

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 621.923.7

**СИНЬКЕВИЧ**  
**Юрий Владимирович**

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО ПОЛИРОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ  
ИЗ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА, ХРОМА И НИКЕЛЯ**

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук  
по специальности 05.02.07 – Технология и оборудование  
механической и физико-технической обработки

Минск, 2015

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете

Научный  
консультант

**Шелег Валерий Константинович**, член-корреспондент  
НАН Беларуси, доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Технология машиностроения»  
Белорусского национального технического университета

Официальные  
оппоненты:

**Хейфец Михаил Львович**, доктор технических наук,  
профессор, заместитель академика-секретаря отделения  
физико-технических наук НАН Беларуси;

**Чигринова Наталья Михайловна**, доктор технических  
наук, доцент, профессор кафедры «Торговое и рекламное  
оборудование» Белорусского национального техническо-  
го университета;

**Стрельцов Евгений Анатольевич**, доктор химических  
наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрохимия»  
Белорусского государственного университета

Оппонирующая  
организация

Государственное научное учреждение «Объединенный  
институт машиностроения Национальной академии наук  
Беларуси»

Защита состоится «24» апреля 2015 г. в 14<sup>00</sup> часов на заседании совета по  
защите диссертаций Д 02.05.03 при Белорусском национальном техническом  
университете по адресу: 220013, Минск, проспект Независимости, 65, корп.  
1, ауд. 202, тел. ученого секретаря (+375 17) 292-24-04.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского нацио-  
нального технического университета.

Автореферат разослан «20» марта 2015 г.

Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций,  
доктор технических наук, профессор

О.Г. Девойно

© Синькевич Ю.В., 2015

© Белорусский национальный  
технический университет, 2015

## ВВЕДЕНИЕ

Качество, надежность и долговечность изделий существенно зависят от степени совершенства применяемых при их производстве технологий финишной обработки, формирующих качество поверхности. Из отечественного и зарубежного опыта известно, что трудоемкость финишных операций в общей трудоемкости изготовления деталей может превышать 20 %. Сложность и многообразие форм обрабатываемых поверхностей затрудняют создание универсальных способов финишной обработки. Известные методы финишной обработки лезвийными инструментами, связанным и свободным абразивами, поверхностным пластическим деформированием, а также электрохимические и комбинированные методы, позволяющие обеспечить шероховатость поверхности в широком диапазоне значений ( $Ra$  1,60–0,012 мкм), имеют ряд существенных недостатков, к которым относятся многостадийность и большая трудоемкость обработки при повышенных требованиях к качеству поверхности, затруднительность обработки изделий сложной конфигурации при высоких требованиях к точности, формирование в процессе обработки дефектного поверхностного слоя, негативное влияние на физико-механические свойства поверхности и другие.

Одним из перспективных методов финишной обработки металлических изделий является электроимпульсное полирование (ЭИП), обеспечивающее снижение шероховатости поверхности до уровня  $Ra$  0,32–0,06 мкм и характеризующееся экологической безопасностью, стабильностью процесса, высоким качеством, производительностью и низкой себестоимостью обработки. В последнее время вопросам, связанным с исследованием процесса ЭИП и его внедрением в производство, уделяется большое внимание в Беларуси, Болгарии, Германии, Китае, Нидерландах, России, Словакии, США, Украине и других странах. Однако, несмотря на значительный объем исследований физико-химических и технологических аспектов процесса, проведенных учеными разных школ, и большое количество научных публикаций и патентов, широкое внедрение ЭИП в промышленных масштабах для финишной обработки изделий из сплавов на основе железа, хрома и никеля сдерживается отсутствием высокоэффективных технологий и серийного промышленного технологического оборудования, для разработки которых требуется проведение комплексных теоретических и экспериментальных исследований физико-химических процессов, протекающих на обрабатываемой поверхности и в парогазовой оболочке (ПГО), механизмов и основных закономерностей электрической проводимости ПГО, анодного растворения компонентов сплавов, сглаживания неровностей профиля поверхности и формирования топографии, изучение влияния технологических режимов на точность и производительность обработки, качество, механические свойства и эксплуатационные характеристики поверхности деталей. В совокупности эти задачи являются научной базой для решения важной народнохозяйственной проблемы создания комплекса технологических процессов ЭИП и современного технологического оборудования,

обеспечивающих формирование поверхности изделий из сплавов на основе железа, хрома и никеля с заданным комплексом механических свойств, точности, геометрических параметров качества и эксплуатационных характеристик.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Связь работы с научными программами (проектами), темами.** Тема диссертационной работы соответствует приоритетным направлениям фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь, в частности, п.1.3 «Ядерно- и электрофизические методы и технологии в научных исследованиях, промышленности, здравоохранении и сельском хозяйстве» и п.8.6 «Высокоэнергетические процессы в технологической среде и на границе раздела фаз при формообразовании, упрочнении, обработке и испытании материалов, формировании покрытий» Перечня приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2011–2015 годы, утвержденного постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 19.04.2010 г. № 585.

Научные исследования по теме диссертации выполнялись в рамках отдельных проектов и заданий: ГБ 86–17 «Усовершенствовать гибкие технологические системы; разработать технологические методы изготовления прецизионных и упрочнения быстроизнашивающихся деталей» (№ Г.Р. 01.86.0135056, 1986–1990 гг.), ГБ 91–76 «Интенсификация машиностроительного производства на базе создания новых машин, оборудования, технологий и материалов» (№ Г.Р. 02.91.0031366, 1991–1995 гг.), ГБ 06–108 «Электроимпульсное полирование коррозионностойких сталей» (№ Г.Р. 20063476, 2006 г.), ГБ 09–14 «Исследование и разработка процесса электроимпульсного полирования углеродистых конструкционных и коррозионностойких сталей» (№ Г.Р. 200991488, 2009–2010 гг.).

**Цель и задачи исследования.** Целью настоящей работы является разработка теоретических и технологических основ электроимпульсного полирования изделий из сплавов на основе железа, хрома и никеля с обеспечением заданного комплекса механических свойств, точности, геометрических параметров качества и эксплуатационных характеристик поверхности, создание на этой основе и внедрение в производство высокоэффективных технологий электроимпульсного полирования и промышленного оборудования.

Для достижения поставленной цели определены следующие задачи:

- разработать динамическую модель самоорганизованных гидродинамических потоков в электролите, устанавливающую связь между скоростью движения и длиной потоков с физико-механическими свойствами электролита, конфигурацией и размерами обрабатываемой заготовки;
- исследовать характеристики электрического тока, протекающего через парогазовую оболочку, выявить и обосновать механизм электрической проводимости парогазовой оболочки в условиях электроимпульсного полирования;

- установить основные закономерности распределения электрического тока на обрабатываемой поверхности в зависимости от геометрических факторов и напряжения обработки, позволяющие определить степень их влияния на точность обработки при электроимпульсном полировании;

- изучить влияние электроимпульсного полирования на морфологию, фазовый и химический состав поверхности сплавов на основе железа, хрома и никеля, выявить, теоретически и экспериментально обосновать механизмы ионизации основных компонентов сплавов и съема металла с обрабатываемой поверхности;

- изучить основные закономерности сглаживания неровностей профиля поверхности, установить механизм формирования топографии, вывести математические зависимости, устанавливающие связь между величиной параметров шероховатости, связанных с высотными свойствами неровностей профиля поверхности ( $Ra$ ,  $Rz$ ,  $Rmax$ ), и съема металла с уровнем шероховатости поверхности, температурой электролита и продолжительностью обработки и разработать алгоритм для автоматизированного назначения технологических режимов электроимпульсного полирования изделий из сплавов на основе железа, хрома и никеля;

- исследовать влияние электроимпульсного полирования на механические свойства и эксплуатационные характеристики поверхности изделий из сплавов на основе железа, хрома и никеля;

- разработать и внедрить в производство технологические процессы электроимпульсного полирования изделий из сплавов на основе железа, хрома и никеля и промышленное оборудование, обеспечивающие формирование поверхности с заданным комплексом механических свойств, точности, геометрических параметров качества и эксплуатационных характеристик.

**Научная новизна.** Разработаны основы теории электроимпульсного полирования сплавов на основе железа, хрома и никеля, устанавливающие взаимосвязь между электрохимическим поведением компонентов сплавов и характером физико-химических процессов, протекающих на обрабатываемой поверхности, с химическим составом и величиной pH водного раствора электролита, напряжением обработки и температурой электролита.

Установлены основные закономерности электрической проводимости парогазовой оболочки и предложена концептуальная модель коммутационного механизма ее электрической проводимости в условиях электроимпульсного полирования, базирующаяся на динамической модели самоорганизованных гидродинамических потоков в электролите и результатах экспериментальных исследований характеристик электрического тока в парогазовой оболочке и его распределения на обрабатываемой поверхности.

Установлены основные закономерности формирования профиля поверхности и топографии при электроимпульсном полировании сплавов на основе железа, хрома и никеля, предложены геометрическая модель формирования профиля, математические зависимости и алгоритм для автоматизированного назначения технологических режимов обработки.

Результаты экспериментальных исследований влияния электроимпульсного полирования на блеск, твердость и эксплуатационные характеристики поверхности изделий из сплавов на основе железа, хрома и никеля.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты экспериментальных исследований морфологии, структуры и химического состава электроимпульсно полированной поверхности углеродистых конструкционных и коррозионностойких сталей, устанавливающие взаимосвязь между электрохимическим поведением компонентов сплавов на основе железа, хрома и никеля и характером физико-химических процессов, протекающих на обрабатываемой поверхности, с химическим составом и величиной рН водного раствора электролита, напряжением обработки и температурой электролита, что впервые позволило представить и обосновать процесс съема металла с поверхности в условиях электроимпульсного полирования как процесс анодного растворения компонентов сплавов, протекающий в области смешанной электрохимической и диффузионной кинетики по механизму комплексообразования через ряд последовательных или последовательно-параллельных промежуточных стадий.

2. Динамическая модель самоорганизованных гидродинамических потоков в электролите, основанная на дифференцированном теоретическом анализе движения основных гидродинамических потоков и устанавливающая связь между скоростью движения и длиной потоков с физико-механическими свойствами электролита (температурой и кинематической вязкостью), конфигурацией и размерами обрабатываемой заготовки, что позволяет расширить область применения традиционных технологий электроимпульсного полирования и разработать новые технологии с использованием свободных и затопленных струй и методом прокатки электролита.

3. Результаты теоретических и экспериментальных исследований электрической проводимости парогазовой оболочки, устанавливающие взаимосвязь между режимами электроимпульсного полирования (напряжением обработки и температурой электролита) с характеристиками электрического тока (уровнем квазипостоянной и параметрами высокочастотной составляющих тока), что позволило разработать концептуальную модель коммутационного механизма электрической проводимости парогазовой оболочки, согласно которой электрический ток, имеющий в своем составе квазипостоянную и высокочастотную составляющие, обеспечивается за счет ионной проводимости в электролитных мостиках, коммутирующих парогазовую оболочку, и ионной проводимости газовой фазы парогазовой оболочки, и рассчитывать вклад ионной проводимости в электролитных мостиках в суммарный ток, протекающий через парогазовую оболочку.

4. Результаты экспериментальных исследований влияния геометрических факторов и напряжения обработки на распределение электрического тока на обрабатываемой поверхности в условиях электроимпульсного полирования, которые позволили установить степень влияния геометрических факторов обработки (конфигурации, размеров электролитической ячейки и электродов,

взаимного расположения электродов относительно друг друга и относительно стенок ячейки) и физико-механических свойств электролита (температуры, электропроводности и плотности) на точность обработки.

5. Результаты экспериментальных исследований динамики изменения параметров шероховатости и формирования топографии при электроимпульсном полировании углеродистых конструкционных и коррозионностойких сталей, устанавливающие связь между природой обрабатываемого сплава, химическим составом, величиной pH и температурой водного раствора электролита, уровнем шероховатости исходной поверхности и продолжительностью обработки, позволившие разработать геометрическую модель формирования профиля поверхности в процессе обработки и установить, что формирование профиля в процессе обработки происходит вследствие равновероятного сглаживания систематических и случайных неровностей профиля с одновременным снижением высоты неровностей, увеличением радиусов выступов и впадин и уменьшением угла наклона профиля, приводя к топографии, сформированной сглаженными систематическими неровностями с большим периодом, причем в структуре случайных неровностей доминирующее положение занимают неровности, обусловленные микроструктурой обрабатываемого сплава, проявившейся на поверхности вследствие селективного анодного растворения компонентов сплава.

6. Математические зависимости, устанавливающие связь между величиной параметров шероховатости, связанных с высотными свойствами неровностей профиля поверхности ( $Ra$ ,  $Rz$ ,  $Rmax$ ), и съема металла с уровнем шероховатости поверхности, температурой электролита и продолжительностью обработки, что позволило осуществить обоснованный выбор режимов обработки, разработать алгоритм и программное обеспечение для автоматизированного назначения технологических режимов электроимпульсного полирования изделий из сплавов на основе железа, хрома и никеля.

7. Результаты экспериментальных исследований влияния электроимпульсного полирования на блеск, твердость и эксплуатационные характеристики поверхности изделий из сплавов на основе железа, хрома и никеля, позволившие установить, что при электроимпульсном полировании наиболее выраженный эффект на повышение блеска вследствие снижения рассеивания света оказывает сглаживание местных выступов профиля поверхности, на твердость поверхности влияет природа обрабатываемого сплава, химический состав электролита и вид предварительной термической обработки, значительно повышается коррозионная стойкость поверхности углеродистых конструкционных и коррозионностойких сталей, у коррозионностойких сталей отсутствует склонность к межкристаллитной коррозии, по сравнению с тонким шлифованием и механическим полированием обеспечивается наименьший коэффициент трения в условиях трения скольжения с достаточной подачей смазочного материала в зону трения, снижаются удельные потери на перемагничивание у разрезных витых ленточных магнитопроводов трансформаторов, повышает-

ся адгезионная прочность и качество гальванических хромовых покрытий и улучшается внешний вид изделий.

**Личный вклад соискателя ученой степени.** Постановка цели и задач исследования, выбор методологии их решения и все научные результаты, вошедшие в диссертацию, выполнены и получены соискателем лично. Основные теоретические и экспериментальные исследования, приведенные в диссертации, выполнены соискателем лично или под его научным руководством. Опубликованные по теме диссертации работы написаны соискателем после анализа и обсуждения полученных данных с соавторами работ, основными из которых являются [Авсеевич О.И.], Беляев Г.Я., Головкина Е.Я., Иванова Н.П. (БГТУ), Шелег В.К. и Янковский И.Н. На все совместно опубликованные с соавторами работы в тексте диссертации и автореферате приведены ссылки. Теоретические исследования физико-химических процессов проводились совместно с канд. физ.-мат. наук [Авсеевичем О.И.] и канд. хим. наук Ивановой Н.П. В подготовке, проведении и обработке результатов экспериментов принимали участие канд. техн. наук Янковский И.Н., инженеры Брень А.Л., Гриневич А.А., Дроздов П.Г. и Тимошевич В.Б. Конструкции установок электроимпульсного полирования разработаны совместно с инженерами Василевским В.Е., Голышевым Б.А., Краснихиным В.Н. и другими. Параметрическая оптимизация конструкции электролитической ванны установки электроимпульсного полирования выполнена совместно с канд. техн. наук Довнартом С.С. Консультации и практическую помощь на всех этапах выполнения диссертационной работы оказывал Шелег В.К.

**Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов.** Основные положения и результаты диссертации доложены и обсуждены на следующих международных и республиканских научно-технических конференциях, симпозиумах и семинарах: «Интенсификация и автоматизация отделочно-зачистной обработки деталей машин» (Ростов-на-Дону, 1988 г.), «Вакуумные покрытия – 88» (Минск, 1988 г.), «Прогрессивные методы получения конструкционных материалов и покрытий, повышающих долговечность деталей машин» (Волгоград, 1988; 1989 гг.), «Механика, кибернетика» (Минск, 1989 г.), «Нестандартное оборудование, оснастка, механизация и прогрессивная технология машиностроительного производства» (Владимир, 1989 г.), «Повышение эффективности применения электрофизических и электрохимических методов обработки материалов» (Ленинград, 1990 г.), «Упрочнение и защита поверхностей газотермическим и вакуумным напылением» (Киев, 1991 г.), «Современные материалы, оборудование и технологии упрочнения и восстановления деталей машин» (Новополоцк, 1993 г.), «Состояние и перспективы развития науки и подготовки инженеров высокой квалификации в Белорусской государственной политехнической академии» (Минск, 1995 г.), «Современные направления развития производственных технологий и робототехника» (Могилев, 1999 г.), «Наука и технологии на рубеже XXI века» (Минск, 2000 г.), «Машиностроение и техносфера XXI века» (Севастополь, 2001; 2006;

2007 г.), «НИРС–2003» (Минск, 2003 г.), «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности» (Могилев, 2005 г.), «Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации и модернизации машин» (Новополоцк, 2007; 2009 гг.), «Современные методы и технологии создания и обработки материалов» (Минск, 2008; 2010 гг.), «Перспективные материалы и технологии» (Витебск, 2009; 2011; 2013 гг.), «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии в машиностроении» (Минск, 2010 г.), «Перспективы развития тактики, инженерного и технического обеспечения боевых действий, модернизация средств вооруженной борьбы» (Минск, 2010 г.), «Автоматизация технологических процессов» (Минск, 2011 г.), «I форум Союзного государства ВУЗов инженерно-технологического профиля» (Минск, 2012 г.), «Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки» (Минск, 2011; 2013 гг.), «Инновационные технологии в машиностроении» (Новополоцк, 2011; 2013 гг.), «Автоматизация и роботизация процессов и производств» (Минск, 2014 г.).

На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработаны типовые технологические процессы электроимпульсного полирования низколегированных углеродистых и коррозионностойких сталей, разработано и внедрено в производство на более чем 20 предприятиях Беларуси, России и Украины промышленное оборудование для электроимпульсного полирования, в том числе автоматическая линия и пять моделей полуавтоматических установок. Технологии химической очистки и обезжиривания поверхности деталей и узлов, разработанные на базе композиции «Обезжириватель НТ-М» и входящие в состав типовых технологических процессов электроимпульсного полирования в качестве операций «Обезжиривание химическое» и «Промывка», внедрены в производство на более чем 50 предприятиях Беларуси для подготовки поверхности изделий под нанесение различных функциональных покрытий. По разработанным техническим условиям ТУ РБ 100200832.001-2003 на минском предприятии «ЭПОЛ» организовано серийное производство трех модификаций композиции «Обезжириватель НТ-М». Практическая значимость диссертации подтверждена актами и справками на общую сумму более 839 тысяч долларов США в эквиваленте.

**Опубликование результатов диссертации.** По результатам диссертационных исследований опубликовано 92 работы, в том числе 1 монография объемом 18,89 авторских листов, 1 глава в рецензированной монографии коллективного автора и 29 статей в изданиях, соответствующих п.18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, общий объем которых составляет 12,6 авторских листов, а также 1 статья в научно-практическом журнале, 7 статей в периодических сборниках научных трудов, 38 статей и тезисов докладов в сборниках материалов международных и республиканских научно-технических конференций, симпозиумов и семинаров, 1 депонированная работа, 3 информационных листка о научно-техническом достижении, 1 публикация в каталоге научно-технических и инновационных разработок БНТУ, 1 публикация в каталоге экспонатов республи-

ликанской выставки «Инновации для машиностроения», 5 авторских свидетельств, 3 патента Республики Беларусь и 1 патент Российской Федерации общим объемом 15 авторских листов. Разработаны и утверждены технические условия ТУ РБ 100200832.001-2003 на композицию «Обезжириватель НТ-М».

**Структура и объем диссертации.** Диссертация имеет следующую структуру: титульный лист, оглавление, введение, общая характеристика работы, основная часть, содержащая 6 глав, заключение, библиографический список на 37 страницах, включающий 317 наименований использованных источников и список публикаций соискателя ученой степени из 92 наименований, и 9 приложений на 80 страницах. Полный объем диссертации составляет 394 страницы, в том числе 196 страниц текста. Диссертация содержит 127 рисунков и 26 таблиц общим объемом 81 страница.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

**Первая глава** посвящена анализу путей повышения качества поверхности при финишной обработке заготовок из сплавов на основе железа, хрома и никеля. Отмечено, что на выбор метода механической отделочно-зачистной обработки оказывают влияние многочисленные факторы такие, как конфигурация детали, требования к качеству поверхности, точности и производительности обработки, физико-механические свойства поверхности, величина припуска, возможное негативное влияние обработки на формирование дефектного поверхностного слоя и другие. Широкое применение коррозионностойких, жаропрочных, магнитных и других высоколегированных сталей и сплавов, обработка которых механическими методами затруднена или невозможна, вызывает необходимость использования в технологических процессах изготовления деталей электрофизических и электрохимических методов обработки, в частности, химического и электрохимического полирования. Однако их применение в промышленных масштабах резко ограничено в связи с использованием высоко агрессивных, токсичных рабочих растворов, сложностью их корректировки, регенерации и достижения заданной точности обработки. Показано, что альтернативным методом является ЭИП, обладающее экологической безопасностью, малостадийностью и широкими технологическими возможностями.

Проведенный анализ литературных данных выявил значительное количество факторов, влияющих на стабильность процесса ЭИП, производительность, качество и точность обработки, а также отсутствие комплексного подхода в их изучении, недостаточность и противоречивость имеющихся экспериментальных данных. Так, отсутствуют систематизированные экспериментальные данные о влиянии технологических режимов обработки на динамику изменения параметров шероховатости поверхности при ЭИП изделий из сплавов на основе железа, хрома и никеля, а механизм и основные закономерности формирования топографии в условиях ЭИП не установлены и не изучены. Показано, что анодные процессы и механизмы растворения компонентов сплавов на основе железа, хрома и никеля в условиях ЭИП, тесно коррелированные с

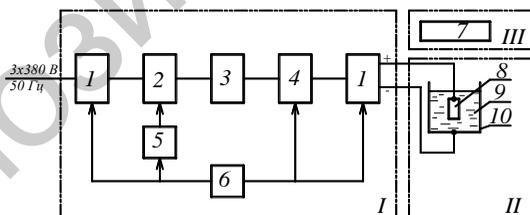
электрической проводимостью ПГО, не установлены и не изучены. Отмечено, что вследствие недостаточной изученности влияния ЭИП на эксплуатационные характеристики поверхности деталей сдерживается широкое применение ЭИП для обработки деталей различного назначения. Показано, что известные установки ЭИП имеют ряд существенных конструктивных недостатков, снижающих качество и производительность обработки, не в полной мере отвечают требованиям охраны труда и промышленной санитарии и не соответствуют современному уровню развития машиностроения.

На основании проведенного анализа сформулирована цель работы и определены задачи, решение которых необходимо для ее достижения.

**Во второй главе** приведено обоснование выбора объектов для исследования, а также описание оборудования и методов исследования.

Из широкой номенклатуры марок сплавов на основе железа, хрома и никеля объектами для исследования выбраны коррозионностойкие (12X18H10T; 20X13 и 40X13) и углеродистые стали (10; 20; 35 и У8А). Выбор марок сталей основывался на необходимости выявления общих физико-химических и технологических закономерностей ЭИП сплавов на основе железа, хрома и никеля и степени применимости этих сталей в машино- и приборостроении, в производстве изделий медицинского назначения, деталей и узлов энергетического и химического оборудования и товаров народного потребления.

Для проведения экспериментальных исследований основных физико-химических и технологических закономерностей ЭИП была спроектирована и изготовлена экспериментальная установка, позволяющая проводить исследование в диапазоне напряжений обработки от 0 до 550 В при стабилизации температуры раствора электролита с точностью  $\pm 1$  °С. Блок-схема экспериментальной установки представлена на рисунке 1.

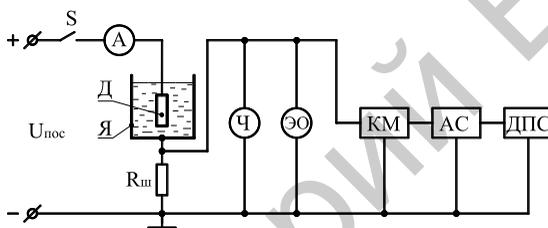


- I** – источник технологического тока; **II** – электролитическая ячейка;  
**III** – вытяжной шкаф; **1** – коммутатор; **2** – блок автотрансформаторов;  
**3** – выпрямитель; **4** – С-фильтр; **5** – электромеханический привод;  
**6** – блок управления и контроля; **7** – система вентиляции; **8** – образец;  
**9** – электролит; **10** – бак термостата

**Рисунок 1.** – Блок-схема экспериментальной установки

При проведении комплексного теоретического и экспериментального исследования использовались стандартные и общепринятые в технических

науках методы исследований, а также новые, разработанные в соответствии с требованиями ГОСТ 8.010-90. Для выявления и анализа самоорганизованных гидродинамических потоков в электролите в раствор электролита вводилась мелкодисперсная диэлектрическая химически нейтральная присадка, обладавшая плавучестью. Визуальное наблюдение за потоками осуществлялось через боковые оптически прозрачные стенки электролитической ячейки. Общая картина движения потоков фиксировалась цифровой видеокамерой DCR-НС 42Е (SONY, Япония) после выхода системы «электролит–ПГО–образец» в квазистационарное состояние, при котором гидродинамические потоки в электролите приобретали установившееся движение. Исследование амплитудных, частотных и спектральных характеристик электрического тока в ПГО проводилось на экспериментальной установке, блок-схема которой представлена на рисунке 2.

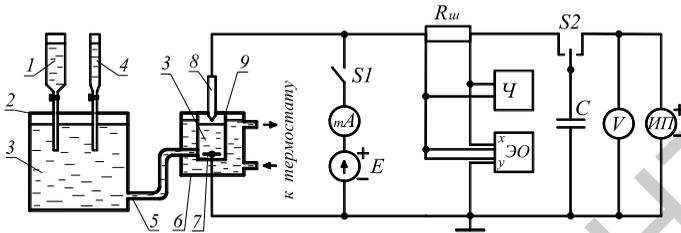


**S** – выключатель; **A** – амперметр постоянного тока; **Д** – образец;  
**Я** – электролитическая ячейка; **R<sub>ш</sub>** – шунт; **Ч** – электронный частотомер;  
**ЭО** – запоминающий осциллограф; **КМ** – магнитофон;  
**АС** – анализатор спектра; **ДПС** – самопишущий потенциометр

**Рисунок 2.** – Блок-схема экспериментальной установки

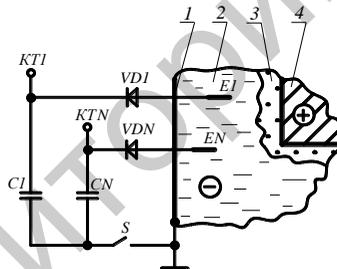
Для измерения толщины ПГО использовалось устройство по авторскому свидетельству 1744437 [82], блок-схема которого представлена на рисунке 3. Изучение равномерности распределения электрического тока на поверхности анода выполнялось по методике определения рассеивающей способности электролита. Исследование электрического поля в электролите выполнялось с помощью устройства, схема которого представлена на рисунке 4. Исследование морфологии, микроструктуры, химического и фазового состава поверхности проводилось на сканирующих электронных микроскопах JSM-5610 LV с системой энергодисперсионного химического микроанализа EDX JED-2201 (JEOL, Япония) и Mira (Tescan, Чехия) с рентгеновским энергодисперсионным спектрометром Inca 350 (Oxford Instruments, Великобритания), на электронном спектрометре ЭС-2401 (СССР), рентгеновском дифрактометре ДРОН 3,0 (СССР) и оптических микроскопах Neophot-21 (Carl Zeiss, Германия) и МКИ-2М-1 (Планар, Беларусь). Изучение механизма и основных технологических закономерностей формирования профиля поверхности выполнялось путем анализа динамики изменения параметров шероховатости и вероятностно-ста-

тистическим методом с помощью корреляционного преобразования профилограмм поверхности.



**S1; S2 – выключатели; mA – миллиамперметр; E – источник ЭДС;**  
 **$R_{ш}$  – шунт; Ч – электронный частотомер; ЭО – запоминающий осциллограф;**  
**C – конденсатор; V – вольтметр; ИП – источник технологического тока;**  
**1; 4 – дозаторы электролита; 2 – расширительная ячейка; 3 – электролит;**  
**5 – трубка; 6 – термостатирующая ячейка; 7 – катод; 8 – анод;**  
**9 – измерительная ячейка**

**Рисунок 3. – Блок-схема устройства для измерения толщины ПГО**



**КТ1–КТN – контрольно-измерительные точки; C1–CN – конденсаторы;**  
**VD1–VDN – диодные ключи; S – выключатель; E1–EN – датчики;**  
**1 – катод; 2 – электролит; 3 – ПГО; 4 – анод**

**Рисунок 4. – Схема устройства для исследования объемного распределения электрических потенциалов в ванне ЭИП (фрагмент)**

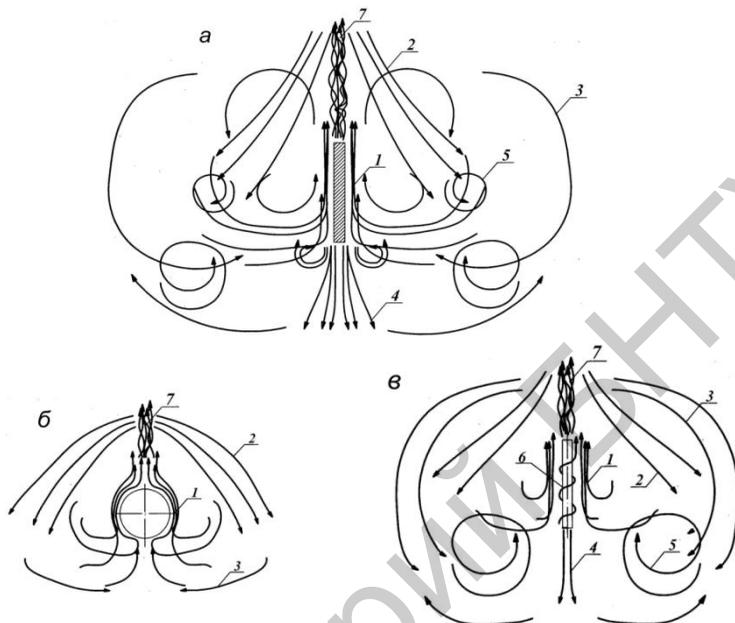
Измерение параметров шероховатости и запись профилограмм производились на профилометрах-профилографах мод. 252 (СССР), M2 (Mahr, Германия) и Talysurf-5 (Rank Taylor Hobson, Англия). Влияние ЭИП на блеск поверхности изучалось в видимой области спектра фотоэлектрическим методом с использованием фотоэлектрического блескомера ФБ-2 (СССР). Производительность обработки оценивалась по величине съема металла на сторону и удельного съема с поверхности, точность обработки – с помощью круглограмм, по которым определялись волнистость и отклонение от круглости поверхности образцов. Запись круглограмм и измерение волнистости и откло-

нения от круглости производились на измерительной системе Talirond-73 (Rank Taylor Hobson, Англия). Измерение величины показателя концентрации водородных ионов (рН) растворов выполнялось потенциометрическим методом с использованием рН-метра-милливольтметра рН-150 (СССР), у которого предел допускаемой абсолютной погрешности при измерении величины рН составляет  $\pm 0,05$ . Изучение влияния ЭИП на твердость поверхности проводилось по методике косоугольного шлифа с использованием микротвердомера ПМТ-3 (СССР). Влияние ЭИП на коррозионную стойкость поверхности сплавов на основе железа, хрома и никеля исследовалось методом изменения массы образца и методом снятия поляризационных кривых потенциостатическим способом с использованием потенциостата ПИ-50-1.1 в комплекте с программатором ПР-8 (СССР). Масса образцов определялась путем взвешивания на аналитических весах ВЛР-200 (СССР) с точностью  $\pm 0,00005$  г. Измерение линейных и диаметральных размеров образцов производилось с помощью штангенциркуля ШЦ-П-125-0,1 (ГОСТ 166-89) и микрометра МК 0-25-0,01 (ГОСТ 6507-90) с ценой деления соответственно 0,1 и 0,05 мм. Оценка стойкости коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т против межкристаллитной коррозии проводилась методом АМУ по ГОСТ 6032-89. Адгезионная прочность гальванических и вакуумно-плазменных покрытий определялась на приборе LSRH (Leybold Heraeus, Германия) по методике царапания покрытия индентором в виде алмазного конуса Роквелла с радиусом вершины 0,2 мм. Сквозная пористость вакуумно-плазменного покрытия TiN определялась методом индикаторных паст по ГОСТ 9.302-88.

**Третья глава** посвящена теоретическому обоснованию и экспериментальному исследованию ЭИП сплавов на основе железа, хрома и никеля.

