

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 621.9.044:621.763

**МИНЬКО**  
Дмитрий Вацлавович

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОЛУЧЕНИЯ  
ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ  
ИМПУЛЬСНЫМИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ**

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

Минск 2019



Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете.

Научный консультант

**БЕЛЯВИН Климентий Евгеньевич**,  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Машины и технология  
обработки металлов давлением» Белорусского  
национального технического университета

Официальные оппоненты:

**МЫШКИН Николай Константинович**,  
академик НАН Беларуси, доктор технических  
наук, профессор,  
заведующий отделом трения, смазки и  
эксплуатационной стойкости материалов  
ГНУ «Институт механики металлополимерных  
систем имени В.А.Белого НАН Беларуси»;

**ДЕВОЙНО Олег Георгиевич**,  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий НИИЛ плазменных и лазерных  
технологий филиала БНТУ «Научно-  
исследовательский политехнический институт»;

**ПИЛИНЕВИЧ Леонид Петрович**,  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры инженерной психологии и  
эргономики УО «Белорусский государственный  
университет информатики и радиоэлектроники»

Оппонирующая организация

ГНУ «Объединенный институт машиностроения  
Национальной академии наук Беларуси»

Защита состоится 13 декабря 2019 г. в 14<sup>00</sup> на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.03 в Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, проспект Независимости, 65, корпус 1, ауд. 202, тел. ученого секретаря (+375 17) 292-24-04, e-mail: sovet020503@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национально-го технического университета.

Автореферат разослан 11 ноября 2019 г.

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

О.Г. Девойно

© Минько Д.В., 2019  
© Белорусский национальный  
технический университет, 2019



## ВВЕДЕНИЕ

Современный уровень научно-технического развития передовых стран во многом определяется достижениями в области технологий получения новых материалов и изделий из них. Самыми востребованными на протяжении последних десятилетий стали композиционные материалы, годовой объем выпуска которых в мире к 2023 году достигнет примерно 115 млрд. долларов США. Основными стимулами роста производства являются потребности автомобильной и аэрокосмической промышленности, строительства и энергетики.

Функционально-градиентные материалы – новое поколение композиционных материалов, для которых характерно отсутствие четких границ между компонентами и закономерное изменение структуры и физико-механических свойств, позволяющее увеличить эффективность и ресурс работы в соответствии с предъявляемыми эксплуатационными требованиями. Порошковые функционально-градиентные материалы, сформированные из частиц, отличающихся по составу, концентрации, структуре и морфологии поверхности, и компактные поверхностно- или объемно-модифицированные материалы за счет структурной неоднородности и заданного распределения физико-механических свойств обладают рядом преимуществ, среди которых сочетание прочности металлов и ударной вязкости твердых сплавов, твердости керамики и коррозионной стойкости полимеров. Однако область применения функционально-градиентных материалов остается недостаточно широкой в первую очередь вследствие отсутствия экономичных высокопроизводительных технологий и оборудования.

Импульсные электрофизические методы, основанные на прямом или косвенном использовании энергии электрического тока, отличительной особенностью которых является короткое время энергетического воздействия, возможность концентрации, дозирования и глубины проникновения энергии в материал, избирательное управление тепловыми и силовыми потоками, являются уникальным высокоэффективным инструментом, как при создании многокомпонентных порошковых градиентных материалов, так и при направленном модифицировании структуры и свойств однородных материалов. Широкое использование в последнее время в создаваемых материалах компонентов из тугоплавких металлов, интерметаллидов, керамики требует разработки новых технологий высокотемпературного воздействия с использованием современных источников токовых импульсов, лазерного излучения и плазмы, обладающих универсальностью, высокой производительностью, экологической чистотой. В то же время, несмотря на многочисленные исследования, к настоящему времени отсутствуют систематизированные данные о механизмах структурно-фазовых превращений в однородных и многокомпонентных материалах при воздействии направленных импульсных потоков энергии, закономерностях формирования в них градиентов структуры и свойств на всех стадиях получения, научно обоснованные рекомендации по созданию технологических процессов и оборудования, что препятствует широкому промышленному внедрению функционально-градиентных материалов и является важной народнохозяйственной проблемой.

