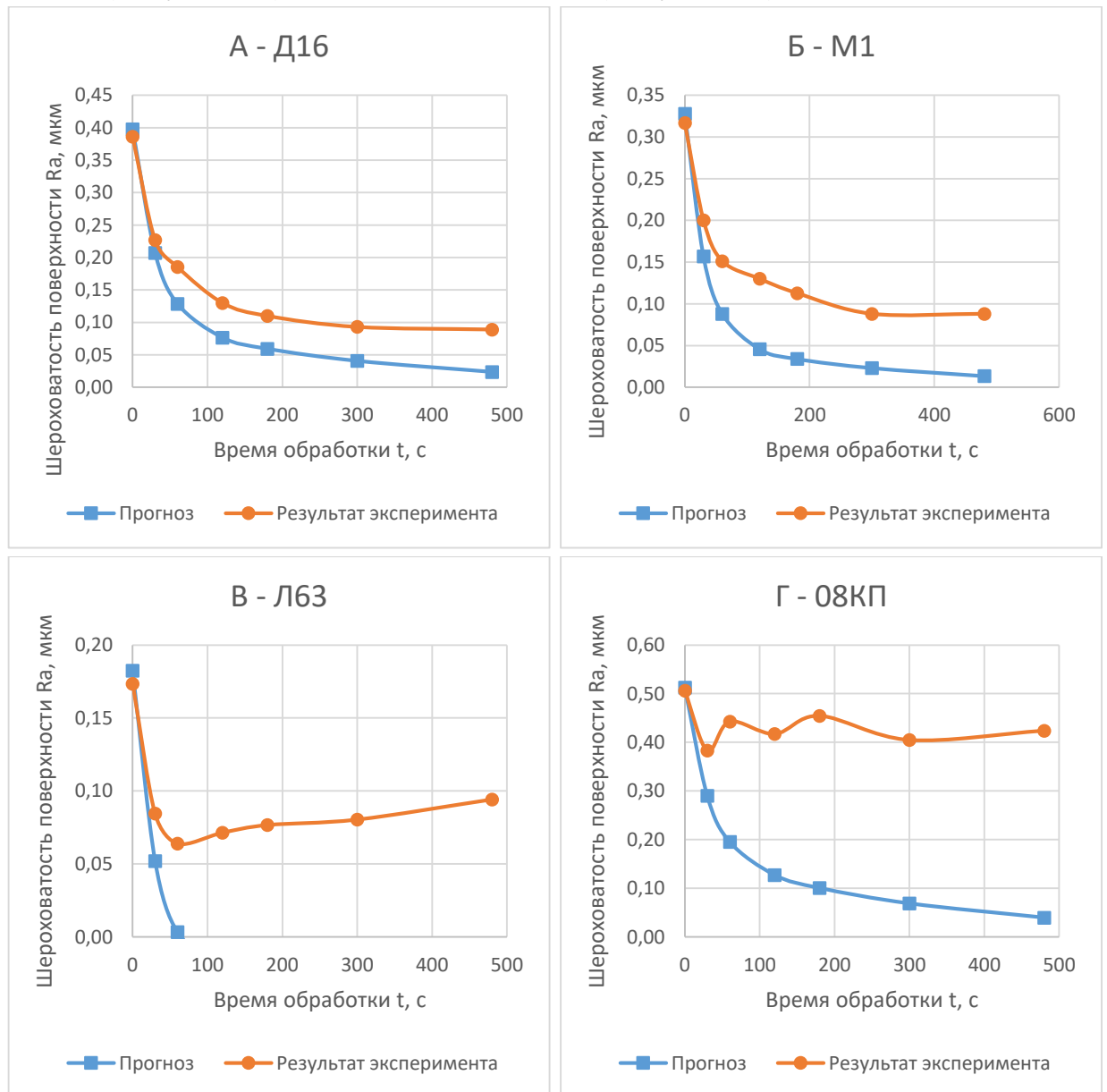


Рисунок 10 – Сравнение расчётного уровня шероховатости Ra (мкм) от времени обработки и начальной шероховатости с результатами эксперимента:

