

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»

УДК 620.182.253:681.1

САДОВСКИЙ  
Евгений Николаевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ  
ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание степени магистра техники и технологии  
по специальности 1-39 81 01 «Компьютерные технологии проектирования  
электронных систем»

Научный руководитель  
Хмыль Александр Александрович  
доктор технических наук,  
профессор

Минск 2015

Работа выполнена на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель:

**Хмыль Александр Александрович**,  
доктор технических наук, профессор кафедры электронной техники и технологии учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Рецензент:

**Стемпичкий Виктор Романович**,  
кандидат технических наук, доцент кафедры микро- и нанoeлектроники учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Защита диссертации состоится «22» июня 2015 г. года в 10<sup>00</sup> часов на заседании Государственной комиссии по защите магистерских диссертаций в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, 1 уч. корп., ауд. 415, тел.: 293-89-92, e-mail: [kafpiks@bsuir.by](mailto:kafpiks@bsuir.by).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

## ВВЕДЕНИЕ

Актуальной задачей современного производства является поиск эффективных, экономически выгодных и экологически чистых методов отделки и подготовки поверхностей перед нанесением покрытий. Для контактирующих поверхностей повышение точности, жесткости и износостойкости прецизионных сопряжений в изделиях, а также обеспечение эффективности изготовления конкурентоспособной по основным показателям надежности и долговечности продукции, в настоящее время может быть получено за счет постоянного совершенствования технологии обработки заготовок, в том числе технологии финишной обработки. Для получения требуемого качества поверхностного слоя деталей, имеющих наружные сложнопрофильные поверхности, существует целый ряд различных методов обработки, в том числе электрохимическое, химическое, механическое полирования, однако, получить заданную шероховатость поверхности трудоемко, дорогостояще, а зачастую затруднительно, особенно используя экологически чистые методы обработки материалов. В этом отношении электролитно-плазменная обработка (ЭПО) является высокоэффективным процессом обработки изделий из токопроводящих материалов в нетоксичных средах, имеющих более высокие экологические и экономические показатели. Наиболее близким, по получаемым параметрам качества обрабатываемой поверхности и технологическому оснащению, к ЭПО является электрохимическое полирование, но в отличие от него, в электролитно-плазменной технологии используются экологически безопасные водные солевые растворы, которые в несколько раз дешевле токсичных кислотных компонентов, а применяемое технологическое оборудование отличается простотой и легкостью управления.

Известно, что концентрированные потоки энергии могут широко применяться для обработки поверхности. Это плазменная металлизация в вакууме, электролитный нагрев, размерная электрохимическая обработка, лазерная резка, сварка, пайка. Этим вопросам посвящены многочисленные работы исследователей России, Украины, Молдовы, Китая, Америки. Однако систематические исследования по использованию этих методов в гальванотехнике для создания локальных слоев с уникальными свойствами в периодической научной литературе отсутствуют. Отсутствует теоретическая база по влиянию потоков заряженных частиц на параметры микрорельефа поверхности, нет реальных и эффективных технологий для промышленного внедрения.

Кроме того, до настоящего времени в научной литературе не разработаны теоретические основы конструирования поверхности, исходя из технических требований к новому изделию и условий его эксплуатации. Поэтому проблема повышения качества решается эмпирически, путем проведения большого количества экспериментов и определения оптимальных параметров поверхности, получаемых при заданной технологии производства изделий. Но данный путь характеризуется повышенной трудоемкостью и приводит к достижению только локального оптимума. Более эффективным является второй путь, основанный на моделировании работы поверхности в заданной

системе и условиях, нахождении таких ее параметров, которые обеспечивают максимальную работоспособность, стабильность, надежность и разработке такого технологического процесса, который мог бы максимально реализовать заданные параметры поверхности.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

Высокая степень развития микроэлектроники, приборо- и машиностроения в республике Беларусь, значительное удорожание основных ресурсов и энергоносителей создает объективные предпосылки для разработки и внедрения в промышленность высокоэффективных, экономически выгодных и экологически безопасных методов финишной обработки металлических деталей электронной техники, а также их очистки и подготовки перед нанесением гальванических покрытий. Механическая обработка для обеспечения высокого качества проводится с применением сложного оборудования и требует значительных временных затрат. Химическая обработка осуществляется в очень агрессивных растворах и не всегда обеспечивает нужное качество. Характеристики поверхности после электрохимического полирования несколько лучше, чем после химического, однако, имеются трудности в корректировке агрессивных составов рабочих растворов.