Решению указанной проблемы путем создания научных основ получения металлических и керамических функционально-градиентных материалов импульс-

ными электрофизическими методами посвящена данная работа. Проведенные исследования в совокупности являются базой для создания комплекса технологических процессов и оборудования, обладающих универсальностью, высокой производительностью, обеспечивающих при минимальных затратах получение материалов с градиентом структуры и свойств для изделий с повышенными эксплуатационными характеристиками, применяемых в медицине, электронике, электротехнике, строительстве, обрабатывающей промышленности.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Связь работы с научными программами (проектами), темами**

Работа выполнялась в рамках 19 заданий 10 государственных программ, важнейшие из которых: ГНТП «Лазерные системы» (задание М20 «Разработать, изготовить, внедрить в производство установку порошковой лазерной стереолитографии для получения объемных изделий из металлических и полимерных порошковых материалов и технологию получения имплантатов из композиционного титана для протезирования в ортопедии и онкологии», 2003–2006 г.г., № ГР20032953); ГНТП «Новые материалы и технологии» (задание 3.60 «Исследовать, разработать и внедрить в производство технологический процесс контактной электроимпульсной сварки порошковых вольфрамовых контактных элементов и стальных контактодержателей звуковых сигналов. Изготовить опытную партию (100 штук) звуковых сигналов. Организовать производство звуковых сигналов с объемом выпуска продукции до 30 000 штук в год», 2004–2005 г.г., № ГР20043287); ГППНИ «Материалы в технике» (задание 3.20 «Исследование структурных изменений в порошковой композиции «металл-диэлектрик» при электроимпульсном воздействии и разработка порошкового твердосплавного материала на основе карбида вольфрама с повышенными эксплуатационными характеристиками для изготовления металло- и деревообрабатывающего инструмента», 2006–2007 г.г., № ГР20064352); ГНТП «Новые материалы и технологии – 2010» (задание 1.66 «Исследовать, разработать и внедрить в производство технологию импульсно-плазменной модификации рабочих поверхностей штампового и медицинского инструмента», 2006–2009 г.г., № ГР20067068); ГПОФНИ «Высокоэнергетические, ядерные и радиационные технологии» (задание 3.25 «Разработка метода регистрации технологических параметров быстропротекающих высокотемпературных процессов и исследование динамики их изменения при электроимпульсной обработке порошковых материалов», 2007–2010 г.г., № ГР20072078); ГПНИ «Механика, техническая диагностика, металлургия» (задание 2.4.20 «Разработка метода электроимпульсного прессования в вакууме прозрачных стеклокпозиционных материалов с эффектом люминесценции для применения в светодиодной осветительной технике», 2014–2015 г.г., № ГР20140670); ГПНИ «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии» (задание 2.17 «Разработка процессов электроимпульсного прессования и спекания композиционных ультра- и нанодисперсных порошков на металлической и керамической основе», 2016–2018 г.г., № ГР20161547).

### **Цель и задачи исследования**

Цель исследования – разработка теоретических и технологических основ получения функционально-градиентных материалов с использованием импульсных

электрофизических методов для изделий с повышенными эксплуатационными характеристиками.

Для достижения поставленной цели определены следующие задачи:

1) на основе анализа существующих методов получения функционально-градиентных материалов разработать концепцию формирования градиентов структуры и свойств в порошковых и компактных материалах импульсными электрофизическими методами;

2) разработать физико-математические модели распределения тепловой энергии в частицах, слоях частиц порошка и в спеченном порошковом материале при импульсном электрофизическом воздействии, позволяющие установить механизмы структурно-фазовых превращений, приводящих к формированию градиентов структуры и свойств;

3) разработать и изготовить технологическое оборудование, средства измерений, установить диапазоны регулирования энергосиловых параметров и провести измерения температуры при импульсном электрофизическом воздействии;

4) установить закономерности формирования и направленного изменения структуры и свойств в порошковых и компактных материалах методами импульсного электрофизического воздействия;

5) разработать методы управления фазовыми и структурными превращениями в порошковых и компактных материалах, приводящие к формированию градиентов структуры и свойств;

6) разработать и внедрить новые технологические процессы получения функционально-градиентных материалов и изделий из них биомедицинского, электро-технического и инструментального назначения.

**Научная новизна** заключается в установлении закономерностей и механизмов формирования градиента структуры и свойств функционально-градиентных материалов при импульсном электрофизическом воздействии для обеспечения требуемых функциональных характеристик получаемых изделий.

Разработаны физико-математические модели, позволившие связать распределение тепловой энергии в частицах, слоях порошка и в спеченном порошковом материале с параметрами электроимпульсного и импульсного лазерного воздействия, и описать процессы, приводящие вследствие высокой концентрации энергии и одномерной направленности воздействия тепловых и силовых потоков к неоднородному распределению температуры и физико-механических свойств.

Проведены прямые измерения температуры поверхности порошкового тела с высоким временным разрешением при электроимпульсном воздействии, позволившие уточнить представление о механизме тепловыделения и структурно-фазовых превращений в порошковом материале, обусловленном возникновением микродуговых плазменных разрядов между частицами.