А – Д16, Б – М1, В – Л63, Г – 08КП

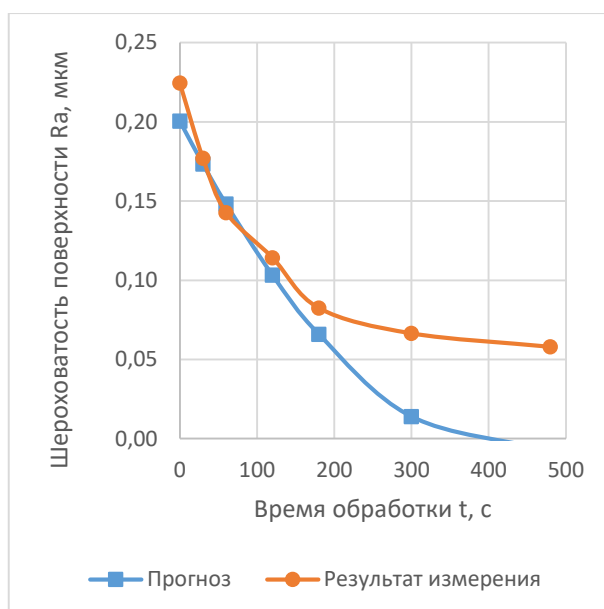


Рисунок 11 – Сравнение прогнозируемого уровня шероховатости Ra (мкм) от времени обработки и начальной шероховатости с результатом эксперимента для хромоникелевой стали 08X18H10

Рациональное время обработки ЭПП зависит от уровня начальной шероховатости поверхности. Для диапазона начальной шероховатости поверхности время обработки составляет:

- менее 1 мкм от 60 до 90 с;
- от 1 до 2 мкм от 120 до 180 с;
- более 2 мкм составляет от 180 до 240 с;

За рациональное время обработки шероховатость поверхности может быть уменьшена до 4 раз, ограничением будет являться минимально достигаемый уровень шероховатости поверхности:

- 08КП – Ra 0,4 мкм;
- остальные материалы – Ra 0,05-0,1 мкм;

В параграфе 3.5 представлена эмпирическая модель процесса ЭПП позволяет с высокой степенью точности прогнозировать результат обработки в диапазоне: напряжений от 250 до 450 В, температур РЭ от 70 до 90 °С, начальной шероховатости от Ra 0,8 до Ra 3,2 мкм и времени обработки от 60 до 300 с., таким образом учитывая все значимые управляющие параметры процесса ЭПП в широком диапазоне.

$$\begin{aligned}
 Ra_{\text{кон}} = & 0,107Ra_{\text{нач}}^2 + 7,424 \cdot 10^{-6}t^2 - 6,3 \cdot 10^{-6}U^2 - 1,53 \cdot 10^{-3}T^2 - 0,478Ra_{\text{нач}} \\
 & + 0,67 \cdot 10^{-3}t + 11,03 \cdot 10^{-3}U + 0,274T - 1,207 \cdot 10^{-3}Ra_{\text{нач}}t + 0,37 \\
 & \cdot 10^{-3}Ra_{\text{нач}}U + 0,006Ra_{\text{нач}}T - 2,499 \cdot 10^{-6}tU - 34,986 \cdot 10^{-6}tT \\
 & - 0,073 \cdot 10^{-3}UT - 12,418
 \end{aligned}$$