При ЭИП скорость и направление гидродинамических потоков в электролите оказывают значительное влияние на устойчивость, структуру и толщину ПГО, которые, в свою очередь, оказывают влияние на качество поверхности, точность и производительность обработки. Анализ видеосъемки движения электролита при ЭИП плоского, цилиндрического и сферического образцов показал, что в электролите наблюдаются подобные самоорганизованные гидродинамические потоки и завихрения (рисунок 5), из которых основными, оказывающими наибольшее влияние на структуру ПГО, являются восходящий 1, обратный 2 и торцевой 4 потоки. Остальные потоки являются результатом слияния или разветвления основных потоков. Анализ экспериментальных данных показал, что режим движения основных потоков является ламинарным, для которого характерно устойчивое течение элементарных струек, отсутствие их перемешивания и обмена частицами между струйками в потоке.

С целью расширения области применения традиционных технологий ЭИП и разработки новых технологий с использованием свободных и затопленных струй и методом прокачки электролита проведено математическое моделирование самоорганизованных гидродинамических потоков в электролите, основанное на дифференцированном теоретическом анализе их движения.



Наименование потока:

- 1 – восходящий; 2 – обратный; 3 – круговой; 4 – торцевой;  
5 – вихревой; 6 – спиралевидный; 7 – турбулентный

Рисунок 5. – Схема самоорганизованных гидродинамических потоков в электролите при ЭИП плоского (а), сферического (б) и цилиндрического (в) образцов

В результате решения уравнения Бернулли для потока вязкой (реальной) жидкости совместно с уравнением неразрывности потока получены выражения, устанавливающие связь между длиной основных потоков и скоростью их движения с физико-механическими свойствами раствора электролита, конфигурацией и размерами обрабатываемой заготовки. Для обратного и торцевого потоков выражения для расчета длины потока  $l$  от момента его зарождения и до затухания и начальной скорости потока  $v_1$  имеют вид

$$l = \frac{v_1^2 \cdot d^3}{64 \cdot Re \cdot v^2}; v_1 = \sqrt{\frac{64 \cdot Re \cdot v^2 \cdot l}{\left(d_1 + l \cdot \operatorname{tg}(\beta/2)\right)^3 \cdot \left(1 - \frac{A \cdot d_1^4}{\left(d_1 + 2 \cdot l \cdot \operatorname{tg}(\beta/2)\right)^4}\right)}}$$

$$\text{где } A = 1 + \left( 1 - \frac{d_1^2}{\left( d_1 + 2 \cdot l \cdot \operatorname{tg}(\beta/2) \right)^2} \right)^2 \cdot \sin \beta,$$

где  $l$  – длина потока, м;  $v_1$  – начальная скорость потока, м/с;  $d$  – средний диаметр элементарных струек в потоке, м;  $Re$  – число Рейнольдса;  $\nu$  – кинематическая вязкость раствора электролита, м<sup>2</sup>/с;  $d_1$  – диаметр струек в момент зарождения потока, м;  $\beta$  – угол расширения потока, градус.

Для восходящего потока аналогичные выражения имеют вид

$$l = \frac{v_1^2 \cdot D^3}{64 \cdot Re \cdot \nu^2}, \quad v_1 = \sqrt{\frac{64 \cdot Re \cdot \nu^2 \cdot l}{D^3(1 - B^2 \cdot (1 + \xi))}}, \quad \text{где } B = \frac{\left( d - 2 \cdot l \cdot \operatorname{tg}(\beta/2) \right)^2}{D^2},$$

где  $D$  – средний диаметр восходящего потока, м;  $\xi$  – коэффициент местного сопротивления, обусловленного расположением образца в потоке.

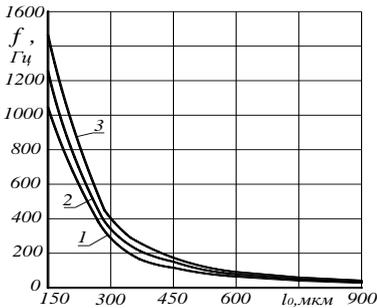
Выполненная численная оценка длины основных потоков от момента их зарождения и до затухания при ЭИП плоского и цилиндрического образцов показала хорошее согласие с экспериментальными данными, что подтверждает адекватность предложенных математических моделей. Математическое моделирование потоков реализовано в способе ЭИП длинномерных изделий по авторскому свидетельству 1630329 [79] и при обработке высокоточных отверстий методом прокачки электролита.

В главе 1 приведено обоснование актуальности исследования стабильности анодного процесса в режиме ЭИП и показано, что ошибки, допущенные на этапах проектирования технологического оборудования или технологического процесса ЭИП, могут привести к невозможности проведения процесса ЭИП и разрушению технологического оборудования. В качестве критерия стабильности анодного процесса принято минимальное значение соотношения площадей поверхностей анода и катода, при котором нет инверсии анодного процесса в катодный. Впервые установлено, что в зависимости от концентрации и температуры раствора электролита, напряжения обработки и условий образования ПГО анодный процесс протекает стабильно в широком диапазоне соотношения площадей. Показано, что при постепенном образовании ПГО около поверхности анода, плавно погружаемого в электролит, площадь поверхности анода может превышать площадь поверхности катода в 15–31 раз. При взрывоподобном образовании ПГО стабильность анодного процесса обеспечивается при превышении площади поверхности катода над площадью поверхности анода более чем в 2,8 раза. Полученные данные позволяют параметрически оптимизировать конструкцию обрабатываемого модуля на этапе проектирования технологического оборудования ЭИП и обеспечить его безопасную работу на этапе эксплуатации при максимальной производительности обработки.

Для электрохимических методов обработки, к которым относится ЭИП, точность и производительность обработки в значительной мере зависят от степени равномерности распределения электрического тока на различных участках обрабатываемой поверхности. Экспериментально установлено, что в условиях ЭИП вследствие образования ПГО электрическое поле в электролите имеет сильно искаженную структуру. При этом основное падение напряжения приходится на прианодную область электролита, примыкающую к ПГО. Так, величина потенциала, измеренная относительно анода на расстоянии 3 мм от его поверхности, превышает 99 % от величины напряжения, поданного на электролитическую ячейку. Благодаря этой особенности процесса ЭИП, геометрические факторы обработки такие, как конфигурация и размер электродов и электролитической ячейки, взаимное расположение электродов относительно друг друга и стенок ячейки не оказывают заметного влияния на равномерность распределения электрического тока на обрабатываемой поверхности и точность обработки. Впервые экспериментально определено, что среднее значение рассеивающей способности электролита превышает 97 %. При этом разница в величине съема металла на сторону для образцов, расположенных на расстоянии 270 и 570 мм от катода, не превышает 4 %. Установлено, что ЭИП снижает отклонение от круглости и волнистость исходной шлифованной цилиндрической поверхности более чем на 10–24 % и 34–41 % соответственно. Отмечено, что на равномерность распределения электрического тока на обрабатываемой поверхности решающее влияние оказывает ПГО, структура и толщина которой являются основными факторами, влияющими на точность обработки.

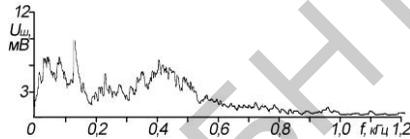
Научная и практическая значимость теоретических и экспериментальных исследований механизма прохождения электрического тока через ПГО вытекает из тесной корреляции электрической проводимости ПГО с основными закономерностями физико-химических процессов, протекающих на поверхности анода и в прианодной области электролита и приводящих к съему металла. На основе разработанной математической модели ПГО, базирующейся на представлении динамической системы «анод–ПГО–электролит» в виде квазистационарной плоскопараллельной модели – аналога плоского конденсатора, теоретически определено (рисунок 6) и экспериментально подтверждено (рисунок 7) наличие низкочастотных колебаний в структуре электрического тока, протекающего через ПГО. Установлено, что в спектре тока, протекающего в ПГО в условиях ЭИП, гармоники тока по амплитуде распределены неравномерно в диапазоне частот от 0,01 до 10 кГц. Гармоники с наибольшими амплитудами сосредоточены в полосе частот от 0,01–0,02 до 0,9–1,2 кГц. На частотах свыше 0,9–1,2 кГц спектры тока подобны спектру белого шума с низким уровнем амплитуд спектральных составляющих. В областях частот 0,05–0,15 кГц и 0,4–0,7 кГц основные гармоники тока сосредоточены в виде совокупных пиков, амплитуда которых зависит от условий проведения процесса обработки. Установлено, что увеличение температуры электролита, напряжения обработки, площади обрабатываемой поверхности и принудительное перемешивание

электролита приводят к росту уровня совокупного пика основных гармоник тока в области частот от 0,4 до 0,7 кГц.



**Напряжение обработки, В:**  
1 – 250; 2 – 300; 3 – 350

**Рисунок 6. – Зависимость частоты низкочастотных колебаний тока от толщины ПГО**



**Рисунок 7. – Спектр электрического тока в ПГО, полученный при  $U = 300 \text{ В}$ ,  $T_{\text{эл}} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$**

Показано, что амплитуды совокупных пиков основных гармоник и гармоник тока, кратных частоте сети, также зависят от параметров выходного сглаживающего фильтра источника технологического тока. Отмечено, что повышение уровня основных гармоник и гармоник тока, кратных частоте сети, оказывает негативное влияние на устойчивость процесса ЭИП.

Экспериментально установлено, что при анодной обработке в режимах электролитно-плазменного нагрева, электрогидродинамическом и электролитно-разрядном в структуре электрического тока, протекающего через ПГО, наряду с квазипостоянной составляющей присутствует высокочастотная составляющая тока с разными уровнями амплитуды и частоты, причем наибольший уровень амплитуды высокочастотной составляющей наблюдается в электрогидродинамическом режиме (режим ЭИП) при напряжении обработки 300 В. Определено, что частота высокочастотной составляющей для исследованных диапазонов параметров обработки ( $T_{\text{эл}} = 50\text{--}90 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $U = 125\text{--}400 \text{ В}$ ;  $S_{\text{обр}} = 2,5\text{--}16 \text{ см}^2$ ) возрастает при увеличении температуры электролита и снижается при увеличении напряжения обработки и площади обрабатываемой поверхности.

На основе разработанных математических моделей самоорганизованных гидродинамических потоков в электролите и ПГО и полученных экспериментальных данных о параметрах электрического тока в ПГО предложена концептуальная модель коммутационного механизма электрической проводимости ПГО в условиях ЭИП, согласно которой электрический ток протекает в ПГО вследствие ионной проводимости электролита в основных и дополнительных электролитных мостиках, замыкающих ПГО, и ионной проводимости газовой

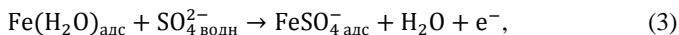
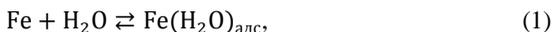
фазы ПГО. При этом основной вклад (более 90 %) в суммарный электрический ток вносит ток, протекающий в электролитных мостиках. Квазипостоянная составляющая тока представляет собой композицию из перекрывающихся во времени импульсов тока в основных электролитных мостиках, коммутирующих ПГО с частотой порядка 0,01–0,9 кГц, и тока в газовой фазе ПГО. Высокочастотная составляющая тока, обусловленная ионной проводимостью электролита в дополнительных электролитных мостиках, коммутирующих ПГО с частотой порядка 2,5 МГц, является составной частью импульсов тока в основных электролитных мостиках. Показано, что аномально высокая электропроводность электролита в электролитных мостиках обусловлена высокой подвижностью ионов вследствие сверхбыстрого разогрева электролита джоулевым теплом и реализацией эффекта Вйна, проявляющегося при напряженности электрического поля свыше  $10^5$  В/м. Отмечено, что образование и обновление ПГО не связано с пузырьковым или пленочным кипением электролита, а вызвано тепловым взрывным механизмом разрушения электролитных мостиков. Вибрация ПГО и самоорганизованные гидродинамические потоки в объеме электролита являются результатом воздействия на приграничный с ПГО слой электролита ударных волн от взрывов электролитных мостиков и схлопывания кавитационных пузырьков в микропотоках в тонком приграничном с ПГО слое электролита.

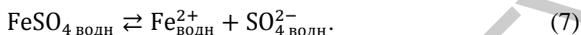
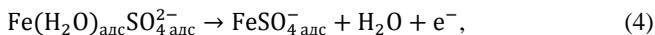
В условиях ЭИП механизм формирования топографии включает в себя комплекс взаимосвязанных физико-химических процессов. По этой причине для установления механизма и основных закономерностей съема металла при ЭИП сплавов на основе железа, хрома и никеля были проведены экспериментальные исследования, которые позволили установить степень влияния состава и концентрации раствора электролита и технологических режимов ЭИП на выход металла по току, морфологию, микроструктуру, фазовый и химический состав поверхности. Установлено, что при ЭИП углеродистых сталей 10; 20; 35 и У8А напряжение обработки и температура электролита оказывают незначительное влияние на выход металла по току в расчете на  $Fe^{2+}$ , что свидетельствует о едином механизме анодного растворения этих сталей. Высокие значения выхода по току (147–171 %) указывают на то, что механизм растворения железа при ЭИП углеродистых сталей включает электрохимическую и химическую стадии, а поверхностные пленки имеют незначительную толщину и обладают высокой ионной проводимостью. Анализ полученных данных о химическом составе сверхтонкого поверхностного слоя (толщиной до 20 Å) коррозионностойких сталей 20X13 и 12X18Н10Т показал, что поверхностные пленки имеют сложный химический состав. После ЭИП концентрация кислорода на поверхности снижается в среднем на 17,6 масс. % для стали 20X13 и 35,1 масс. % для стали 12X18Н10Т и стабилизируется на уровне 5,7–11,0 масс. %. Количество оксидов изменяется более сложным образом – концентрация оксидов хрома возрастает в среднем на 45,0 масс. % для стали 20X13 и 90,5 масс. % для стали 12X18Н10Т, а количество железо-хромового оксида снижается для обеих марок сталей – в среднем на 35,5 масс. % для стали

20Х13 и 50,8 масс. % для стали 12Х18Н10Т. В то же время количество оксидов титана и никеля на поверхности стали 12Х18Н10Т практически не изменяется.

ЭИП коррозионностойких и углеродистых сталей проводится при температуре электролита свыше 60 °С в кислых водных растворах соответственно сульфата и хлорида аммония с  $\text{pH} < 5,5$ , причем при прохождении через раствор некоторого количества электричества  $\text{pH}$  раствора снижается, т.е. раствор дополнительно подкисляется. Анализ данных, полученных в ходе изучения морфологии и определения общего элементного химического состава поверхности, химического состава в пределах одного зерна и на границе зерен, показал, что при ЭИП коррозионностойких и углеродистых сталей анодные процессы, протекающие на обрабатываемой поверхности, обеспечивают съем металла с одновременным формированием поверхностных пленок, которые в зависимости от условий проведения процесса ЭИП могут иметь различную природу и толщину. Полученные данные о содержании серы и хлора в поверхностных пленках свидетельствуют о том, что анодное растворение этих сталей происходит с непосредственным участием анионов раствора электролита.