Одним из способов, позволяющим улучшить качественные характеристики обрабатываемых изделий и сократить время технологического цикла, является электролитно-плазменная обработка (ЭПО). В настоящее время достаточно хорошо изучены возможности электролитной плазмы для нагрева, закалки, азотирования, науглероживания и нитроцементации металлов, очистки металлических поверхностей от загрязнений и удаления окислов. Последние 30-40 лет ведется активное изучение электрохимической размерной обработки металлов и электролитно-плазменного полирования. Однако, в публикациях по данной тематике отсутствуют результаты по исследованию качественных характеристик обработанных поверхностей, не приводятся конкретные рекомендации по разработке составов электролитов и режимов обработки.

В радиоэлектронной промышленности наиболее распространенными конструкционными материалами являются стали типа *08кп*, *10кп*, *Ст40*, а в контактирующих системах наибольшее применение нашли медь и ее сплавы. Обработка их традиционными методами хорошо изучена, но не всегда пригодна для получения изделий электронной техники из-за наличия дефектного слоя и различных загрязнений технологического характера, ухудшающих их показатели. Поэтому исследования, направленные на установление основных закономерностей процесса ЭПО и разработку новых технологий финишной обработки изделий электронной техники являются в настоящее время актуальными. Результаты исследований позволят повысить конкурентоспособ-

ность выпускаемой продукции, снизить энергопотребление.

### **Степень разработанности проблемы**

Теоретические и практические вопросы и особенности электролитно-плазменной обработки деталей приборостроения раскрыты в трудах зарубежных ученых – У. К. Чаб, И. У. Мэйер, Д. Бриггс, Р. Хольм и др. Особенности реализации электролитно-плазменной обработки, условия протекания процесса ЭПО нашли отражение в работах Грилихеса С.Я., Слугинова Н.П., Ясногородского И.З., Вишницкого А.Л., Анагорского А.А. и др. Также данные вопросы рассматривают в своих работах и представители белорусской науки Мураc В.С., Анисимович В.Г.

### **Цель и задачи исследования**

Целью диссертации является установление механизма взаимодействия электролита с поверхностью металла, обрабатываемого электролитной плазмой, изучение закономерностей его обработки в различных электролитах с применением стационарных и импульсных режимов, разработка технологии полирования поверхности изделий электронной техники.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить **следующие задачи:**

- провести анализ методов финишной обработки металлических поверхностей (механическая, химическая, электрохимическая, ЭПО), дать оценку их эффективности и определить пути развития, провести теоретическое и экспериментальное исследование процессов тепломассопереноса в электролитной плазме;

- изучить возможность применения электролитно-плазменной обработки для подготовки поверхностей деталей перед нанесением гальванических покрытий, разработать состав электролита и технологию полировки углеродистых сталей и латуни электролитно-плазменной обработкой.

- изучить влияние составов электролитов и режимов электролитно-плазменной обработки на качественные характеристики обрабатываемых поверхностей изделий из углеродистой стали и латуни, исследовать основные физико-механические и эксплуатационные свойства поверхностей изделий электронной техники различного назначения после электролитно-плазменной обработки, включая ее импульсные режимы;

**Объектом** исследования является процесс электролитно-плазменной обработки применительно к коррозионно-стойким (*X18H10T*) и углеродистым сталям (*08кп*, *Ст40*), латуни (*Л63*) электролитическим никелевым покрытиям.

**Предметом** работы является протекание электролитно-плазменной обработки в стационарном и импульсном режимах в различных технологических средах.

**Область исследования.** Содержание диссертационной работы соответствует образовательному стандарту высшего образования второй ступени (магистратуры) специальности 1-39 81 01 Компьютерные техноло-

гии проектирования электронных систем.

### **Теоретическая и методологическая основа исследования**

В основу диссертации легли теоретические и практические положения отечественных и зарубежных исследований ученых по проблеме инновационной деятельности: И.У. Мэйер, Д. Бриггс, А.А. Анагорский и др.

**Теоретической основой исследований**, проведенных в работе, являются методы Оже-спектроскопии, рентгеноструктурного и спектрального анализа, электронной и атомно-силовой микроскопии.