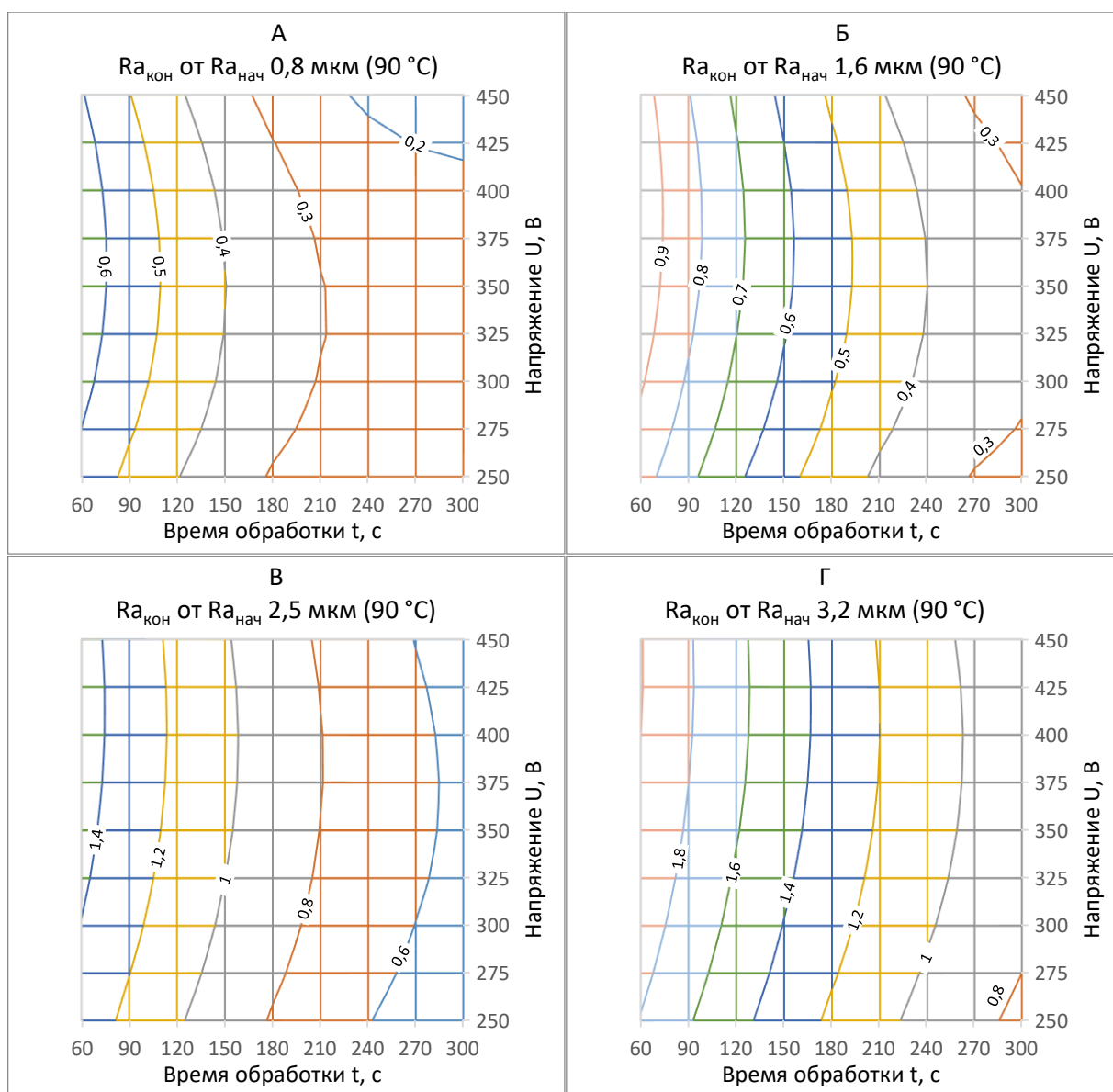


Рисунок 12 – Конечная шероховатость $Ra_{кон}$ в зависимости от времени обработки и напряжения при температуре РЭ $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ и начальной шероховатости:
 А – $Ra_{нач}$ 0,8 мкм, Б – $Ra_{нач}$ 1,6 мкм, В – $Ra_{нач}$ 2,5 мкм, Г – $Ra_{нач}$ 3,2 мкм

Полученные зависимости дают представление о скорости уменьшения шероховатости обрабатываемой поверхности. При температуре РЭ близкой к температуре кипения ($90\text{-}100\text{ }^{\circ}\text{C}$) плотность тока практически не меняется в диапазоне напряжений $250\text{-}350\text{ В}$. Дальнейшее повышение напряжения в диапазоне $350\text{-}450\text{ В}$ приводит к увеличению плотности тока. Одновременно с этим, на всём промежутке изменения напряжения в диапазоне $250\text{-}450\text{ В}$ уменьшается V_m , что приводит к уменьшению скорости удаления материала и уменьшения шероховатости. Таким образом, напряжение процесса при температурах РЭ близких к кипению оказывает минимальное влияние на скорость уменьшения шероховатости.