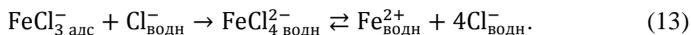
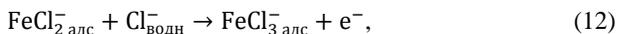
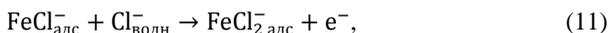
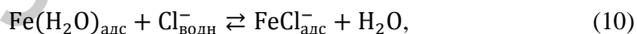
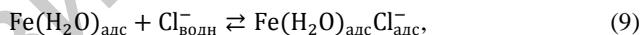
Из литературных источников известно, что на первых стадиях растворения железа в сульфатных или галоидных растворах на поверхности железа происходит образование как адсорбционных комплексов  $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_{\text{адс}}$  с участием хемосорбированных молекул воды, так и короткоживущих адсорбционных комплексов  $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_{\text{адс}}\text{SO}_4^{\text{адс}-}$  или  $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_{\text{адс}}\text{Cl}^{\text{адс}-}$  с участием сульфат- или хлорид-ионов. При этом поверхностные адсорбционные комплексы «металл-вода» образуются на свежесформированной поверхности в водном растворе в течение 0,4 мс для железа и 0,7 мс для никеля. Согласно предложенной модели коммутационного механизма электрической проводимости ПГО и численной оценки, выполненной на основе полученных данных о параметрах электрического тока в ПГО, продолжительность контакта основных электролитных мостиков с обрабатываемой поверхностью в условиях ЭИП составляет 0,71–50,0 мс. Учитывая эти данные, величину  $\text{pH}$  растворов электролита и наличие на полированной поверхности кислорода, серы и хлора, анодное растворение основных компонентов сплавов на основе железа, хрома и никеля в условиях ЭИП может протекать по механизму комплексообразования через ряд последовательных или последовательно-параллельных промежуточных стадий. При ЭИП в водном растворе сульфата аммония растворение железа может протекать по следующей схеме:





В предложенной схеме (1)–(7) на первой быстрой стадии (1) на поверхности железа хемосорбируются молекулы воды с образованием гидрокомплекса железа  $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_{\text{адс}}$ . Затем на быстрой стадии (2) происходит взаимодействие сульфат-иона  $\text{SO}_4^{2-}$  с хемосорбированной молекулой воды с образованием короткоживущего адсорбционного комплекса  $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_{\text{адс}}\text{SO}_4^-$ . Прочный адсорбционный комплекс  $\text{FeSO}_4^-$  образуется на последующих медленных одновременно протекающих параллельных стадиях (3) и (4) по электрохимическому процессу с отдачей аноду одного электрона. Далее на быстрой стадии (5) происходит гидролиз адсорбционного комплекса  $\text{FeSO}_4^-$  с образованием адсорбционного комплекса  $\text{FeOH}_{\text{адс}}$ , который на следующей медленной стадии (6) взаимодействует с сульфат-ионом  $\text{SO}_4^{2-}$  и отдает аноду один электрон, в результате чего образуется растворимая в воде соль железа  $\text{FeSO}_4$ , которая в растворе по реакции (7) диссоциирует на простые ионы  $\text{Fe}_{\text{водн}}^{2+}$  и  $\text{SO}_4^{2-}$ .

При ЭИП в водном растворе хлорида аммония растворение железа может протекать по схеме, включающей следующие стадии:



Согласно предложенной схемы (8)–(13), на поверхности железа первоначально по реакции (8) хемосорбируются молекулы воды с образованием гидрокомплекса железа  $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_{\text{адс}}$ . Затем на одновременно протекающих быстрых параллельных стадиях (9) и (10) происходит взаимодействие адсорбционного комплекса  $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_{\text{адс}}$  с хлорид-ионами  $\text{Cl}_{\text{водн}}^-$ , в результате чего об-

разуются короткоживущие адсорбционные комплексы  $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_{\text{адс}}\text{Cl}_{\text{адс}}^-$  и прочные адсорбционные комплексы  $\text{FeCl}_{\text{адс}}^-$ . Далее следуют последовательные медленные электрохимические стадии (11) и (12), в результате чего на поверхности железа формируется солевая пленка  $\text{Fe}[\text{FeCl}_3]_{\text{адс}}^-$ . На завершающей быстрой стадии (13) происходит образование и переход в раствор хорошо растворимого в воде адсорбционного комплекса  $\text{FeCl}_4^{2-}$  водн с последующим его распадом на простые ионы  $\text{Fe}_{\text{водн}}^{2+}$  и  $\text{Cl}_{\text{водн}}^-$ .

Установлено, что при ЭИП коррозионностойких и углеродистых сталей в водных растворах соответственно сульфата и хлорида аммония анионы электролита играют двоякую роль в механизмах анодного растворения железа. При повышении концентраций сульфата аммония от 2,0 до 6,0 масс. % и хлорида аммония от 1,0 до 4,0 масс. % сульфат- и хлорид-ионы оказывают активирующее действие на процесс растворения железа за счет легкого образования по реакциям (2) и (9) нестабильных поверхностных адсорбционных комплексов  $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_{\text{адс}}\text{SO}_4^{2-}$  адс и  $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_{\text{адс}}\text{Cl}_{\text{адс}}^-$ , которое выражается в росте величины удельного съема металла. Дальнейшее повышение концентраций при низких значениях pH растворов способствует более активному вытеснению сульфат- и хлорид-ионами адсорбированных молекул воды с поверхности железа и активному образованию прочных адсорбционных комплексов  $\text{FeSO}_4^-$  адс и  $\text{FeCl}_{\text{адс}}^-$ , которые блокируют активные центры на поверхности, замедляя процесс растворения железа. Этот эффект более выражен у коррозионностойких сталей.

Показано, что при ЭИП сплавов на основе железа, хрома и никеля в водных растворах солей аммония анодное растворение хрома и никеля в условиях первоначальной хемосорбции молекул воды на поверхности этих металлов может протекать по известным механизмам комплексообразования через образование поверхностных комплексов  $\text{Me}(\text{H}_2\text{O})_{\text{адс}}^{\delta+}$  с частичным переносом заряда электрона.

Известно, что неотъемлемой частью анодного растворения металлов и сплавов являются вторичные анодные процессы, вносящие дополнительный вклад в растворение металлов и компонентов сплавов. Показано, что при ЭИП сплавов на основе железа, хрома и никеля образование оксидов и гидроксидов металлов на поверхности анода возможно по известным электрохимическим процессам, а образующиеся на поверхности оксиды и гидроксиды металлов могут растворяться по химическому или электрохимическому процессам.

**Четвертая глава** посвящена изучению механизма и основных технологических закономерностей формирования качества поверхности при ЭИП углеродистых конструкционных и коррозионностойких сталей.

Анализ данных о динамике изменения параметров шероховатости поверхности  $Ra$ ,  $Rz$  и  $Rmax$  при ЭИП стали 10 показал, что при одинаковом уровне шероховатости исходной поверхности, но при разных значениях температуры электролита характер изменения этих параметров подобен. На рисунке 8 представлены данные о динамике изменения параметра  $Ra$  при шероховатости исходной поверхности  $Ra^{\text{нач}}$  1,25–1,30 мкм.

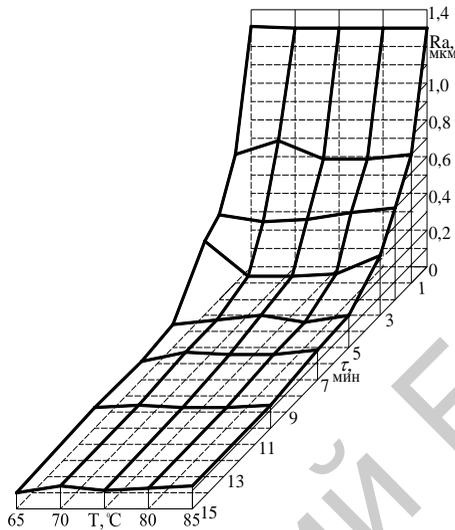


Рисунок 8. – Динамика изменения параметра шероховатости  $Ra$

Экспериментально установлено, что повышение температуры электролита от 65 до 85 °С, несмотря на существенное снижение величины съема металла, не оказывает заметного влияния на эффективность сглаживания неровностей профиля поверхности. Выявленные закономерности следует учитывать при ЭИП высокоточных деталей, поскольку обработка при высокой температуре электролита (свыше 80 °С) позволяет обеспечить заданную шероховатость поверхности при значительно меньшем съеме металла, что повышает точность обработки. Показано, что при обработке углеродистых конструкционных сталей в течение 5–7 мин вне зависимости от уровня шероховатости исходной поверхности и температуры электролита в исследованных диапазонах значений ( $Ra^{нач}$  0,51–1,40 мкм;  $T_{эл}$  = 65–85 °С) обеспечивается достижение практически одинаковых уровней параметров шероховатости ( $Ra$  0,10–0,17 мкм,  $Rz$  0,60–0,99 мкм,  $Rmax$  0,74–1,31 мкм) и относительного сглаживания шероховатости  $\Delta Ra$  = 85–89 %. Следовательно, при ЭИП неотвественных деталей уровень шероховатости исходной поверхности заготовки можно повысить, что позволит снизить стоимость ее предварительной механической обработки и себестоимость изготовления детали в целом при обеспечении заданной шероховатости поверхности. Показано, что увеличение продолжительности обработки свыше 7 мин нецелесообразно, поскольку дальнейшее снижение значений параметров  $Ra$ ,  $Rz$  и  $Rmax$  и повышение относительного сглаживания шероховатости  $\Delta Ra$  относительно достигнутых уровней незначительно.

Экспериментально определено, что при ЭИП стали 20X13 так же, как и при обработке стали 10, зависимости параметров шероховатости  $Ra$ ,  $Rz$  и  $Rmax$  от

продолжительности обработки и температуры электролита подобны, но имеют более выраженный пологий характер. Пологий характер зависимостей обусловлен значительно меньшим съемом металла, который при ЭИП стали 20X13 более чем в 6,5 раза ниже по сравнению с обработкой углеродистых конструкционных сталей. Анализ полученных данных показал, что на сглаживание неровностей профиля стали 20X13 значительное влияние оказывает температура электролита. При этом, чем выше уровень шероховатости исходной поверхности, тем заметнее влияние температуры электролита. Для обеспечения шероховатости на уровне  $Ra$  0,10–0,15 мкм и относительного сглаживания  $\Delta Ra = 75\text{--}85\%$  ЭИП коррозионнотойких сталей следует проводить в течение от 7 до 15 мин при температуре электролита от 65 до 80 °С и шероховатости исходной поверхности менее  $Ra$  1,10–1,40 мкм. Показано, что увеличение продолжительности обработки свыше 15 мин нецелесообразно.

В результате изучения динамики изменения параметров шероховатости  $Ra$ ,  $Rz$  и  $Rmax$  при ЭИП углеродистых конструкционных и коррозионнотойких сталей для описания этих параметров предложено математическое выражение вида

$$P^{кон} = P^{нач} \cdot e^{-k\tau},$$

где  $P^{кон}$  – значение заданного параметра шероховатости поверхности  $Ra$ ,  $Rz$  или  $Rmax$ , мкм;  $P^{нач}$  – значение заданного параметра шероховатости для исходной поверхности, мкм;  $k$  – коэффициент, зависящий от вида обрабатываемого материала и температуры электролита,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $\tau$  – продолжительность обработки, мин.

Данное выражение позволяет с достаточной точностью прогнозировать изменение параметров  $Ra$ ,  $Rz$  или  $Rmax$  в зависимости от вида обрабатываемого материала, уровня шероховатости исходной поверхности и режимов обработки в исследованных диапазонах значений. С другой стороны, по известным значениям параметра шероховатости поверхности детали и заготовки оптимальную продолжительность обработки можно определить из выражения:

$$\tau = -\frac{1}{k} \ln \frac{P^{кон}}{P^{нач}}.$$

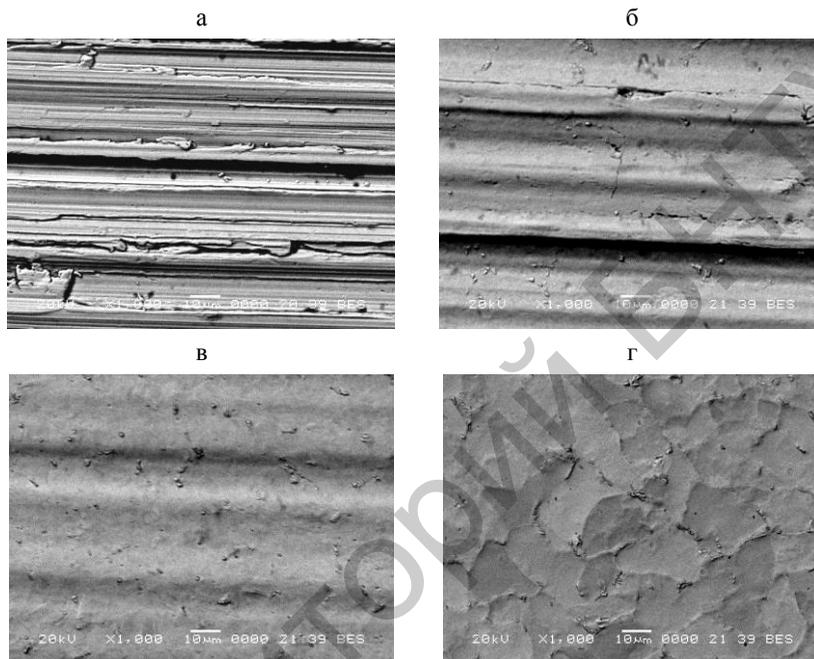
На основе полученных данных о динамике изменения параметров  $Ra$ ,  $Rz$ ,  $Rmax$  и предложенных математических выражений разработан алгоритм и программное обеспечение для автоматизированного назначения технологических режимов ЭИП сплавов на основе железа, хрома и никеля.

Отмечено, что, несмотря на установленные закономерности, параметры шероховатости поверхности, связанные с высотными свойствами неровностей профиля, не дают никакой информации о динамике изменения формы неровностей. По этой причине при изучении механизма и основных закономерностей формирования профиля в условиях ЭИП использовался вероятностно-

статистический метод с применением корреляционного преобразования профилограмм поверхности и изучалась динамика изменения параметров шероховатости, связанных с формой неровностей и их свойствами в направлении длины профиля: среднего шага неровностей  $S_m$ , среднего квадратического наклона профиля  $\Delta q$  и средней квадратической длины волны профиля  $\lambda_q$ . Анализ полученных данных показал, что при ЭИП сплавов на основе железа, хрома и никеля формирование профиля поверхности происходит вследствие вероятного сглаживания систематических и случайных неровностей профиля с одновременным снижением высоты неровностей, увеличением радиусов выступов и впадин и уменьшением наклона профиля. При этом случайные неровности, расположенные на выступах и во впадинах профиля и имеющие существенно меньшие размеры по сравнению с систематическими неровностями, сглаживаются за более короткое время. Установлено, что наибольшая скорость сглаживания систематических и случайных неровностей наблюдается в первые минуты обработки. Показано, что при увеличении продолжительности обработки до 5–10 мин доля случайных неровностей в структуре шероховатости существенно снижается. Дальнейшая обработка приводит к профилю, сформированному сглаженными систематическими неровностями с большим периодом. При этом в структуре случайных неровностей профиля доминирующее положение занимают неровности, обусловленные микроструктурой сплава, проявившейся на полированной поверхности вследствие селективного растворения структурных составляющих сплава.

На основе полученных теоретических и экспериментальных данных предложена геометрическая модель формирования профиля поверхности в условиях ЭИП на примере сглаживания единичного выступа. Согласно модели, профиль исходной поверхности, сформированный в результате механической обработки, представляет собой композицию из различных по высоте и ширине основных выступов и впадин и местных выступов, расположенных на основных выступах и впадинах профиля. В процессе ЭИП растворение основного и местных выступов происходит с равной вероятностью, в результате чего основной и местные выступы сглаживаются, что приводит к постепенному увеличению ширины выступа на средней линии профиля и уменьшению угла наклона боковых линий выступа. Продолжение обработки приводит к полному растворению местных выступов. При этом ширина выступа на средней линии профиля достигает максимального значения. Дальнейшая обработка способствует дополнительному сглаживанию выступа, уменьшению его высоты и ширины на средней линии профиля и угла наклона боковых линий выступа. Выступ так же, как и профиль поверхности, становится гладким и пологим. При продолжении обработки наступает момент, когда средний квадратический наклон профиля поверхности достигает минимально возможного значения, которое в большей мере определяется не столько наклоном боковых линий не полностью растворившихся выступов профиля, сколько средним квадратическим наклоном профиля поверхности элементов микроструктуры сплава, проявившейся на полированной поверхности вследствие селективного растворе-

ния структурных составляющих сплава. Адекватность предложенной модели подтверждают фотографии поверхности образца из стали 20, представленные на рисунке 9.



Продолжительность ЭИП, с: исходная поверхность (а); 20 (б); 40 (в); 300 (г)

Рисунок 9. – Эволюция топографии в процессе ЭИП (x1000)

Экспериментально установлено, что при ЭИП углеродистых конструкционных и коррозионноустойчивых сталей повышение блеска поверхности обеспечивается в результате сглаживания неровностей профиля, приводящего к нивелированию структуры шероховатости и снижению рассеивания света. Показано, что наиболее выраженный эффект на повышение блеска оказывает сглаживание местных выступов профиля, обеспечивающее высокий уровень блеска за относительно короткое время обработки (от 1 до 3 мин). Отмечено, что сглаживание основных выступов и впадин, способствуя формированию гладкого, пологого профиля, обеспечивает высокий уровень блеска поверхности на более продолжительных интервалах времени. Установлено, что для обеспечения уровня блеска, близкого к максимально возможному значению, равному 60 % для стали 10 и 55 % для стали 20Х13, обработку изделий из этих сталей следует проводить соответственно в течение от 2 до 10 и от 3 до 15 мин.