Установлен эффект ускоренного массопереноса на границах контактных зон между частицами порошка в направлении электроимпульсного воздействия, приводящий к формированию градиента структуры, фазового состава и свойств как при получении, так и при объемном модифицировании структуры и свойств спеченного порошкового материала.

Установлен эффект интенсификации поверхностного оплавления частиц порошка в зависимости от их коэффициента отражения, мощности импульсов лазер-

ного излучения, диаметра и скорости сканирования лазерного луча при импульсном лазерном воздействии, позволивший обеспечить управление распределением температуры в слоях частиц порошка, снизить термические напряжения и формировать градиентные порошковые слои на компактной подложке.

Установлен эффект упрочнения и структурно-фазовых изменений поверхности углеродистых сталей и сталей с диффузионно-борированной поверхностью при импульсном плазменном воздействии в воздухе при атмосферном давлении, обусловленный термо-ударным воздействием импульсов плазмы и высокими скоростями теплоотвода, позволивший создавать градиентные слои с поверхностно-модифицированной структурой, фазовым составом и физико-механическими свойствами.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Физико-математическая модель тепловыделения в слоях частиц порошка и в спеченном порошковом материале при электроимпульсном воздействии, основанная на оценке соотношения выделившейся тепловой и затраченной электрической энергии в условиях нестационарной теплопроводности, отличающаяся учетом связи между параметрами электрического импульса, структурными характеристиками, электрическим сопротивлением и теплофизическими свойствами порошка, позволяющая установить закономерности распределения выделяемой тепловой энергии по объему порошка в зависимости от соотношения осевого усилия прессования и радиальных электромагнитных сил, возникающих при прохождении импульсов электрического тока, оценить кинетику упрочнения спеченного порошкового материала, получить распределение температуры по его толщине и рассчитать градиенты структуры и прочности в зависимости от мощности и длительности электроимпульсного воздействия.

2. Физико-математическая модель распределения тепловой энергии в контактных зонах между частицами и в слоях порошка при импульсном лазерном воздействии, основанная на решении задачи пространственного нестационарного плавления материала концентрированным потоком энергии, отличающаяся учетом связи между параметрами импульсного лазерного излучения, оптическими и структурными характеристиками порошка, физическими свойствами материала частиц и температурой их поверхности, позволяющая определить граничные значения мощности импульсов лазерного излучения, необходимой для формирования зон устойчивого контактообразования в слое свободно насыпанных частиц порошка, установить закономерности образования и сохранения устойчивости жидкометаллических контактов между частицами под действием сил поверхностного натяжения и сил тяжести, оценить величину градиента температуры в слое частиц порошка в зависимости от распределения мощности импульсов лазерного излучения.

3. Результаты экспериментальных исследований температуры поверхности порошкового тела с высоким временным разрешением в процессе электроимпульсного воздействия в совокупности с результатами измерений параметров электрического импульса, в ходе которых уточнено представление о механизме структурно-фазовых превращений в материале частиц порошка, заключающемся в возникновении в контактных зонах между частицами микродуговых плазменных разрядов, приводящих к образованию жидкой фазы, вязко-пластичном скольжении частиц под действием усилия прессования и быстром отводе тепла от контактных зон к центру частиц с образованием твердой фазы, позволившие определить необходи-

мое для формирования требуемого градиента структуры и свойств порошкового материала соотношение между размерами межчастичных контактов, параметрами электрического импульса и усилием прессования.

4. Результаты экспериментальных исследований влияния энергии, длительности и направления пропуска импульсов электрического тока на процесс формирования градиентов структуры, фазового состава и свойств спеченных порошковых материалов при электроимпульсном воздействии, в ходе которых установлен эффект активации процессов ускоренного массопереноса в направлении пропуска импульсов электрического тока, обеспечивающий создание градиента прочности при равномерном распределении относительной пористости, позволивший повысить на 65-110 % прочность на срез порошкового материала в направлении электроимпульсного воздействия за счет роста размера контактных зон и их микротвердости при сохранении исходной мелкозернистой структуры материала частиц порошка.

5. Результаты экспериментальных исследований влияния морфологии поверхности частиц порошка, скорости сканирования и параметров импульсного лазерного излучения на процесс формирования градиентов структуры, фазового состава и свойств спеченных порошковых материалов при импульсном лазерном воздействии, в ходе которых установлена возможность управления распределением температуры в слоях частиц порошка путем изменения их коэффициента отражения, мощности лазерного импульса, диаметра и скорости сканирования лазерного луча, позволившие обеспечить устойчивое контактообразование в присутствии жидкой фазы, образующейся на поверхности частиц, снижение термических напряжений, увеличение предела прочности порошкового материала при сжатии на 50-76 % за счет роста размера и повышения микротвердости материала контактных зон между частицами.