Время, затрачиваемое на уменьшение шероховатости в 4 раза (например, $Ra_{нач} 3,2 \rightarrow Ra_{кон} 0,8$ мкм) в зависимости от напряжения колеблется в диапазоне 200-240 с для $Ra_{нач} 1,6$ мкм, 240-290 с для $Ra_{нач} 2,5$ мкм, от 290 с для $Ra_{нач} 3,2$ мкм, от 230 с для $Ra_{нач} 0,8$ мкм. Для всех описанных диапазонов время обработки превосходит рациональное – 180 с. В случае обработки изделий при температуре РЭ близкой к кипению необходимо более тщательная подготовка поверхности перед обработкой, по сравнению с более низкими температурами РЭ.

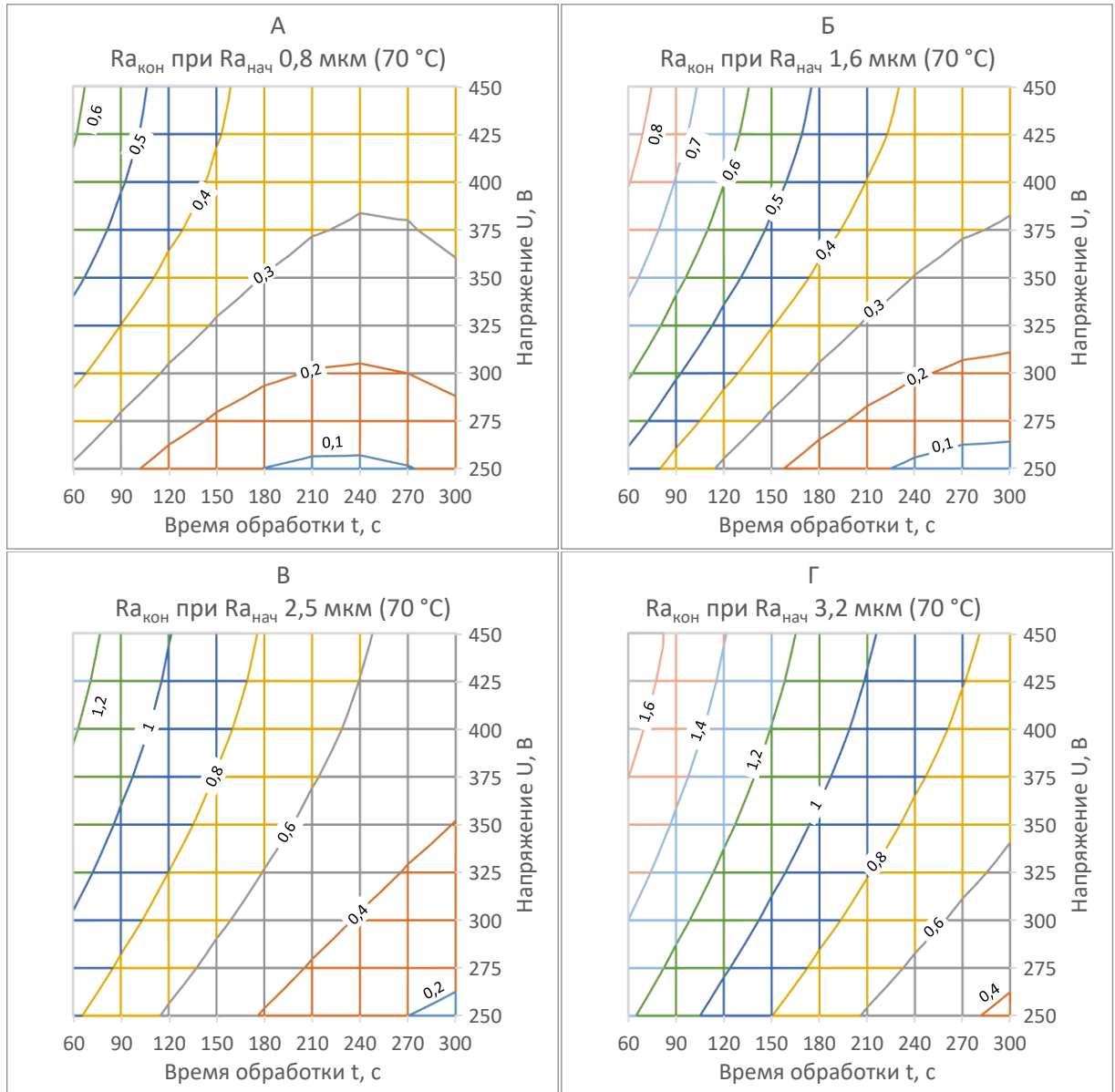


Рисунок 13 – Конечная шероховатость $Ra_{кон}$ в зависимости от времени обработки и напряжения при температуре РЭ 70 °C и начальной шероховатости:
 А – $Ra_{нач} 0,8$ мкм, Б – $Ra_{нач} 1,6$ мкм, В – $Ra_{нач} 2,5$ мкм, Г – $Ra_{нач} 3,2$ мкм

Изменение температуры РЭ приводит к изменению скорости уменьшения шероховатости от 1,1 до 2 раз за каждые 10 °C. Влияние более существенно при более низких напряжениях. Изменение напряжения в диапазоне от 250 до 450 В оказывает влияние на скорость уменьшения шероховатости в зависимости от температуры РЭ и:

- скорость уменьшения шероховатости практически не зависит от напряжения при температурах близких к температуре кипения РЭ (90 °С и более);
- скорость уменьшения шероховатости сокращается в более чем 2 раза при изменении напряжения в диапазоне от 250 до 450 В, при температуре РЭ 70 °С и менее;

Основные результаты и выводы по работе

1. Решена актуальная научная задача, состоявшая в разработке научно-методического аппарата повышения эффективности обработки методом электролитно-плазменного полирования на основе ионизационной модели парогазовой оболочки, за счет достижения цели исследования, включающей в себя разработку ионизационной модели процесса электролитно-плазменного полирования и разработку метода формирования компонентного состава;