В результате изучения влияния ЭИП на твердость поверхности образцов из сталей 20; У8А и 40Х13, прошедших предварительную термическую обработку, установлено, что ЭИП не влияет на твердость поверхности коррозионно-стойкой стали, в то время как твердость полированной поверхности углеродистых сталей зависит от вида предварительной термической обработки. Так, ЭИП не влияет на твердость поверхности стали У8А, прошедшей закалку с последующим отпуском, в то время как полирование нормализованной или отожженной стали У8А снижает микротвердость поверхностного слоя соответственно от 375 МПа на поверхности до 75 МПа на глубине 15 мкм и от 255 МПа на поверхности до 38 МПа на глубине 35 мкм. Наибольшее снижение микротвердости установлено у отожженной стали 20, которое составляет от 500 МПа на поверхности до 100 МПа на глубине 25 мкм. Снижение микротвердости связано с известным эффектом обезуглероживания тонкого поверхностного слоя при обработке углеродистых сталей в водном растворе хлорида аммония.

**В пятой главе** приведены результаты исследования влияния ЭИП на эксплуатационные характеристики поверхности деталей из сплавов на основе железа, хрома и никеля. Установлено, что ЭИП не вызывает склонности к межкристаллитной коррозии у коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т и значительно повышает коррозионную стойкость поверхности углеродистых конструкционных и коррозионно-стойких сталей. Так, ЭИП образцов из сталей 10 и 20Х13 по сравнению с электрохимическим полированием и шлифованием снижает скорость коррозии соответственно более чем в 3,5 и 5,6 раз для стали 10 и 1,4 и 2,0 раза для стали 20Х13.

Экспериментально определено, что в условиях трения скольжения с достаточной подачей смазочного материала в зону трения ЭИП закаленной стали 40Х13 до  $Ra$  0,18 мкм обеспечивает наименьший коэффициент трения, равный 0,09–0,13, по сравнению с тонким шлифованием до  $Ra$  0,22 мкм и механическим полированием до  $Ra$  0,12 мкм, который ниже соответственно более чем на 29 и 6 % в начале трибологического испытания и 47 и 12 % в конце испытания. Отмечено, что этот эффект связан с формированием в процессе ЭИП благоприятной топографии, включающей случайные неровности, обусловленные проявившейся на поверхности микроструктурой вследствие селективного растворения компонентов стали, в результате чего поверхность хорошо удерживает смазочный материал. Показано, что этап приработки продолжительностью до 12,5 мин наблюдается только для механически обработанных поверхностей.

Определено, что ЭИП плоскости реза разрезных витых ленточных магнитопроводов трансформаторов в течение от 0,5 до 1,0 мин снижает удельные потери на перемагничивание на 25–30 % вследствие удаления с поверхности реза дефектного слоя металла и заусенцев, замыкающих примыкающие пластины.

Установлено, что ЭИП подложки существенно повышает адгезионную прочность и качество гальванических и вакуумно-плазменных покрытий. В ча-

стности, по сравнению с гальваническим хромовым покрытием, нанесенным на шлифованную подложку из стали 10, ЭИП подложки в течение 7 мин повышает адгезионную прочность более чем на 17 % (с 648 до 764 МПа), снижает количество сфероидов в покрытии на 65–75 % и улучшает его внешний вид. На основе полученных данных разработан способ подготовки металлических поверхностей перед нанесением вакуумно-плазменных покрытий (авторское свидетельство 1662123 [80]).

**В шестой главе** приведены результаты разработки и практической реализации оборудования и технологий ЭИП сплавов на основе железа, хрома и никеля. На основе результатов проведенных исследований разработаны технологии ЭИП сплавов на основе железа, хрома и никеля с обеспечением заданного комплекса механических свойств, точности, геометрических параметров качества и эксплуатационных характеристик поверхностей деталей, оформленные в виде типовых технологических процессов ЭИП низколегированных углеродистых (АТЮФ.02275.00001) и коррозионностойких (АТЮФ.02275.00002) сталей. Для реализации в промышленных масштабах разработанных технологий ЭИП в период с 1988 по 2001 гг. было спроектировано, изготовлено и внедрено в производство три модели полуавтоматических установок ЭИП (мод. УЭИП-70 (КД УЭИП70-00.00.000), ЭПОЛ-5Н (КД 5Н0228-40.00.000) и ЭИП-1 (КД ЭИУ01-00.00.000) и автоматическая линия мод. ЭИП-1АЛ (КД ЭИП1.00.00.000). Разработанные технологии и оборудование внедрены в производство более чем на 20 предприятиях Беларуси, России и Украины, в том числе на Минском механическом заводе им. С.И. Вавилова, Медико-инструментальном заводе им. В.И. Ленина (г. Ворсма), в ПО «Система» (г. Калининград), АО «Машиностроительный завод» (г. Электросталь) и других. Практическая значимость результатов проведенных исследований подтверждена бронзовой медалью ВДНХ СССР (1987 г.), дипломом и серебряной медалью VIII Московского международного салона инноваций и инвестиций (ВВЦ, 2008 г.) и дипломами международных выставок (2008–2012 гг.). Мировую новизну разработанных технических решений подтверждают 5 авторских свидетельств [78–82], 3 патента Республики Беларусь [84–86] и 1 патент Российской Федерации [83].

Результаты проведенных исследований процесса ЭИП и комплексный подход к разработке технологического оборудования, реализованный в период с 2002 по 2012 гг., послужили основой для создания современных, высокоэффективных промышленных полуавтоматических установок ЭИП нового модельного ряда ЭПОЛ-6Н: мод. ЭПОЛ-6Н-200 (КД ИЛГВ.02.00.000) и ЭПОЛ-6Н-500 (КД ИЛГВ.01.00.000). На основании результатов компьютерного моделирования электролитической ванны установок методом конечных элементов выполнена параметрическая оптимизация конструкции ванны и разработана технология ее сборки, предотвращающая развитие коррозионной усталости в сварных швах в процессе эксплуатации ванны. Установки внедрены в производство в АО «Машиностроительный завод» (г. Электросталь) и на РУП «140 ремонтный завод» (г. Борисов).

Проведены исследования и определены перспективные области применения разработанных технологий ЭИП сплавов на основе железа, хрома и никеля – для финишной обработки высокоточных деталей и узлов, удаления заусенцев, обработки отверстий и совмещенной очистки-полирования. Разработанные технологии удаления заусенцев и ЭИП высокоточных деталей и сборочных единиц внедрены на Минском механическом заводе им. С.И. Вавилова и в АО «Машиностроительный завод» (г. Электросталь). Показано, что технологии химической очистки и обезжиривания поверхности деталей и узлов, разработанные на базе композиции «Обезжириватель НТ-М» и входящие в состав типовых технологических процессов ЭИП в качестве операций «Обезжиривание химическое» и «Промывка», могут использоваться для химической очистки поверхности деталей и узлов от загрязнений значительной толщины и низкотемпературной (от +5 °С) подготовки деталей под нанесение различных функциональных покрытий. Технология химической очистки деталей и узлов оборудования для крекинга нефти и котла подогревателя танка Т-72Б, внедренная в ремонтном производстве Мозырского нефтеперерабатывающего завода и войсковой части 42715 (Беларусь), позволила исключить валютные затраты на импорт новых деталей и узлов. Технологии химического обезжиривания поверхности деталей перед нанесением функциональных покрытий внедрены более чем на 50 предприятиях Беларуси, в том числе в ОАО «Амкор», ОАО «Борисовский завод «Автогидроусилитель», СП ОАО «Брестгазоаппарат», на РУП «Гомсельмаш» и других. В 2003 г. на минском предприятии «ЭПОЛ» по разработанным техническим условиям ТУ РБ 100200832.001-2003 организовано серийное производство композиции «Обезжириватель НТ-М», объем производства которой в 2011–2012 гг. составил более 51 т на общую сумму 1199,2 млн рублей в сопоставимых ценах на 02.05.2013 г. (138311 долларов США в эквиваленте). Суммарный годовой экономический эффект от внедрения разработанных технологий и оборудования за период 1988–2012 гг. в сопоставимых ценах на 02.05.2013 г. составил 1873,1 млн рублей (216044 доллара США в эквиваленте). При этом стоимость разработок и работ по их внедрению в производство в сопоставимых ценах на 02.05.2013 г. составила 4205,1 млн рублей (485022 доллара США в эквиваленте).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Разработаны основы теории электроимпульсного полирования сплавов на основе железа, хрома и никеля, устанавливающие взаимосвязь между электрохимическим поведением компонентов сплавов и характером физико-химических процессов, протекающих на обрабатываемой поверхности, с химическим составом и величиной рН водного раствора электролита, напряжением обработки и температурой электролита, что впервые позволило представить и обосновать процесс съема металла в условиях электроимпульсного полирования как процесс анодного растворения компонентов сплавов, протека-

ющий в области смешанной электрохимической и диффузионной кинетики по механизму комплексообразования через ряд последовательных или последовательно-параллельных промежуточных стадий. Теоретически и экспериментально обосновано, что на первой стадии растворения на поверхности железа, хрома и никеля образуются адсорбционные комплексы с участием хемосорбированных молекул воды. Экспериментально доказано, что в последующих стадиях принимают участие анионы раствора электролита и (или) молекулы воды. На заключительной стадии на обрабатываемой поверхности образуются растворимые в воде соединения, которые при переходе в раствор диссоциируют на простые ионы. Установлено, что растворение сплавов происходит в результате селективного растворения структурных составляющих сплавов, а диффузионные ограничения возникают вследствие затрудненного ионного массопереноса через поверхностные солевые, оксидные и гидроксидные адсорбционно-фазовые пленки. При этом в растворении компонентов сплавов существенную роль играют химические процессы [1–3, 13–15, 19, 20, 37, 42, 43, 45, 47, 49, 62, 64, 67, 76, 81, 83, 84, 88].

2. На основе разработанной динамической модели самоорганизованных гидродинамических потоков в электролите, устанавливающей взаимосвязь между скоростью движения и длиной основных потоков с физико-механическими свойствами электролита, конфигурацией и размерами обрабатываемой заготовки, математической модели парогазовой оболочки, базирующейся на представлении динамической системы «анод–парогазовая оболочка–электролит» в виде квазистационарной плоскопараллельной модели – аналога плоского конденсатора, и изучения характеристик электрического тока предложена концептуальная модель коммутационного механизма электрической проводимости парогазовой оболочки в условиях электроимпульсного полирования, согласно которой электрический ток, имеющий в своем составе квазипостоянную и высокочастотную составляющие, обеспечивается за счет ионной проводимости в электролитных мостиках (более 90 % от силы тока), коммутирующих парогазовую оболочку, и ионной проводимости газовой фазы парогазовой оболочки. Квазипостоянная составляющая представляет собой композицию из перекрывающихся во времени импульсов тока в основных электролитных мостиках, коммутирующих парогазовую оболочку с частотой 0,01–0,9 кГц, и тока в газовой фазе парогазовой оболочки. Высокочастотная составляющая тока, обусловленная ионной проводимостью электролита в дополнительных электролитных мостиках, коммутирующих парогазовую оболочку с частотой порядка 2,5 МГц, является составной частью импульсов тока в основных электролитных мостиках. Теоретически обосновано, что аномально высокая электропроводность электролита в электролитных мостиках обусловлена высокой подвижностью ионов вследствие сверхбыстрого разогрева электролита джоулевым теплом и реализацией эффекта Вина, проявляющегося при напряженности электрического поля свыше  $10^5$  В/м. Показано, что образование и обновление парогазовой оболочки обеспечивается тепловым взрыв-

ным механизмом разрушения электролитных мостиков [2, 9, 11, 16–18, 23, 28, 30, 32, 34, 38, 52, 53, 55, 61, 70, 74, 77, 79, 82, 85–88].

3. В результате изучения влияния распределения электрического тока на обрабатываемой поверхности при электроимпульсном полировании на точность обработки установлено, что падение напряжения на парогазовой оболочке превышает 99 % от величины напряжения, поданного на электролитическую ячейку, вследствие чего геометрические факторы обработки (конфигурация и размеры электролитической ячейки и электродов, расположение электродов относительно друг друга и относительно стенок ячейки) и физико-механические свойства электролита (температура, плотность и электропроводность) не оказывают заметного влияния на точность обработки (неравномерность съема металла на сторону не превышает 4 %), рассеивающая способность электролита превышает 97 %, а волнистость поверхности и погрешность формы (отклонение от круглости) по сравнению с исходной шлифованной поверхностью снижаются более чем на 34 и 10 % соответственно. При этом в зависимости от концентрации и температуры раствора электролита, напряжения обработки и условий образования парогазовой оболочки анодный процесс стабильно протекает при соотношении площадей поверхностей анода и катода до 31:1 при постепенном образовании оболочки около поверхности анода, плавно погружаемого в электролит, и свыше 1:2,8 в случае взрывоподобного образования оболочки, что позволяет параметрически оптимизировать конструкцию обрабатывающего модуля установок электроимпульсного полирования [2, 23, 25, 29, 46, 51].

4. В результате изучения динамики сглаживания профиля поверхности в условиях электроимпульсного полирования установлено, что формирование профиля в процессе обработки сплавов на основе железа, хрома и никеля происходит вследствие равновероятного сглаживания систематических и случайных неровностей профиля, в результате чего предложена геометрическая модель формирования профиля, устанавливающая связь между параметрами профиля и продолжительностью обработки. Показано, что случайные неровности, представляющие собой местные выступы и впадины, расположенные на выступах и во впадинах профиля, сглаживаются за более короткое время вследствие существенно меньших размеров по сравнению с основными выступами и впадинами профиля. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что увеличение продолжительности обработки приводит к профилю, сформированному сглаженными систематическими неровностями с большим периодом. При этом в структуре случайных неровностей профиля доминирующее положение занимают неровности, обусловленные микроструктурой обрабатываемого сплава, проявившейся на поверхности вследствие селективного анодного растворения компонентов сплава, и ограничивающие минимально возможный уровень шероховатости поверхности [2, 3, 6, 12, 27, 31, 38, 50, 58, 75].

5. При исследовании влияния технологических режимов электроимпульсного полирования на динамику сглаживания профиля поверхности сплавов на

основе железа, хрома и никеля установлено, что основными факторами, влияющими на эффективность сглаживания шероховатости, являются: природа обрабатываемого сплава, химический состав и температура электролита, уровень шероховатости исходной поверхности и продолжительность обработки. Определено, что при прочих равных условиях проведения процесса обработки на эффективность сглаживания шероховатости наибольшее влияние оказывает продолжительность обработки, которая включает три периода времени: периоды интенсивного и прогнозируемого сглаживания и период постоянной шероховатости. Установлено, что экономически целесообразная продолжительность обработки составляет 1–7 мин для углеродистых конструкционных сталей и 2–15 мин для коррозионностойких сталей. Получены математические зависимости, устанавливающие связь между величиной параметров шероховатости, связанных с высотными свойствами неровностей профиля поверхности ( $Ra$ ,  $Rz$ ,  $Rmax$ ), и съема металла с уровнем шероховатости поверхности, температурой электролита и продолжительностью обработки, что позволило осуществить обоснованный выбор режимов обработки, разработать алгоритм и программное обеспечение для автоматизированного назначения технологических режимов электроимпульсного полирования сплавов на основе железа, хрома и никеля. В результате изучения влияния технологических режимов (температуры электролита и продолжительности обработки) на блеск поверхности установлено, что наиболее выраженный эффект на повышение блеска оказывает сглаживание местных выступов профиля, обеспечивающее высокий уровень блеска за относительно короткое время обработки вследствие снижения рассеивания света, в то время, как сглаживание основных выступов и впадин, способствуя формированию гладкого, пологого профиля, обеспечивает высокий уровень блеска поверхности на более продолжительном интервале времени. Установлено, что для обеспечения уровня блеска, близкого к максимально возможному значению равному 60 % для углеродистой конструкционной стали 10 и 55 % для коррозионностойкой стали 20X13, обработку изделий из этих сталей следует проводить соответственно в течение от 2 до 10 и от 3 до 15 мин [2, 21, 27, 30, 31, 35, 47, 56, 75].