6. Результаты экспериментальных исследований влияния параметров импульсного лазерного излучения на процесс образования жидкой фазы между слоями порошка с увеличивающимся размером частиц и компактной подложкой при импульсном лазерном воздействии, в ходе которых предложен метод управления контактообразованием путем последовательного увеличения диаметра лазерного луча при постоянной удельной энергии лазерных импульсов одновременно с увеличением размеров частиц в каждом слое по мере удаления от подложки, позволивший за счет сохранения относительного количества жидкой фазы на поверхности частиц каждого слоя и создания градиента микротвердости между частицами и компактной подложкой обеспечить повышение предела прочности на срез в 2-4 раза.

7. Результаты экспериментальных исследований влияния энергии, длительности и частоты импульсного плазменного воздействия в воздухе при атмосферном давлении на процесс модифицирования структуры, фазового состава, свойств и морфологии поверхности углеродистых сталей и сталей с диффузионно-борированной поверхностью, в ходе которых установлен эффект градиентного упрочнения и структурно-фазовых изменений в поверхностных слоях материала, обусловленный термударным воздействием импульсов плазмы и высокими скоростями теплоотвода, позволивший обеспечить повышение микротвердости поверхности углеродистых сталей в 3-4 раза и создание плавного перехода от борированного слоя к стальной матрице с повышением микротвердости его поверхности на 17-20 % за счет преобразования формы и распределения боридов в структуре слоя.

### **Личный вклад соискателя ученой степени**

Постановка цели и задач исследования, методологические подходы к их решению, подготовка исходных параметров и анализ результатов теоретических исследований, проведение и анализ результатов экспериментальных исследований, формулировка выводов и рекомендаций принадлежат соискателю и являются итогом многолетней деятельности в области разработки оборудования и исследований процессов получения порошковых материалов импульсными электрофизическими методами. Соискателем проведен комплекс теоретических, экспериментальных и опытно-конструкторских работ, предложен ряд технологических схем процессов получения функционально-градиентных материалов и изделий из них, обеспечено проведение испытаний.

Совместно с научным консультантом д.т.н. К.Е. Белявиным выбрано научно-техническое направление, проводилось обсуждение полученных результатов. Обсуждение и разработка математических моделей распределения тепловой энергии и давления, создания градиентов температуры и прочности при электроимпульсном и импульсном лазерном спекании порошков проведена при участии чл.-корр. НАН Беларуси, д.т.н. В.К. Шелега, к.т.н. В.В. Мазюка и н.с. О.О. Кузнецика. Совместно с д.т.н. Л.Н. Дьячковой проведены исследования структурно-фазового состояния порошковых материалов при электроимпульсном воздействии. Экспериментальные исследования импульсного лазерного получения наноразмерных порошков и особенностей генерации импульсной плазмы в воздухе при атмосферном давлении выполнены совместно с д.ф.-м.н. А.Н. Чумаковым. Соавторы научных публикаций и патентов, ссылки на которые даны в тексте диссертационной работы и автореферата, принимали участие в исследованиях и обсуждении полученных результатов.

### **Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов**

Результаты диссертации доложены и обсуждены на 36 международных конгрессах, конференциях и симпозиумах, основными из которых являются: Международные конгрессы по порошковой металлургии WORLD PM 1998, 2004, 2006 и EURO PM 2005, 2007, 2013; Международные научно-технические конференции «Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия», Минск (2002–2017); Международные конференции «Plasma Physics and Plasma Technology», Минск (2003, 2006, 2012); Международные научно-технические конференции «Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин», Новополоцк (2007, 2009); Международная конференция по пористым металлам и металлическим пенам «MetFoam–2007», Монреаль, 2007; Международная конференция «HighMat-Tech–2007», Киев, 2007; Международная научно-практическая конференция «Инновации в машиностроении», Кемерово, 2015; Международные научные конференции «Актуальные проблемы прочности», Витебск (2007, 2017); Международные научные симпозиумы «Перспективные материалы и технологии», Витебск (2008–2017); Международные научно-технические конференции «Современные методы и технологии создания и обработки материалов», Минск (2008–2018); Международные научные семинары «Перспективные технологии консолидации материалов с применением электромагнитных полей», Москва (2014–2017); Международная конференция «Синтез и консолидация порошковых материалов», Чер-

ноголовка, 2018; Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы порошкового материаловедения», Пермь, 2018.