2. Разработанный метод формирования компонентного состава РЭ для осуществления процесса ЭПП, определяет: характер влияния химических компонентов на протекающие физико-химические процессы при обработке широкого диапазона металлов; характер количественного изменения компонентного состава РЭ в процессе протекания газового разряда; механизм возникновения дефектов в процессе обработки; влияние концентрации компонентов РЭ на стабильность плёночного кипения и характер протекания газового разряда; что подтверждает предположение о физико-химическом характере преобразований в газовом разряде компонентов РЭ и материала анода;

3. На основании метода формирования компонентного состава РЭ разработан универсальный технологический режим процесса ЭПП, включающий в себя раствор электролита широкого спектра действия, для которого определены рекомендованные минимальные концентрации компонентов РЭ в размере 3 % KNO_3 и 1 % $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ и рекомендованные управляющие параметры процесса, такие как напряжение процесса $U=300$ В и температура раствора электролита $T=80$ °С.

4. В результате комплекса исследований, направленных на выявление закономерностей влияния управляющих электрофизических параметров процесса ЭПП, определен: характер влияния температуры раствора электролита на плотность тока, формирование и наблюдаемые свойства парогазовой оболочки; показано, что температурный напор прианодной области парогазовой оболочки находится в диапазоне от 1000 до 4000 °С.;

5. Показано, что на скорость удаления материала оказывает влияние, не только обрабатываемый материал и плотность тока, но и коэффициент выхода массы по току, который зависит от обрабатываемого материала и не зависит от температуры раствора электролита;

6. Определены закономерности и разработана эмпирическая модель взаимного влияния температуры раствора электролита и рабочего напряжения на плотность тока и удельную поверхностную мощность;