**Методологической основой исследования** являются разработки отечественных и зарубежных авторов, методические материалы, труды отечественных и зарубежных учёных и научные труды в области электролитно-плазменной обработки деталей. В магистерской диссертации используются следующие общенаучные методы: эмпирического исследования (эксперимент, измерение, научное исследование), общелогические (анализ, аналогия, системный подход), метод факторного и сравнительного анализа.

**Информационная база** исследования для электролитно-плазменной обработки деталей сформирована на основе экспериментальных данных, научных публикаций известных ученых России (Белкин П.Н., Кусманов С.А., Дольский А.М. и другие) и Белоруссии (Станишевский В.К., Анисимович В.Г.).

**Инструментальной базой** исследования являются микротвердомер ПМТ-ЗМ, использующийся для измерения твердости поверхностей, фотоэлектрический блескомер ФБ-2, с помощью которого определялся блеск исследуемых поверхностей, фотометр ФОУ-УХЛ и программное обеспечение, написанное на Delphi, используемое для вывода уравнений регрессии для исследуемых выходных параметров.

**Научная новизна и значимость полученных результатов** магистерской диссертационной работы заключается в использовании известной модели теплового поля, образующегося в электролитной плазме, на основании которой исследована динамика изменения температуры обрабатываемой металлической поверхности, прианодной области и электролита, установлен колебательный характер изменения температуры и ее значительное увеличение (до 700 °С и выше) в прианодной области.

Установлен механизм воздействия электролитной плазмы на поверхность металла при обработке, определен ионный состав парогазовой оболочки и элементный состав технологических загрязнений и показано, что проникновение примесей в приповерхностный слой обработанных в электролитной плазме углеродистой стали (*08кп*) распространяется на глубину до 0,05 мкм, а латуни (*Л63*) до 0,01 мкм, из-за образования локальных высокотемпературных зон.

Разработана методика полирования металлов в жидких электролитах, использующий импульсное возбуждение плазмы в зоне обработки, что по-

зволило управлять качественными характеристиками обрабатываемых изделий за счет дозированной подачи энергии.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

– процесс полирования металлических поверхностей в электролитной плазме определяется высокотемпературным полем в парогазовой оболочке, которое создано под действием высокого потенциала и определяется диффузионными и дрейфовыми явлениями в зоне электрического разряда;

– основным фактором снижения контактного сопротивления поверхности изделий электронной техники, обработанных в электролитной плазме, является снижение толщины дефектного слоя, количества и глубины проникновения технологических загрязнений в поверхностный слой (до 0,05 мкм для стали 08кп и 0,01 мкм для латуни Л63);

– импульсное возбуждение плазмы в электролите расширяет технологические возможности метода обработки металлических поверхностей деталей за счет дозированной подачи энергии и управления качественными характеристиками за счет варьирования параметров импульсного тока;

– разработанный электролит ( $NaCl$  – 25 г/л,  $NH_4Cl$  – 2 г/л, остальное – вода) для полирования углеродистых сталей в электролитной плазме готовится из доступных компонентов, обладает длительной работоспособностью и обеспечивает уменьшение в 2-3 раза степени шероховатости и объемного износа поверхности.

**Теоретическая значимость** диссертации заключается в использовании известной модели теплового поля, образующегося в электролитной плазме, на основании которой исследована динамика изменения температуры обрабатываемой металлической поверхности из стали и латуни, прианодной области электролита, установлен колебательный характер изменения температуры и ее значительная величина.

**Практическая значимость** диссертации состоит в разработке неагрессивного состава электролита из доступных компонентов и технологический процесс полирования углеродистой стали в электролитной плазме, разработан процесс полирования латуни в электролитной плазме импульсными токами, разработан способ нанесения функциональных электрохимических покрытий на изделия электронной техники.

### **Апробация и внедрение результатов исследования**

Основные положения работы и результаты диссертации изложены в двух опубликованных работах общим объемом 4 страницы.

**Структура и объем работы.** Структура диссертационной работы обусловлена целью, задачами и логикой исследования. Работа состоит из введения, трёх глав, заключения и библиографического списка и приложений. Общий объем диссертации – 86 страниц. Работа содержит 12 таблиц, 17 рисунков. Библиографический список включает 59 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** рассмотрено современное состояние проблемы поиска эффективных, экономически выгодных и экологически чистых методов отделки и подготовки поверхностей перед нанесением покрытий, определены основные направления исследований, а также дается обоснование актуальности темы диссертационной работы.