Результаты диссертации использованы при разработке технологических процессов получения 7 новых изделий биомедицинского назначения, 5 – электротехнического и трех – инструментального назначения, зарегистрированы технические условия на 6 новых видов продукции. Экономический эффект от внедрения составил более 295 тысяч долларов США. Результаты исследований внедрены в учебный процесс в Белорусском национальном техническом университете (г. Минск, Беларусь), Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ» (г. Москва, Россия), Донском государственном техническом университете (г. Ростов-на-Дону, Россия).

#### **Опубликование результатов диссертации**

Основные результаты диссертации опубликованы в 89 научных работах, в том числе 2 монографиях и 3 главах в монографиях, 30 статьях в научных рецензируемых изданиях, 36 статьях и докладах в сборниках и материалах конференций, а также 18 тезисах докладов на конференциях. Новизна технических решений подтверждена 19 патентами Республики Беларусь, двумя патентами Российской Федерации и одним Евразийским патентом. Объем публикаций, соответствующих п.18 Положения, составляет 897 страниц (53,8 а. л.), из них личный вклад соискателя – 654 страниц (39,2 а. л.).

#### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, 6 глав с краткими выводами, заключения, библиографического списка и приложения. Полный объем диссертации составляет 362 страницы. Работа содержит 197 страниц текста, 206 рисунков на 68 страницах, 33 таблицы на 9 страницах, библиографический список в количестве 384 наименований на 25 страницах, список публикаций соискателя из 111 наименований на 11 страницах, 7 приложений на 52 страницах.

## **ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

**Введение** содержит оценку современного состояния решаемой проблемы и обоснование актуальности темы диссертации.

**Первая глава** посвящена анализу научных публикаций, касающихся основных типов, характеристик и областей применения функционально-градиентных материалов (ФГМ), приведена классификация, рассмотрены известные технологии получения, выделены основные проблемы их создания.

Показано, что порошковые ФГМ, сформированные из различных по составу, концентрации, структуре и морфологии поверхности частиц, а также компактные материалы, подвергнутые модифицирующей поверхностной или объемной обработке, обладают широким диапазоном эксплуатационных характеристик, что делает их применение перспективным во многих областях техники. Однако традиционные методы получения ФГМ, характеризуются низкой производительностью, высокими материало- и энергозатратами, не подходят для массового производства и масштабирования, отличаются низкой воспроизводимостью результатов и надежностью используемых процессов, экономичностью и возможностью управления

качеством получаемых изделий. Отмечено, что наиболее эффективными и перспективными для получения ФГМ являются импульсные электрофизические методы, основанные на воздействии концентрированных потоков тепловой энергии, выделяемой при прямом прохождении через материал электрического тока или возникающей в результате физических явлений, создаваемых электрическим током. На основе анализа существующих импульсных электрофизических методов в качестве наиболее эффективных и перспективных для получения ФГМ выбраны электроимпульсные, импульсные лазерные и импульсные плазменные методы, позволяющие обеспечить локальное изменение структуры и свойств обрабатываемого материала, создавая в нем направленные взаимосвязанные силовые и тепловые потоки, различающиеся по плотности, скорости и глубине проникновения вводимой энергии.

На основе сделанных выводов сформулирована цель работы и определены необходимые для ее достижения задачи.

**Вторая глава** содержит теоретические исследования процессов распределения тепловой энергии, выделившейся в частицах, слоях частиц порошка и в спечённом порошковом материале в условиях возникновения внутреннего источника тепла при электроимпульсном воздействии и при использовании внешнего теплового источника при импульсном лазерном воздействии.

Показано, что количество и равномерность распределения по объему порошка тепловой энергии, выделяющейся при электроимпульсном воздействии, зависит от размеров и качества контактов между частицами на стадии прессования. При сжатии силой  $F_0$  двух сферических частиц диаметром  $D_0$  возникает упругая линейная деформация  $y$ , связанная с диаметром контактной зоны  $d$  между ними соотношением

$$d = y \left[ \frac{ED_0^2}{3F_0(1-\nu^2)(1-f)} \right]^{1/3}, \quad (1)$$

где  $E$  – модуль Юнга;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $f$  – коэффициент трения-скольжения частиц. Поскольку поверхности частиц порошка разделены непроводящим оксидным слоем толщиной  $l_0$ , для протекания электрического тока необходимо, чтобы сила сжатия  $F_0$  вызвала такую линейную деформацию частиц, при которой выполнялось бы условие  $y > 2l_0$ . При отношении толщины непроводящего слоя  $l_0$  к величине линейной деформации  $y$

$$\varepsilon = l_0 / y, \quad (2)$$

электрическое сопротивление насыпки порошка высотой  $h$  и площадью  $S$  поперечного сечения под действием осевого усилия прессования  $F$  составит