7. Определены критерии, зависимости и даны рекомендации по выбору энергоэффективных и рациональных режимов обработки:

- Наиболее энергоэффективный диапазон рабочих напряжений от 260 до 320 В является, поскольку значение коэффициента избыточной мощности K находится в диапазоне значений от 1,1 до 1,4 для различных температур РЭ;

- Диапазон напряжений с наименьшим уровнем плотности тока и удельной поверхностной мощности для всего диапазона температур раствора электролита находится в диапазоне от 320 до 380 В;

- Наиболее рациональным напряжением процесса с точки зрения энергоэффективности, плотности тока, удельной поверхностной мощности и запаса напряжения при высоких нагрузках на источник питания является диапазон напряжений

от 310 до 330 В для различных температур РЭ;

8. В результате исследования частотных характеристик с разложением по методу Фурье, ток протекающий в системе при ЭПП больше соответствует физико-химическим процессам, связанным с формированием нестационарной ненасыщенной плазмы тлеющего разряда:

- частота находится в двух диапазонах колебаний от 2,5 до 4 МГц и от 14 до 17 МГц что соответствует диапазонам собственных колебаний электропроводности плазменной оболочки;

- частота не зависит от обрабатываемого материала;

- частота не зависит от площади обрабатываемой поверхности;

- частота не зависит от температуры РЭ.

10. Ионизационная модель обладает более высокой предсказательной способностью, что подтверждается балансом энергетических потоков при проведении ЭПП;

11. На основании положений ионизационной модели процессов, протекающих в ПГО при ЭПП и широких экспериментальных исследований разработаны технологические рекомендации для выбора состава электролита, режимов обработки, позволяющие создавать технологические процессы для широкой номенклатуры обрабатываемых изделий и материалов;

12. Разработана эмпирическая модель процесса ЭПП, которая согласуется с ранее полученными зависимостями и позволяет с высокой степенью точности прогнозировать технологический результат обработки в диапазоне: напряжений от 250 до 450 В, температур РЭ от 70 до 90 °С, начальной шероховатости от Ra 3,2 до Ra 0,8 мкм и времени обработки от 60 до 300 с, таким образом учитывая все

значимые управляющие параметры процесса ЭПП в широком диапазоне регулирования;

13. Показано, что для режима активного анодного растворения при ЭПП, неизменных управляющих параметрах и составе раствора электролита плотность тока и скорость уменьшения шероховатости не зависят от обрабатываемого материала, что позволяет применять разработанную эмпирическую модель для оценки результатов обработки рекомендованных материалов без потери предсказательной способности;

14. Показано, что увеличение напряжения в диапазоне от 250 до 500 В приводит к ухудшению протекающего процесса обработки. Следствием этого является понижение скорости уменьшения шероховатости и уменьшение энергоэффективности процесса ЭПП. Это выражается в увеличении значений коэффициента избыточной мощности K и уменьшении выхода массы по току V_m . Наиболее энергоэффективный режим обработки соответствует наименьшим значениям коэффициента избыточной мощности K и наибольшим значениям выхода массы по току V_m , что достигается за счёт назначения управляющих параметров процесса с наибольшими значениями температуры раствора электролита, начальной шероховатости R_a и наименьшими значениями напряжения.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Публикации в изданиях, рецензируемых ВАК

1. Захаров, С.В. Электролитно-плазменное полирование сложнопрофильных изделий из алюминиевого сплава Д16 / С.В.Захаров, М.Т.Коротких // Вестник Концерна ВКО "АЛМАЗ – АНТЕЙ". Выпуск №2 (22) / 2017. 83-87 с.

