

**БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

УДК 691.9.048.4

ЧИГРИНОВА
Наталья Михайловна

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ
МИКРОПЛАЗМОИСКРОВОГО УПРОЧНЕНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТИ
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ**

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

Минск, 2010

Работа выполнена в Государственном научном учреждении «Институт порошковой металлургии» Государственного научно-производственного объединения порошковой металлургии Национальной академии наук Беларуси.

Научный консультант --

Ильюшенко Александр Федорович,
член-корреспондент НАН Беларуси, доктор технических наук, профессор, директор Государственного научного учреждения «Институт порошковой металлургии»

Официальные оппоненты:

Акулович Леонид Михайлович,
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология металлов» Белорусского государственного аграрно-технического университета;

Ивашко Виктор Сергеевич,
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Техническая эксплуатация автомобилей» Белорусского национального технического университета;

Рубаник Василий Васильевич,
доктор технических наук, доцент, директор Государственного научного учреждения «Институт технической акустики» Национальной академии наук Беларуси

Оппонирующая организация --

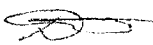
Государственное научное учреждение «Объединенный институт машиностроения» Национальной академии наук Беларуси

Защита состоится 29 октября 2010 г. в 14⁰⁰ на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.03 в Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65, корп.1, ауд. 202, тел. ученого секретаря 292-24-04.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан «__» _____ 2010 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций Д 02.05.03,
доктор технических наук, профессор

 О.Г. Девойно

ВВЕДЕНИЕ

Доля выпускаемой массовыми и крупносерийными производствами продукции машиностроения и металлообработки в общем объеме ВВП Республики Беларусь сегодня составляет менее 30 %, а основная его часть (около 70 %) производится мелко- и среднесерийными предприятиями. В первую очередь это огромная номенклатура металлических изделий повышенной точности с полями допусков от 0,001 до 0,1 мм, эксплуатируемых в условиях циклических знакопеременных нагрузок, интенсивного износа и агрессивных сред. Улучшение качества, продление ресурса и обеспечение конкурентоспособности таких изделий является важной народнохозяйственной задачей. Среди путей ее решения может быть восстановление и поверхностное упрочнение таких изделий с созданием функционально адаптированных покрытий.

На предприятиях с массовым и крупносерийным производствами с достаточно узкой номенклатурой выпускаемой продукции для таких целей используются производительные стационарные технологии поверхностного упрочнения – газоплазменная, плазменные, ионно- и детонационно-плазменные методы, лазерная обработка, воздействие на поверхность сильнотоковыми электронными пучками. Такие процессы, осуществляемые, как правило, при температурах не менее 550 К, дороги, энергоемки, требуют создания специальной инфраструктуры и применения дорогостоящего оборудования. С их помощью весьма проблематично **непосредственно** в процессе упрочнения создавать покрытия на поверхности изделий повышенной точности с толщинами и шероховатостью, вписываемыми в диапазон принятых допусков. Для этого требуется последующая механическая доработка упрочненных изделий, сопровождаемая дополнительными материальными затратами и часто при этом – опасностью скалывания созданного, как правило высоконапряженного, покрытия.

На мелко- и среднесерийных производствах, где ассортимент изготавливаемых изделий гораздо шире и чаще меняется, экономически выгодней применять более дешевые и мобильные процессы поверхностного упрочнения, легко адаптируемые к производственным условиям. К таким технологиям относятся рассматриваемые в диссертации микроплазменоскоровые методы – электронскоровое легирование (ЭИЛ) и анодное микродуговое оксидирование (АМДО), основанные на взаимодействии анода и катода в электрическом поле в результате дискретного действия пробойных напряжений при возникновении искры. Данные процессы отличаются возможностью низкотемпературного (не более 323 К) упрочнения, восстановления и декорирования металлических материалов, включая стали, черные, цветные и благородные металлы, твердые сплавы и специальные материалы – вентильные металлы (Al, Ti, Zr, Nb, Ta, Mg) и их сплавы (АМДО) с созданием металлических и оксидо-керамических покрытий широкого спектра действия.

Вместе с тем широкое промышленное использование АМДО и ЭИЛ сдерживается их относительно невысокой производительностью, стохастическим характером формирования покрытий, их ограниченной толщиной, нерегулярной структурой и неравнотолщинностью, высокими пористостью и шероховатостью. Несмотря на исследования особенностей данных процессов учеными разных школ и большое количество публикаций и патентов в мире и республике Беларусь, к настоящему времени отсутствуют общие, систематизированные данные о физических механизмах массопереноса, кинетике изменения во времени электрических параметров упрочнения, динамике роста покрытий, их напряженном состоянии. Недостаточно информации о применении специальных средств контроля анодно-катодными взаимодействиями и управления ими при микроплазмойсковой обработке. Большинство исследователей связывают повышение производительности и стабильности действия изучаемых технологий с увеличением мощности серийного оборудования, что делает данные методы более дорогостоящими и энергоемкими.

В связи с вышесказанным в диссертации решаются проблема интенсификации указанных электроразрядных технологий дополнительным электромеханическим воздействием с созданием технологических процессов формирования функциональных покрытий увеличенных в 1,5–2,0 раза толщины при уменьшении в 1,5–2,5 раза энергозатрат на их получение, а также задачи комплексного и систематизированного исследования механизмов и закономерностей интенсифицированных микроплазмойсковых методов и развития научного направления в области физико-технической обработки материалов, связанного с упрочнением и защитой поверхности металлических изделий повышенной точности с полями допусков от 0,001 до 0,1 мм в жидкой и газовой средах для среднесерийных производств.

Связь работы с крупными научными программами, темами

Научные исследования по диссертации выполнялись в рамках 20 заданий 14 государственных программ: ГПОФНИ «Высокоэнергетические, ядерные и радиационные технологии» (задания 94. № г.р. 20042960, 3.01, № г.р. 20071534); ГПФИ «Поверхность», фундаментально-ориентированная подпрограмма «Исследование перспективных для космической техники материалов на трение и износ в открытом космическом пространстве и наземных лабораториях» (задание 88 ГБ, № г.р. 2005 1114); ГППИ «Материалы в технике (задание 3.14 ГБ, № г.р. 20071535), БРФФИ (задания Т07К–067, № г.р. 20071527, Т09К–056, № г.р. 20092587), РНТП «Инструмент» (задание 2.04), ГНТП «Транспорт» (задание 4.97, № г.р. 19962351); ГНТП «Машиностроение», подпрограмма «Технологии» (задания 4.28, № г.р. 20053645, 5.14, № г.р. 19972504); ОНТП (задание 110); ГНТП «Ресурсосбережение» (задание 2.48. № г.р. 20001786); ГНТП «Новые материалы и технологии» подпрограмма «Защита поверхностей» (задание 1.48, № г.р. 20093218); ГНТП «Новые материалы и защита поверхностей», подпрограмма «Защита поверхностей» (задания 1.27, № г.р. 20012988, 1.64, № г.р. 20071536, 1.72, № г.р. 20093218);

ГНТП «Технологии и оборудование машиностроения», подпрограмма «Технологии машиностроения» (задание 4.34, № г.р. 20073451); ГППНИ «Металлургия»; РНТП «Развитие Могилевской области» (задание МГ–О45, № г.р. 2003390).

Цель и задачи исследования. Цель – научно-техническое обоснование и технологическое обеспечение интенсификации микроплазменной обработки металлических изделий повышенной точности в жидкой и газовой средах электромеханическим воздействием и создание энергосберегающих технологий формирования функциональных покрытий увеличенных толщин в наноструктурированном состоянии со сниженным уровнем остаточных напряжений.

Поставленная цель достигается решением следующих задач.

1. Анализ процессов упрочнения и восстановления изделий известными методами ЭИЛ и АМДО. Разработка концепции и способов электромеханической интенсификации анодно-катодных взаимодействий при микроплазменной обработке изделий повышенной точности: в газовой среде при ЭИЛ за счет последовательного, в различных комбинациях действия на упрочняемый материал энергии электроразрядной плазмы с низко- (150 Гц) и высокочастотной (22 кГц) механической деформацией, в жидкой среде при АМДО – за счет активации водно-щелочных электролитов действием электрического и ультразвукового полей.

2. Теоретическое описание интенсифицированного процесса электроискрового легирования. Исследование характера и диапазона изменения в режиме реального времени электрических, ультразвуковых параметров обработки и особенностей массопереноса при электроискровом легировании, интенсифицированном электромеханическим воздействием. Разработка методологии управления интенсифицированным процессом ЭИЛ, где входными параметрами приняты электрические, частотные и временные характеристики упрочнения, а выходными – скорость эрозии и объем затвердевшего материала легирующего анода на упрочненной поверхности катода.

3. Теоретическое описание процесса микродугового оксидирования (АМДО) в активированных электрическим и ультразвуковым полями электролитах. Исследование влияния предложенного электромеханического воздействия на изменение энергетического уровня и особенности процесса АМДО с оптимизацией параметров электрического и ультразвукового полей и характеристик водно-щелочных электролитов для получения оксидо-керамических покрытий увеличенных толщин при сниженных энергозатратах на их формирование.

4. Разработка алгоритма, приемов и контрольно-измерительного оборудования для адаптивного управления и поддержания оптимальных параметров интенсифицированного микроплазменного упрочнения и восстановления изделий в жидкой и газовой средах в режиме реального времени.

5. Установление механизмов упрочнения, изменения структурного, фазового и напряженно-деформированного состояний упрочняемой поверхности изделий из легированных и быстрорежущих сталей, алюминиевых и титановых сплавов, включая литейные и высокопрочные, легирующими анодами на основе твер-

дых сплавов групп ВК, ТК и интерметаллидных систем состава Cr-Al-Ni под воздействием плазменно-механической энергии изменяющейся интенсивности при ЭИЛ и в процессе АМДО в водно-щелочных электролитах с различной электрической активностью.

6. Исследование влияния электромеханической интенсификации на физико-механические и эксплуатационные свойства создаваемых покрытий.

7. Разработка энергосберегающих технологических процессов интенсифицированного микроплазменного упрочнения и восстановления в жидкой и газовой средах изделий повышенной точности, создание контрольно-измерительных устройств управления интенсифицированными методами, внедрение результатов исследования в машиностроение, металлообработку и производство медицинских приборов и приспособлений.

Объект исследования – упрочненные и восстановленные интенсифицированными микроплазменными методами изделия с полями допусков 0,001–0,1 мм из легированных сталей, алюминиевых и титановых сплавов, включая литейные и высокопрочные, выбор которых определен их широким использованием в машиностроении и металлообработке, в производстве медицинской техники.

Предмет исследования – физические механизмы электромеханической интенсификации микроплазменной обработки, закономерности массопереноса, особенности структуро- и фазообразования и изменения напряженно-деформированного состояния металлических материалов под интегральным действием электрической, плазменной и механической энергий различной интенсивности.

Разрабатываемые микроплазменные методы отличает от существующих соблюдение требуемых размеров и геометрии поверхности изделия **непосредственно** в процессе упрочнения, что позволит использовать их в качестве финишных операций безабразивной обработки изделий с узкими полями допусков.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Концепция и способы электромеханической интенсификации микроплазменных технологий восстановления, упрочнения и декоративной обработки металлических поверхностей повышенной точности в газовой и жидкой средах, управляемые совместным действием электрического тока и ультразвука и обеспечивающие активизацию анодно-катодных взаимодействий в системе металл–покрытие, включая ускорение в 1,5–2,5 раза процессов массопереноса, увеличение в 1,3–2,8 раза толщины формируемых покрытий, повышение однородности по толщине до 1–3 мкм, стабилизацию структурного и напряженно-деформированного состояния с уменьшением энергозатрат на обработку более, чем в 2 раза.

2. Физико-математические модели расчета объема проэродировавшего материала анода и времени затвердения проэродировавшей капли на упрочняемой поверхности в процессе электроискрового легирования, интенсифицированного электромеханическим воздействием, основанные на уравнении теплопроводности при различных начальных условиях и учитывающие дополнительное действие высокочастотных колебаний легирующего электрода, определяющих изменение

контактных условий в анодно-катодной области и вызывающих появление дополнительных микроразрядов на упрочняемой поверхности, которые позволяют рассчитать и оптимизировать объем и массоперенос материала анода, размеры проэродировавшихся капель (50–80 мкм) и время затвердевания капли $(0,6–0,8) \cdot 10^{-8}$ с на поверхности катода для определения и регулирования скорости массопереноса и степени поверхностного упрочнения.

3. Эмпирическая модель расчета параметров процесса массопереноса при изменении электрических и частотных режимов легирования, основанная на теории малых колебаний механических систем и учитывающая силы упругости, сопротивления пластическому деформированию, инерции в системе металл–покрытие, позволяющая оптимизировать соотношение электрических и частотных характеристик процесса упрочнения, рассчитать суммарный уровень потенциальной и кинетической энергии в анодно-катодной области, необходимый для ускоренного и устойчивого массопереноса с получением покрытий повышенной в 1,5–2,0 раза толщины при сниженных в 1,8–2,5 раза энергозатратах.

4. Физико-математическая модель процесса микродугового оксидирования, интенсифицированного воздействием электрического и ультразвукового полей, основанная на решении гидродинамического уравнения Рэлея–Плессе, модифицированного с учетом зарождения и развития процессов кавитации в электролите, позволяющая установить диапазоны амплитуд давления $(2–3) \cdot 10^5$ Па и частоты 20–30 кГц ультразвукового поля, размеров 1–3 мкм и концентрации 0,1–0,8 г/л заряженных полирадикалов, электрических режимов АМДО, вязкости и плотности активированных электролитов для ускорения в 1,5–2,0 раза анодно-катодных взаимодействий без разрушения поверхности оксидируемой детали для получения покрытий увеличенных в 1,3–2,8 раза толщин в наноструктурированном состоянии с пониженным в 1,4–1,6 раза уровнем остаточных напряжений и уменьшенной с 25–40 % до 1–3 % пористостью.

5. Результаты экспериментальных исследований изменения электрических режимов процесса ЭИЛ в зависимости от уровня напряженно-деформированного состояния упрочняемой поверхности, позволяющие установить механизм электромеханической интенсификации метода, обусловленный появлением в анодно-катодной области при ультразвуковой обработке дополнительного количества (до 40 %) высокочастотных импульсов тока и напряжения, что расширяет в 1,5–2,2 раза рабочий диапазон вольт-амперных характеристик процесса и интенсифицирует на 80–120 % массоперенос.

6. Результаты экспериментальных исследований изменения в режиме реального времени электрических параметров и анализа осциллограмм частотных колебаний в активированных электролитах при АМДО, позволяющие установить механизм интенсификации процесса, связанный с выделением дополнительной энергии (25–30 %) в анодно-катодной области за счет ускорения электрохимических взаимодействий, появления и развития в электролите высокочастотных колебаний с высокой амплитудой по току, сопровождаемых увеличением количества

микроразрядов на упрочняемой поверхности при стандартных режимах серийного оборудования.

7. Результаты исследования структурно-фазового и напряженно-деформированного состояний упрочненных поверхностей интенсифицированными микроплазменноискровыми методами, позволяющие установить механизмы упрочнения, наноструктурирования и изменения фазового состава материала покрытия за счет дополнительной деформации его кристаллической структуры при электромеханическом воздействии с дроблением зерен и кристаллитов в 1,5–2,0 раза, что обуславливает повышение плотности дислокаций в 4,5–8,5 раз, а значит, и активизирует скорость диффузионных процессов, а также механизмы стабилизации и упорядочения структурного и напряженного состояний упрочняемого материала, связанные с релаксацией остаточных напряжений под действием ультразвукового поля.

8. Результаты влияния электромеханической интенсификации микроплазменноискровых методов в жидкой и газовой средах на физико-механические и эксплуатационные свойства изделий с покрытиями, подтверждающие эффективность примененных приемов интенсификации и гарантирующие надежную и в среднем в 2,5–5 раз более долговременную работу изделий с полученными покрытиями в условиях термоциклирования, интенсивного износа, высоких температур.

Личный вклад соискателя. Выбор научно-технического направления, постановка цели и задач исследования, методические подходы к их решению, выводы и рекомендации принадлежат автору. Соискатель сформулировала научную идею, создала концепцию, а также разработала интенсифицированные микроплазменноискровые методы упрочнения, восстановления и декорирования металлических изделий повышенной точности в жидкой и газовой средах с дополнительным электромеханическим воздействием на упрочняемый материал и реализацией энергосберегающего эффекта при обработке. Автором проведен комплекс теоретических и экспериментальных исследований с созданием и применением измерительно-управляющих устройств и программного обеспечения. Чигринова Н.М. приняла участие в патентовании разработок, в соавторстве разработала технические условия на восстановление и упрочнение плунжерных пар методом ЭИЛ с УЗМ ТУ Респ. Беларусь 05893818.272-9 и на титановые изделия с оксидо-керамическими покрытиями, внедрила выполненные разработки в промышленность республики. В тексте диссертации и автореферата даны ссылки на все совместно опубликованные с соавторами работы. Теоретические исследования проводились совместно с д-ром физ.-мат. наук Нелаевым В.В. (БГУИР), канд. физ.-мат. наук Кулешовым А.А. (БГУ), консультации по составам покрытий на имплантатах – с член-корр. НАН Беларуси Ильюшенко А.Ф., обсуждение и разработка технологических параметров нанесения покрытий – с научн. сотр. Чигриновым В.Е., изучение характера теплопередачи в ДВС и создание блока фиксации температурных полей – с научн. сотр. Кузнециком О.О. и инж. Пресняковым Г.Н., изучение изменения в режиме

реального времени электрических параметров обработки с созданием измерительно-контролирующего устройства – с инж. Дроздовым А.В.

Апробация результатов диссертации. Основные результаты и положения диссертации были представлены на 70 международных (МК) и республиканских научно-технических (НТК) конференциях, симпозиумах, выставках. Наиболее значительные из них: МК III НТК «Современные материалы, оборудование и технологии упрочнения и восстановления деталей машин», Новополоцк, 1997 г., 1999 г., 2005 г.; МК «Пленки и покрытия», СПб, 1998 г., 2001 г., 2005 г.; МК «Материалы и покрытия в экстремальных условиях. Исследование, применение» Ялта, 2000 г., 2002 г., 2004 г., 2008 г.; 8-я МК «Технология ремонта машин, механизмов, оборудования», Киев, 2000 г., 9-я МК «Дислокационная структура, механические свойства металлов и сплавов – ДСМСМС-2002», Екатеринбург, 2002 г.; МК «Петербургские чтения по проблемам прочности», СПб, 2002 г., 2003 г.; МК «Триботехника» SITC, Зелена Гура, 2002 г., Польша; 6-я МК «Фуллерены и фуллереноподобные структуры в конденсированных средах», Минск, 2004 г.; НТК «Проблемы космической триботехники». «Космотриб-2004», Гомель, 2005 г.; НТК «Ремонтные технологии. Новые разработки и практика», Минск, 2005 г.; МК «Композиционные материалы в промышленности», Ялта, 2005 г., 2007 г., 2008 г., 2009 г.; International Workshop on New Approaches to High-Tech: Non-destructive Testing and Computer Simulations in Science and Engineering, Olsztyn, 2006, Poland; International Conference on Mathematical Modeling and Computer Simulations of Materials Technologies, Ariel, 2006, 2008, Israel; International Workshop on New Approaches to High-Tech: Nano Design, Technology, Computer Simulations, Bayreuth, 2007, Germany; МК «Технологии, оборудование, качество», Минск, 2008 г., 2009 г.; МК «Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка», Минск, 2008 г., 2009 г.; МК «Сварка и родственные технологии», Гродно, 2008 г., МС «Перспективные материалы и технологии», Витебск, 2009 г.