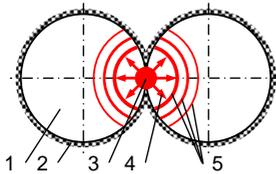
$$R = \rho \frac{4D_0}{\pi(1-2\varepsilon)^2 n_v^{1/3}} \left[ \frac{E}{3FD_0(1-\nu^2)(1-f)} \right]^{2/3} \frac{h}{S} \quad (3)$$

где  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление материала частиц порошка,  $n_v$  – объемная концентрация контактов между частицами. При осевом пропускании импульса тока в порошке возникают радиально направленные силы электромагнитного поля (пинч-эффект), приводящие к появлению радиального давления  $p_r$ , действие которого может приводить к появлению градиента структуры и свойств порошкового материала. При осевом усилии прессования  $F$  порошка, вызывающем давление  $p_h$  на стенку пресс-формы площадью  $S_h$ , и выполнении условия

$$p_h = \frac{F}{S_h} \geq p_r \quad (4)$$

этого не произойдет. При  $p_{iv} < p_r$  будет проявляться градиент структуры и свойств в радиальном направлении. Таким образом, варьируя параметры  $F$ ,  $D_0$ ,  $h$ ,  $S$ , можно изменять электрическое сопротивление порошка в локальных объемах перед пропуском импульса электрического тока, и управлять процессом тепловыделения в получаемом порошковом материале.

Существенное значение для описания процесса распределения тепловой энергии имеет связь температуры разогрева частиц порошка от внутреннего нестационарного теплового источника, которым является зона их контакта, с параметрами электроимпульсного воздействия. Ввиду быстроты процесса теплообмен с окружающей средой практически отсутствует, так что выделяемое при прохождении



1 – частица порошка; 2 – оксидная пленка; 3 – зона контакта; 4 – направление распространения тепла; 5 – изотермы

Рисунок 1. – Схема теплообмена между частицами порошка

высоковольтного импульса электрического тока тепло распространяется внутри частиц равномерно (рисунок 1), а температурное поле формируется таким образом, что точки с минимальными значениями температуры находятся в геометрических центрах частиц. Исходя из площади сферического сегмента, удаленного от зоны контакта на некоторое расстояние  $x$ , через который внутрь частицы проходит поток удельной тепловой мощности  $P_0$ , изменение температуры между элементарной толщиной разогретого слоя  $dx$  и зоной контакта определяется как

$$dT = -\frac{P_0}{\lambda \pi} \frac{dx}{x \left( x + \sqrt{D_0^2 - x^2} - D_0 \right)}. \quad (5)$$

Если предположить, что теплопроводность при электроимпульсном воздействии является функцией температуры  $\lambda = \lambda(T)$ , а глубина прогревания элементарных слоев  $d/2 \leq x < D_0/2$ , то температурное поле порошковой частицы находим из выражения

$$\int_{T_x}^{T_0} \lambda(T) dT = -\frac{P_0}{\pi} \left[ \frac{1}{D_0^2} \ln \left( \frac{D_0+x}{x} \right) - \frac{1}{xD_0} \right] \Big|_{d/2}^x. \quad (6)$$

Связь между параметрами электроимпульсного воздействия и изменением температуры будет иметь вид

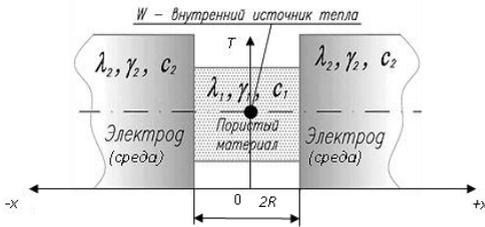
$$\Delta T = -\frac{CU_0^2}{\lambda \omega} \left[ \frac{1}{D_0^2} \ln \left( \frac{D_0+x}{x} \right) - \frac{1}{xD_0} \right] \Big|_{d/2}^x, \quad (7)$$

где  $C$  – емкость электрической цепи;  $U_0$  – начальное значение электрического напряжения;  $\omega$  – частота затухающих колебаний.