6. В результате изучения влияния электроимпульсного полирования на твердость поверхности углеродистых и коррозионностойких сталей установлено снижение твердости полированной поверхности нормализованных и отожженных углеродистых сталей на 255–500 МПа в зависимости от марки стали и вида предварительной термической обработки, что связано с известным эффектом обезуглероживания тонкого поверхностного слоя при обработке углеродистых сталей в водном растворе хлорида аммония. При полировании закаленных углеродистых и коррозионностойких сталей этот эффект не проявляется. При изучении влияния электроимпульсного полирования на эксплуатационные характеристики поверхности деталей установлено, что электроимпульсное полирование не вызывает у коррозионностойких сталей склонности к межкристаллитной коррозии и значительно снижает скорость коррозии углеродистых конструкционных и коррозионностойких сталей по сравне-

нию с электрохимическим полированием и шлифованием (более чем в 3,5–5,6 раза для стали 10 и 1,4–2,0 раза для стали 20Х13). Установлено, что в условиях трения скольжения с достаточной подачей смазочного материала в зону трения при примерно одинаковом уровне шероховатости поверхности электроимпульсное полирование обеспечивает наименьший коэффициент трения (0,09–0,13) по сравнению с тонким шлифованием (0,14–0,17) и механическим полированием (0,11–0,14), а этап приработки отсутствует. Экспериментально определено, что электроимпульсное полирование плоскости реза разрезных витых ленточных магнитопроводов трансформаторов в течение от 0,5 до 1,0 мин снижает удельные потери на перемагничивание на 25–30 % вследствие удаления с поверхности реза дефектного слоя металла и заусенцев, замыкающих прилегающие пластины. Установлено, что электроимпульсное полирование подложки существенно повышает адгезионную прочность и качество вакуумно-плазменных и гальванических покрытий. В частности, по сравнению с гальваническим хромовым покрытием, нанесенным на шлифованную подложку из стали 10, электроимпульсное полирование подложки в течение 7 мин обеспечивает повышение адгезионной прочности хромового покрытия более чем на 17 %, снижает количество сфероидов в покрытии на 65–75 % и улучшает его внешний вид [2, 7, 8, 21, 30, 33, 36, 39, 41, 44, 48, 57, 59, 64–66, 69, 72, 80, 81, 83, 84].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

1. На основании результатов проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработаны типовые технологические процессы электроимпульсного полирования низколегированных углеродистых (АТЮФ.02275.00001) и коррозионностойких (АТЮФ.02275.00002) сталей и промышленное оборудование для их реализации: автоматическая линия мод. ЭИП-1АЛ и три модели полуавтоматических установок (УЭИП-70, ЭИП-1 и ЭПОЛ-5Н). Разработанные технологии электроимпульсного полирования изделий из сплавов на основе железа, хрома и никеля и оборудование внедрены в производство более чем на 20 предприятиях Беларуси, России и Украины, в том числе на Минском механическом заводе им. С.И. Вавилова, Медико-инструментальном заводе им. В.И. Ленина (г. Ворсма), в ПО «Система» (г. Калининград), АО «Машиностроительный завод» (г. Электросталь) и других. Практическая значимость результатов проведенных исследований подтверждена бронзовой медалью ВДНХ СССР (1987 г.), дипломом и серебряной медалью VIII Московского международного салона инноваций и инвестиций (ВВИ, 2008 г.) и дипломами международных выставок (2008–2012 гг.). Мировая новизна разработанных технических решений подтверждена 5 авторскими свидетельствами, 3 патентами Республики Беларусь и 1 патентом Российской Федерации [16, 34, 40, 67, 68, 78–87, 89–91].

2. Результаты проведенных исследований легли в основу разработки и внедрения в производство в АО «Машиностроительный завод» (г. Электросталь) и на РУП «140 ремонтный завод» (г. Борисов) двух современных конку-

рентоспособных полуавтоматических установок электроимпульсного полирования нового модельного ряда: мод. ЭПОЛ-6Н-200 и мод. ЭПОЛ-6Н-500. Проведенное на этапе проектирования установок компьютерное моделирование ванны методом конечных элементов выявило основные области концентраций опасных напряжений и пластических деформаций и позволило параметрически оптимизировать конструкцию ванны, что значительно повысило ее жесткость и эксплуатационную надежность. На основании результатов моделирования разработана технология сборки ванны, предотвращающая развитие коррозионной усталости в сварных швах в процессе эксплуатации ванны [4, 5, 10, 22, 26, 63, 91, 92].

3. Проведены исследования и определены перспективные области применения разработанных технологий электроимпульсного полирования изделий из сплавов на основе железа, хрома и никеля – для финишной обработки высокоточных деталей и узлов, удаления заусенцев, обработки отверстий, совмещенной очистки-полирования. Разработанные технологии удаления заусенцев и электроимпульсного полирования высокоточных изделий внедрены на Минском механическом заводе им. С.И. Вавилова и в АО «Машиностроительный завод» (г. Электросталь). Показано, что процесс химического обезжиривания, разработанный на основе композиции «Обезжириватель НТ-М», может применяться для химической очистки поверхности деталей и узлов от загрязнений значительной толщины и низкотемпературной (от +5 °С) подготовки деталей под нанесение различных функциональных покрытий. Технология химической очистки деталей и узлов оборудования для крекинга нефти и котла подогревателя танка Т-72Б, внедренная в ремонтном производстве Мозырского нефтеперерабатывающего завода и в войсковой части 42715 (Беларусь), позволила исключить валютные затраты на импорт новых деталей и узлов. Технологии химического обезжиривания поверхности деталей перед нанесением функциональных покрытий внедрены более чем на 50 предприятиях Беларуси, в том числе в ОАО «Амкор», ОАО «Борисовский завод «Автогидроусилитель», СП ОАО «Брестгазоаппарат», на РУП «Гомсельмаш» и других. В 2003 г. на минском предприятии «ЭПОЛ» по ТУ РБ 100200832.001-2003 организовано серийное производство композиции «Обезжириватель НТ-М», объем производства которой в 2011–2012 гг. составил более 51 т на общую сумму 1199,2 млн рублей в сопоставимых ценах на 02.05.2013 г. (138311 долларов США в эквиваленте). Суммарный годовой экономический эффект от внедрения разработанных технологий и оборудования за период 1988–2012 гг. в сопоставимых ценах на 02.05.2013 г. составил 1873,1 млн рублей (216044 доллара США в эквиваленте). При этом стоимость разработок и работ по их внедрению в производство в сопоставимых ценах на 02.05.2013 г. составила 4205,1 млн рублей (485022 доллара США в эквиваленте) [8, 16, 21, 23, 24, 30, 32, 34, 40, 54, 55, 60, 71, 73, 78, 87, 90, 92].

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Монографии

1. Синькевич, Ю.В. Теоретические основы механизма съема металла в условиях электроимпульсного полирования низколегированных углеродистых и коррозионностойких сталей / Ю.В. Синькевич, В.К. Шелег, И.Н. Янковский // Перспективные материалы и технологии / А.В. Алифанов [и др.]; под ред. В.В. Клубовича. – Витебск: Изд-во УО «ВГТУ», 2013. – Гл. 19. – С. 389–406.
2. Синькевич, Ю.В. Электроимпульсное полирование сплавов на основе железа, хрома и никеля / Ю.В. Синькевич, В.К. Шелег, И.Н. Янковский, Г.Я. Беляев. – Минск: БНТУ, 2014. – 324 с.

### Статьи в научных журналах

3. Головкина, Е.Я. Исследование параметров шероховатости поверхности стальных деталей после электроимпульсного полирования и нанесения тонкопленочных покрытий / Е.Я. Головкина, Ю.В. Синькевич, С.А. Иващенко, И.С. Фролов // Известия ВУЗов СССР. Сер. Машиностроение. – 1989. – № 6. – С. 134–138.
4. Довнар, С.С. Моделирование и оптимизация конструкции ванны для установки электроимпульсного полирования / С.С. Довнар, Ю.В. Синькевич, Г.Я. Беляев, И.Н. Янковский // Теория и практика машиностроения. – 2003. – № 2. – С. 21–24.
5. Синькевич, Ю.В. Установка электроимпульсного полирования «ЭПОЛ-6Н» / Ю.В. Синькевич, Г.Я. Беляев // Теория и практика машиностроения. – 2004. – № 2. – С. 77–80.
6. Шелег, В.К. Формирование микрогеометрии поверхности при электроимпульсном полировании / В.К. Шелег, Ю.В. Синькевич, И.Н. Янковский // Вестник полоцкого гос. ун-та. Серия В. Прикладные науки. – 2007. – № 8. – С. 48–52.
7. Синькевич, Ю.В. Влияние электроимпульсного полирования подложки на качество вакуумно-плазменных покрытий TiN / Ю.В. Синькевич, В.К. Шелег // Вестник полоцкого гос. ун-та. Серия В. Прикладные науки. – 2008. – № 2. – С. 112–116.
8. Баханович, А.Г. Триботехнические характеристики и долговечность зубчато-ременных передач / А.Г. Баханович, Ю.В. Синькевич, И.Г. Баханович, И.Н. Янковский, В.Я. Лебедев // Механика машин, механизмов и материалов. – 2008. – № 3. – С. 27–30.
9. Синькевич, Ю.В. Исследование самоорганизованных гидродинамических потоков в электролите в режиме электроимпульсного полирования / Ю.В. Синькевич, В.К. Шелег, И.Н. Янковский // Вестник полоцкого гос. ун-та. Серия В. Прикладные науки. – 2008. – № 8. – С. 66–72.

10. Синькевич, Ю.В. Комплексный подход к разработке технологического оборудования для электроимпульсного полирования / Ю.В. Синькевич // Вестник БНТУ. – 2009. – № 6. – С. 15–19.

11. Здор, Г.Н. Собственные радиоизлучение и ток электрического разряда как инструмент контроля и управления процессом электроимпульсного полирования / Г.Н. Здор, В.Б. Тимошевич, Ю.В. Синькевич, И.Н. Янковский // Известия НАН Беларуси. Серия физико-технических наук. – 2009. – № 2. – С. 111–119.

12. Синькевич, Ю.В. Вероятностно-статистическая оценка шероховатости поверхности электроимпульсно полированных деталей / Ю.В. Синькевич, А.А. Гриневич, И.Н. Янковский // Вестник БНТУ. – 2011. – № 5. – С. 9–18.

13. Иванова, Н.П. Исследование морфологии и химического состава электроимпульсно полированной поверхности углеродистых и коррозионно-стойких сталей / Н.П. Иванова, Ю.В. Синькевич, В.К. Шелег, И.Н. Янковский // Наука и техника. – 2012. – № 6. – С. 3–10.

14. Иванова, Н.П. Механизм анодного растворения коррозионно-стойких и конструкционных углеродистых сталей в условиях электроимпульсного полирования / Н.П. Иванова, Ю.В. Синькевич, В.К. Шелег, И.Н. Янковский // Наука и техника. – 2013. – № 1. – С. 24–30.

15. Синькевич, Ю.В. Исследование выхода металла по току при электроимпульсном полировании конструкционных углеродистых сталей / Ю.В. Синькевич, В.К. Шелег, И.Н. Янковский // Вестник БарГУ. Серия: ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ (Физика). ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ (Машиностроение и машиноведение. Процессы и машины агроинженерных систем). – 2013. – Вып. 1. – С. 125–130.

#### **Статьи в сборниках научных трудов**

16. Головкина, Е.Я. Метод электроимпульсного полирования металлов / Е.Я. Головкина, С.Н. Терехов, Ю.В. Синькевич, О.И. Авсеевич // Машиностроение: респ. межвед. сб. науч. тр. / Высшая школа. – Минск, 1988. – Вып. 13. – С. 40–43.

17. Авсеевич, О.И. Расчет толщины парогазовой оболочки при электроимпульсном полировании металлов / О.И. Авсеевич, Ю.В. Синькевич, Е.Я. Головкина, С.Н. Терехов, С.И. Романчук // Машиностроение: респ. межвед. сб. науч. тр. / Высшая школа. – Минск, 1989. – Вып. 14. – С. 68–71.

18. Головкина, Е.Я. Устройство для исследования парогазовой оболочки при электроимпульсном полировании / Е.Я. Головкина, Ю.В. Синькевич, С.И. Романчук // Машиностроение: респ. межвед. сб. науч. тр. / Высшая школа. – Минск, 1990. – Вып. 15. – С. 60–63.

19. Беляев, Г.Я. Основные направления совершенствования технологии электроимпульсного полирования коррозионно-стойких сталей / Г.Я. Беляев, Ю.В. Синькевич // Машиностроение: респ. межвед. сб. науч. тр. / УП «Технопринт». – Минск, 2000. – Вып. 16. – С. 156–159.

20. Синькевич, Ю.В. Формирование качества поверхности при электроимпульсном полировании коррозионно-стойких сталей / Ю.В. Синькевич // Про-

грессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. науч. тр. / Донецкий гос. техн. ун.-т. – Донецк, 2001. – Вып. 17. С. 231–236.

21. Синькевич, Ю.В. Использование технологии электроимпульсного полирования в производстве высокотехнологичных изделий / Ю.В. Синькевич, Г.Я. Беляев // Машиностроение: респ. межвед. сб. науч. тр. / УП «Технопринт». – Минск, 2001. – Вып. 17. – С. 144–147.

22. Синькевич, Ю.В. Проектирование установок электроимпульсного полирования серии «ЭПОЛ-6Н» на этапе разработки дизайн-проекта / Ю.В. Синькевич, Г.Я. Беляев, В.Н. Старовойтов // Машиностроение: респ. межвед. сб. науч. тр. / УП «Технопринт». – Минск, 2002. – Вып. 18. – С. 336–340.

23. Беляев, Г.Я. Особенности формообразования поверхностей при электроимпульсном полировании / Г.Я. Беляев, Ю.В. Синькевич, И.Н. Янковский // Машиностроение: респ. межвед. сб. науч. тр. / УП «Технопринт». – Минск, 2003. – Вып. 19. – С. 119–124.

24. Синькевич, Ю.В. Низкотемпературная подготовка поверхности изделий из черных и цветных металлов перед нанесением защитных покрытий / Ю.В. Синькевич, П.Г. Дроздов // Машиностроение: респ. межвед. сб. науч. тр.: в 2 т. / УП «Технопринт». – Минск, 2004. – Вып. 20. – Т. 1. – С. 141–146.

25. Синькевич, Ю.В. Точность обработки при электроимпульсном полировании / Ю.В. Синькевич, Г.Я. Беляев, П.Г. Дроздов, И.Н. Янковский, А.Л. Брень // Машиностроение: респ. межвед. сб. науч. тр.: в 2 т. / Беларус. национ. техн. ун.-т. – Минск, 2005. – Вып. 21. – Т. 1. – С. 328–334.

26. Беляев, Г.Я. Применение компьютерного моделирования в учебных и инженерных целях на примере проектирования, моделирования и оптимизации конструкции установки электроимпульсного полирования / Г.Я. Беляев, Ю.В. Синькевич, И.Н. Янковский // Теоретическая и прикладная механика: межвед. сб. науч.-метод. статей / Беларус. национ. техн. ун.-т. – Минск, 2005. – Вып. 18. – С. 204–208.

27. Синькевич, Ю.В. Обеспечение геометрических параметров качества поверхности электроимпульсным полированием / Ю.В. Синькевич, И.Н. Янковский // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. науч. тр. / Донецкий национ. техн. ун.-т. – Донецк, 2006. – Вып. 32. – С. 200–206.

28. Синькевич, Ю.В. Физико-математическая модель процесса электроимпульсного полирования / Ю.В. Синькевич, И.Н. Янковский // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. науч. тр. / Донецкий национ. техн. ун.-т. – Донецк, 2006. – Вып. 32. – С. 206–212.

29. Синькевич, Ю.В. Обеспечение точности обработки при электроимпульсном полировании / Ю.В. Синькевич, И.Н. Янковский // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. науч. тр. / Донецкий национ. техн. ун.-т. – Донецк, 2007. – Вып. 33. – С. 253–259.

30. Синькевич, Ю.В. Электроимпульсное полирование тепловыделяющих элементов / Ю.В. Синькевич, И.Н. Янковский // Прогрессивные технологии и

системы машиностроения: Междунар. сб. науч. тр. / Донецкий национ. техн. ун.-т. – Донецк, 2007. – Вып. 33. – С. 259–264.

31. Синькевич, Ю.В. Исследование микропрофиля поверхности деталей из углеродистой конструкционной стали при электроимпульсном полировании / Ю.В. Синькевич, Г.Я. Беляев, И.Н. Янковский, А.Ю. Войтех // Машиностроение: респ. межвед. сб. науч. тр. / Белорус. национ. техн. ун.-т. – Минск, 2007. – Вып. 22. – С. 12–18.

32. Синькевич, Ю.В. Электроимпульсное полирование прецизионных отверстий / Ю.В. Синькевич, Г.Я. Беляев, И.Н. Янковский, Н.А. Киселева // Машиностроение: респ. межвед. сб. науч. тр. / Белорус. национ. техн. ун.-т. – Минск, 2007. – Вып. 22. – С. 44–48.