Опубликованность результатов диссертации. По материалам диссертационных исследований опубликовано 114 работ, из них 30 статей в научных журналах, рекомендованных перечнем ВАК Респ. Беларусь, ВАК России, ВАК Украины, общий объем которых составляет 24 авторских листа, 57 работ в сборниках США, Германии, Польше, России, Украине, Респ. Беларусь, а также 14 докладов на МНТК и МС. Новизна технических решений подтверждена 11 патентами Респ. Беларусь на изобретения, 2 патентами на полезную модель и 3 положительными решениями на получение патентов на изобретение. Получены Технические условия на восстановление плунжерных пар методом электронского легирования с ультразвуковым модифицированием ТУ Респ. Беларусь № 05893818.272-97 и подготовлены Технические условия на медицинские имплантаты с покрытиями. Общий объем опубликованных по теме диссертации материалов, включая 12 приложений, составляет 565 страниц или 83 авторских листа.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из общей характеристики работы, шести глав с краткими выводами, заключения, списка литературы и 12 приложений. Работа включает 185 иллюстраций на 87 страницах, 52 таблицы на 24 страницах, библиографию из 336 наименований использованных источников на 25 страницах и списка публикаций соискателя из 114 наименований на 14 страницах, 12 приложений на 255 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена краткая оценка современного состояния изучаемой проблемы, обоснована актуальность темы, представлены основные положения, выносимые на защиту, показана научная, практическая и социальная значимость работы, а также личный вклад соискателя и апробация результатов исследования.

Первая глава посвящена анализу особенностей поверхностного упрочнения материалов различными методами, включая АМДО и ЭИЛ, с оценкой эффективности различных технологий упрочнения, определением преимуществ микроплазменноискровых методов и изучением проблем, существующих в мире и Респ. Беларусь, при упрочнении и восстановлении изделий повышенной точности.

Отмечено, что к настоящему времени не создана теория, полностью отражающая специфическую сущность многофакторных явлений при обработке изделий повышенной точности микроплазменноискровыми методами. Отсутствует единое мнение об особенностях влияния технологических режимов, интенсивности энергетического воздействия и состояния поверхности обрабатываемого материала на динамику массопереноса и анодно-катодных взаимодействий. Некоторые исследователи решают вопросы повышения эффективности электроискрового легирования за счет конструктивных изменений специализированного оборудования. Так, рост производительности ЭИЛ связывается с увеличением частоты следования рабочих импульсов за счет сокращения времени зарядки конденсатора, либо посредством сообщения одному электроду механических колебаний малой амплитуды и высокой частоты с быстрым вращением электрода-инструмента вокруг своей оси, либо посредством безвибрационной обработки поверхности и применением многоэлектродных анодов и т.п. Исследователи метода ЭИЛ видят улучшение качества создаваемых покрытий в грамотном выборе материала легирующего электрода. При этом указывается, что фазовый состав формируемых слоев должен соответствовать химическому составу материала электрода. Это трудноразрешимая задача. К технологическим приемам интенсификации метода АМДО и повышения качества покрытий исследователи относят оптимизацию рецептуры электролита и электрических параметров процесса, а также совершенствование серийного оборудования с неизбежным возрастанием его стоимости и энергоемкости. При этом получение слоев с регулярной структурой и сниженными остаточными напряжениями не гарантируется. Вместе с тем специалисты сходятся во мнении, что качество создаваемого покрытия зависит от степени согласования режимов упрочнения с кинетикой внутренних процессов созданных по-

крытий. Это определяет необходимость разработки новых версий изучаемых методов, исключая недостатки стандартных и обеспечивающих получение за фиксированный промежуток времени более толстых и качественных покрытий при сниженных затратах на их формирование.

Анализ существующих микроплазменных технологий указывает также на то, что для интенсификации массопереноса, определяющего толщину и качество покрытия, необходимой и своевременной является разработка концептуальных подходов и технологических принципов управления энергией импульсного разряда, частотой возникновения импульсов и вибрации анода. На основе сделанных выводов сформулирована цель работы и определены задачи, решение которых необходимо для ее достижения.

Вторая глава посвящена разработке концепции и теоретическому обоснованию способов интенсификации микроплазменных процессов в жидкой и газовой средах за счет применения дополнительного электро-механического воздействия на упрочняемый материал.

В газовой среде предусматривается последовательное действие на упрочняемый материал энергии электроразрядной плазмы и его низко- (150 Гц) и высокочастотное (22 кГц) деформирование. Стадийность ультразвуковой деформации материала катода определяется его первоначальным напряженно-деформированным состоянием и ответственна за изменение контактных условий в анодно-катодной области, а также состояние формируемой структуры и твердости обрабатываемой поверхности (рисунок 1).

Схема типового процесса ЭИЛ

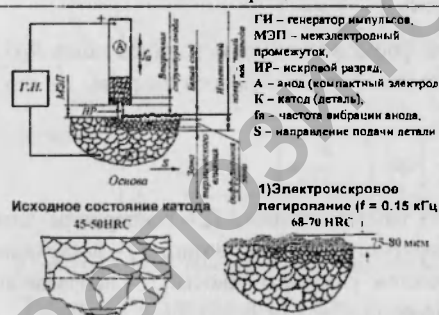
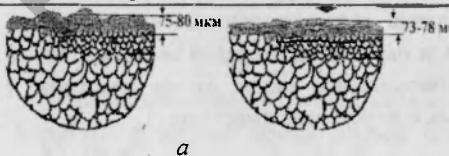


Схема ультразвуковой обработки (УЗО)



Процесс ЭИЛ + УЗО



Процесс УЗО + ЭИЛ + УЗО

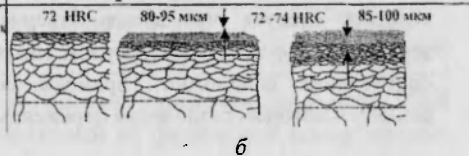


Рисунок 1 – Схемы типового (а – ЭИЛ) и ультразвукового (б – УЗО) процессов легирования и эволюция состояния структуры упрочняемой поверхности

С целью оптимизации процесса эрозии при ЭИЛ, определяющего толщину покрытия, создан ряд физико-математических моделей интенсифицированного процесса ЭИЛ, в которых в качестве входных параметров выбраны частотные, электрические и временные характеристики (длительность обработки t и паузы между последовательными искровыми разрядами δ):

1) физико-математическая модель расчета объема материала анода, эродировавшего в одном искровом разряде в процессе ЭИЛ, на основе модели теплопроводности от точечного источника;

2) физико-математическая модель расчета времени затвердевания капли расплавленного материала в результате искрового разряда с использованием модели теплопроводности от мгновенного сферического источника тепла;

3) эмпирическая модель процесса массопереноса при изменении электрических и частотных параметров легирования, основанная на теории малых колебаний механических систем и учитывающая силы упругости, сопротивления деформированию, инерции в системе металл-покрытие, с помощью которой оптимизировано соотношение частотных, вольт-амперных характеристик, времени процесса легирования и скорости эрозии анода.

Согласно первой модели в результате проведенных преобразований классического уравнения теплопроводности и установления начальных $t = 0, \forall r, T = T_0$ и граничных условий $-k_r \frac{\partial T}{\partial r} = q_c$ и $-k_r \frac{\partial T}{\partial r} = 0$ для $r = 0$ и для $r = \infty$, а также при $T = T_0$ при $t > 0$ и $r = \infty$ получено результирующее распределение температуры по поверхности капли эродирующего металла

$$T = T_0 + \left(\frac{F_c U I}{2 p k_r r} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{r}{2 \sqrt{6 t}} \right)$$

позволяющее при $r = R$ выразить в неявной форме зависимость радиуса капли $R(t)$ материала анода, расплавленного в процессе электроискрового разряда, от его длительности t

$$T(R) = T_m = T_0 + \left(\frac{F_c U I}{2 p k_r R} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{R}{2 \sqrt{6 t}} \right)$$

где T_0 – температура среды; q_c – мощность тепловыделения; T_m – температура плавления материала анода; t – время моделируемого процесса эрозии; F_c – постоянная доля от полной, выделяемой при электрическом разряде мощности; U – напряжение; I – ток; $\alpha = k_r / c C_p$ – коэффициент термодиффузии.

Теплообмен на границе капли описывается уравнением Ньютона, из которого следует, что время затвердевания капли зависит от коэффициента теплообмена h между материалом анода и окружающей средой (воздух). Задача определения зависимости времени затвердевания капли от ее размеров R решается методом разделения переменных и ее решение имеет вид

$$T(r, t) = T_0 + 2(u_1 - u_0) h R^2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{\sqrt{\alpha_n^2 + (hR-1)^2}}{\alpha_n (\alpha_n^2 + h^2 R^2 - hR)} \exp\left(-\frac{\alpha_n^2 t}{R^2}\right) \frac{\sin\left(\frac{\alpha_n r}{R}\right)}{r}$$

где h – коэффициент теплообмена материала анода с окружающей средой; ∂_r и ∂_t – производные первого порядка по температуре и по радиусу; u_0 – начальная температура остывания; u_1 – температура среды, К; ξ_n – положительные корни трансцендентного уравнения $\operatorname{tg}(\xi) = -\frac{\xi}{hR - 1}$.

При оценке значения h для капли радиусом от 10 до 80 мкм максимизируется целевая функция

$$f = -\frac{R^2}{a^2(\xi_1^2 - \xi_2^2)} \ln \left(\frac{\xi_2^2 + h^2 R^2 - hR}{\xi_1^2 + h^2 R^2 - hR} \sqrt{\frac{\xi_1^2 + (hR - 1)^2}{\xi_2^2 + (hR - 1)^2}} \right)$$

зависящая от коэффициента теплообмена h материала анода и имеющая своими значениями время затвердевания капли. Анализ результатов численного решения трансцендентного уравнения (1) показал зависимость корней этого уравнения от величины h (таблица 1).

Таблица 1 – Длительность затвердевания капли t в зависимости от константы h

h	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-3}$	1	1·10
$T, \text{с}$	$3,1 \cdot 10^{-8}$	$9,0 \cdot 10^{-8}$	$9,1 \cdot 10^{-8}$	$9,2 \cdot 10^{-8}$

Полученные данные свидетельствуют о том, что параметр может изменяться в широких пределах и предложенная модель пригодна для анодов из разных материалов.

Зависимость температуры в центре капли от времени выражается уравнением

$$T(0, t) = u_1 + 2(u_1 - u_0)hR \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{\sqrt{\xi_n^2 + (hR - 1)^2}}{(\xi_n^2 + h^2 R^2 - hR)} \exp\left(-\frac{a^2 \xi_n^2 t}{R^2}\right). \quad (1)$$

Если $hR < 1$, то при всех значениях времени t , удовлетворяющих неравенству

$$t \geq t_{\text{def}} = -\frac{R^2}{a^2(\xi_1^2 - \xi_2^2)} \ln \left(\frac{\xi_2^2 + h^2 R^2 - hR}{\xi_1^2 + h^2 R^2 - hR} \sqrt{\frac{\xi_1^2 + (hR - 1)^2}{\xi_2^2 + (hR - 1)^2}} \right),$$

в центре капли заведомо будет иметь место стационарный режим.

Таблица 2 – Длительность затвердевания капли t в зависимости от ее радиуса при произвольно принятом $h = 1,9 \cdot 10^3$.

$R, \text{мкм}$	10	20	30	40	50	60	70	80
$T, \text{с}$	$0,1 \cdot 10^{-6}$	$0,4 \cdot 10^{-6}$	$0,9 \cdot 10^{-6}$	$1,7 \cdot 10^{-6}$	$2,7 \cdot 10^{-6}$	$3,9 \cdot 10^{-6}$	$5,3 \cdot 10^{-6}$	$6,9 \cdot 10^{-6}$

Для объяснения и прогнозирования результатов интенсифицированного ЭИЛ в работе предложен новый подход, основанный на физической интерпретации экспериментальных данных по массопереносу в зависимости от изменения напряженно-деформированного состояния поверхности упрочняемого катода. Неравномерный во времени характер изменения величины $\Delta m / \Delta t$ свидетельствует

вуют о трансформации со временем состояния контактирующих поверхностей взаимодействующих электродов, обусловленном изменением их твердости, геометрии и электросопротивления, что, в соответствии с законом Пашена, приводит к смене условий для наступления электроискрового разряда, а следовательно, к изменению условий протекания электрического тока при анодно-катодных взаимодействиях, определяющего процессы массопереноса. В терминологии теории малых колебаний механических систем с ограниченным числом степеней свободы совокупность этих состояний интерпретирована в работе в форме коэффициентов влияния в дифференциальном уравнении, описывающем свободные колебания механических систем. В основе описания поведения такой системы лежит предположение о том, что свободные колебания в ней в реальных условиях затухают, поскольку на ее составляющие элементы действуют некоторые силы сопротивления R_p , вызывающие диссипацию общей механической (кинетической и потенциальной) энергии. Для записи дифференциального уравнения движения системы с одной степенью свободы использовано уравнение Лагранжа

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \right) - \left(\frac{\partial T}{\partial q} \right) = Q_p + Q_R, \quad (2)$$

где $Q_p = -\frac{\partial U}{\partial q}$, N – так называемые «восстанавливающие» силы, стремящиеся

привести систему в состояние равновесия, а T и U – кинетическая и потенциальная энергии системы, Дж, соответственно. В обобщенной системе координат выражения для кинетической T , потенциальной U и диссипативной Φ энергий имеют вид:

$T = \frac{1}{2} a \dot{q}^2$, $U = \frac{1}{2} c q^2$, $\Phi = \frac{1}{2} b \dot{q}^2$, а обобщенные «восстанавливающие» силы Q_p и силы сопротивления $Q_R - Q_p = -cq$; $Q_R = -b\dot{q}^2$ соответственно.

Подставляя эти значения в уравнение Лагранжа (2), получим

$$a\ddot{q} = -cq - b\dot{q}. \quad (3)$$

Введем обозначения $c = k^2/a$; $b = 2n/a$.

Тогда уравнение (3) примет вид $\ddot{q} + \frac{2n}{a}\dot{q} + \frac{k^2}{a}q = 0$. (4)

В работе рассматривается общий случай движения системы около положения равновесия. При этом принимается, что на точки системы действуют восстанавливающие силы Q_p , стремящиеся вернуть систему в равновесное состояние, силы сопротивления Q_R (противодействующие изменению состояния подложки), а также возмущающие силы Q_F (определяющие внешнее воздействие на систему, т.е. электрические параметры, управляющие процессом нанесения покрытий). При $Q_F = 0$ отсутствуют вынужденные колебания системы – при ЭИЛ это состояние соответствует потере массы анода в начале обработки.

Таким образом, для рассматриваемой системы уравнение Лагранжа с учетом возмущающих сил имеет вид

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \right) - \left(\frac{\partial T}{\partial q} \right) = Q_P + Q_R + Q_I.$$

Путем подстановки (см. уравнения (2) и (3)) получим

$$\ddot{q} + \frac{2n}{a} \dot{q} + \frac{k^2}{a} q = \frac{1}{a} Q_F(t). \quad (5)$$

В результате рассмотрения правой части уравнения (5) как описывающей процесс с гауссовым распределением с независимыми приращениями на основании однородного уравнения (4), вычислены коэффициенты k , n и a , которым в работе приведено соответствие силы упругости, силы сопротивления и силы инерции системы. С использованием соответствующего алгоритма и ПО, реализованного в компьютерной системе *Mathematica*, по узлам интерполяции выражений, определяющих на основании экспериментальных данных динамику массопереноса материала анода, построены интерполяционные сплайны третьего порядка, дающие возможность снимать значения потери массы в любой момент времени обработки и рассчитан суммарный уровень и диапазон механической энергии в контактной области, определяющей интенсивность анодно-катодных взаимодействий (рисунок 2).

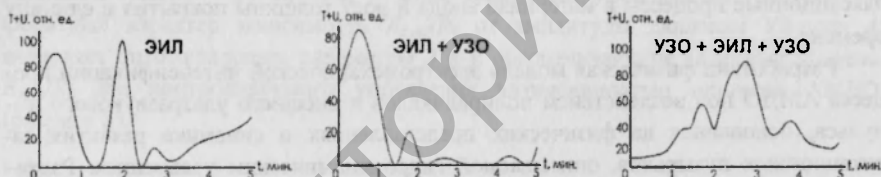


Рисунок 2 – Зависимость от времени t суммарной энергии системы $(T+U)$ при изучаемых способах легирования

Во второй главе изложены также теоретические представления о влиянии разработанных способов интенсификации АМДО на кинетику электрохимических процессов в водно-щелочных электролитах, активированных: *химическим способом* – посредством дополнительного введения в стандартный электролит химических ингредиентов, снижающих его вязкость, *электрическим*, благодаря присадкам разнозаряженных полирадикальных частиц, *электромеханическим* в результате воздействия на раствор ультразвуковым полем (рисунок 3).

Впервые предложено объяснение механизма интенсификации процесса АМДО в активированных электролитах, основанное на явлении кавитации. При воздействии на жидкость ультразвуковым полем в ней появляются пульсации, формируя области отрицательного и положительного давлений. При достижении определенного уровня и соотношения величин этих давлений в растворе возникает неразрушающая кавитация, обуславливая схлопывание кавитационных пу-

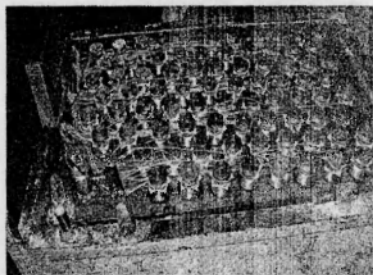


Рисунок 3 – Электролизная ванна с акустическими элементами на днище

зырьков вокруг оксидируемого анода, приводя к повышению давления в зоне пробоя и создавая упруго-деформационное поле с ультразвуковым излучением. В диапазоне применяемых частот и давлений УЗ-поля это вызывает микродеформацию и повышение плотности дислокаций в поверхностных слоях оксидируемого анода, интенсифицирует диффузионные процессы и ускоряет рост покрытия. Энергия ультразвукового поля в растворе с возникающими ударными волнами при схлопывании пузырьков поддерживают высокую температуру в реакционной зоне, что продлевает стадию термолитиза в электролите, активизирует процессы растворения анода и его химического взаимодействия с продуктами гидролиза электролита, обуславливает дополнительные реакции взаимодействия оксидов металла и оксидов химических элементов анионного комплекса, обеспечивая интенсификацию нарастания толщины оксидных слоев и изменение их фазового состава. Эти же ударные волны наклепывают обрабатываемую поверхность, дополнительно активируя ее, ускоряют релаксационные процессы в материале анода и рост толщины покрытия в единицу времени.