Полученные аналитические зависимости, связывающие начальные значения электрического напряжения и электросопротивления порошка с температурой в зоне контакта частиц, позволили провести численное моделирование процесса электроимпульсного воздействия. Показано, что при прессовании сферических частиц титана размером  $D_0 = 0,35$  мм усилием  $F = 200$  Н в цилиндрической пресс-

форме диаметром  $D = 5$  мм высотой  $h = 10$  мм электросопротивление порошка с относительной пористостью  $\Pi = 0,35$  составит  $R = 0,01$  Ом. Тогда при начальном значении электрического напряжения  $U_0 = 1500$  В через 70 мкс с момента пропускания импульса электрического тока температура в зоне контакта превысит 1600 К, а ее градиент по радиусу частицы достигнет  $10^7$  К/м. Установленная взаимосвязь между коэффициентами бокового давления, сухого трения между частицами порошка и пористостью прессовки в совокупности с учетом деформации частиц и влияния сил электромагнитного поля позволили оценить характер распределения давления в порошке не только на стадии предварительного уплотнения, но и в момент пропускания импульсов электрического тока.

Для установления закономерности изменения прочностных свойств по толщине однородного слоя спеченного порошкового материала при электроимпульсном воздействии исследована кинетика изменения температурного поля путем решения задачи нестационарной теплопроводности, поставленной как определение распределения температуры от внутреннего источника тепла мощностью  $W$  по толщине пластины с



$\lambda_1, \lambda_2$  – коэффициенты теплопроводности;  $\gamma_1, \gamma_2$  – плотности;  $c_1, c_2$  – удельные теплоемкости пластины и среды соответственно;  $x$  – координата по толщине пластины;  $2R$  – толщина пластины  
Рисунок 2. – Схема нагрева порошковой пластины

начальной температурой  $T_0$ , помещенной в среду с температурой  $T_C$  (рисунок 2). Поставленная краевая задача представляет собой дифференциальные уравнения теплопроводности в частных производных отдельно для порошкового материала и отдельно для электродов с учетом начальных и конечных условий теплообмена. Решение задачи с применением интегральных производных Лапласа для пластины имеет вид:

$$\Theta_1 = \frac{T_1(x, t) - T_C}{T_0 - T_C} = 1 + PoFo_1 - \frac{1}{1 + K_\epsilon} \sum_{n=1}^{\infty} (-h)^{n-1} \cdot \left[ \operatorname{erfc} \frac{(2n-1) \pm x}{2\sqrt{Fo_1}} + 4PoFo_1 i^2 \operatorname{erfc} \frac{(2n-1) \pm x}{2\sqrt{Fo_1}} \right], \quad (8)$$

где  $\Theta_1$  – температура пластины;  $Po = \frac{WR^2}{\lambda_1(T_0 - T_C)}$  – критерий Померанцева;  $K_\epsilon = \sqrt{\frac{\lambda_1 c_1 \gamma_1}{\lambda_2 c_2 \gamma_2}}$  – критерий, характеризующий тепловую активность пластины по отношению к среде;  $Fo_1 = \frac{a_1 t}{R^2}$  – число Фурье;  $h = \frac{1 - K_\epsilon}{1 + K_\epsilon}$ ;  $\frac{1}{1 + K_\epsilon} = X$  – охлаждающий эффект, характеризующий скорость охлаждения нагретого тела;  $i^2 \operatorname{erfc} z = \int_z^{\infty} i \operatorname{erf} \xi d\xi$  – кратный интеграл вероятностей;  $\operatorname{erfc} z = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-\xi^2} d\xi$  и  $\operatorname{erfc} z = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_z^{\infty} e^{-\xi^2} d\xi$  – интегралы вероятностей. На основании решения тепловой задачи установлена связь между распределением температуры в порошковом слое, мощностью и длительностью электроимпульсного воздействия:

$$T_1(x, t) - T_c = \frac{WR^2}{\lambda_1} Fo_1 \left( 1 - 4Xi^2 \operatorname{erfc} \frac{1 \pm \frac{x}{R}}{2\sqrt{Fo_1}} \right). \quad (9)$$

Полученные функциональные зависимости позволили вывести уравнения для оценки прочности порошкового материала и мощности нагрева, необходимой для ее достижения:

$$\sigma_B(t) = \sigma_c \pi \sqrt{r_0^4 + \frac{B}{v_i} \left[ E_1 \left( \frac{U}{kT_i} \right) - E_1 \left( \frac{U}{kT_c} \right) \right]}, \quad (10)$$

$$W = \frac{bc_1 \gamma_1 \left[ E_1 \left( \frac{U}{kT_2} \right) - E_1 \left( \frac{U}{kT_c} \right) \right]}{(\sigma_B^2 - \pi^2 \sigma_c^2 x_0^4)(1-X)}. \quad (11)$$