33. Синькевич, Ю.В. Исследование коррозионной стойкости сталей после электроимпульсного полирования / Ю.В. Синькевич, Н.П. Иванова, И.Н. Янковский // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. науч. тр. / Донецкий национ. техн. ун.-т. – Донецк, 2007. – Вып. 34. – С. 211–215.

34. Киселева, Н.А. Разработка высокоэффективных технологий металлообработки – вклад в инновационное развитие Республики Беларусь / Н.А. Киселева, Ю.В. Синькевич, С.И. Моисеенко // Машиностроение: респ. межвед. сб. науч. тр. / Белорус. национ. техн. ун.-т. – Минск, 2007. – Вып. 23. – С. 100–104.

35. Шелег, В.К. Исследование высотных параметров шероховатости поверхности коррозионно-стойких сталей при электроимпульсном полировании / В.К. Шелег, А.Ю. Войтех, Г.Я. Беляев, Ю.В. Синькевич, И.Н. Янковский // Машиностроение: респ. межвед. сб. науч. тр.: в 2 т. / Белорус. национ. техн. ун.-т. – Минск, 2009. – Вып. 24. – Т. 1. – С. 18–21.

36. Синькевич, Ю.В. Влияние электроимпульсного полирования подложки на прочность сцепления гальванических покрытий / Ю.В. Синькевич, Г.Я. Беляев, И.Н. Янковский // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. науч. тр. / Донецкий национ. техн. ун.-т. – Донецк, 2009. – Вып. 37. – С. 228–232.

37. Синькевич, Ю.В. Фазовый состав и микроструктура электроимпульсно полированной поверхности коррозионно-стойких сталей / Ю.В. Синькевич, И.Н. Янковский // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. науч. тр. / Донецкий национ. техн. ун.-т. – Донецк, 2009. – Вып. 37. – С. 233–238.

38. Синькевич, Ю.В. Исследование механизма прохождения электрического тока через парогазовую оболочку при анодном процессе / Ю.В. Синькевич, И.Н. Янковский // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. науч. тр. / Донецкий национ. техн. ун.-т. – Донецк, 2011. – Вып. 41. – С. 287–292.

39. Беляев, Г.Я. Исследование коэффициента трения электроимпульсно полированных поверхностей деталей / Г.Я. Беляев, Ю.В. Синькевич, И.Н. Янковский, А.В. Безлюдько // Машиностроение: респ. межвед. сб. науч. тр. по матер. Междунар. научн.-технич. конф. «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие

технологии в машиностроении», Минск, 06–09 апреля 2010 г.: в 2 т. / Белорус. национ. техн. ун-т. – Минск, 2012. – Вып. 26. – Т. 1. – С. 14–16.

### Материалы конференций

40. Синькевич, Ю.В. Автоматическая линия ЭИП-1АЛ / Ю.В. Синькевич, Л.П. Симанович // Повышение эффективности применения электрофизических и электрохимических методов обработки материалов: материалы науч.-техн. семинара, Ленинград, 6–7 дек. 1990 г. / Ленинградский дом науч.-техн. пропаганды; под ред. Л.А. Ушомирской. – Л., 1990. – С. 70–72.

41. Синькевич, Ю.В. Использование электроимпульсного полирования для повышения качества ионно-плазменных покрытий / Ю.В. Синькевич, И.С. Фролов, Л.П. Симанович // Упрочнение и защита поверхностей газотермическим и вакуумным напылением: материалы III Междунар. науч.-техн. конф., Киев, окт. 1991 г. / АН УССР, ин-т электросварки им. Е.О. Патона; редкол.: К.А. Ющенко (отв. ред.) [и др.]. – Киев, 1991. – С. 111–115.

42. Синькевич, Ю.В. Электроимпульсное полирование стали ШХ-15 / Ю.В. Синькевич, Л.Г. Скуратович // Состояние и перспективы развития науки и подготовки инженеров высокой квалификации в Белорусской государственной политехнической академии: материалы Междунар. 51-ой науч.-техн. конф. профессоров, преподавателей, науч. работников, аспирантов и студентов БГПА, посвященной 75-летию БГПА, Минск, 1995 г.: в 8-ми ч. / Белорус. госуд. политехн. академия. – Минск, 1995. – Ч. 2. – С. 115–116.

43. Романчук, С.И. Особенности электроимпульсного полирования медьсодержащих сплавов / С.И. Романчук, Ю.В. Синькевич, Г.Я. Беляев // Современные направления развития производственных технологий и робототехника: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 22–23 апр. 1999 г. / Могилевский машиностр. ин-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 1999. – С. 149.

44. Кучеров, А.В. Влияние электроимпульсного полирования стальных подложек на параметры качества вакуумно-плазменных покрытий / А.В. Кучеров, И.С. Фролов, Ю.В. Синькевич // Наука и технологии на рубеже XXI века: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 2000 г. / УП «Технопринт»; редкол.: И.П. Филонов [и др.]. – Минск, 2000. – С. 21–25.

45. Беляев, Г.Я. Влияние электроимпульсного полирования на химический состав поверхности коррозионно-стойких сталей / Г.Я. Беляев, Ю.В. Синькевич // Наука и технологии на рубеже XXI века: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 2000 г. / УП «Технопринт»; под ред. И.П. Филонова, Е.П. Сапелкина, Г.Я. Беляева. – Минск, 2000. – С. 26–30.

46. Синькевич, Ю.В. Рассеивающая способность процесса электроимпульсного полирования / Ю.В. Синькевич, И.Н. Янковский // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы респ. науч.-техн. конф., Могилев, 27 янв. 2005 г. / Белорусско-российский ун-т; редкол.: И.С. Сазанов [и др.]. – Могилев, 2005. – С. 82.

47. Синькевич, Ю.В. Механизм формирования микропрофиля поверхности при электроимпульсном полировании / Ю.В. Синькевич, И.Н. Янковский // *Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации и модернизации машин: сб. научн. тр. VI Междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 24–26 апр. 2007 г.: в 3 т. / Полоцкий гос. ун-т; под общ. ред. П.А. Витязя, С.А. Астапчика. – Новополоцк, 2007. – Т. 2. – С. 135–139.*

48. Синькевич, Ю.В. Повышение качества ионно-плазменных покрытий TiN / Ю.В. Синькевич // *Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации и модернизации машин: сб. научн. тр. VI Междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 24–26 апр. 2007 г.: в 3 т. / Полоцкий гос. ун-т; под общ. ред. П.А. Витязя, С.А. Астапчика. – Новополоцк, 2007. – Т. 2. – С. 139–142.*

49. Синькевич, Ю.В. Влияние электроимпульсного полирования на структуру поверхности коррозионно-стойких сталей / Ю.В. Синькевич // *Машиностроение и техносфера XXI века: сб. тр. XIV Междунар. науч.-техн. конф., Севастополь, 17–22 сент. 2007 г.: в 5 т. / Донецкий национ. техн. ун.-т. – Донецк, 2007. – Т. 3. – С. 272–276.*

50. Шелег, В.К. Моделирование топографии электроимпульсно полированной поверхности стали / В.К. Шелег, Ю.В. Синькевич, И.Н. Янковский // *Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. материалов III Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 15–17 окт. 2008 г.: в 4 кн. / ФТИ НАН Беларуси; редкол.: С.А. Астапчик (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2008. – Кн. 2. – С. 14–20.*

51. Синькевич, Ю.В. Влияние соотношения площадей поверхностей электродов на устойчивость процесса электроимпульсного полирования / Ю.В. Синькевич, В.К. Шелег, И.Н. Янковский // *Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин: сб. науч. тр. VII Междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 29–30 апр. 2009 г.: в 3 т. / Полоцкий гос. ун-т; под общ. ред. П.А. Витязя, С.А. Астапчика. – Новополоцк, 2009. – Т. 2. – С. 265–269.*

52. Здор, Г.Н. Исследование собственного радиоизлучения и тока электрического разряда в электролите при анодной обработке нержавеющей стали / Г.Н. Здор, В.Б. Тимошевич, Ю.В. Синькевич, И.Н. Янковский // *Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин: сб. науч. тр. VII Междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 29–30 апр. 2009 г.: в 3 т. / Полоцкий гос. ун-т; под общ. ред. П.А. Витязя, С.А. Астапчика. – Новополоцк, 2009. – Т. 3. – С. 9–13.*

53. Янковский, И.Н. Осциллографические исследования электрического тока в парогазовой оболочке при анодном процессе / И.Н. Янковский, Ю.В. Синькевич, Г.Я. Беляев // *Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин: сб. науч. тр. VII Междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 29–30 апр. 2009 г.: в 3 т. / Полоцкий гос. ун-т; под общ. ред. П.А. Витязя, С.А. Астапчика. – Новополоцк, 2009. – Т. 3. – С. 13–17.*

54. Синькевич, Ю.В. Применение технологии электроимпульсного полирования для очистки поверхностей деталей машин / Ю.В. Синькевич, И.Н. Янковский, А.В. Безлюдько // Перспективы развития тактики, инженерного и технического обеспечения боевых действий, модернизация средств вооруженной борьбы: материалы 63-й науч.-техн. конф. в рамках 8-й Междунар. науч.-техн. конф. «Наука – образованию, производству, экономике», посвящ. 90-летию БНТУ, Минск, 27 апр. 2010 г. / Белорус. национ. техн. ун-т; реценз.: В.Ф. Тамело [и др.]. – Минск, 2010. – С. 207–209.

55. Синькевич, Ю.В. Анодные эффекты в водных электролитах и их технологическое применение / Ю.В. Синькевич, В.К. Шелег, И.Н. Янковский // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. материалов V Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 15–17 сент. 2010 г.: в 3 кн. / ФТИ НАН Беларуси; редкол.: С.А. Астапчик (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2010. – Кн. 2. – С. 201–205.

56. Синькевич, Ю.В. Автоматизация назначения технологических режимов обработки при электроимпульсном полировании / Ю.В. Синькевич, Г.Я. Беляев, И.Н. Янковский // Автоматизация технологических процессов: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 15–16 марта 2011 г. / ООО «Бизнесофсет»; редкол.: Г.Н. Здор (гл. ред.), А.Н. Дербан, Р.В. Новичихин. – Минск, 2011. – С. 38–40.

57. Синькевич, Ю.В. Повышение качества гальванических хромовых покрытий / Ю.В. Синькевич, В.К. Шелег, И.Н. Янковский // Перспективные материалы и технологии: сб. статей Междунар. симпоз., Витебск, 24–26 мая 2011 г. / Витебский гос. технол. ун-т. – Витебск, 2011. – С. 30–32.

58. Синькевич, Ю.В. Исследование механизма формирования топографии поверхности в процессе электроимпульсного полирования / Ю.В. Синькевич, А.А. Гриневич, И.Н. Янковский // Инновационные технологии в машиностроении: материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 35-летию машиностроит. фак. ПГУ, Новополоцк, 19–20 октября 2011 г. / Полоцкий гос. ун-т; под общ. ред. А.И. Гордиенко, В.К. Шелега. – Новополоцк, 2011. – С. 67–70.

59. Синькевич, Ю.В. Влияние электроимпульсного полирования на микротвердость поверхности стали / Ю.В. Синькевич // Инновационные технологии в машиностроении: материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 35-летию машиностроит. фак. ПГУ, Новополоцк, 19–20 октября 2011 г. / Полоцкий гос. ун-т; под общ. ред. А.И. Гордиенко, В.К. Шелега. – Новополоцк, 2011. – С. 70–73.

60. Синькевич, Ю.В. Высокоэффективная технология очистки котла подогревателя танка Т-72Б / Ю.В. Синькевич, И.Н. Янковский, В.В. Яковлев // I форум Союзного государства ВУЗов инженерно-технологического профиля: материалы встречи молодых ученых «Молодежные идеи и проекты», Минск, 25 мая 2012 г. / БНТУ. – Минск, 2012. – С. 38–39.

61. Синькевич, Ю.В. Оценка адекватности физико-математической модели парогазовой оболочки в условиях электроимпульсного полирования / Ю.В. Синькевич, В.К. Шелег, И.Н. Янковский // Инновационные технологии в ма-

шиностроении: материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. памяти проф. В.Л. Кирпичева и 45-летию ПГУ, Новополоцк, 29–30 окт. 2013 г. / Полоцкий гос. ун-т; под общ. ред. А.И. Гордиенко, В.К. Шелега. – Новополоцк, 2013. – С. 47–50.

62. Синькевич, Ю.В. Основы выбора состава раствора электролита для электроимпульсного полирования металлов и сплавов / Ю.В. Синькевич, И.Н. Янковский, Г.Я. Беляев, В.В. Бирич // Инновационные технологии в машиностроении: материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. памяти проф. В.Л. Кирпичева и 45-летию ПГУ, Новополоцк, 29–30 окт. 2013 г. / Полоцкий гос. ун-т; под общ. ред. А.И. Гордиенко, В.К. Шелега. – Новополоцк, 2013. – С. 71–74.

63. Синькевич, Ю.В. Установки электроимпульсного полирования модельного ряда ЭПОЛ-6Н / Ю.В. Синькевич, И.Н. Янковский, Г.Я. Беляев // Автоматизация и роботизация процессов и производств: материалы республ. науч.-практич. семинара, Минск, 13 февр. 2014 г. / Бизнесофсет; редкол.: Пантеленко Ф.И. (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2014. – С. 76–78.

#### Тезисы докладов

64. Синькевич, Ю.В. Влияние электролитной анодной обработки на удельный съем и микротвердость поверхности сталей / Ю.В. Синькевич, Е.Я. Головкина, С.Н. Терехов // Интенсификация и автоматизация отделочно-зачистной обработки деталей машин: тез. докл. науч.-технич. конф., Ростов–на-Дону, 1988 г. / Ростовский ин-т сельскохоз. машиностр.; редкол.: А.П. Бабичев [и др.]. – Ростов–на-Дону, 1988. – С. 65–67.

65. Иващенко, С.А. Влияние электрохимического полирования на геометрические характеристики качества ионно-вакуумных покрытий / С.А. Иващенко, Ю.В. Синькевич, И.С. Фролов, Е.Я. Головкина // Вакуумные покрытия – 88: тез. докл. науч.-технич. конф., Минск, 20–21 апр. 1988 г. / БелНИИНТИ; редкол.: С.А. Астапчик [и др.]. – Минск, 1988. – С. 83–84.

66. Иващенко, С.А. Обеспечение качества износостойких ионно-вакуумных покрытий на этапе подготовки поверхности упрочняемых изделий / С.А. Иващенко, Ю.В. Синькевич, И.С. Фролов // Прогрессивные методы получения конструкционных материалов и покрытий, повышающих долговечность деталей машин: тез. докл. регион. науч.-технич. конф., Волгоград, 1988 г. / Волгоградский политех. ин-т; науч. ред. Ю.А. Бондарев. – Волгоград, 1988. – С. 104–105.

67. Синькевич, Ю.В. Совершенствование технологии изготовления медицинского инструмента из нержавеющей хромистой стали / Ю.В. Синькевич, Е.Я. Головкина, С.И. Романчук // Прогрессивные методы получения конструкционных материалов и покрытий, повышающих долговечность деталей машин: тез. докл. межресп. науч.-технич. конф., Волгоград, 1989 г. / Волгоградский политех. ин-т; науч. ред. Ю.А. Бондарев. – Волгоград, 1989. – С. 106–107.

68. Синькевич, Ю.В. Технология и оборудование электроимпульсного полирования металлов / Ю.В. Синькевич, Е.Я. Головкина // Нестандартное обо-

рудование, оснастка, механизация и прогрессивная технология машиностроительного производства: тез. докл. регион. науч.-технич. конф., Владимир, 1989 г. / Владимирский политех. ин-т; под общ. ред. В.Г. Гусева. – Владимир, 1989. – С. 50–51.

69. Лукашевич, С.В. Влияние электроимпульсной обработки поверхностей разреза витых ленточных магнитопроводов на их магнитные свойства / С.В. Лукашевич, Ю.В. Синькевич, С.И. Романчук // Механика, кибернетика: тез. докл. XXXIII межресп. студенч. науч.-техн. конф. ВУЗов прибалт. рес.-к, Белорусской ССР и Молдавской ССР, Минск, 11–13 апр. 1989 г.: в 3 ч. / Белорус. политех. ин-т. – Минск, 1989. – Ч. 3. – С. 110.