Разработана физическая модель электрохимической интенсификации процесса АМДО под воздействием полирадикалов и внешнего ультразвукового импульса, основанная на физических представлениях о динамике развития кавитационных пузырьков, описываемой гидродинамическим уравнением Рэлея–Плесе, модифицированным с учетом зарождения и развития в электролите процессов неразрушающей кавитации.

$$\frac{p_v(T_\infty) - p_v(t) + p_{lv} \left(\frac{R_0}{R} \right)^{2k}}{\rho_l} = \frac{\dot{R}}{2} \left(1 - \frac{\dot{R}}{3c} \right) + \frac{4v_l \dot{R}}{R} + \frac{2S}{\rho_l R}, \quad (6)$$

где R – радиус пузырька; ρ – плотность жидкой среды; S – коэффициент поверхностного натяжения на поверхности пузырька; p_{G0} – парциальное давление газа в пузырьке радиусом R_0 ; $p_v(T_\infty)$ – давление насыщенного пара при температуре T_∞ вдали от пузырька; k – политропическая константа.

Однако уравнение (6) не учитывает сжимаемость жидкости – эффект, который с необходимостью должен проявляться при давлениях коллапса пузырьков. Этот недостаток устранен в модели Келлера–Миксиса и в ее модификации Парлицем с соавторами, которая выражается следующим уравнением:

$$\left(1 - \frac{\dot{R}}{c} \right) R \dot{R} + \frac{3}{2} \dot{R}^2 \left(1 - \frac{\dot{R}}{3c} \right) = \left(1 - \frac{\dot{R}}{c} \right) \frac{P}{\rho_l} + \frac{R}{\rho_l c} \dot{P}, \quad (7)$$

$$\text{где } P = \left(p_{\text{stat}} - p_v(T_{\infty}) + \frac{2S}{R_0} \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3k} - \frac{2S}{R} - \frac{4M_L \dot{R}}{R} - p_{\text{stat}} + p_v(T_{\infty}) - A \sin(2\rho f t) \right)$$

Замена переменных $\dot{R} = u$ и $f = \Theta$ сводит (7) к уравнению

$$\dot{u} = \left[\left(1 - \frac{u}{c} \right) R + \frac{4M_L}{p_L c} \right]^{-1} \left[-\frac{u^2}{2} \left(3 - \frac{u}{c} \right) + \left(1 + (1 - 3k) \frac{u}{c} \right) \left(\frac{p_{\text{stat}} - p_v(T_{\infty})}{p_L} + \frac{2S}{p_L R_0} \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3k} - \frac{2S}{p_L R_0} - \frac{4M_L u}{p_L R} \right) - \left(1 + \frac{u}{c} \right) \frac{p_{\text{stat}} - p_v(T_{\infty}) + A \sin(2\rho\Theta)}{p_L} - R \frac{2\rho f}{p_L c} A \cos(2\rho\Theta) \right]$$

В процессе расчетов и экспериментов определены параметры ультразвукового поля (частоты и амплитуды давления), обеспечивающие выделение необходимой энергии для коллапса кавитационных пузырьков без разрушения оксидируемого анода. Показано, что энергия, выделяющаяся при схлопывании пузырька, зависит от отношения R_{max}/R_0 , где R_{max} – максимальный радиус пузырька, достигаемый им в процессе полупериода растяжения жидкой среды при ультразвуковом воздействии, а R_0 – начальный радиус пузырька, образованного при ее сжатии. Установлено, что величина R_{max}/R_0 уменьшается до 1,5 раз при увеличении частоты УЗ-поля от 20 до 30 кГц. Расчеты показали, что сильная зависимость отношения R_{max}/R_0 от частоты наблюдается в начале ультразвукового диапазона частот – до 40 кГц, а затем монотонно уменьшается (рисунок 4). Обратный характер зависимости R_{max}/R_0 от амплитуды давления УЗ-поля A позволяет оптимизировать параметры A и f , обеспечивающие заданный уровень R_{max}/R_0 для контролируемого управления интенсивностью процесса АМДО (рисунок 5).

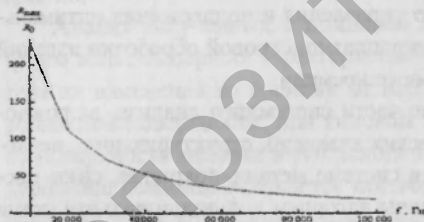


Рисунок 4 – Зависимость R_{max}/R_0 от частоты f УЗ-поля при $R_0 = 1 \text{ мкм}$ и $A = 2,0 \cdot 10^5 \text{ Па}$

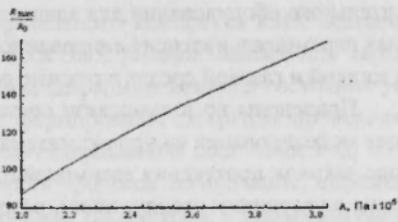


Рисунок 5 – Зависимость R_{max}/R_0 от амплитуды давления A УЗ-поля при $R_0 = 1 \text{ мкм}$ и $f = 25 \text{ кГц}$

Параметр R_0 зависит от условий зародышеобразования пузырька. Расчетами установлено, что оптимальное соотношение R_{max}/R_0 , определяющее степень интенсификации электрохимических процессов в околоанодной области без разрушения оксидируемого анода, проявляется в узком, но реальном при практической реализации диапазоне изменения R_0 : 1–3 мкм (рисунок 6). Это величины того же порядка, что и размер полирадикалов, вводимых в электролит и

результатов моделирования физических явлений, сопровождающих процесс АМДО, позволил решить многофакторную задачу управления процессом получения покрытий заданной толщины и качества посредством целенаправленного выбора параметров активации электролитов, определяющих их плотность, вязкость, размер полирадикалов, а также амплитуды давления и частоты ультразвукового поля. Результаты приведены на рисунках 4, 5, 6 и в таблице 3.

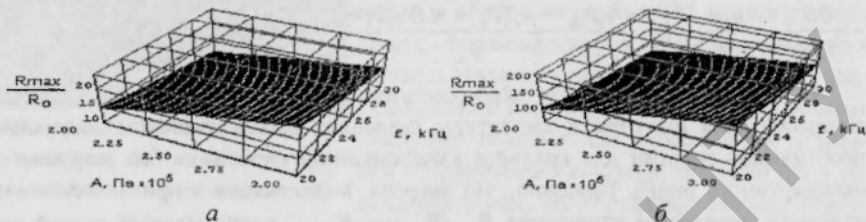


Рисунок 6 – Зависимость R_{\max}/R_0 от частоты f и амплитуды давления A ультразвукового поля при разных R_0 : 10 мкм (а) и 1 мкм (б)

Таблица 3 – Допустимый разброс входных факторов ρ , μ и p_{stat} , обеспечивающих заданный диапазон изменения выходного параметра R_{\max}/R_0

R_{\max}/R_0	Допустимые изменения входных параметров		
	ρ , г/см ³	μ , П	p_{stat} , 10^5 Па
$100 \pm 10\%$	0,699–1,297	0,71–1,32	0,80–1,32
$300 \pm 15\%$	0,634–1,567	0,53–1,05	0,50–1,90

Третья глава посвящена разработке алгоритма, методик и контрольно-измерительного оборудования для адаптивного управления и поддержания оптимальных параметров интенсифицированной микроплазмой обработки изделий в жидкой и газовой средах в режиме реального времени.

Приведены во взаимосвязи составные части системного анализа, включающие моделирование на уровне математических аналогий, структуризацию, иерархию законов протекания взаимодействий в системе металл–покрытие, связь системы с условиями эксплуатации, разработаны алгоритм и функциональная схема адаптивного управления динамикой микроплазмой обработки с одновременным контролем поведения обрабатываемого объекта на основании анализа его *текущего* состояния. Представлены данные о разработанных и запатентованных информационно–измерительном комплексе ИИК, устройстве контроля и управления кинетикой нарастания толщины покрытий по продолжительности микроплазмой воздействий и изменению «цвета искры» УККП с выработкой управляющего сигнала и методике, позволяющей с помощью высокоскоростного осциллографа АЦП В-421 измерять с точностью 0,05 % в режиме реального времени электрические характеристики с их анализом на базе созданного ПО; автоматизированный блок высокоточного измерения температуры БФТП с ошибкой не более 0,3 %, адаптированный к условиям испытаний на заводских стендах об-

катки двигателей, и методика исследования температурного поля поршня двигателя внутреннего сгорания. Разработана и опробована методика определения эффективного прироста покрытия, позволяющая определить расход энергии на его образование. Для исследования структурного состояния обработанных поверхностей применялись стереоскопический микроскоп Texnlval (Carl Zeiss Iena), растровая и оптическая микроскопии Mef-3 (Reichert-Jung). Использовались высококоразрешающий метод сканирующей электронной микроскопии с микрорентгеноспектральным анализатором и электронный микроскоп «CamScan» с рентгеновским энергодисперсионным спектрометром «Inca 350» «Oxford Instruments». Поверхность фотографировали цифровым фотоаппаратом HP photosmart 715 digital camera. Для анализа фазового и напряженного состояния материала применяли количественный точечный, рентгеноструктурный и микрорентгеноспектральный анализы с применением спектрометра по дисперсии энергии SED на анализаторе AN 10000 (Link Analytical), установленном на сканирующем электронном микроскопе CamScan, с методиками оценки системы обработки информации СОИ и планирования эксперимента, реализованными в пакете программ для IBM PC/AT с разработанными программными средствами компьютерной графики «GOR»: SPLIT LINE, FOUR1 и MIC2L. Определение пористости осуществлялось посредством количественного стереологического анализа образцов на анализаторе изображения «Mini-Magiscan» («Joyce Loebel») по программе «Genias 26».

Четвертая глава посвящена исследованию особенностей и установлению механизмов влияния электрохимической интенсификации электроискрового легирования и составов легирующих анодов на кинетику анодно-катодных взаимодействий, структуру, фазовый состав и напряженное состояние формируемых покрытий.

Анализ полученных с помощью измерительного комплекса ИИК осциллограмм вольт-амперных характеристик процесса ЭИЛ выявил зависимость характера их изменения во времени от напряженно-деформированного состояния упрочняемой поверхности: при типовом ЭИЛ формирование покрытия происходит на поверхности металла в его исходном, неактивированном состоянии и во всем диапазоне режимов отмечается нестабильность процесса легирования, выраженная в заметных колебаниях уровня электрических параметров, в неравнотолщинности и несплошности созданного покрытия (рисунки 7 и 8, а). Последующая ультразвуковая обработка (ЭИЛ + УЗО) улучшает качество созданного покрытия вследствие массопереноса эродирующего материала анода существенно более мелкими каплями (рисунок 8, б). Толщина слоя увеличивается на 5–10 мкм, отклонения от равнотолщинности не превышают 2–4 мкм. Трехступенчатая обработка (УЗО + ЭИЛ + УЗО), приводящая при ультразвуковом воздействии на поверхность катода в начальной стадии создания покрытия к изменению его исходного напряженно-деформированного состояния, обеспечивает возрастание поверхностной твердости на 30–80%, формирование более регулярного рельефа упрочняе-

мой поверхности и более активное и стабильное протекание процесса легирования с образованием равнотолщинных покрытий (рисунки 7, 8, в).

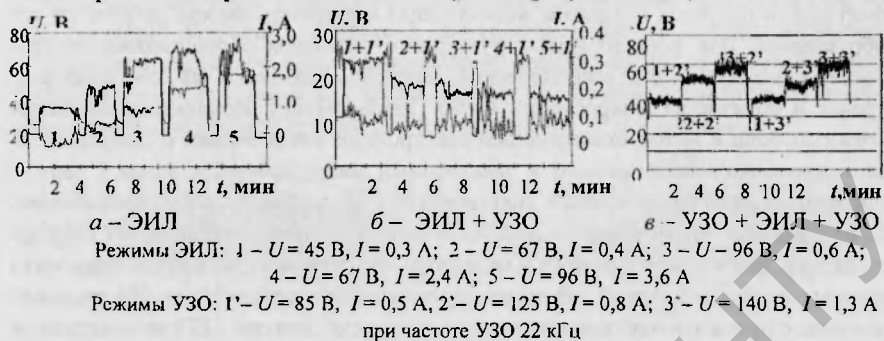


Рисунок 7 – Изменение в режиме реального времени средних значений тока и напряжения при различном электромеханическом воздействии на катод из стали 40Х в процессе его легирования электродом ВК 8



Рисунок 8 – Микроструктура твердосплавного покрытия на стали Р6М5 после ЭИЛ (а), ЭИЛ + УЗО (б) и УЗО + ЭИЛ + УЗО (в)

Механизм действия предложенных приемов интенсификации ЭИЛ на динамику массопереноса связан с увеличением уровня энергетического воздействия на систему металл–покрытие за счет появления в анодно-катодной области при ультразвуковой обработке дополнительного количества (до 40 %) высокочастотных импульсов тока вследствие сдвига напряжений искрения в область больших значений с повышением энергии электроразряда. Это связано с изменением контактных условий взаимодействия анода и катода, вызванного изменением напряженно-деформированного состояния материала катода в процессе его предварительной ультразвуковой деформации за счет снижения его сопротивления пластическому течению и вследствие наклепа, а также эродированием материала анода мелкими и равновеликими каплями в результате его вибрации с ультразвуковой частотой. Это приводит к расширению диапазона рабочих токов процесса ЭИЛ, обеспечивающих ускоренный на 80–120 % и устойчивый массоперенос (рисунок 9) с формированием покрытий увеличенной в 1,3–2,2 раза толщины (рисунок 10). Определено, что покрытия с минимальным количеством несовершенств и регулярным рельефом с отклонениями от равнотолщинности не более 1–3 мкм получают в процессе трехступенчатого легирования УЗО + ЭИЛ + УЗМ при рав-

ном или близком по величине соотношении высокочастотных выбросов по току и напряжению.

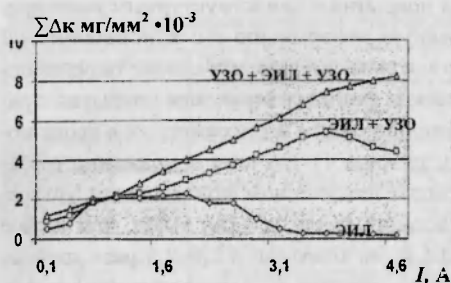


Рисунок 9 – Изменение величины привеса катода при легировании стали Р6М5 электродом из ВК 6

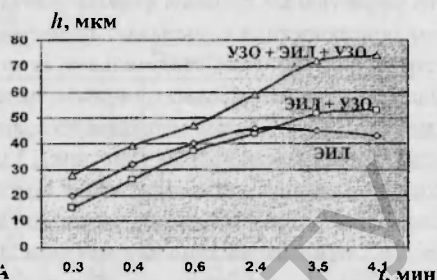


Рисунок 10 – Влияние энергетического воздействия изменяющейся интенсивности на толщину покрытия

Установлено, что независимо от типа металлической основы, скорость массопереноса материала анода определяется его химическим составом и термодинамической устойчивости. Однако, доминирующую роль в получении покрытий с бездефектной топографией и регулярной геометрией поверхности играет интенсивность ультразвуковой деформации. Этот же фактор влияет и на изменение микротвердости и шероховатости упрочненной поверхности (рисунки 11, 12), а также ее фазовый состав: наиболее качественные слои независимо от состава легирующего анода формируются при трехступенчатой обработке УЗО + ЭИЛ + УЗО с возрастанием суммарного количества карбидных фаз в твердосплавных покрытиях, включая двойные и тройные карбидные системы, с 20 % при типовом ЭИЛ до 81 % после трехступенчатого легирования.

$H_c, \text{ ГПа}$

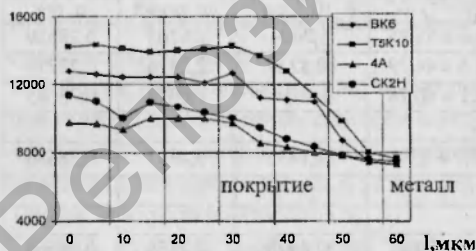


Рисунок 11 – Распределение H_c по сечению покрытия на стали 40X после ее трехступенчатого легирования различными электродами

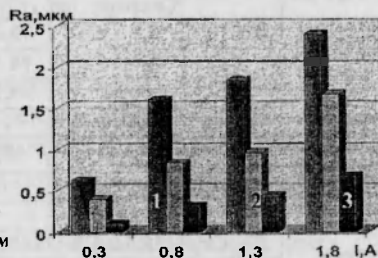


Рисунок 12 – Изменение шероховатости поверхности твердосплавных покрытий, полученных ЭИЛ (1), ЭИЛ + УЗМ (2), УЗО + ЭИЛ + УЗМ (3)

Объяснение зафиксированных особенностей упрочнения найдено при исследовании и расчетах уровней напряжений и параметров тонкой структуры покры-

тия и упрочненной поверхности. Установлено, что предложенное дополнительное воздействие на материал электрического и ультразвукового полей является одним из эффективных приемов формирования покрытия с наноструктурным состоянием поверхности, т.к. вызывает существенную деформацию его кристаллической структуры. Об этом свидетельствует «галло» на дифрактограммах, определяющее наличие аморфно-микроструктурных фаз на поверхности покрытия с размером ОКР в 1,5 раза меньшим по сравнению с этим же параметром в слоях после типового легирования (рисунок 13 и таблица 4). Расчеты напряженного состояния материала показали, что в покрытии, полученном под двойным ультразвуковым воздействием, плотность дислокаций почти в 6 раз выше, чем в слое после легирования типовым методом ЭИЛ, но меньший в 2,0–2,5 раза уровень напряжений в материале, что объясняется процессами их релаксации при ультразвуковой обработке (таблица 4).