Публикации в изданиях, рецензируемых SCOPUS

2. Zakharov S.V., Korotkikh M.T. Electrolyte-plasma polishing ionization model. Lecture notes in mechanical engineering. 2020. 193-208. DOI: 10.1007/978-3-030-39500-1_20

3. Alexander Popov, Alla Popova, Alexandr Fumin, Mikhail Novoselov, Sergey Zakharov, Mikhail Radkevich. High-Speed Dimensional Processing of Metallic Materials with an Environmentally Friendly Jet Electrolyte-Plasma Method. Proceedings of I4SDG Workshop, 2021. 481-489. DOI: 10.1007/978-3-030-87383-7_52

4. Alecander Popov, Alla Popova, Sergey Zakharov, Mikhail Novoselov, Vasily Teplukhin, Alexandr Fumin, Mikhail Radkevich. Processes of contact interaction of an electrolyte plasma jet with a surface // Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2021. ISBN 978-3-030-91552-0. ISSN 2195-4356.

Публикации в изданиях РИНЦ

5. Захаров, С.В. Технология электролитно-плазменного полирования сложнопрофильных поверхностей отверстий // Двадцатая Санкт-Петербургская ассамблея молодых ученых и специалистов. Сборник тезисов. Правительство Санкт-Петербурга. КНВШ. 2015. 156.

6. Захаров, С.В. Совершенствование технологии электролитно-плазменного полирования алюминиевого сплава Д16 / С.В.Захаров, М.Т.Коротких // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием. 2016. 162-165.

7. Захаров, С.В. Влияние компонентов раствора электролита на нижнюю границу начала процесса электролитно-плазменного полирования / С.В.Захаров, М.Т.Коротких, А.А.Волков, И.А.Марцинкевич // Электрофизические методы обработки в современной промышленности: Материалы II Международной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. Пермь, 2019. 122-128.

8. Попов, А.И. Особенности разряда между металлическим анодом и полым токоподводом / А.И.Попов, В.И.Новиков, М.М.Радкевич, М.В.Новоселов, С.В.Захаров, В.Г.Теплухин // 16-й Международный симпозиум по технологии электрохимической обработки. Хемниц, Германия, 2020. 15-20.

9. Захаров, С.В. Ионизационная модель электролитно-плазменного полирования / С.В.Захаров, М.Т.Коротких, Е.В.Гонибесова // Неделя науки СПбПУ: Материалы научной конференции с международным участием. В 2-х частях. 2020. 255-258.

10. Захаров, С.В. Сравнительный анализ электролитно-плазменных технологий / С.В.Захаров, А.И.Попов // Электрофизические методы обработки в современной промышленности. Специальный выпуск: аддитивные технологии. Материалы III Международной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. Пермь, 2020. 64-67.

11. Попов, А.И. Анализ взаимодействия струйной электролитной плазмы с поверхностью нержавеющей стали / А.И.Попов, А.И.Попова, М.М.Радкевич, С.В.Захаров, И.А.Ролецкий, К.Г.Колесин // Современное машиностроение. Наука и образование. №10 / 2021. 636-656.

12. Захаров, С.В. Стабильность процесса электролитно-плазменного полирования при низких напряжениях / С.В.Захаров, М.Т.Коротких // Электрофизические методы обработки в современной промышленности.

Материалы IV Международной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. Пермь, 2021. 128-132.

13. Пузанов, А.А. Струйная электролитно-эрозионная обработка - новый метод обработки материала / А.А.Пузанов, В.М.Варяница, Шао Гуансинь, С.В.Захаров, М.М.Радкевич, А.И.Попова, А.И.Попов // Электрофизические методы обработки в современной промышленности. Материалы IV Международной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. Пермь, 2021. 137-140.

14. Попов, А.И. Диагностика частотно-импульсных характеристик струйного разряда / А.И.Попов, А.П.Веселовский, С.В.Ермак, М.М.Радкевич, С.В.Захаров, Й.Б.Лазарев // Инновации в машиностроении: сборник трудов XII Международной научно-практической конференции / под ред. С.И. Василевской, Ю.С. Кудрявцевой. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2021. 35-42.

Патент

Попов А.И., Радкевич М.М., Кудрявцев В.Н., Захаров С.В., Кузьмичев И.С. Установка для электролитно-плазменной обработки турбинных лопаток. Патент на изобретение RU 2623555 С1, 27.06.2017. Заявка № 2016120180 от 24.05.2016.