70. Аксенович, О.Д. Методика и устройство для исследования парогазовой оболочки / О.Д. Аксенович, Ю.В. Синькевич, С.И. Романчук // Механика, кибернетика: тез. докл. XXXIII межресп. студенч. науч.-техн. конф. ВУЗов прибалт. рес.-к, Белорусской ССР и Молдавской ССР, Минск, 11–13 апр. 1989 г.: в 3 ч. / Белорус. политех. ин-т. – Минск, 1989. – Ч. 3. – С. 111.

71. Лапицкая, Е.А. Удаление заусенцев в точных пазах электроимпульсной обработкой / Е.А. Лапицкая, Ю.В. Синькевич, С.И. Романчук // Механика, кибернетика: тез. докл. XXXIII межресп. студенч. науч.-техн. конф. ВУЗов прибалт. рес.-к, Белорусской ССР и Молдавской ССР, Минск, 11–13 апр. 1989 г.: в 3 ч. / Белорус. политех. ин-т. – Минск, 1989. – Ч. 3. – С. 112.

72. Синькевич, Ю.В. Использование электроимпульсного полирования для повышения качества ионно-плазменных покрытий / Ю.В. Синькевич, И.С. Фролов // Современные материалы, оборудование и технологии упрочнения и восстановления деталей машин: тез. докл. республ. науч.-техн. конф., Новополоцк, 22–23 апр. 1993 г. / Полоцкий госуд. ун.-т. – Новополоцк, 1993. – С. 97.

73. Янковский, И.Н. Очистка от нагара и полирование клапанов двигателей внутреннего сгорания электроимпульсным полированием / И.Н. Янковский, Ю.В. Синькевич // НИРС–2003: тез. докл. VIII Республ. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, Минск, 9–10 дек. 2003 г.: в 7-ми ч. / Белорус. национ. техн. ун-т.; редкол.: Б.М. Хрусталева [и др.]. – Минск, 2003. – С. 156–157.

74. Здор, Г.Н. Исследование собственного радиоизлучения и тока электрического разряда при анодном процессе в режиме электроимпульсного полирования / Г.Н. Здор, В.Б. Тимошевич, Ю.В. Синькевич, И.Н. Янковский // Перспективные материалы и технологии: сб. тез. Междунар. симпоз., Витебск, 25–29 мая 2009 г. / Витебский гос. технол. ун-т; гл. ред. В.В. Рубаник. – Витебск, 2009. – С. 223.

75. Янковский, И.Н. Исследование блеска поверхности сталей после электроимпульсного полирования / И.Н. Янковский, Ю.В. Синькевич // Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки: тез. докл. междунар. науч.-техн. конф., Минск, 12–13 апреля 2011 г. / ООО «Бизнесофсет»; редкол.: В.К. Шелег (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2011. – С. 188–190.

76. Синькевич, Ю.В. Влияние технологических режимов обработки на выход металла по току при электроимпульсном полировании конструкционных

углеродистых сталей / Ю.В. Синькевич, И.Н. Янковский // Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 10–11 апреля 2013 г. / БНТУ, МИНСКЭКСПО; редкол.: В.К. Шелег (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2013. – С. 89–92.

77. Бирич, В.В. Повышение интенсивности процесса электроимпульсного полирования ультразвуковыми колебаниями / В.В. Бирич, Ю.В. Синькевич, А.В. Бирич // Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 10–11 апреля 2013 г. / БНТУ, МИНСКЭКСПО; редкол.: В.К. Шелег (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2013. – С. 15–16.

### Авторские свидетельства и патенты

78. Медицинская игла: а. с. 1496802 СССР, МКИ4 А 61 М 5/32 / В.Н. Чачин, Е.Я. Головкина, С.Н. Терехов, Ю.В. Синькевич, С.И. Романчук, М.И. Дегтярев, Н.И. Анощенко, В.И. Муравьева; Белорус. политехн. ин-т. – № 4270369; заявл. 20.04.87; опубл. 30.07.89 // Открытия. Изобрет. – 1989. – № 28.

79. Способ электрохимического полирования и устройство для его осуществления: а. с. 1630329 СССР, МКИ5 С 25 F 3/00, 7/00 / Ю.В. Синькевич, Е.Я. Головкина, О.И. Авсеевич, С.И. Романчук; Белорус. политехн. ин-т. – № 4696710; заявл. 31.05.89. – ДСП.

80. Способ подготовки металлических поверхностей перед нанесением ионно-вакуумных покрытий: а. с. 1662123 СССР, МКИ5 С 23 С 14/00 / Ю.В. Синькевич, И.С. Фролов, С.А. Ивашенко, С.И. Романчук, Е.Я. Головкина; Белорус. политехн. ин-т. – № 4641099; заявл. 24.01.89. – ДСП.

81. Раствор для полирования металлических изделий: а. с. 1665727 СССР, МКИ5 С 25 F 3/00 / С.И. Романчук, Ю.В. Синькевич, Е.Я. Головкина; Белорус. политехн. ин-т. – № 4617566; заявл. 09.12.88. – ДСП.

82. Устройство для измерения толщины парогозовой оболочки: а. с. 1744437 СССР, МКИ5 G 01 В 7/06 / Ю.В. Синькевич, С.И. Романчук, Е.Я. Головкина, О.Д. Аксенович; Белорус. политехн. ин-т. – № 4670167; заявл. 30.03.89; опубл. 30.06.92 // Открытия. Изобрет. – 1992. – № 24.

83. Способ электрохимической обработки поверхности металлических изделий: пат. 2155828 РФ, МПК7 С 25 F 3/00 / Ю.В. Синькевич; заявитель НПП «Эпол». – № 98106979; заявл. 13.04.98; опубл. 10.09.2000 // Официальн. бюл. / Российское агентство по патентам и товарным знакам – 2000. – № 25.

84. Способ электрохимической обработки поверхности металлических изделий: пат. 3604 С1 Респ. Беларусь, МПК6 С 25 F 3/00 / Ю.В. Синькевич; заявитель НПП «Эпол». – № 970226; заявл. 23.04.97; опубл. 30.12.2000 // Официальн. бюл. / Гос. патент. ком. Респ. Беларусь. – 2000.

85. Устройство для электрофизической обработки изделия из токопроводящего материала: пат. 8010 U Респ. Беларусь, МПК6 С 25 F 1/100 / Ю.В. Синькевич, А.В. Бирич, В.В. Бирич; заявитель Белорус. национ. технич. ун-т. –

№ и 20110568; заявл. 13.07.2011; опубл. 28.02.2012 // Официальн. бюл. / Национальн. центр интеллектуальной собств. Респ. Беларусь. – 2012.

86. Устройство для электроимпульсного полирования поверхностей изделия из токопроводящего материала: пат. 18112 С1 Респ. Беларусь, МПК6 С25F 1/00, С25F 3/16, С25F 7/00, В08В 3/12 / Ю.В. Синькевич, А.В. Бирич, В.В. Бирич; заявитель Белорус. национ. технич. ун-т. – № а 20110707; заявл. 23.05.2011; опубл. 30.04.2014 // Официальн. бюл. / Национальн. центр интеллектуальной собств. Респ. Беларусь. – 2014.

### Другие публикации

87. Чачин, В.Н. Метод электроимпульсного полирования сталей и цветных металлов / В.Н. Чачин, Е.Я. Головкина, С.Н. Терехов, Ю.В. Синькевич, О.И. Авсеевич. – Минск: БелНИИНТИ Госплана БССР, 1987. – 4 с. – (Информац. листок БелНИИНТИ Госплана БССР о науч.-техн. достиж. № 87–150).

88. Авсеевич, О.И. Электрогидродинамическая модель прианодной зоны при электроимпульсном полировании металлов / О.И. Авсеевич, Ю.В. Синькевич, Е.Я. Головкина, С.И. Романчук; Белорус. политех. ин-т. – М., 1988. – 14 с. – Деп. в ВНИИТЭМР, № 295–мш88 // Библ. указ. ВИНТИ: Деп. науч. работы. – 1988. – № 11(205). – С. 140.

89. Малов, Е.К. Установка электроимпульсного полирования / Е.К. Малов, Ю.В. Синькевич, Б.А. Гольшев, В.П. Кайдалов, Н.Ю. Тарасов, Е.Я. Головкина. – Минск: БелНИИНТИ Госплана БССР, 1989. – 4 с. – (Информац. листок БелНИИНТИ Госплана БССР о науч.-техн. достиж. № 89–208).

90. Кацнельсон, В.М. Автоматическая линия ЭИП-1 АЛ / В.М. Кацнельсон, В.Н. Краснихин, В.Е. Василевский, Б.П. Судницын, Ю.В. Синькевич, С.С. Ткачев, С.И. Романчук, Е.Я. Головкина. – Минск: БелНИИНТИ Госплана БССР, 1989. – 4 с. – (Информац. листок БелНИИНТИ Госплана БССР о науч.-техн. достиж. № 89–244).

91. Синькевич, Ю.В. Оборудование и технология электроимпульсного полирования металлов и сплавов / Ю.В. Синькевич // Каталог научно-технических и инновационных разработок БНТУ / сост. А.С. Калиниченко, Ф.А. Романюк, Ю.В. Кравцов. – Минск: ЧУП «КАВАЛЕР», 2010. – С. 12.

92. Синькевич, Ю.В. Технология электроимпульсного полирования металлов и сплавов. Технология низкотемпературного обезжиривания и очистки поверхностей узлов и деталей / Ю.В. Синькевич, И.Н. Янковский // Каталог экспонатов республиканской выставки «Инновации для машиностроения». – Минск: БЕЛИСА, 2013. – С. 9.

Сінькевіч Юрый Уладзіміравіч

**ТЭАРЭТЫЧНЫЯ І ТЭХНАЛАГІЧНЫЯ АСНОВЫ  
ЭЛЕКТРАІМПУЛЬСНАГА ПАЛІРАВАННЯ ВЫРАБАЎ  
З СПЛАВАЎ НА АСНОВЕ ЖАЛЕЗА, ХРОМУ І НІКЕЛЯ**

**Ключавыя словы:** паліраванне, электраліт, парагазавая абалонка, здыманне металу, якасць, профіль паверхні, дакладнасць, эксплуатацыйныя характарыстыкі, тэхналагічны працэс, абсталяванне.

**Мэта працы:** распрацоўка тэарэтычных і тэхналагічных асноў электраімпульснага паліравання вырабаў з сплаваў на аснове жалеза, хрому і нікеля з забеспячэннем задзенага комплексу механічных уласцівасцей, дакладнасці, геаметрычных параметраў якасці і эксплуатацыйных характарыстык паверхні дэталей, стварэнне на гэтай аснове і ўкараненне ў вытворчасць высокаэфектыўных тэхналогій электраімпульснага паліравання і прамысловага абсталявання.

**Метады даследавання і выкарыстаная апаратура:** матэматычнае мадэляванне, імавернасна-статыстычны метады апрацоўкі прафілаграм паверхні, рэнтгенаструктурны аналіз, рэнтгенаўская фотаэлектронная спектраскапія, аптычная і сканавальная электронная мікраскапія, энергадысперсійны хімічны мікрааналіз, стандартныя і агульнапрынятыя ў тэхнічных навуках метады даследаванняў.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна:** распрацаваны асновы тэорыі электраімпульснага паліравання сплаваў на аснове жалеза, хрому і нікеля, якія ўстанаўліваюць ўзаемасувязь паміж электрахімічным паводзінамі кампанентаў сплаваў і характарам фізіка-хімічных працэсаў, якія праходзяць на апрацоўванай паверхні, з хімічным складам і велічынёй рН воднага раствора электраліта, напругай апрацоўкі і тэмпературай электраліта. Устаноўлены механізмы і асноўныя заканамернасці электрычнай праводнасці парагазавай абалонкі, аноднага растварэння кампанентаў сплаваў, згладжвання профілю паверхні і фарміравання тапаграфіі. Вывучаны ўплыў тэхналагічных рэжымаў на дакладнасць і прадукцыйнасць апрацоўкі, якасць, механічныя ўласцівасці і эксплуатацыйныя характарыстыкі паверхні дэталей з сплаваў на аснове жалеза, хрому і нікеля.

**Рэкамендацыі па выкарыстанні, вобласць прымянення:** распрацаваныя тэхналогіі і абсталяванне ўкаранены больш чым на 70 прадпрыемствах Беларусі, Расіі і Украіны. Практычная значнасць працы пацверджана актамі і даведкамі на агульную суму больш за 839000 долараў ЗША ў эквіваленце.

## РЕЗЮМЕ

Синькевич Юрий Владимирович

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО ПОЛИРОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ  
ИЗ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА, ХРОМА И НИКЕЛЯ**

**Ключевые слова:** полирование, электролит, парогазовая оболочка, съем металла, качество, профиль поверхности, точность, эксплуатационные характеристики, технологический процесс, оборудование.

**Цель работы:** разработка теоретических и технологических основ электроимпульсного полирования изделий из сплавов на основе железа, хрома и никеля с обеспечением заданного комплекса механических свойств, точности, геометрических параметров качества и эксплуатационных характеристик поверхности деталей, создание на этой основе и внедрение в производство высокоэффективных технологий электроимпульсного полирования и промышленного оборудования.

**Методы исследования и использованная аппаратура:** математическое моделирование, вероятностно-статистический метод обработки профилограмм поверхности, рентгеноструктурный анализ, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, оптическая и сканирующая электронная микроскопия, энергодисперсионный химический микроанализ, стандартные и общепринятые в технических науках методы исследований.

**Полученные результаты и их новизна:** разработаны основы теории электроимпульсного полирования сплавов на основе железа, хрома и никеля, устанавливающие взаимосвязь между электрохимическим поведением компонентов сплавов и характером физико-химических процессов, протекающих на обрабатываемой поверхности, с химическим составом и величиной pH водного раствора электролита, напряжением обработки и температурой электролита. Установлены механизмы и основные закономерности электрической проводимости парогазовой оболочки, анодного растворения компонентов сплавов, сглаживания профиля поверхности и формирования топографии. Изучено влияние технологических режимов на точность и производительность обработки, качество, механические свойства и эксплуатационные характеристики поверхности деталей из сплавов на основе железа, хрома и никеля.

**Рекомендации по использованию, область применения:** разработанные технологии и оборудование внедрены более чем на 70 предприятиях Беларуси, России и Украины. Практическая значимость работы подтверждена актами и справками на общую сумму более 839 тысяч долларов США в эквиваленте.

## SUMMARY

Sinkevitch Ioury Vladimirovitch

**THEORETICAL AND TECHNOLOGICAL BASES  
ELECTRIC PULSE POLISHING OF PRODUCTS FROM ALLOYS  
ON THE BASIS OF IRON, CHROME AND NICKEL**

**Key words:** polishing, electrolyte, a steam-gas shell, removal of metal, quality, a surface contour, accuracy, operating characteristics, technological process, the equipment.

**Work purpose:** development of theoretical and technological bases of electric pulse polishing of products from alloys on the basis of iron, chrome and nickel with provision the set complex of mechanical properties, accuracy, geometrical parameters of quality and operating characteristics of a surface of details, creation on this basis and introduction in production of highly effective technologies of electric pulse polishing and the industrial equipment.

**Methods of research and the used equipment:** mathematical modeling, a probabilistic and statistical method of processing profile graphs surfaces, the X-ray diffraction analysis, X-ray photo electronic spectroscopy, the optical and scanning electronic microscopy, the power dispersive chemical microanalysis, the standard and generally accepted methods of researches in technical sciences.

**The results obtained and their novelty:** the bases of the theory of electric pulse polishing of alloys on the basis of iron, chrome and nickel establishing interrelation between electrochemical behavior of components of alloys and nature of the physical and chemical processes progressing on the processed surface with a chemical composition and the size pH of aqueous solution of electrolyte, tension of processing and temperature of electrolyte are developed. Mechanisms and the basic of electrical conductivity of a steam-gas shell, anode dissolution of components of alloys, smoothing of a profile of a surface and formation of topography are determined. Influence of the technological modes on accuracy and a capacity of processing, quality, mechanical properties and operational characteristics of a surface of details from alloys on the basis of iron, chrome and nickel are studied.

**Application recommendations, field of application:** the developed technologies and the equipment are introduced more than at 70 enterprises of Belarus, Russia and Ukraine. The practical importance of work is confirmed with acts and references for the total sum more than 839 thousand US dollars in an equivalent.

Научное издание

**СИНЬКЕВИЧ** Юрий Владимирович

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО ПОЛИРОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ  
ИЗ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА, ХРОМА И НИКЕЛЯ**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук  
по специальности 05.02.07 – Технология и оборудование  
механической и физико-технической обработки

Подписано в печать 12.03.2015. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Ризография

Усл. печ. л. 2,73. Уч.-изд. л. 2,14. Доп. тираж 60. Заказ 227.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя  
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.