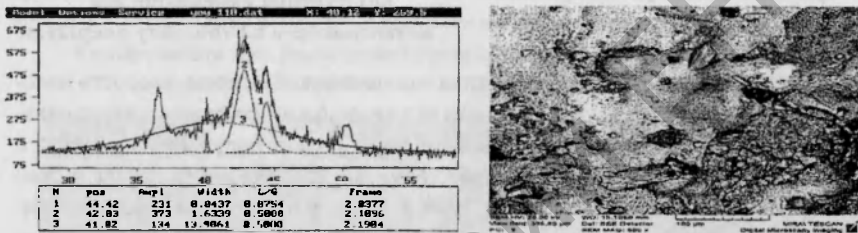


Рисунок 13 – Дифрактограмма и топография упрочненной поверхности покрытия, полученного в результате трехступенчатой обработки УЗО + ЭИЛ + УЗО

Таблица 4 – Параметры тонкой структуры твердосплавного покрытия

Исследуемые образцы	Фаза	Размер ОКР ($D_{эфф.}$ по Селякову, нм)	ОСМД (по Селякову), $\langle E^2 \rangle^{1/2} 10^{-4}$	Плотность дислокаций $\theta \cdot 10^{10}$, см ⁻¹	Интегральная ширина линий	Параметр решетки a , нм
Исх. сост-е	(Fe, Cr)	9,9 ± 2,6	78,6 ± 53,95	5,2604	2,6263	0,28629
ЭИЛ	(Fe, Cr)	1,0 ± 0,8	68,4 ± 44,39	10,8227	2,2816	0,28774
	“galo”	0,62	48,1 ± 40,18	0,1614	1,6012	0,28685
	WC _{1-x}	7,4 ± 0,9				
ЭИЛ + УЗО	(Fe, Cr)	15,8 ± 0,8,2	16,7 ± 8,34	22,1453	0,4437	0,28673
	“galo”	0,5 ± 0,9				
	WC _{1-x}	6,2 ± 1,0				
УЗО + ЭИЛ + УЗО	(Fe, Cr)	18,5 ± 1,2	7,7 ± 2,67	90,0978	0,2559	0,28668
	“galo”	0,4 ± 1,0				
	WC _{1-x}	5,0 ± 1,1				

Расчетами определено также, что комбинация плазменного и деформационного воздействия с дополнительной ультразвуковой обработкой менее энергозатратна, чем типовое ЭИЛ, т.к. требует в 1,5–2,5 раза меньше энергии на образование покрытия толщиной в 1 мкм, а потребляемая мощность в 1,5–2,5 раза ниже.

Результаты исследований подтверждены полученными свойствами сформированных покрытий (таблица 5).

Таблица 5 – Основные свойства покрытий

Метод обработки	Трибологические		Электрические		
	Основа, покрытие	$K_{тр}$	Основа покрытия	$R_{cp}, \text{Ом/см}^2$	$V_{cp}, \text{мкВ}$
ЭИЛ	Сталь 40 + ВК8 + Браж	0,31	Cu	$3,02 \cdot 10^{-4}$	68,0
ЭИЛ + УЗО		0,16		$3,06 \cdot 10^{-4}$	67,5
УЗО + ЭИЛ + УЗО		0,08		$3,16 \cdot 10^{-4}$	66,0
ЭИЛ	Сталь 30ХГСН2А + + Т15К6+э/граф	0,32	Al	$3,06 \cdot 10^{-4}$	67,5
ЭИЛ + УЗО		0,15		$3,12 \cdot 10^{-4}$	68,8
УЗО + ЭИЛ + УЗО		0,07		$3,26 \cdot 10^{-4}$	65,5
ЭИЛ	Сталь 12ХМ + КХН + + э/графит	0,34	Механические Прочность на изгиб		
УЗО + ЭИЛ + УЗО		0,14			
ЭИЛ	Сталь 25Х5М + + 4А литой	0,38	Сталь 40 + ВК8 / Сталь 40 + Т5К10	357,1 / 331,6	
ЭИЛ + УЗО		0,28		363,0 / 349,2	
УЗО + ЭИЛ + УЗО		0,22		370,8 / 353,2	

Таким образом, в результате сделанных теоретических прогнозов и их экспериментального подтверждения установлено превосходство над известным разработанным интенсифицированным методом электроискрового легирования с дополнительной ультразвуковой деформацией упрочняемой поверхности с получением высокоточных с отклонениями от равнотолщинности не более 1–3 мкм покрытий увеличенной в 1,3–2,2 раза толщины с адгезией на уровне 350–500 МПа в наноструктурированном состоянии, с повышенной в 1,2–1,5 раза прочностью и сниженным в 1,4–1,6 раз уровнем остаточных напряжений в его структуре. При этом предел контактной усталости повышен на 10–20 %, микротвердость, в зависимости от состава упрочняемого сплава, возрастает на 35–65 %, чистота поверхности существенно улучшается.

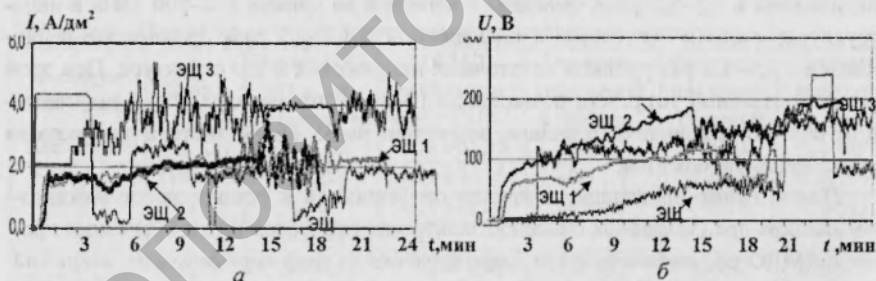
Пятая глава посвящена изучению особенностей и установлению механизмов влияния предложенных способов электромеханической интенсификации процесса АМДО на закономерности формирования оксидо-керамических покрытий на поверхности алюминиевых и титановых сплавов в активированных водно-щелочных электролитах (таблица 6).

При изучении особенностей оксидирования алюминиевого сплава Д16 в стандартном и активированных электролитах (рисунок 14) было отмечено, что на осциллограммах изменения токовых характеристик в режиме реального времени наблюдается различие в их уровнях: если в стандартном электролите ЭЩ при АМДО в гальваностатическом режиме средние значения тока соответствуют заданным с помощью оборудования, то в активированных растворах при равных задаваемых плотности тока, времени обработки и одинаковых размерах оксиди-

руемых образцов зафиксированы более высокие, в 1,2–2,6 раза, значения тока и напряжения.

Таблица 6 – Составы электролитов, марки оксидируемых сплавов, режим АМДО

Номер электролита	Основа электролита	Марка и основа оксидируемого сплава	Плотность тока/напряжение
ЭЩ	Стандартный 2,5 г/л NaOH + 5 г/л SiO ₂ ·10H ₂ O	АД-0 99,99 %Al	Гальваностатич. режим j: (0,3–30) А/дм ²
ЭЩ 1	2,5 г/л NaOH + 5 г/л SiO ₂ ·10H ₂ O + 5-20 г/л (NaOH + Na ₆ P ₆ O ₁₈ + NaAlO ₂) + 5-10 г/л Na ₂ SiO ₃ + 1-5 г/л Na ₂ P ₄ O ₇	Д16 Al-Cu-Mg	
ЭЩ 2	2,5 г/л NaOH + 5 г/л SiO ₂ ·10H ₂ O + 5-20 г/л (NaOH + Na ₆ P ₆ O ₁₈ + NaAlO ₂) + 5-10 г/л Na ₂ Si + 1-5 г/л Na ₂ P ₄ O ₇ + УДА в концентрации 0,05 г/л; 0,1 г/л; 0,8 г/л; 1 г/л; 1,6 г/л	АМг6 Al-Mg	Потенциостатич. режим U: (180–280) В
ЭЩ 3	2,5 г/л NaOH + 5 г/л SiO ₂ ·10H ₂ O + 5-20 г/л (NaOH + Na ₆ P ₆ O ₁₈ + NaAlO ₂) + 5-10 г/л Na ₂ Si + 1-5 г/л Na ₂ P ₄ O ₇ + УЗ	АЛ 9 Al-Si	Гальваностатич. режим j: (1,2–10) А/дм ² Потенциостатич. режим U: (240–320) В
ЭЩ 4	2,5 г/л NaOH + 5-10 г/л Na ₂ P ₄ O ₇ + полирадикалы	ВТ1-0 Ti-Si-Fe	
ЭЩ 5	2,5 г/л NaOH + 5-10 г/л Na ₂ P ₄ O ₇ + 5–30 г/л Ca ₁₀ (PO ₄) ₆ (OH) ₂	ВТ6 Al-V-Zr-Si-Fe	
ЭЩ 6	2,5 г/л NaOH + 5-10 г/л Na ₂ P ₄ O ₇ + 5–30 г/л Ca ₁₀ (PO ₄) ₆ (OH) ₂ + полирадикалы		



Электролиты: ЭЩ – стандартный, ЭЩ 1 – химически активированный, ЭЩ 2 – электрически активированный, ЭЩ 3 – механически активированный УЗ-полем

Рисунок 14 – Изменение электрических параметров АМДО в режиме реального времени в активированных электролитах

Механизм увеличения электрических параметров в электролите ЭЩ 1 – ускоренное протекание химических реакций с образованием новых соединений, для которых оксидирование в микродуговой фазе требует увеличения начального тока. При этом толщина покрытия, полученного в электролите ЭЩ 1 в 1,5 раза больше, а энергозатраты на образование 1 мкм покрытия в 1,3 раза меньше, чем

при формировании покрытия в стандартном растворе при одинаковых начальных условиях (рисунок 15, таблица 7).

Таблица 7 – Энергозатраты на получение покрытий на поверхности сплава АД-0

Электродлит	Скорость роста оксида мкм/мин	Энергозатраты на образование покрытия, Дж	ЭЦ/ЭЦ _н
ЭЦ	1,4	20299	–
ЭЦ 1	2,2	15750	1,28
ЭЦ 2	2,9	11819	1,46
ЭЦ 3	3,9	9123	2,22

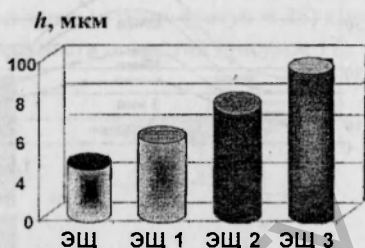


Рисунок 15 – Толщина покрытий после АМДО сплава АД-0

Активация электролита введением полирадикальных частиц (состав ЭЦ 2) обуславливает АМДО при таких же, как и в электролите ЭЦ 1, токах, но при более высоких (в 1,4–1,6 раза) напряжениях (рисунок 14, кривые ЭЦ 2). Механизм данной активации – одновременное протекание нескольких видов реакций, в том числе и электрофоретических, вследствие адсорбции катионов электролита на поверхности полирадикальных частиц, последующего осаждения заряженных частиц на аноде и встраивания их в растущую оксидную пленку. Снижение энергозатрат связано с тем, что прирост массы покрытия определяется в этом случае не законом Фарадея, а закономерностями электрофореза, эффективность выхода которого по току намного выше, поскольку осаждаются многоатомные заряженные частицы. Распределенные по объему приграничного слоя электролита заряженные полирадикалы, выполняющие роль дополнительных носителей заряда, обуславливают более равномерное распределение электрических разрядов на поверхности оксидируемого изделия, стимулируют рост покрытия. Вследствие большого числа центров кристаллизация приобретает «многозародыщевый» характер, а создаваемое покрытие имеет более высокие плотность и равномерность по толщине. В ЭЦ 2 средняя скорость роста слоя составляет 2,3 мкм/мин, что в 1,8 раза быстрее, чем в стандартном растворе ЭЦ (рисунок 15). Расход энергии на наращивание одного микрона покрытия в ЭЦ 2 по сравнению с ЭЦ снижается в 1,7 раза (таблица 7).

Экспериментально установлена оптимальная концентрация полирадикалов в электролите ЭЦ 2 для получения наиболее толстого покрытия при сниженных затратах мощности – не менее 0,1 г/л и не более 1,0 г/л раствора (рисунок 16). В процессе рентгенофазового анализа установлено, что использование электрической интенсификации АМДО алюминиевых сплавов с оптимальной концентрацией полирадикалов в диапазоне (0,1–0,8) г/л раствора свело к минимуму образование на поверхности покрытия муллита и желелирующих электролит фаз.

Самые большие токи отмечены в активированном ультразвуковым полем растворе ЭЦ 3 (рисунок 14, кривые ЭЦ 3): толщина покрытий после 20-минутного АМДО достигает 90–100 мкм (рисунок 15).

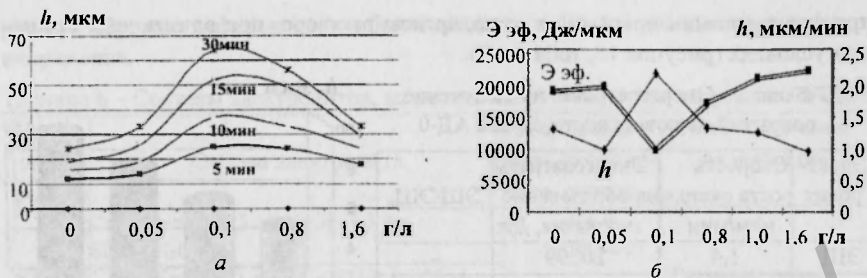


Рисунок 16 – Динамика нарастания толщины покрытия во времени (а), изменение энергетических затрат и скорости роста покрытия (б) при АМДО алюминиевого сплава АД-0 в электролите ЭЦ 2 с разной концентрацией заряженных полирадикалов

Механизм механической интенсификации – появление и развитие в электролите процессов кавитации, обуславливающей схлопывание кавитационных пузырьков вокруг оксидируемого анода. Это приводит к повышению давления в зоне пробоя и созданию упруго-деформационного поля с высоким уровнем энергии в виде излучения ультразвука. Действие ультразвука на твердый материал анода вызывает микродеформацию и повышение плотности дислокаций в его поверхностных слоях, что интенсифицирует диффузионные процессы. Возникающие ударные волны при коллапсе пузырьков газа поддерживают высокую температуру в реакционной зоне, что продлевает стадию термализации в электролите. Это приводит к активизации всех процессов, осуществляемых непосредственно на аноде и в зоне пробоя в около анодной области, к дополнительной очистке обрабатываемой детали, провоцируя ускорение химических взаимодействий с электролитом, и обуславливает дополнительные реакции оксидов металла, входящего в состав исходных солей в виде катионов, и оксидов химических элементов анионного комплекса, обеспечивая интенсификацию нарастания толщины оксидных слоев и изменение их фазового состава. Эти же ударные волны наклепывают обрабатываемую поверхность, ускоряя рост толщины покрытия в единицу времени даже при более низких вольт-амперных характеристиках процесса АМДО (таблица 7). Упруго-деформационное поле активирует капиллярный эффект, приводя к проникновению электролита в мельчайшие поры и трещины покрытия и предотвращая появление в нем пустых полостей (пор), образует электропроводные каналы, создавая дополнительные центры зарождения новых оксидных фаз. Механизмом самопроизвольного возрастания на 20–25 % электрической мощности электролита ЭЦ 3, активированного ультразвуковым полем, является образование в нем высокочастотных затухающих колебаний нерегулярной формы с высокой амплитудой по току. При анализе полученных и систематизированных осциллограмм ультразвуковых колебаний в этом электролите определено, что

средняя высота импульсов напряжения в нем увеличена на 68 %, импульсов тока – на 87 %, частоты импульсов тока и напряжения возросли на 90 %, что объясняет указанный эффект, сопровождающийся ускорением роста (рисунок 15) и повышением плотности формируемых на его поверхности покрытий (рисунок 17).

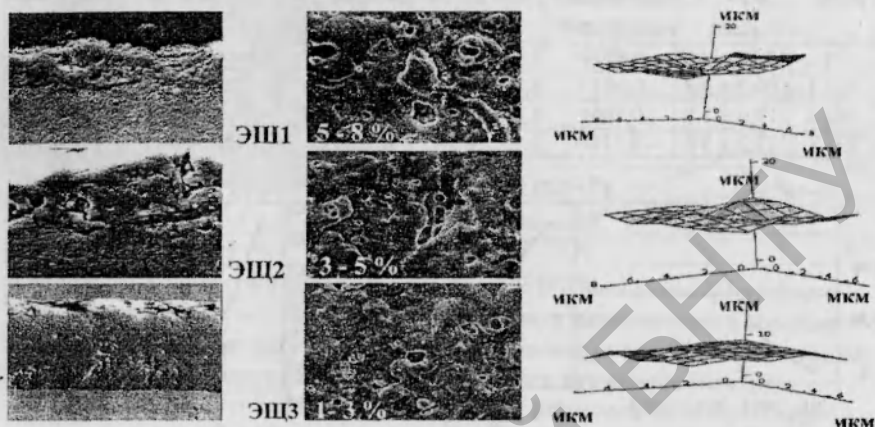


Рисунок 17 – Микроструктура, топография и геометрия поверхности покрытий, сформированных методом АМДО на алюминиевом сплаве АД-0 в активированных электролитах

Те же тенденции в формировании покрытий в процессе интенсифицированного АМДО характерны для литейных алюминиевых и титановых сплавов. При этом в активированных электролитах при АМДО литейных сплавов отмечена возможность сокращения в 3 раза и более времени на образование покрытия заданной толщины по сравнению с АМДО в стандартном растворе.

Наибольший выигрыш во времени при АМДО литейных сплавов (в 3,5 раза) отмечен в активированном ультразвуковым полем электролите, что может быть связано с дроблением конгломератов кремния на оксидируемой поверхности и возможностью беспрепятственного образования и роста оксидов алюминия.

При исследовании тонкой структуры и напряженного состояния полученных покрытий доказано, что при АМДО в активированных электролитах формируются оксидные слои с наноструктурированным состоянием поверхности. При этом плотность дислокаций в материале покрытий в 5–9 раз выше, чем в слоях, сформированных в стандартном растворе (рисунок 18, а), что является одной из причин упрочнения. Ультразвуковое поле способствует дополнительному повышению прочностных свойств формируемых покрытий в процессе дополнительного наклепа их поверхности при схлопывании в анодно-катодной области кавитационных пузырьков и вызывает упорядочение блочной структуры в материале, что подтверждается степенной моделью распределения деформаций (таблица 8), приводя к образованию в покрытии напряжений сжатия (рисунок 18, в).