В **общей характеристике работы** сформулированы ее цель и задачи, показана связь с научными программами и проектами, даны сведения об объекте исследования и обоснован его выбор, представлены положения, выносимые на защиту, приведены сведения о личном вкладе соискателя, апробации результатов диссертации и их опубликованность, а также, структура и объем диссертации.

В **первой главе** проведен анализ и систематизированы основные методы финишной отделки металлов при изготовлении изделий электронной техники.

Показано, что электролитно-плазменная обработка поверхностей металлов является одним из наиболее перспективных путей повышения их качественных характеристик и эффективности процессов.

Получена вольтамперная характеристика для анодного процесса (рисунок 1).

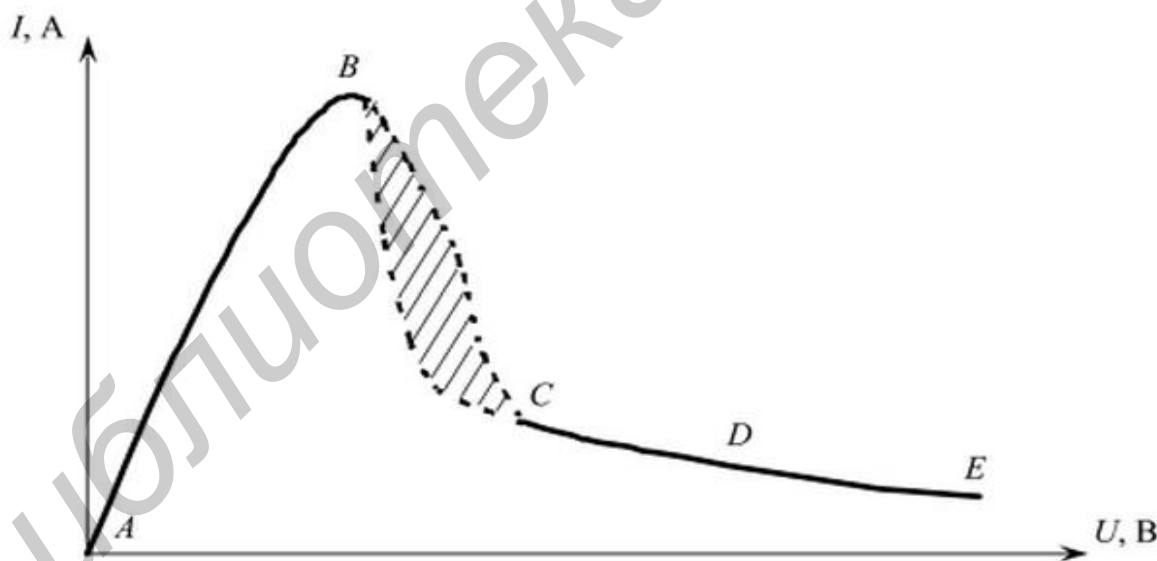


Рисунок 1 – Усредненная вольт-амперная характеристика анодного процесса системы «электрод-электролит»

На вольтамперной характеристике для анодного процесса выделены следующие области:

- электрический ток возрастает линейно с увеличением напряжения на электродах ванны, то есть область, в которой протекает обычный электролиз и соблюдается закон Ома;
- электрический ток изменяется не линейно и вольтамперная характе-



ристика анодного процесса неустойчива. Электролит вблизи анода нагревается до температуры кипения и дальнейшее увеличение напряжения не вызывает роста электрического тока – это переходная стадия;

– напряжение резко увеличивается, и электрический ток падает до малой величины, анод полностью окружен парогазовой пленкой – это стабильная стадия.

Выделены основные преимущества ЭПО:

– широкая область применения: полирование, удаление заусенцев, высокопроизводительная и эффективная очистка поверхности от любых загрязнений;

– использование в качестве инструмента электролита, что позволяет применять одно и то же оборудование для самых разнообразных по форме и размерам изделий;

– возможность совмещения в одном процессе очистки изделия и создания на его поверхности антикоррозионного покрытия;

– легкость автоматизации;

– экологическая чистота процесса (безвредные и низко токсичные электролиты).

В качестве недостатков электролитно-плазменной обработки отмечено следующее:

– необходимость усиления мер электробезопасности ввиду того, что при ЭПО применяются опасные для жизни человека напряжение и ток;

– невозможность применения ЭПО для обработки изделий с режущими кромками ввиду их закругления в процессе обработки;

– трудность обработки изделий сложной формы;

– невозможность непрерывного контроля процесса съема металла.