Таблица 8 – Параметры тонкой структуры оксидированного в активированных электролитах сплава Д 16

Электродит	Размер ОКР $D_{ф., нм}$	Относительная деформация $\Delta a/a_0$	ОСМД, $(E^2 > 1/2) 10^{-4}$	Плотность дислокаций $\theta, \cdot 10^8/\text{см}^2$	Распределение деформаций	Физич. уширение линий $3_{1/2, \text{рад}}$
ЭЩ	$435,2 \pm 3,8$	0,6947	$1,45 \pm 0,30$	0,0083142	Экспоненциал.	
ЭЩ 1	$189,2 \pm 3,8$	0,0010	$1,29 \pm 0,30$	0,0253121	Степенное	0,1222
ЭЩ 2	$213,6 \pm 3,8$	0,1061	$1,15 \pm 0,25$	0,0706324	Степенное	0,1084
ЭЩ 3	$212,2 \pm 3,8$	-0,3180	$1,11 \pm 0,24$	0,104726	Степенное	0,1096

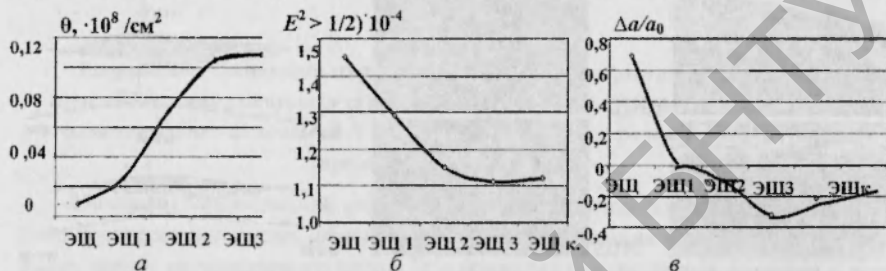


Рисунок 18 – Параметры тонкой структуры покрытий, полученных в стандартном и активированных электролитах

Такие покрытия являются защитным барьером для образования в основе металла растягивающих напряжений, что предотвращает разрушение изделия в условиях циклических знакопеременных нагрузок.

Установлено, что по сравнению с оксидными слоями, полученными типовым методом, покрытия, созданные в активированных электролитах, имеют в 1,1–1,4 раза более высокий уровень критической нагрузки разрушения, на 10–22 % повышенную износостойкость и на 20–95 % увеличенную микротвердость. Это позволяет прогнозировать долговременную эксплуатацию изделий с такими покрытиями в условиях абразивного износа и термоциклирования.

Отмечена высокая эффективность разработанных электролитов для АМДО технического ВТ1-0 и высокопрочного ВТ 6 титановых сплавов (таблица 6), из которых изготавливают медицинские имплантаты. Показано, что при введении в раствор с гидроксипатитом ЭЩ 6 присадок полирадикалов реализуется наиболее предпочтительный для имплантата тип микроструктуры с развитой мелкой и равномерной 25–35 %-й пористостью (рисунок 19). В процессе рентгеноструктурного анализа (РСА) определено, что в данном электролите количество двуокиси титана со структурой анатаза и рутила, наиболее биотолерантных соединений с костными тканями организма, достигает 78 %. Средний максимум микротвердости в покрытии составляет 16–18,2 МПа. Титановые образцы с такими покрытиями имеют меньшую адсорбционную активность по сравнению с титаном без покрытия (рисунок 20). Это повышает биосовместимость имплантата, обуслов-

ленную слабыми ионными обменами на поверхности раздела имплантат–живая ткань.



TiO₂ Rut 37,2–37,2 (36,6–36,6) %;
TiO₂Ant 40,8–40,8 (39,7–39,7) %;
α-Ti He 22,0–22,0 (23,7 %)

Рисунок 19 –Топография поверхности и фазовый состав покрытия на титановом сплаве ВТ 6, полученного в электролите ЭЩ 6 с гидроксидантитом и полирадикалами

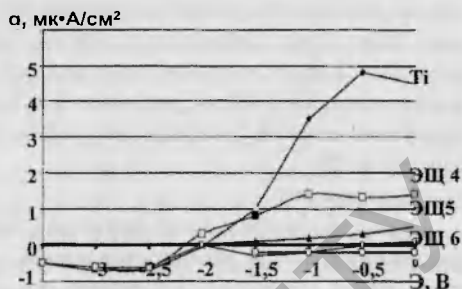


Рисунок 20 – Зависимость плотности заряда на поверхности образцов титанового сплава ВТ 6 с покрытиями от потенциала электрода в физиологическом растворе

Сделанные при исследовании выводы подтверждают теоретические прогнозы и характерны для широкой гаммы алюминиевых и титановых сплавов, включая литейные и высокопрочные.

Глава 6 посвящена практической реализации результатов выполненных исследований (рисунок 21).

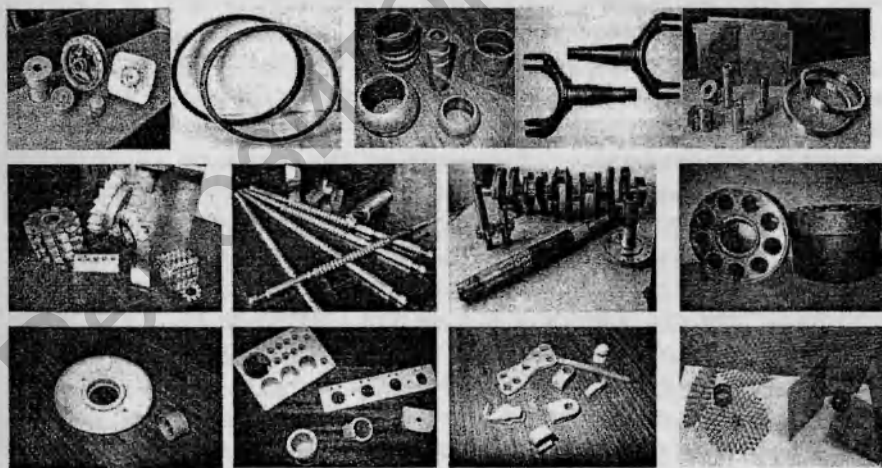


Рисунок 21 –Примеры практической реализации выполненных разработок

В ней показано, что применение предложенной электромеханической интенсификации микроплазмой обработки материалов в жидкой и газовой средах является эффективным и энергосберегающим направлением упрочнения и

средах является эффективным и энергосберегающим направлением упрочнения и восстановления высокоточных металлических изделий, гарантирующим повышение их ресурса при работе в условиях термоциклирования, высоких температур, агрессивных сред и абразивного износа. На основе анализа условий эксплуатации изученных объектов на базе выполненных исследований разработаны технологические процессы (ТП) их упрочнения и восстановления, проведены приемочные испытания изделий с покрытиями и осуществлено внедрение в производство этих изделий и ТП.

В результате:

1) в процессе заводских испытаний двигателя внутреннего сгорания (ДВС), содержащего детали цилиндропоршневой группы (ЦПГ) с оксидо-керамическими покрытиями, созданными в активированных электролитах, установлено, что средняя температура разогрева поршня снизилась на 25–30 %, на 15 % уменьшился теплоотвод в рубашку охлаждения ДВС. Это привело к повышению температуры газов в цилиндре и возрастанию давления в нем, вызывая увеличение крутящего момента на коленчатом валу и давления в среднем на 10–12 % при снижении расхода топлива на 5 %, что обеспечило увеличение мощности двигателя на 3–5 %. Оптимальное сочетание свойств реализуется в ДВС с ЦПГ с оксидным покрытием на днище поршня толщиной 35–60 мкм. Разработка защищена патентами Респ. Беларусь № 5511, 5846, 8195, 8587. Технологические процессы по созданию методом АМДО износостойких и термостойких покрытий на поверхности деталей ЦПГ ДВС ТП01271.01911, ИСПФ.01271.02127 внедрены на ПО ММЗ и ОАО «Мотто-вело». Экономическая эффективность от внедрения данной разработки в 2005 г. составила 21600000 рублей;

2) внедрение в филиале РУПП «БелАЗ» в г. Могилеве технологического процесса ТП ИСПФ.01171.02190 по формированию методом ЭИЛ с УЗО износостойких покрытий с улучшенными антифрикционными свойствами на контактных поверхностях уплотнительных колец тормозной системы самосвалов для подземных работ позволило исключить импорт данного узла трения и наладить производство отечественных колец с заменой дорогостоящей легированной стали 5ХНМ на сталь 40Х, отказаться от операций ХТО и трехступенчатой притирки. При этом обеспечивается герметичность и надежная работа указанного узла в условиях эксплуатации. Разработка защищена патентами Респ. Беларусь № 2601, 10316. Экономическая эффективность от установки колец с покрытиями в тормозной узел на одном самосвале составила в 2005 г. 1500000 рублей;

3) применение интенсифицированного метода ЭИЛ для восстановления и упрочнения поверхностей высокоточных комплектующих узлов шасси и тормозных систем Ил-76ТД и Ил 86, Як-40, Як-42 и Ту-134 сократило количество межремонтных циклов, обеспечивая твердость их поверхности на уровне 72–74 НРС, работоспособность с гарантией надежной и долговечной работы в сложнагруженных рабочих и агрессивных климатических условиях с сохранением пневмоплотности и герметичности контактов в узлах трения. Восстановленные и упрочненные из-

деля апробированы на всех типах ремонтируемых самолетов и показали соответствие их размерных и эксплуатационных параметров требованиям ИТЭ-Ил-76ТД, Ил-86, Альбомов основных сочленений и ремонтных допусков и каталогов. Внедрение высокопроизводительного нанесения функционального покрытия с комплексным упрочняющим эффектом методом ЭИЛ с УЗО на ГП «Минский авиаремонтный завод» и РУП «Трансaviaэкспорт» (ТП ИСПФ.01271.02173 и ТП ИСПФ.01271.02311) определило экономическую эффективность в 2009 г. в 177 500 US\$;

4) внедрение ТП ИСПФ.01171.02172, ИСПФ.01271.02173 для восстановления и упрочнения методом ЭИЛ с УЗО металлообрабатывающего инструмента и высококачественной многопрофильной штамповой оснастки различного назначения, эксплуатируемых в условиях ударного нагружения, при высоких (более 1500 К) температурах, сложнопрофильного зубонарезного инструмента без искажений профилей фасонных резцов и эвольвенты зуба долбяка. протяжек на РУПП «Бобруйскгапротомаш», РУПП «БеАЗ», филиале РУП ММЗ, ОАО «Полимиз», ОАО «ГАИМ» и т. д. привело к возрастанию ресурса упрочненного инструментария в 2–10 раз. Разработки защищены патентами Респ. Беларусь № 5923, 6787, 9036. Суммарная стоимость товарной продукции, произведенной согласно выполненным разработкам, составила с 2003 г. по 2009 г. 715 000 US\$;

5) внедрение интенсифицированного процесса АМДО для формирования оксидо-керамического покрытия в рабочих зонах алюминевых роликов для натяжения металлокорда на БМЗ позволило отказаться от импорта данного изделия, т.к. отечественный ролик с оксидным покрытием отвечает всем техническим требованиям по стойкости при сниженной более чем в 3 раза стоимости. Разработка защищена патентами Респ. Беларусь № 5240, 5813;

6) применение интенсифицированных процессов для формирования функциональных покрытий на поверхности крупногабаритных изделий типа «ведущий винт компрессора», валов для натяжения металлокордовой нити, роторов аксиально-поршневых насосов, шнеков экструдеров полимерных материалов и т.п. обеспечило продление ресурса указанных изделий, позволило повторно эксплуатировать подготовленные к утилизации изделия, привело к сокращению материальных, валютных и трудовых расходов на изготовление и приобретение новых;

7) внедрение ТП ИСПФ.01271.02262 формирования биотолерантных покрытий на титановых медицинских имплантатах для металлоостеосинтеза переломов костей и деформаций костей опорно-двигательного аппарата на НПФ «Медбиотех» обеспечило для имплантатов из сплава ВТ-0 предел прочности на растяжение на уровне 400–440 МПа и не менее 900–950 МПа – для имплантатов из сплава ВТ 6, относительное удлинение – не менее 8–9 %. По заключению Государственной Санитарно-эпидемиологической и биологической экспертиз имплантаты для межтелового спондилодеза с оксидо-керамическими покрытиями, сформированными интенсифицированным методом АМДО, по санитарно-химическим, органолептическим, токсикологическим показателям соответствуют требованиям действующих нормативных и правовых актов (СанПиН 1.1.12–30–2006, Инструкция

1.1.0-12-41-2006), прошли государственную регистрацию в Респ. Беларусь и используются в клинической практике на базе РНПЦ травматологии и ортопедии Минздрава Респ. Беларусь. Успешно внедрен техпроцесс ИСПФ.01271.02284 создания износостойких декоративных оксидных покрытий на поверхности комплектующих и корпусов медицинских приборов на ЗАО «Спектроскопия, оптика, лазеры. Авангардные разработки». Правовая защита обеспечена патентом Респ. Беларусь на изобретение № 13878 от 09.09.2010 г. Экономическая эффективность разработок в 2009 г. составила 90000 US\$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Установлено, что согласно разработанной концепции интенсификация совместным действием электрического тока и ультразвука микроплазменно-эрозионных процессов восстановления и упрочнения металлических поверхностей повышенной точности в жидкой и газовой средах приводит к изменению контактных условий взаимодействия анода и катода, определяющих массо- и теплопередачу в анодно-катодной области. При электроискровом легировании это связано с повышением твердости и получением сглаженной геометрии упрочняемой поверхности в результате ее дополнительной ультразвуковой деформации. При анодном микродуговом окислении изменение контактных условий вызвано ускоренным протеканием электрохимических реакций в микродуговой фазе, наклепом оксидируемого анода, возрастанием температуры обработки за счет активации водно-щелочных электролитов растворимыми солями натрия, присадками разнозаряженных полирадикалов, ультразвуковым полем [3-А, 6-А, 9-А, 27-А, 30-А, 33-А, 34-А, 59-А, 70-А, 76-А, 78-А, 89-А, 102-А, 103-А, 104-А].

2. Теоретически с помощью разработанных физико-математических моделей расчета объема проэродировавшего материала анода и времени остывания проэродировавшей капли на упрочняемой поверхности в процессе интенсифицированного электроискрового легирования, основанных на уравнении теплопроводности при различных начальных условиях, установлено, что оптимальный диапазон размеров капель проэродировавшего материала анода для получения покрытий с отклонениями от равнотолщинности 1–3 мкм составляет 50–80 мкм. Доказано, что время затвердевания капель указанных размеров не превышает $(0,6-0,8) \cdot 10^{-8}$, в результате чего биение легирующего электрода при формировании покрытия осуществляется по поверхности катода, находящейся не в расплавленном энергией плазмы, а в твердом состоянии. Это обеспечивает ее дополнительный наклеп на 30–80 %, стабильный ход процесса легирования с устойчивым массопереносом и получением равнотолщинных покрытий [29-А, 31-А, 70-А].

3. С использованием эмпирической модели расчета параметров массопереноса, учитывающей изменение электрических и частотных режимов легирования, основанной на теории малых колебаний механических систем и предусматривающей действие на систему металл–покрытие сил упругости, сопротивления пласт-

шением электрических и частотных режимов легирования, при котором обеспечиваются наибольшая упругость системы, минимальное сопротивление энергетическим воздействиям в сочетании с высокой инерционностью системы анод-катод, максимум суммарной энергии, определяющих в совокупности интенсификацию скорости роста покрытия в 1,3–2,4 раза при сниженных в 1,5 раза энергозатратах, является при обработке ЭИЛ $I = 0,3–0,5$ А; $U = 45–65$ В; ЭИЛ + УЗМ – $I = 0,4–0,6$ А; $U = 65–95$ В, УЗМ: $I = 0,8–1,3$ А, $U = 115–125$ В; УЗО + ЭИЛ + УЗМ – $I = 2,4–3,6$ А; $U = 67–96$ В, УЗО: $I = 0,3–0,5$ А, $U = 85–115$ В; УЗМ: $I = 1,3–1,8$ А, $U = 125–145$ В [29-А, 30-А, 66-А, 82-А, 88-А, 89-А, 97-А–99-А, 111-А, 112-А].

4. Экспериментально доказано, что доминирующее влияние на анодно-катодные взаимодействия и кинетику массопереноса при электроискровом упрочнении оказывает интенсивность высокочастотной деформации материала катода. Установлено, что механизм активизации массопереноса при этом связан с изменением напряженно-деформированного состояния упрочняемого материала и заключается в повышении энергии электроразряда на наклепанной и сглаженной при ультразвуковой обработке поверхности, а также сдвиге напряжений искрения в область больших значений, что привело к увеличению (до 40 %) плотности высокочастотных импульсов тока и, как следствие, к расширению в 1,5–2,2 раза рабочего диапазона электрических параметров легирования. При этом подтверждено, что в результате вибрации легирующего анода с ультразвуковой частотой он эродирует мелкими и равновеликими каплями. Показано, что независимо от состава анода наиболее устойчивый и ускоренный в 0,8–1,2 раза массоперенос, обеспечивающий увеличение толщины покрытий до 2,5 раз, реализуется при упрочнении катода с двойным ультразвуковым деформированием поверхности при равном или близком по величине соотношении высокочастотных выбросов по току и напряжению [19-А, 41-А, 85-А – 87-А, 95-А].

5. Теоретически на основе разработанной физико-математической модели интенсифицированного процесса микродугового оксидирования, основанной на решении гидродинамического уравнения Рэля–Плессе, модифицированного с учетом зарождения и развития в электролите процессов неразрушающей кавитации, установлен диапазон амплитуд давления $(2–3) \cdot 10^5$ Па и частот ультразвуковых колебаний 20–30 кГц, размеры 1–3 мкм и концентрация 0,1–0,8 г/л полирадикалов, электрические режимы АМДО и параметры активированных электролитов: плотность 0,634–1,567 г/см³, вязкость 0,53–1,32 П, давление 0,50–1,9 Па, определяющих ускорение анодно-катодных взаимодействий без разрушения поверхности оксидируемого анода [23-А, 27-А, 35-А, 53-А, 59-А, 64-В, 71-А, 72-А, 76-А, 77-А, 86-А, 100-А, 108-А].

6. Экспериментально подтверждено, что в процессе АМДО при стандартной работе серийного оборудования в активированных электролитах происходит интенсификация анодно-катодных взаимодействий с ускорением в 1,5–2,5 раза массопереноса и эффектом повышения на 20–25 % электрической активности раство-

ров. Это связано с увеличением плотности и более равномерным распределением на поверхности оксидируемого изделия микроразрядов в результате насыщения электролитов заряженными полирадикалами, являющимися дополнительными миникаатодами, и возникновения затухающих колебаний с высокой амплитудой по току при пропускании через раствор ультразвуковых колебаний. Это приводит к возрастанию амплитуд импульсов тока и напряжения на 87% и 67% соответственно и повышению их частоты на 90 %, способствуя увеличению давления в зоне пробоя и созданию упруго-деформационного поля с высоким уровнем энергии в виде излучения ультразвука. Возникающие при этом ударные волны наклепывают оксидируемую поверхность, поддерживают высокую температуру в реакционной зоне, продлевая стадию термолита в электролите. В результате происходит ускоренный в 1,3–2,8 раз рост толщины формируемых оксидных покрытий, снижение их пористости с 40 % до 1–3 % и сокращение энергозатрат на их получение более, чем в 2,5 раза [4-А, 5-А, 23-А, 35-А, 54-А, 66-А, 80-А, 96-А, 97-А, 102-А –105-А, 108-А].

7. Рентгеноструктурным анализом (РСА) доказано, что при микроплазменном упрочнении дополнительное совместное действие на материал электрического тока и ультразвука вызывает в процессе ЭИЛ дополнительную деформацию кристаллической структуры материала с дроблением кристаллитов в 1,5–2,0 раза, при АМДО в активированных растворах повышение плотности дислокаций в 4,5–8,5 раз и образование мелкокристаллической структуры в процессе многозародышевой кристаллизации оксидных фаз происходит в результате дополнительного наклепа поверхности изделия при схлопывании кавитационных пузырьков и действия полирадикалов как дополнительных микрокатодов. Расчетным путем определено, что уровень остаточных напряжений в покрытиях, полученных под комбинированным действием микроразрядов, электрического и ультразвукового полей, уменьшен в 1,4–1,6 раза и механизм этого снижения, а также стабилизации структурного и напряженного состояний является упорядочение блочной структуры вследствие протекания в материале процессов релаксации остаточных напряжений [21-А, 40-А, 55-А, 58-А, 62-А, 68-А, 73-А, 74-А, 83-А, 93-А].

8. Экспериментально установлено, что энергия ультразвуковых колебаний активизирует растворение и химическое взаимодействие материалов анода и катода при ЭИЛ и анода с продуктами гидролиза электролита при АМДО, влияя на фазовый состав и пористость формируемых покрытий. В частности, РСА показал, что в процессе ЭИЛ с УЗО суммарное содержание карбидных фаз в износостойких покрытиях, включая двойные и тройные карбидные системы, возрастает с 20 % при типовом ЭИЛ до 81 % после трехступенчатой обработки. При АМДО, активированном предложенным электромеханическим воздействием, вследствие более высоких температур в анодно-катодных областях, обусловленных интенсивными электрохимическими обходами, формируются покрытия с минимальным (менее 1–3 %) количеством муллита и увеличенным на порядок содержанием стеклофаз на основе оксидов фосфора, обеспечивающих высокую твердость и

плотность поверхности с более стабильной геометрией и сниженной до 1–3 % пористостью вследствие активизации капиллярного эффекта. Показано, что аналогичные тенденции в структурообразовании характерны для АМДО титановых и литейных сплавов с эффектом сокращения в 3 раза времени на образование в активированных растворах работоспособных покрытий требуемой толщины на поверхности кремнийсодержащих сплавов вентильного типа [2-А, 16-А, 18-А, 41-А, 43-А, 47-А, 66-А, 79-А, 80-А, 82-А, 86-А, 95-А].

9. Расчетами установлено, что интенсифицированные технологии ЭИЛ и АМДО менее энергозатратны, чем типовые процессы, т.к. требуют в 1,5–2,5 раза меньше энергии на образование покрытия 1 мкм толщиной, обеспечивают увеличение в 1,5–2,5 раза степени энергетического воздействия на обрабатываемый объект без принудительного наращивания величин вольт-амперных характеристик серийного оборудования [2-А, 42-А, 101-А, 114-А].

10. В процессе испытаний физико-механических свойств упрочненных при микроплазменоскоровой обработке изделий определено, что в покрытиях, полученных интенсифицированным методом ЭИЛ, увеличение толщины наклепанной зоны от 0,001 до 0,15 мм, микротвердости на 30–60 %, предела контактной усталости на 10–20 %, снижение коэффициента трения с 0,31 до 0,08 и шероховатости поверхности определяется в первую очередь уровнем электромеханического воздействия на материал катода, в то время, как увеличение до 10 % уровня диэлектрических свойств и на 3–8 % механической прочности на изгиб зависит от состава легирующего анода.

Изделия из различных алюминиевых сплавов с покрытиями, созданными методом АМДО в активированных электролитах, имеют увеличенные на 10–15 %, усталостную прочность $\sigma_{уст}$ и на 160–200 % микротвердость $H_{ц}$, на 50–90 % более высокую износостойкость, в 1,2–1,4 раза увеличенную трещиностойкость и повышенное в 2,5–2,8 раза пробивное напряжение по сравнению со свойствами изделий, оксидированных типовым методом АМДО. При этом в покрытиях, полученных в активированных ультразвуковым полем электролитах, зафиксированы напряжения сжатия [2-А, 4-А, 40-А, 44-А, 52-А, 54-А, 56-А, 69-А, 73-А, 84-А, 87-А, 96-А, 101-А, 107-А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Разработаны новые энергосберегающие микроплазменоскоровые технологии упрочнения, восстановления и декорирования высокоточных металлических изделий, повышающие конкурентоспособность продукции отечественных металлургических и машиностроительных предприятий, исключаящие в ряде случаев валютные затраты за счет отказа от импорта зарубежных аналогов. Указанные техпроцессы внедрены на организованных производственных участках в Институте сварки и защитных покрытий, а также на предприятиях различных отраслей промышленности.

Так, в области машиностроения внедрение на ПО «ММЗ», «ОАО «Мотовелло», РУП «БелАЗ» интенсифицированной технологии анодного микродугового

оксидирования для создания оксидных покрытий на деталях ЦПГ четырех- и двухтактных двигателей обеспечило большую устойчивость основных характеристик двигателя с увеличением оборотов коленчатого вала, что улучшает его приспособляемость к изменению нагрузки. Это свидетельствует о работе ДВС в более экономичном режиме и повышенном КПД. В конструктивном плане созданные покрытия позволяют снизить тепловой зазор между поршнем и цилиндром, что снижает угар масла, улучшает экологические характеристики, уменьшает шумность ДВС [1-А, 5-А – 7-А, 11-А, 13-А, 15-А, 16-А, 22-А, 24-А, 36-А, 37-А, 39-А, 49-А, 60-А, 61-А, 75-А, 94-А, 101-А].

Использование технологии электроискрового легирования с дополнительным ультразвуковым воздействием в металлообработку на РУПП «Бобруйскгазромаш», ЗАО «Атлант», ПО «ММЗ» филиал г. Столбцы, ОАО «Амкодор», ОАО «ТАИМ», ООО «Полиэфир» и др. для восстановления и упрочнения инструмента и штамповой оснастки широкой номенклатуры и назначения обусловило повышение их износостойкости в 3–10 раз [2-А, 3-А, 33-А, 54-А, 63-А, 91-А, 92-А, 105-А, 106-А, 109-А, 110-А].

Применение интенсифицированных технологий АМДО и ЭИЛ с УЗО в ремонтнообслуживающих производствах на БМЗ, РУП МАЗ, ПО «Горизонт», ОАО «Легмаш», ГП «Минский авиаремонтный завод», ГП «Авиакомпания Трансавиаэкспорт», ЗАО «Атлант» позволило увеличить в 1,5–5 раз ресурс работы восстановленных и упрочненных объектов широкого спектра действия, снизить стоимость и исключить валютные затраты на импорт новых изделий [5-А, 8-А, 9-А, 12-А, 14-А, 17-А, 19-А, 20-А, 25-А, 26-А, 34-А, 38-А, 39-А, 45-А – 48-А, 51-А, 57-А, 67-А, 90-А].

Показаны эффективность и перспектива использования разработанной технологии АМДО в медицине, обеспечившей повышение надежности, долговечности и улучшение декоративных свойств медицинской техники, инструментария и медицинских имплантатов для металлоостеосинтеза [18-А, 65-А, 81-А, 113-А].

Экономическая эффективность от внедрения выполненных разработок в производство за период 2005–2009 гг. составила 36,6 млн руб. и 982500 US\$.

2. Определены и экспериментально обоснованы перспективные области применения результатов исследования:

- для продления рабочего ресурса изделий из вентильных металлов, включая высокопрочные титановые и магниевые сплавы, эксплуатируемых в условиях солевой и атмосферной коррозии, температурных градиентов и т.п. – формирование методом АМДО коррозионностойких покрытий на поверхности алюминиевых гермоконтейнеров для защиты высокоточных электронных приборов от воздействия морской воды (научный центр волновых исследований Института общей физики им. А.М.Прохорова РАН),

- создание износо- и коррозионностойких покрытий методами ЭИЛ с УЗМ и АМДО на поверхности изделий для бензозаправочных станций и для работы в условиях подземных пещер (Джофре-Лабортехник, СЭЗ-резидент в г.

Бресте), для ремонта, восстановления и упрочнения комплектующих авиационной техники (авиаремонтные заводы в Минске, Барановичах, Орше);

- на химических, газо- и нефтеперерабатывающих предприятиях, в производстве сельскохозяйственной техники) РУП «Белгазтехника, ОАО «Гомсельмаш»;

- в медицине – для нейрохирургических операций с использованием титановых имплантатов для краниопластики с оксидо-керамическими покрытиями, полученными разработанным методом АМДО (Минздрав Респ. Беларусь);

- в производстве труб и электрических тэнов (ЗАО «Адиполь», «Белтэн») и т.д.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи в рецензируемых журналах и сборниках

1-А Чигринова, Н.М. Особенности формирования керамических покрытий методом АМДО на поршнях высокофорсированных двигателей / Н.М. Чигринова, В.Е. Чигринов // Порошковая металлургия. – Минск, 1998. – Вып. 21. – С. 97–100.

2-А Чигринова, Н.М. Сравнительная оценка методов восстановления работоспособности жесткодопускных изделий / Н.М. Чигринова, В.Е. Чигринов // Порошковая металлургия. – Минск, 1998. – Вып. 21. – С. 59 – 63.

3-А Чигринова, Н.М. Технология электроискрового легирования с ультразвуковым модифицированием – эффективный способ продления ресурса рабочего времени инструмента / Н.М. Чигринова, В.Е. Чигринов // Инструмент. – СПб., 1998. – № 5. – С. 28–32.

4-А Чигринова, Н.М. Влияние химических и электрофизических параметров анодного микродугового оксидирования на функциональные свойства керамических покрытий / Н.М. Чигринова, В.Е. Чигринов, А.А. Кухарев // Порошковая металлургия. – Минск, 1999. – № 22. – С. 58–63.

5-А Чигринова, Н.М. Особенности получения оксидных керамических покрытий на Al-отливках / Н.М. Чигринова, В.Е. Чигринов, А.А. Кухарев, В.В. Овчинников // Литейное производство. – М., 1999. – № 11. – С. 24–26.

6-А Чигринова, Н.М. Улучшение тепловой защиты поршней в двигателях внутреннего сгорания методом анодного микродугового оксидирования / Н.М. Чигринова, В.Е. Чигринов, А.А. Кухарев // Вести НАН Беларуси. Серия физико-технических наук. – Минск, 2000. – № 2. – С. 45–48.

7-А Чигринова, Н.М. Тепловая защита поршней высокофорсированным анодным микродуговым оксидированием / Н.М. Чигринова, В.Е. Чигринов, А.А. Кухарев // Защита металлов. – М., 2000. – Т. 36, № 3. – С. 303–309.

8-А Чигринова, Н.М. Особенности изнашивания и восстановления плунжерных пар ТНВД / Н.М. Чигринова, В.Е. Чигринов, В.В. Чигринов // Автомобильная промышленность. – М., 2000. – № 9. – С. 20–24.

9-А Чигринова, Н.М. Прогрессивный метод восстановления плунжерных пар ТНВД / Н.М. Чигринова, В.Е. Чигринов, В.В. Чигринов // Автомобильная промышленность. – М., 2000. – № 12. – С. 27–28.

10-А Чигринова, Н.М. Микроплазмохимическая обработка материалов – эффективное средство продления ресурса рабочего времени изделий из них / Н.М. Чигринова // Порошковая металлургия. – Минск, 2000. – Вып. 23. – С. 91–98.

11-А Чигринова, Н.М. Микродуговое оксидирование поршней ДВС / Н.М. Чигринова // Автомобильная промышленность. – М., 2001. – № 7. – С. 27–28.

12-А Чигринова, Н.М. Восстановление и упрочнение поверхностей износа внутренних полостей масляных насосов типа НШ с применением микроэлектродуговой обработки / Н.М. Чигринова // Тяжелое машиностроение. – М., 2001. – № 2 – С. 35–38.

13-А Чигринова, Н.М. Формирование покрытий методом анодного микродугового оксидирования и их эксплуатация в теплонапряженных узлах / Н.М. Чигринова // Порошковая металлургия. – Киев, 2001. – № 5/6. – С. 13–23.

14-А Чигринова, Н.М. Применение оксидной керамики в качестве функциональных защитных барьеров / Н.М. Чигринова // Огнеупоры и техническая керамика. – М., 2001. – № 11. – С. 4–8.

15-А Chigrinova, N.M. Use of Ceramic Coatings as thermal barriers in heat cycling / N.M. Chigrinova // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – USA, 2001. – Vol. 74, № 6. – P. 1583–1592.

16-А Чигринова, Н.М. Оптимизация процесса создания керамических тепловых барьеров методом анодного микродугового оксидирования / Н.М. Чигринова, В.Е. Чигринов, В.В. Чигринов // Вестник машиностроения. – М., 2002. – № 9. – С. 69–72.

17-А Чигринова, Н.М. Нанесение оксидных покрытий на поверхности изделий из сплавов на основе алюминия / Н.М. Чигринова, Ю.Н. Тюрин, М.Л. Жадкевич, С.И. Головенко // Автоматическая сварка. – ИЭС им. Патона. – Киев, 2002. – № 2. – С. 44–48.

18-А Чигринова, Н.М. Изучение особенностей формирования теплостойких покрытий на поверхности циркониевого сплава микроплазмой методом / Н.М. Чигринова, В.В. Чигринов // Порошковая металлургия. – Минск, 2003. – № 26. – С. 129–134.

19-А Чигринова, Н.М. Применение микроплазмой технологий для увеличения стабильности эксплуатационных свойств деталей ответственного назначения / Н.М. Чигринова, В.Е. Чигринов, В.В. Чигринов // Сварка и родственные технологии. – Минск, 2004. – № 6. – С. 65–69.

20-А Чигринова, Н.М. Использование метода микроплазмой обработки для осуществления операций восстановления изделий и комплектующих авиатехники / Н.М. Чигринова, В.В. Чигринов, В.С. Павлова // Порошковая металлургия. – Минск, 2004. – Вып. 27. – С. 147–151.

21-А Чигринова, Н.М. Исследование структурного состояния композиционных плазменных покрытий на основе порошковых смесей и оксидной керамики / Н.М. Чигринова, В.В. Чигринов // Порошковая металлургия. – Минск, 2004. – Вып. 27. – С. 152–157.

22-А Chigrinova, N.M. Analysis of Heat Stresses of the Parts of the Cylinder-Piston Group with Heat-Protective Coatings in an Internal-Combustion Engine / N.M. Chigrinova, O.O. Kuznechik, V.V. Chigrinov // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – USA, 2004. – Vol. 77, № 3. – P. 578–589.

23-A Chigrinova, N.M. Setting up a system and an algorithm of adaptive control in regime of real time with electrolyte flows during formation of oxide-ceramic coatings / N.M. Chigrinova // *Jornal of SPIE: Nanodesign, Technology, and Computer Simulation*. – USA, 2004. – Vol. 6597,65971A-5.

24-A Чигринова, Н.М. Влияние теплозащитных покрытий, сформированных методом анодного микродугового оксидирования, на ресурсные характеристики поршневых двигателей / Н.М. Чигринова, В.Е. Чигринов, В.В. Чигринов, О.О. Кузнецик, Г.А. Пресняков // *Порошковая металлургия*. – Киев, 2005. – № 5,6. – С. 120–124.

25-A Чигринова, Н.М. Стабилизация жаростойких фаз в защитных покрытиях на турбинных лопатках газоперекачивающих агрегатов / Н.М. Чигринова // *Защита металлов*. – М., 2006. – Т. 42, № 6. – С. 654–660.

26-A Чигринова, Н.М. Применение микроплазмойсковой обработки для создания стабильных жаростойких барьеров на поверхности чехлов термопреобразователей в ядерных реакторах / Н.М. Чигринова // *Атомная энергия*. – М., 2006. – Т. 100, Вып. 5. – С. 363–368.

27-A Чигринова, Н.М. Физическая модель энергетической активации процесса анодного микродугового оксидирования / Н.М. Чигринова, А.А. Кулешов, В.В. Нелаев // *Инженерно-физический журнал*. – НАН Беларуси, 2009. – Вып. 5. – С. 1004–1013.

28-A Чигринова, Н.М. Новые технологии получения защитных покрытий / Н.М. Чигринова, М.А. Андреев, Е.Д. Манойло, А.И. Шевцов // *Инженер-механик*. – Минск, 2009. – № 1 (42). – С. 25–28.

29-A Чигринова, Н.М. Исследование массопереноса при формировании покрытий на основе многокомпонентных систем методами высокоэнергетического и ультразвукового воздействий / Н.М. Чигринова, В.Е. Чигринов, В.В. Чигринов, А.В. Паустовский, Р.А. Алфинцева, В.Е. Шелудько // *Инженерия поверхности. Новые порошковые композиционные материалы*. Сварка, 25–27 марта 2009 г. – Минск, 2009. – С. 256–263.

30-A Chigrinova, N.M. Theoretical model of the engineering of metal surfaces by microplasmospark alloying with the alternative intensity of the mechanical impact / N.M. Chigrinova. ISSN 1068–3755, *Surface engineering and Applied electrochemistry*. – USA, 2010. – Vol. 46, № 1. – P.21–261.

31-A Чигринова, Н.М. Микроплазмойсковое легирование с ультразвуковым модифицированием поверхности / Н.М. Чигринова, А.А. Кулешов, В.В. Нелаев // *Электронная обработка материалов*. – НАН Молдовы. – Кишинев, 2010. – № 2(262) – С. 27–34.

Статьи в научных сборниках и материалах конференций

32-A Chigrinova, N.M. Electrospark alloying of electroconductiviting surfaces / N.M. Chigrinova, V.E. Chigrinov, E.V. Zvonarev // *Materials of the International*

Conference of Thin Covers, San Diego, USA, April 1996. – San Diego, 1996. – P. 1243–1249.

33-А Чигринова, Н.М. Технология электроискрового легирования с ультразвуковым модифицированием – эффективный способ ремонта и восстановления размеров и геометрических параметров высокоточных изделий / Н.М. Чигринова, В.Е. Чигринов // Новые материалы и технологии: материалы Междунар. конгресса, Минск, май 1997 г. – Минск, 1997. – С. 13–17.

34-А Чигринова, Н.М. Новые аспекты использования технологии электроискрового легирования с ультразвуковым модифицированием для восстановления работоспособности плунжерных пар / Н.М. Чигринова, В.Е. Чигринов // Современные материалы, оборудование и технологии упрочнения и восстановления деталей машин: материалы III Респ. науч.-техн. конф., Новополоцк, апрель 1997 г. – Новополоцк, 1997. – С. 47–49.

35-А Чигринова, Н.М. Влияние химического состава электролита на кинетику роста керамического слоя при анодном микродуговом оксидировании алюми-ниевых сплавов / Н.М. Чигринова, Е.В. Звонарев, В.Ф. Алехин // Новые материалы и технологии: материалы Междунар. конгресса, Минск, май 1997 г. – Минск, 1997. – С. 89–92.