**Во второй главе** рассмотрены современные методы и измерительное оборудование, приведенное в соответствующих ГОСТах и позволяющие получить объективную информацию о физико-механических свойствах поверхностей металлов, обработанных различными методами, качественном элементном составе загрязнений, находящихся на них, а также значениях параметров кристаллической решетки. Достоверность результатов измерений подтверждена статистической обработкой полученных данных и оценкой их точности.

Изучение параметров топографии поверхности на субмикронном уровне проведено с использованием новейшей методики сканирования и визуализации профиля поверхности на атомно-силовом микроскопе и последующего его анализа с помощью специальных компьютерных программ.

В работе для исследований использованы плоско-параллельные образцы из латуни марки Л63, углеродистых (*Ст40, 08кп*) и коррозионно-стойкой (*X18H10T*) сталей, которые полировались различными способами, а затем проводился сравнительный анализ полученных результатов. Разработан состав электролита для ЭПО:

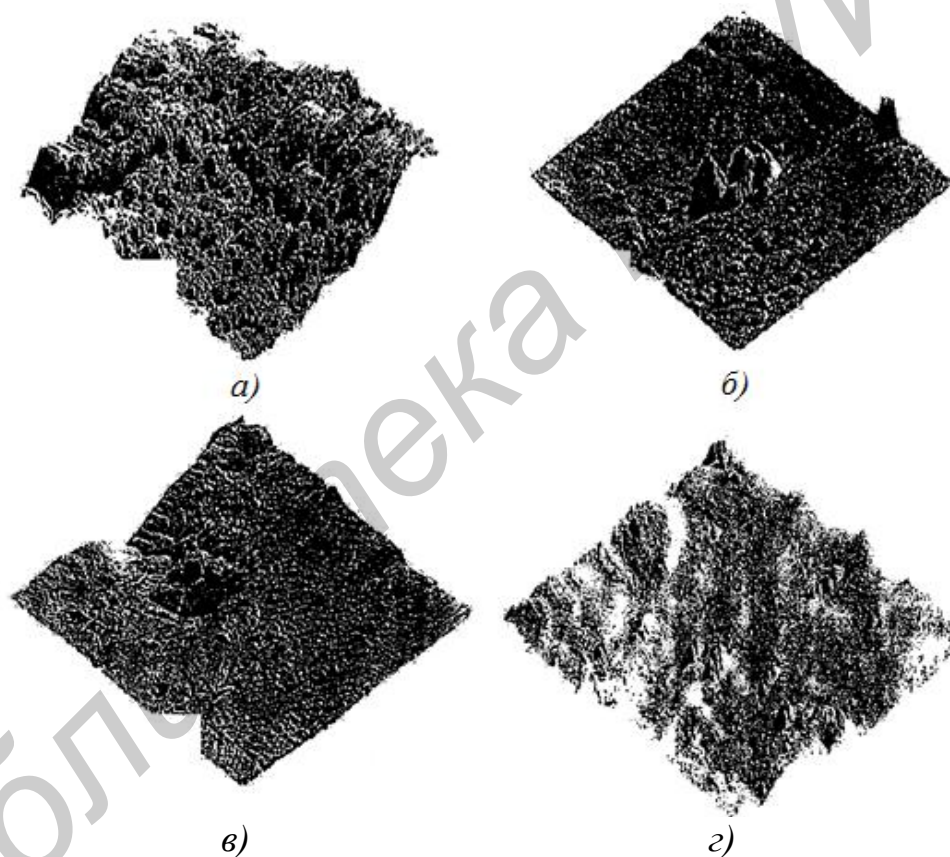
– для латуни (масс, доля %):  $(NH_4)_2SO_4$  – 0,1...1,0, трилон Б – 1,0...6,0, остальное вода при напряжении на аноде 220...330 В, температуре раствора 60...90 °С в течение 1...3 минут;

– для углеродистых сталей (г/л):  $NaCl$  – 20...30,  $NH_4Cl$  – 1...3, остальное вода, при напряжении на аноде 240...330 В, температуре раствора 60...90 °С в течение 3...5 минут.

– для коррозионно-стойкой стали (%):  $(NH_4)_2SO_4$  – 2...6, остальное вода, при напряжении на аноде 240...330 В, температуре раствора 60...90 °С в течение 2...6 минут.

В состав электролитов при ЭПО входила обычная техническая вода.