36-А Чигринова, Н.М. Применение технологии электроискрового легирования с ультразвуковым модифицированием для восстановления изношенных поверхностей / Н.М. Чигринова, В.Е. Чигринов // Передовые технологии в производстве материалов и восстановлении изношенных поверхностей: материалы II Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 1997 г. – Минск, 1997. – С. 12–16.

37-А Чигринова, Н.М. Особенности формирования методом АМДО керамических покрытий на поршнях высокофорсированных двигателей / Н.М. Чигринова // Новые материалы и технологии: материалы III Респ. науч.-техн. конф., Минск, 21–22 мая 1998 г. – Минск, 1998. – С. 31.

38-А Чигринова, Н.М. Ресурсосберегающая технология электроискрового легирования с ультразвуковым модифицированием – эффективный способ восстановления работоспособности жесткодopusкных изделий для автотранспортных средств / Н.М. Чигринова, В.Е. Чигринов // Ресурсосберегающие и экологически чистые технологии: материалы III Респ. науч.-техн. конф., Гродно, 25–26 июня 1998 г. – Гродно, 1998. – С. 154–155.

39-А Чигринова, Н.М. Анодное микродуговое оксидирование – эффективный способ повышения моторесурса высокофорсированного двигателя / Н.М. Чигринова, В.Е. Чигринов, А.А. Кухарев // Ресурсосберегающие и экологически чистые технологии: материалы III Респ. науч.-техн. конф., Гродно, 25–26 июня 1998 г. – Гродно, 1998. – С. 153–154.

40-А Чигринова, Н.М. Структура и свойства восстанавливающе-упрочняющих покрытий на поверхности трения изношенных плунжерных пар после микроплазмохимической обработки / Н.М. Чигринова // Слоистые композиционные

материалы – 98: материалы Междунар. конф., Волгоград, 7–12 сентября 1998 г. – Волгоград, 1998. – С. 8–10.

41-А Чигринова, Н.М. Особенности процесса формирования на изношенных высокоточных металлических поверхностях восстанавливающе-упрочняющих покрытий методом электроискрового легирования с ультразвуковым модифицированием / Н.М. Чигринова // Пленки и покрытия – 98: материалы Междунар. конф., СПб., 23–25 сентября 1998. – СПб., 1998. – С. 151,152.

42-А Чигринова, Н.М. Энергосберегающий эффект в технологии анодного микродугового оксидирования (АМДО) / Н.М. Чигринова, В.Е. Чигринов // Новые ресурсосберегающие технологии и улучшение экологической обстановки в легкой промышленности и машиностроении: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Витебск, 10–11 ноября 1998 г. – Витебск, 1998. – С. 122–123.

43-А Чигринова, Н.М. Структурные преобразования в материале при микродуговом воздействии покрытий / Н.М. Чигринова, В.Е. Чигринов, А.А. Кухарев // МЕТ–99: материалы III Междунар. науч.-техн. конф., Рига, апрель 1999 г. – Рига, 1999. – С. 22–24.

44-А Chigrinova, N.M. Study of character of friction and deterioration in metal-polymeric compositions / N.M. Chigrinova // International Thermal Spray Conference, Montreal, Quebec, 8–11 May 2000. – Montreal, 2000. – P. 123–128.

45-А Чигринова, Н.М. Рециклинг с упрочнением плунжерных пар топливных систем ДВС микроплазмохимической обработкой поверхности трения / Н.М. Чигринова, В.Е. Чигринов, А.А. Кухарев // Технология ремонта машин, механизмов, оборудования: материалы 8-й Междунар. науч.-техн. конф., Ялта, май 2000 г. – Ялта, 2000. – С. 48–52.

46-А Чигринова, Н.М. Восстановление и упрочнение поверхности износа внутренних полостей масляных насосов типа НШ с применением микроплазмохимической обработки / Н.М. Чигринова, В.Е. Чигринов, А.А. Кухарев // Технология ремонта машин, механизмов, оборудования: материалы 8-й Междунар. науч.-техн. конф., Ялта, май 2000 г. – Ялта, 2000. – С. 53–58.

47-А Чигринова, Н.М. Инженерия поверхности литейных сплавов алюминия методом АМДО / Н.М. Чигринова, В.Е. Чигринов, А.А. Кухарев // Балттехмаш–2002 (прогрессивные технологии. Машины и оборудование в машиностроении): материалы Междунар. науч.-техн. конф., Калининград, 5–9 июня 2000 г. – Калининград, 2000. – С. 5–10.

48-А Чигринова, Н.М. Формирование теплоизоляционных покрытий на основе композиций керамика-полимер / Н.М. Чигринова, А.А. Кухарев, В.Е. Чигринов // МАТЕХ-2000: материалы 4-й Респ. науч.-техн. конф., Гомель, 12–13 сентября 2000 г. – Гомель, 2000. – С. 125,126.

49-А Чигринова, Н.М. Формирование и эксплуатация АМДО-покрытий в теплонапряженных узлах / Н.М. Чигринова, В.Е. Чигринов, А.А. Кухарев // Материалы и покрытия в экстремальных условиях. Исследование, применение. Эколо-

гически чистые технологии производства и утилизации изделий: материалы Международ. науч.-техн. конф., Кацивели, 18–22 сентября 2000 г. – Кацивели, 2000. – С. 138–145.

50-А Чигринова, И.М. Формирование функциональных покрытий на токопроводящих поверхностях низковольтными электродуговыми методами / И.М. Чигринова // Пленки и покрытия – 2001: материалы Международ. конф., СПб., 2–7 апреля 2001 г. – СПб., 2001. – С. 9–11.

51-А Чигринова, И.М. Упрочнение функциональных поверхностей электродуговым методом / И.М. Чигринова, В.Е. Чигринов, В.В. Чигринов // Актуальные проблемы прочности: материалы Международ. конф., Киев, 3–7 июля 2001 г. – Киев, 2001. – С. 137–138.

52-А Чигринова, И.М. Модификация структуры и свойств поверхности дискретным действием низковольтных пробойных напряжений / И.М. Чигринова // Модификация свойств поверхностных слоев непроводящих материалов с использованием энергетических импульсов: материалы Международ. конф., Феодосия, 27–30 августа 2001 г. – Феодосия, 2001. – С. 28–33.

53-А Чигринова, И.М. Некоторые сведения о возможности оптимизации режимов процесса АМДО для получения толстых керамических покрытий в щелочных растворах / И.М. Чигринова // Модификация свойств поверхностных слоев материалов с использованием энергетических импульсов: материалы Международ. конф., Феодосия, 27–30 августа 2001 г. – Феодосия, 2001. – С. 39–42.

54-А Чигринова, И.М. Сверхтвердое покрытие для притирочных и доводочных инструментов / И.М. Чигринова // Сверхтвердые инструментальные материалы на рубеже тысячелетий: получение, свойства, применение «СТИМ–2001»: материалы Международ. конф., Киев, 2001 г. – Киев, 2001. – С. 62–65.

55-А Чигринова, И.М. Тонкая структура и свойства износостойких покрытий, полученных методом электроискрового легирования с ультразвуковым модифицированием / И.М. Чигринова // ДСМСМС – 2002: Дислокационная структура и механические свойства металлов и сплавов: материалы 9-го Международ. семинара, Екатеринбург, 18–22 марта 2002 г. – Екатеринбург, 2002. – С. 280–291.

56-А Чигринова, И.М. Некоторые трибологические свойства материалов с оксидными керамиками на рабочих поверхностях / И.М. Чигринова // Триботехника SITC 2002: материалы 2-й Международ. конф., Зелена Гура, Польша, 25–28 августа 2002 г. – Зелена Гура, 2002. – С. 187–189.

57-А Чигринова, И.М. Нанесение оксидных покрытий на поверхности изделий из сплавов на основе алюминия / И.М. Чигринова, Ю.Н. Тюрин, М.Л. Жадкевич, С.И. Головенко, И.М. Дуда // Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов «ОТТОМ–3»: материалы Международ. конф., Харьков, 9–13 сентября 2002 г. / ХФГИ. – Харьков, 2002. – С. 66–69

58-А Чигринова, И.М. Роль микроплазменоскровой обработки в условиях управляемого электрического разряда в повышении жаростойкости лопаток ТНД /

Н.М. Чигринова // *Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий: материалы Второй междунар. конф., Кацивели, 16–22 сентября 2002 г.* – Кацивели, 2002. – С. 49–54.

59-А Чигринова, Н.М. Некоторые физические поля в кристаллических и нанокристаллических сплавах / Н.М. Чигринова, Т.М. Бречко // *Актуальные проблемы прочности. Структура и свойства перспективных материалов и сплавов: материалы 15-го Междунар. семинара, Великий Новгород, 30 сентября – 4 октября 2002 г.* – Великий Новгород, 2002. – С. 28–31.

60-А Чигринова, Н.М. Анализ напряженно-деформированного состояния изделий с теплостойким оксидо-керамическим покрытием при термоциклических нагрузках / Н.М. Чигринова, В.В. Чигринов, О.О. Кузнечик // *Петербургские чтения по проблемам прочности: материалы Междунар. семинара, СПб., 11–14 марта 2003 г.* – СПб., 2003. – С. 10–12.

61-А Чигринова, Н.М. Исследование теплопередачи в поршневом двигателе внутреннего сгорания / Н.М. Чигринова, В.Е. Чигринов, О.О. Кузнечик, Г.А. Пресняков // *Новейшие технологии в порошковой металлургии и керамике: материалы конф., Киев, 8–12 сентября 2003 г.* – Киев, 2003. – С. 12–14.

62-А Чигринова, Н.М. Использование углерода для формирования наноструктурных слоев в покрытиях на чехлах термопреобразователей / Н.М. Чигринова // *Материалы 8-й Междунар. конф. по химии гидридов и наноматериалам, Судак, 2003 г. / ИПМ им. Францевича, Киев, сентябрь 2003.* – С. 44–49.

63-А Чигринова, Н.М. Использование методов прикладной акустики в задачах электрофизического упрочнения и отделки поверхностей пресс-форм / Н.М. Чигринова, А.Г. Калсаров // *материалы 68-й Науч.-техн. конф., Минск, 2–6 февраля 2004 г. / БГТУ. – Минск, 2004.* – С. 11–14.

64-А Чигринова, Н.М. Некоторые свойства метало-оксидо-керамических и метало-полимерных систем / Н.М. Чигринова // *Проблемы строительства, машиностроения, сельхозинженерии: материалы Юбилейной науч. конф., Олыштын, 15–16 июня 2004 г. / Варминско-Мазурский Университет. – Олыштын, июнь 2004.* – С. 238–242.

65-А Чигринова, Н.М. Микродуговые оксидо-керамические покрытия с фуллереновым наполнением / Н.М. Чигринова, В.Е. Чигринов, Э.М. Шпилевский, В.И. Прокошин // *Фуллерены и фуллереноподобные структуры в конденсированных средах: материалы Междунар. симпозиума. Минск, июнь 2004.* – С. 93–98.

66-А Чигринова, Н.М. Оптимизация параметров микроплазменного воздействия для получения покрытий с устойчивой тенденцией роста при изменении параметров обработки / Н.М. Чигринова, В.С. Павлова // *Порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка: материалы 6-й Междунар. конф., Минск, 2004 г.* – Минск, 2004. – С. 189–191.

67-А Чигринова, Н.М. Микроплазмоискровые покрытия в кривошипно-шатунном соединении ДВС / Н.М. Чигринова, В.В. Чигринов // Порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка: материалы 6-й Междунар. конф., Минск, 2004 г. – Минск, 2004. – С. 159–162.

68-А Чигринова, Н.М. Новые перспективные материалы для узлов трения / Н.М. Чигринова, А.Ф. Ильющенко, Н.А. Шипица, М.А. Андреев // Проблемы космической триботехники «Космотриб–2004»: материалы семинара, Гомель, 26–28 августа 2004 г. – Гомель, 2004. – С. 14–19.

69-А Чигринова, Н.М. К вопросу о трибологических особенностях оксидных керамик / Н.М. Чигринова // Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий: материалы Третьей междунар. конф., Киев, 13–17 сентября 2004 г. – Киев, 2004. – С. 29–31.

70-А Чигринова, Н.М. Критерии подобия в механизмах образования микроплазменных покрытий / Н.М. Чигринова, А.Г. Капсаров, В.В. Чигринов // Прогрессивные технологии в порошковой металлургии: материалы Междунар. симпозиума, Минск, 30 марта 2005 г. – Минск, 2005. – С. 28–30.

71-А Чигринова, Н.М. Использование микроплазмоисковой обработки для получения композиционных материалов, функционирующих в экстремальных условиях / Н.М. Чигринова // Сварка и порошковая металлургия МЕТ-2005: материалы 4-й Междунар. конф., Рига–Юрмала, 28–29 апреля 2005 г. – Рига–Юрмала, 2005. – С. 22–25.

72-А Чигринова, Н.М. Роль ультразвука в формировании восстанавливающе-упрочняющих оксидных покрытий большой толщины при микродуговом оксидировании объектов из вентильных металлов / Н.М. Чигринова, В.Е. Чигринов, А.В. Дроздов // Материалы, технологии и оборудование для упрочнения и восстановления деталей машин: материалы Международной науч.-техн. конф., Новополоцк, 20–22 апреля 2005 г. / ПГУ. – Новополоцк, 2005. – С. 61–65.

73-А Чигринова, Н.М. Структура и трибологические свойства функционально адаптированных к экстремальным условиям композиционных материалов / Н.М. Чигринова, В.Е. Чигринов // Композиционные материалы в промышленности: материалы 25-й Юбилейной конф., Ялта, 30 мая – 3 июня 2005 г. / ИПМ им. Францевича. – Ялта, 2005. – С. 145–148.

74-А Chigrinova, N.M. Use of inoculated surface compositions for creation of nano-structural layers in functional peo-coatings / Н.М. Chigrinova // EUROMAT 2005: материалы Европейского конгресса современных материалов и технологий, Прага, 5–8 сентября 2005 г. – Прага, 2005. – Р. 1215–1218.

75-А Чигринова, Н.М. Применение компьютерных технологий для оптимизации технологических приемов микроплазмоискровых воздействий в различных средах / Н.М. Чигринова, В.Е. Чигринов, В.В. Чигринов // Tenth International Workshop on New Approaches to High-Tech: Nondestructive Testing and

Computer Simulations in Science and Engineering (NDTCS–2006), Olsztyn, 5–8 July 2006. – Olsztyn, 2006. – С. 156–161.

76-А Чигринова, Н.М. Разработка и оптимизация технологических приемов формирования композиционных покрытий на основе порошковых смесей и оксидной керамики с использованием микроплазменных воздействий и компьютерного моделирования / Н.М. Чигринова, В.В. Чигринов // The Fourth International Conference on Mathematical Modeling and Computer Simulations of Materials Technologies, Ariel, Israel, 11–15 September, 2006. – Ariel, 2006. – Р. 43–48.

77-А Чигринова, Н.М. Моделирование состава и параметров получения микроплазменными методами композиционного материала сталь-оксидо-керамическое покрытие // Н.М. Чигринова, В.В. Чигринов // The Fours International Conference on Mathematical Modeling and Computer Simulations of materials and Technologies, Ariel, Israel, 11–15 September 2006. – Ariel, 2006. – Р. 135–143.

78-А Чигринова, Н.М. Комбинирование микроплазмойсковых методов обработки в условиях регулируемого электроразряда для формирования оксидо-керамических покрытий на объектах из вентильных и черных металлов / Н.М. Чигринова, В.В. Чигринов // Композиционные материалы в промышленности: материалы 27-й Ежегодной междунар. науч.-практ. конф. и блиц-выставки, Ялта, 30 мая – 5 июня 2007 г. – Ялта, 2007. – С. 240–243.

79-А Chigrinova, N.M. Physical simulation of heat and mass-transfer in microplasma ans spark processes with various ambiances / N. Chigrinova // Eleventh International Workshop on New Approaches to High-Tech: Nano Design, Technology, Computer Simulations, Bayreuth, Germany, 17–21 September 2007. – Bayreuth, 2007. – Vol. 11. – Р. 1153–6.

80-А Чигринова, Н.М. Исследование закономерностей взаимодействия в композиции подложка-покрытие при модернизации процесса АМДО / Н.М. Чигринова // Высокие технологии – 2007: материалы Междунар. конф., Киев, октябрь 2007 г. – Киев, 2007. – С. 227–225.

81-А Чигринова, Н.М. Микроструктурные исследования оксидных покрытий, сформированных методом АМДО на поверхности титановых имплантатов // Н.М. Чигринова, В.С. Павлова, А.В. Дроздов // Сварка и родственные технологии: материалы Междунар. конф., Минск, 2007. – С. 57–62.

82-А Чигринова, Н.М. Оптимизация технологических приемов микроплазмойскового воздействия для разработки энергосберегающих процессов формирования защитных покрытий / Н.М. Чигринова, В.Е. Чигринов, А.В. Дроздов // Сварка и родственные технологии: материалы Междунар. симпозиума, Минск, 26 марта 2008 г. – Минск, 2008. – С. 48–52.

83-А Чигринова, Н.М. Применение ультразвуковой обработки для получения нанокристаллического состояния в материалах, подвергнутых микроплазмойсковым воздействиям / Н.М. Чигринова // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия,

сварка: материалы 8-й Междунар. конф., Минск, 27–28 мая 2008 г. – Минск, 2008. – С. 28–34.

84-А Чигринова, Н.М. Исследование характера и интенсивности износа металлических объектов с композиционными износостойкими покрытиями с улучшенными триботехническими свойствами, полученными микроплазменным легированием с участием ультразвука / Н.М. Чигринова, В.Е. Чигринов // Композиционные материалы в промышленности: материалы 28-й Междунар. конференции, Крым, 26–30 мая 2008 г. / Сланполиком. – Крым, 2008. – С. 364–366.

85-А Чигринова, Н.М. Применение многокомпонентных электродных систем для формирования покрытий методом микроплазменного легирования / Н.М. Чигринова, А.В. Паустовский, Р.А. Алфинцева, В. Е. Шелудько, А.Д. Костенко, А.Ю. Борехов // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка: материалы 8-й Междунар. конф., Минск, 27–28 мая 2008 г. – Минск, 2008. – С. 108–110.

86-А Чигринова, Н.М. Механизм управления технологией анодного микродугового оксидирования для получения покрытий заданной толщины и качества / Н.М. Чигринова // Инженерия поверхности. Новые порошковые композиционные материалы. Сварка. Минск, 25–27 марта 2009 г. – Минск, 2009. – С.115–117.

87-А Чигринова, Н.М. Совершенствование качества металлических изделий методом микроплазменного легирования с ультразвуковым модифицированием / Н.М. Чигринова, В.Е. Чигринов, В.С. Короткая // Технологии. Оборудование. Качество. Минск, 19–22 мая 2009 г. – Минск, 2009. – С.115–117.

88-А Чигринова, Н.М. Решение задачи оптимизации на основе теории малых колебаний / Н.М. Чигринова, В.В. Нслаев, Т.Ф. Бречко // Перспективные материалы и технологии: Витебск, 26–29 мая 2009 г. – Витебск, 2009. – С.18–19.

89-А Чигринова, Н.М. Разработка концепции моделирования энергетической интенсификации микроплазменной обработки в газовой среде / Н.М. Чигринова // Композиционные материалы в промышленности: материалы 29-й Междунар. конф., Ялта, 1–5 июня 2009 г. – Ялта, 2009. – С.124–127.

90-А Чигринова, Н.М. Применение интенсифицированного метода электроискрового легирования с дополнительным высокочастотным деформированием для восстановления и упрочнения быстроизнашивающихся деталей авиационной техники / Н.М. Чигринова, В.С.Короткая // Сварка и родственные технологии: материалы Междунар. симпозиума, Минск. – 24 марта 2010 г. – Минск, 2010. – С.155–159.

Тезисы докладов

91-А Чигринова, Н.М. Электроискровое упрочнение стального и твердосплавного инструмента / Н.М. Чигринова, Е.В. Звонарев, В.Е. Чигринов // Совершенствование процессов финишной обработки в машино- и приборостроении, экология и защита окружающей среды: тезисы докл. на Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 28 ноября – 1 декабря 1995 г. – Минск, 1995. – С. 46.

92-А Чигринова, Н.М. К вопросу о создании алюминиевого абразивного инструмента методом анодного микродугового оксидирования / Н.М. Чигринова, Е.В. Звонарев, В.Ф. Алехин // Новые материалы и технологии: тез. докл. на II Респ. науч.-техн. конф. Минск, май 1996 г. – Минск, 1996. – С. 121.

93-А Чигринова, Н.М. Структурные преобразования в материале при микродуговом воздействии / Н.М. Чигринова, В.Е. Чигринов, А.А. Кухарев // Тез. докл. на III Междунар. конф. МЕТ-99, май, Рига, 1999 г. – Рига, 1999. – С.38,39.

94-А Чигринова, Н.М. Защита днища поршня ДВС методом анодного микродугового оксидирования / Н.М. Чигринова, В.Е. Чигринов // Современные материалы, оборудование и технологии упрочнения и восстановления деталей машин: тезисы докл. на Междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 23–25 сентября 1999 г. – Новополоцк, 1999. – С. 23,24.

95-А Чигринова, Н.М. Особенности упрочнения материала в процессе микроплазмохимической обработки в условиях управляемого электрического разряда под воздействием ультразвуковых импульсов / Н.М. Чигринова // Петербургские чтения по проблемам прочности: тез. докл. на Междунар. семинара, СПб., 11–14 марта 2002 г. – СПб., 2002. – С. 102.

96-А Чигринова, Н.М. Перспективы применения анодного микродугового оксидирования для улучшения эксплуатационных свойств литейных сплавов / Н.М. Чигринова // Машиностроение и техносфера 21 века: тез. докл. на Междунар. конф., Севастополь, 9–14 сентября 2002 г. – Севастополь, 2002. – С. 32.

97-А Чигринова, Н.М. Использование автоматизированного измерительного комплекса для исследования микроплазмоискровых процессов / Н.М. Чигринова, А.В. Дроздов // Прогрессивные технологии в порошковой металлургии: материалы Междунар. симпозиума, Минск, 30 марта 2005 г. – Минск, 2005. – С. 18,19.

98-А Чигринова, Н.М. Автоматизированные комплексы для контроля энергосиловых параметров при микроплазмоискровой обработке объектов / Н.М. Чигринова, В.Е. Чигринов // Пленки и покрытия – 2005: материалы 7-й Междунар. конф., СПб., 24–26 мая 2005 г. – СПб., 2005. – С. 4–6.

99-А Чигринова, Н.М. Перспективы применения автоматизированных информационно-измерительных систем для управления и оптимизации электрофизических параметров микроплазмоискровых технологий / Н.М. Чигринова, А.В. Дроздов // Исследование, разработка и применение

высоких технологий в промышленности: материалы Междунар. конф., СПб., 30 мая 2005 г. – СПб., 2005. – С. 52–55.

100-А Чигринова, Н.М. Интенсификация процесса массопереноса при формировании покрытий методом АМДО / Н.М. Чигринова // Материалы. Технологии и оборудование для нанесения функциональных защитных покрытий: материалы Междунар. симпозиума, Минск, 30 марта 2007 г. – Минск, 2007. – С. 12–14.

101-А Чигринова, Н.М. Состояние работ и перспективы применения микроплазмоискровых технологий в производстве и ремонте изделий, эксплуатируемых в условиях интенсивного абразивного изнашивания и термоциклирования / Н.М. Чигринова, В.Е. Чигринов, В.В. Чигринов // Сварка и родственные технологии: материалы Науч.-практ. семинара, Гродно, 22 октября 2008 г. – Гродно, 2008. – С. 28.

Патенты

102-А Способ формирования в щелочном электролите толстых покрытий на литейных сплавах алюминия методом АМДО: пат. 5511 Респ. Беларусь, МПК7 С 25 D 11/06 / Н.М. Чигринова, В.Е. Чигринов, А.А. Кухарев; заявитель Государственное научное учреждение «Ин-т порошковой металлургии». – № а 19980673; заявл. 17.07.1998; опубл. 30.09.2003.

103-А Способ получения фильтрующего материала: пат. 5813 Респ. Беларусь, МПК7 В 22 F 3/00 / Н.М. Чигринова, В.Е. Чигринов, А.А. Кухарев, Л.Н. Пилинович; заявитель Государственное научное учреждение «Ин-т порошковой металлургии» – № а 20000487; заявл. 24.05.2000; опубл. 30.12.2003.

104-А Способ формирования толстых покрытий на литейных сплавах алюминия: пат. 5846 Респ. Беларусь, МПК7 С 25 D 11/02 / Н.М. Чигринова, В.Е. Чигринов, А.А. Кухарев; заявитель Государственное научное учреждение «Ин-т порошковой металлургии». – № а 19990983; заявл. 02.11.1999; опубл. 30.12.2003.

105-А Инструмент для притирки и доводки: пат. 5923 Респ. Беларусь, МПК7 В 24D 15/00, С25D 11/02 / Н.М. Чигринова, В.Е. Чигринов, А.А. Кухарев; заявитель Государственное научное учреждение «Ин-т порошковой металлургии». – № а 20000341; заявл. 11.04.2000; опубл. 30.03.2004.

106-А Способ восстановления и упрочнения штамповой оснастки и режущего инструмента: пат. 6787 Респ. Беларусь, МПК7 В 23 Р 6/00 / Н.М. Чигринова, В.Е. Чигринов; заявитель Государственное научное учреждение «Ин-т порошковой металлургии». – № а 20011045; заявл. 12.05.2001; опубл. 30.03.2005.

107-А Способ измерения температуры поршней механизмов с кривошипно-ползунным приводом: пат. 8195 Респ. Беларусь, МПК G 01 K 13/06 / Н.М. Чигринова, В.В. Чигринов, О.О. Кузнецик; заявитель Государственное

научное учреждение «Ин-т порошковой металлургии». – № а 20031211; заявл. 23.12.2003; опубл. 30.06.2005.

108-А Способ получения износ-, коррозионно- и термостойких покрытий на основе термодинамически стабильных оксидов алюминия: пат. 8587 Респ. Беларусь, МПК7 С 23 С / Н.М. Чигринова, В.В. Чигринов, А.Ф. Ильющенко; заявитель Государственное научное учреждение «Ин-т порошковой металлургии». – № а 20040145; заявл. 27.02.2004; опубл. 30.09.2005.

109-А Многоэлектродный инструмент для электроискрового легирования: пат. 9036 Респ. Беларусь, МПК 7 В 23 Н 7/16 / Н.М. Чигринова, В.Е. Чигринов, А.Г. Капсаров, И.Д. Сухман; заявитель Государственное научное учреждение «Ин-т порошковой металлургии». – № а 20040379; заявл. 28.04.2004; опубл. 30.12.2005.

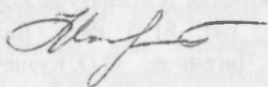
110-А Способ формирования сервовитной пленки на трущихся поверхностях и устройство для его реализации: пат. 10316 Респ. Беларусь, МПК В 23 Н 5/00 / Н.М. Чигринова, В.Е. Чигринов, А.Г. Капсаров, С.Е. Бельский; заявитель Государственное научное учреждение «Ин-т порошковой металлургии». – № а 20040600; заявл. 30.06.2004; опубл. 30.12.2005.

111-А Способ и устройство контроля и управления кинетикой нарастания покрытий по продолжительности микроплазмойсковых воздействий: пат. 2601 Респ. Беларусь, МПК7 В 23 Н 11/00 / Н.М. Чигринова, В.Е. Чигринов, А.В. Дроздов; заявитель Государственное научное учреждение «Ин-т порошковой металлургии». – № а 20050380; заявл. 24.06.2005; опубл. 30.04.2006.

112-А Устройство управления микроплазмойсковым легированием с целью минимизации энергозатрат: пат. 5240 Респ. Беларусь МПК (2006) В 23Н 7/26 / Н.М. Чигринова, В.Е. Чигринов, В.В. Чигринов, А.В. Дроздов; заявитель Государственное научное учреждение «Ин-т порошковой металлургии». – № и 20080534, заявл. 28.06.2008. опубл. 30.04.2006.

113-А Способ получения биосовместимых покрытий с равномерной пористостью на хирургических имплантатах: патент № 13878 от 09.09.2010 / Н.М. Чигринова, В.Е. Чигринов, А.Ф. Ильющенко, В.В. Чигринов.

114-А Способ интенсификации процесса формирования оксидных покрытий методом АМДО в слабощелочных растворах с минимизацией энергозатрат: заявка на патент А20081239 от 30.09.2008 / Н.М. Чигринова.



РЭЗЬЮМЭ

Чыгрынава Наталля Міхайлаўна

ІНТЭНСІФІКАЦЫЯ ПРАЦЭСАЎ МІКРАПЛАЗМАІСКРАВОГА ЁМАЦАВАННЯ І АДНАЎЛЕННЯ МЕТАЛІЧНЫХ ВЫРАБАЎ ПАВЫШАНАЙ ДАКЛАДНАСЦІ ЭЛЕКТРАМЕХАНІЧНЫМ УЗДЗЕЕНЕМ

Ключавыя словы: інтэнсіфікацыя, мікраплазмаіскравыя метады, умацаванне і аднаўленне, электрамеханічнае ўздзеянне, вадкае і газавое асяроддзі, пакрыцці, аноднае мікрадугавое аксідзіраванне, электраіскравое легіраванне, ультрагукавая апрацоўка, масаперанос, водна-шчолачныя электраліты, кантактныя ўмовы, электрычныя параметры, структура, напружана-дэфармаваны стан.

Мэта работы: навукова-тэхнічнае абгрунтаванне і тэхналагічнае забеспячэнне інтэнсіфікацыі мікраплазмаіскаравой апрацоўкі металічных вырабаў павышанай дакладнасці ў вадкім і газавым асяроддзях электрамеханічным уздзееннем і стварэнне энергазберагальных тэхналогій фарміравання функцыянальна адаптаваных пакрыццяў павялічанай таўшчыні ў нанаструктурыраваным стане са зніжаным узроўнем астаточных напружанняў.

Метады даследавання: для тэарэтычных і эксперыментальных даследаванняў выкарыстоўваліся фундаментальныя фізічныя законы, матэматычнае мадэліраванне, тэорыя алгарытмаў, шэраг сучасных метадаў, абсталявання і распрацаваных устройстваў для адаптыўнага кіравання і падтрымання аптымальных параметраў мікраплазмаіскаравой апрацоўкі ў рэжыме рэальнага часу, сістэмна-структурны, колькасны пунктавы рэнтгенаструктурны і мікрарэнтгенаспектральныя аналізы, метадыкі выпрабаванняў фізіка-механічных уласцівасцей.

Атрыманыя вынікі: распрацавана канцэпцыя інтэнсіфікацыі сумесным дзеяннем электрычнага току і ультрагуку мікраплазмаіскаравых працэсаў аднаўлення і ўмацавання металічных паверхняў павышанай дакладнасці ў вадкім і газавым асяроддзях. Створаны фізіка-матэматычныя мадэлі інтэнсіфіцыраваных мікраплазмаіскаравых метадаў, на аснове якіх аптымізаваны тэхналагічныя параметры працэсаў, якія забяспечваюць паскарэнне ў 1,5–4 разы росту таўшчыні пакрыццяў у нанаструктурыраваным стане пры зніжэнні энергазатрат на іх выраб у 1,5–2,5 разы. Вывучаны механізмы і заканамернасці фарміравання пакрыццяў, змянення іх структуры, напружана-дэфармаванага стану і фізіка-механічных уласцівасцей пры дадатковым электрамеханічным уздзеянні на матэрыял.

Ступень і галіна выкарыстання: распрацаваны і ўжаранены ў вытворчасць новыя энергазберагальныя мікраплазмаіскаравыя тэхналогіі ўмацавання, аднаўлення і дэкарыравання высокадакладных металічных вырабаў і тэхнічныя ўмовы, якія павышаюць канкурэнтназдольнасць прадукцыі айчынных металаапрацоўкі, машынабудаўніцтва, вырабу медыцынскай тэхнікі і прыстасаванняў, якія выключаюць у шэрагу выпадкаў валютныя затраты за кошт адмаўлення ад імпарту замежных аналагаў. Агульны аб'ём таварнай прадукцыі, вырабленай на распрацаваных тэхнапрацэсах за перыяд 2005–2009 гг., складае 982000 амерыканскіх долараў і 31600000 рублёў.

РЕЗЮМЕ

Чигринова Наталья Михайловна

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ МИКРОПЛАЗМОИСКРОВОГО УПРОЧНЕНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

Ключевые слова: интенсификация, микроплазмоискровые методы, упрочнение и восстановление, электромеханическое воздействие, жидкая и газовая среды, покрытия, анодное микродуговое окислирование, электроискровое легирование, ультразвуковая обработка, массоперенос, водно-щелочные электролиты, контактные условия, электрические параметры, структура, напряженно-деформированное состояние.

Цель работы: научно-техническое обоснование и технологическое обеспечение интенсификации микроплазмоискровой обработки металлических изделий повышенной точности в жидкой и газовой средах электромеханическим воздействием и создание энергосберегающих технологий формирования функционально адаптированных покрытий увеличенной толщины в наноструктурированном состоянии со сниженным уровнем остаточных напряжений.

Методы исследования: для теоретических и экспериментальных исследований применялись фундаментальные физические законы, математическое моделирование, теория алгоритмов, ряд современных методик, оборудования и разработанных устройств для адаптивного управления и поддержания оптимальных параметров микроплазмоискровой обработки в режиме реального времени, системно-структурный, количественный точечный рентгеноструктурный и микрорентгеноспектральный анализы, методики испытаний физико-механических свойств.

Полученные результаты: разработана концепция интенсификации совместным действием электрического тока и ультразвука микроплазмоискровых процессов восстановления и упрочнения металлических поверхностей повышенной точности в жидкой и газовой средах. Созданы физико-математические модели интенсифицированных микроплазмоискровых методов, на основе которых оптимизированы технологические параметры процессов, обеспечивающих ускорение в 1,5–4 раза роста толщины покрытий в наноструктурированном состоянии при снижении энергозатрат на их производство в 1,5–2,5 раза. Изучены механизмы и закономерности формирования покрытий, изменения их структуры, напряженно-деформированного состояния и физико-механических свойств при воздействии на материал дополнительного электромеханического воздействия.

Степень и область применения: разработаны и внедрены в производство новые энергосберегающие микроплазмоискровые технологии упрочнения, восстановления и декорирования высокоточных металлических изделий, и технические условия, повышающие конкурентоспособность продукции отечественных металлообработки, машиностроения, производства медицинской техники и приспособлений, включающие в ряде случаев валютные затраты за счет отказа от импорта зарубежных аналогов. Общий объем товарной продукции, произведенной по разработанным технологическим процессам за период 2005–2009 гг., составляет 982000 американских долларов и 31600000 рублей.

ABSTRACT

Chigrinova Natalya Mikhailovna

INTENSIFIED PROCESSES FOR MICROPLASMASPARK STRENGTHENING AND RESTORATION OF METAL INCREASED ACCURACY PRODUCTS BY ELECTROMECHANIC ACTION.

Key words: intensification, microplasmaspark methods, strengthening and restoration, electromechanic effect, liquid and gas media, coatings, anode microarc oxidation, electrospark alloying, ultrasound processing, mass transfer, water and alkaline electrolyte, contact conditions, electric parameters, structure, tense and deformed state.

Aim of paper: scientific and engineering justification and technology support for intensified microplasmaspark processing of metal products with increased accuracy in liquid and gas media by electromechanic action and creation for energy saving technologies of formed function and adaptation coatings having increased thicknesses in nanostructured state with reduced level for residual tensions.

Investigation methods: basic laws of physics, mathematical modeling, theory of algorithms, a number of up-to-date methods, the relevant equipment and the developed devices for adaptive control and support of optimal microplasmaspark processing parameters in real time mode, system and structure, quantitative point roentgen and structure, microroentgen and spectral analyses, methods for testing physical and mechanical properties were used for theoretical and pilot investigations.

Results obtained. The appropriate concept for intensification of microplasmaspark restoration and strengthening processes of metal increased accuracy surfaces in liquid and gas media by joint electric current and ultrasound action has been developed. Physical and mathematical models have been created. They include the models for intensified microplasmaspark methods on the base of which technology parameters have been optimized. They provide the accelerated growth of thickness of coatings in nanostructured state by 1,5-4 times while the reduction for energy consumption for their production constitutes 1,5-2,5 times. The mechanisms and regularities for forming coatings, changing their structure, tense and deformed state and physical and mechanical properties have been studied during the action of additional electromechanical impact on the material.

Extent and application field.: New energy saving microplasmaspark technologies for strengthening, restoration and decoration of high precision metal products have been developed and introduced into production as well as technical conditions improving competitiveness of products of homeland origin metal processing, machine building, medical devices and equipment excluding in a number of cases currency payment due to refusal to import foreign analogues. The total commodity production volume, produced by developed technology processes in the period 2005-2009, constitutes 982000 American dollars and 31600000 roubles.

Научное издание

ЧИГРИНОВА
Наталья Михайловна

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ МИКРОПЛАЗМОИСКРОВОГО УПРОЧНЕНИЯ
И ВОССТАНОВЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТИ
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ**

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 23.09.2010 г.

Формат 60x84^{1/16}. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л.3,02. Уч.-изд. л.2,36. Тираж 60. Заказ 1069.

Издатель полиграфическое исполнение:
Белорусский национальный технический университет.

ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009.

Проспект Независимости, 65. 220013, Минск.