**В третьей главе** проведено исследование топографии поверхности металла (латунь) на атомно-силовом микроскопе (рисунок 2).



*а) исходная поверхность, б) электрохимическое полирование, в) ЭПО постоянным током, з) ЭПО импульсным током*

Рисунок 2 – АСМ-изображения типичных участков рельефа поверхности из латуни после различных способов обработки

Представлены результаты исследования:

– разработанный раствор для полирования углеродистых сталей в электролитной плазме обеспечивает уменьшение в 2-3 раза степени шероховатости и объемного износа поверхности;

– импульсное возбуждение плазмы в электролите расширяет технологические возможности метода полирования металлических поверхностей де-

талей за счет дозированной подачи энергии и управления качественными характеристиками посредством варьирования параметров импульсного тока, а также снижает энергопотребление и время обработки;

– установлены закономерности изменения физико-механических свойств и микропрофиля поверхностей металлов в зависимости от особенностей электролитно-плазменной обработки. Показана возможность получения поверхностей с шероховатостью  $R_a$  0,1...0,2 для углеродистых сталей и 0,2...0,3 – для латуни при этом в 2-3 раза уменьшается величина объемного износа;

– показано, что при использовании обработанных поверхностей в режиме трущихся пар важную роль играет ориентация неровностей рельефа поверхности относительно заданного направления. Выбор оптимального направления скольжения обеспечивает уменьшение деформационной составляющей силы трения до 20 % и, следовательно, величины износа поверхности;

– при ЭПО происходит заметный сьем металла, закругляются режущие кромки, имеются трудности при обработке изделий сложной формы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлен механизм воздействия плазмы на поверхность металла при обработке, определены ионный состав парогазовой оболочки и элементный состав органических и неорганических загрязнений после обработки в различных технологических средах. Установлено, что в процессе ЭПО снижается количество технологических загрязнений в поверхностных слоях металлов, а глубина их проникновения составляет для стали – до 0,05 мкм, для латуни – 0,01 мкм.

2. Установлено значительное увеличение температуры до 700 °С металлической поверхности прианодной области в начальный период обработки при ЭПО и ее колебательный характер.

3. Разработана методика импульсного возбуждения плазмы в жидких электролитах, с использованием которой разработан процесс модификации латунных поверхностей в электролитной плазме импульсными токами. Использование данной технологии позволяет за счет управления режимами и изменения микропрофиля повысить степень шероховатости поверхности до  $R_a$  0,1...0,3, уменьшить величины контактного сопротивления до 3...4 МОм, объемного износа в 2-3 раза, сократить энергопотребление и время обработки. Определены оптимальные режимы процесса ЭПО. Установлены закономерности изменения свойств и микропрофиля поверхностей материалов в зависимости от условий проведения ЭПО. Показана возможность формирования поверхностей материалов с шероховатостью  $R_a$  0,1...0,2 для углеродистой стали и 0,2...0,3 для латуни, и при этом величины объемного износа исследованных материалов уменьшается в 2-3 раза.

4. Определены закономерности влияния процесса ЭПО на формирование приповерхностных слоев твердых тел, на адгезионные и физико-

механические свойства осажденных на них электрохимическим способом слоев никеля. Показано, что ЭПО улучшает адгезионные свойства поверхности, а для нанесенных на нее никелевых покрытий получены значения шероховатости  $R_a$  0,26...0,29, контактного сопротивления – 2,4...3,3 мОм при сокращении количества технологических операций и вредного воздействия технологических сред на свойства покрытий. Разработаны состав электролита из доступных компонентов ( $NaCl$  – 25...30 г/л,  $NH_4Cl$  – 2 г/л, остальное – вода), обладающий длительной работоспособностью, и технологический процесс модификации поверхностей из углеродистых сталей в стационарной электролитной плазме ( $U_{раб}$  – 160...320 В,  $T_{эл}$  – 60...90 °С,  $t_{обр}$  – 3...7 мин).

### СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. Садовский, Е.Н. Электролитно-плазменная обработка металлов / Е.Н. Садовский // Актуальные вопросы физики и техники: Тезисы докл. к зональному семинару – Гомель, 2015 – С. 91-92.

2. Садовский, Е.Н. Методы снижения энергоемкости процесса электролитно-плазменной обработки металлов / Е.Н. Садовский // Актуальные вопросы физики и техники: Тезисы докл. к зональному семинару – Гомель, 2015 – С. 92-94.