В результате численного моделирования получены зависимости влияния удельной мощности внутреннего источника тепла на относительный размер контакта между частицами порошка (рисунок 3), температуру в центре  $T_{Ц}$  слоя порошкового материала и на его поверхностях  $T_{Э}$  (рисунок 4), распределение температуры по толщине слоя (рисунок 5). Установлено, что для любого фиксированно-

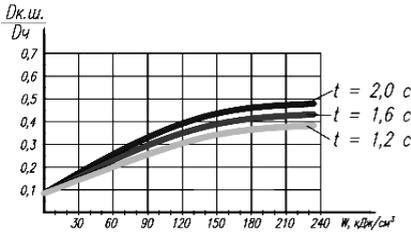


Рисунок 3. – Влияние удельной мощности внутреннего источника тепла на относительный размер контакта между частицами

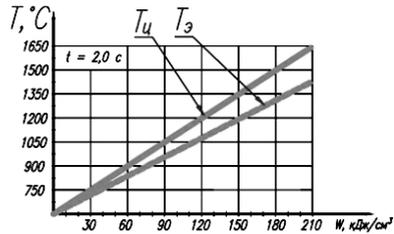


Рисунок 4. – Влияние удельной мощности внутреннего источника тепла на перепад температур в центре и на поверхности слоя порошкового материала

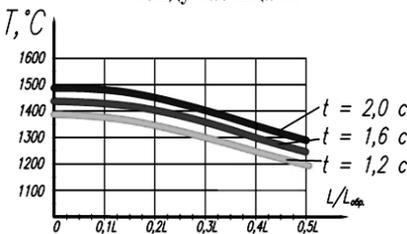
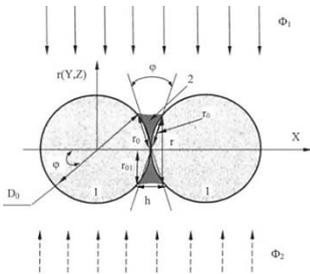


Рисунок 5. – Распределение температуры по толщине слоя порошкового материала

го момента времени максимальная температура нагрева достигается в центре слоя порошкового материала, а минимальная – на его поверхностях. При этом температура в центре и на поверхностях слоя в любой момент времени линейно зависит от мощности и времени нагрева и определяется его теплофизическими свойствами, а также теплофизическими свойствами среды, в которую он помещен. Расчеты показывают,

что значение удельной энергии, при которой по механизму пластично-вязкого течения происходит увеличение межчастичных контактов с 0,1 до 0,5 диаметра частицы, составит 130-190 кДж/см<sup>3</sup>. При этом разность температур на поверхностях и в центре слоя порошкового материала достигнет 190-210 °C, а градиент прочности на срез по толщине составит 20-50 МПа/мм.

При импульсном лазерном воздействии описание распределения тепловой энергии в контактных зонах между частицами и в слоях порошка основывалось на решении задачи пространственного нестационарного плавления материала концентрированным потоком энергии. Если рассматривать лазерное излучение, как источник тепловой энергии, рассеиваемой в порошке, то процесс формирования жидкофазных контактов между частицами (рисунок 6) может быть описан с помощью капельной модели Френкеля.



- 1 – сферическая частица порошка;  
 2 – жидкофазный контакт;  $h$  – толщина жидкофазного контакта;  $D_0$  – диаметр частицы;  $r_0$  – хорда;  $\varphi$  – угол между хордами  $r_0$ ;  
 $r_{01}$  – радиус жидкофазного контакта;  
 $r, x$  – цилиндрические координаты;  
 $\Phi_1$  – падающий поток лазерного излучения;  
 $\Phi_2$  – отраженный поток лазерного излучения

Рисунок 6. – Схема формирования жидкофазного контакта между частицами порошка при импульсном лазерном воздействии

Энергия  $W_Q$  жидкофазного контакта является суммой энергий лазерного излучения  $W_{LR}$ , создающего световое давление, потенциальной энергии силы тяжести  $W_g$  и энергии сил поверхностного натяжения  $W_s$

$$W_Q = W_{LR} + W_g + W_s, \quad (12)$$

причем

$$W_s = 2\pi\sigma \int_0^h r \sqrt{(r')^2} dx; \quad W_g = \pi g \gamma \int_0^h r^2 dx; \quad (13)$$

$$W_{LR} = \frac{1+R_{LR}}{c_{LR}} \int_0^\tau P_{LR}(t) \int_0^h \frac{1}{r^2} dx dt, \quad (14)$$

где  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\gamma$  – плотность материала частиц;  $R_{LR}$  – коэффициент поверхностного отражения световой волны;  $P_{LR}$  – мощность импульса лазерного излучения;  $c_{LR}$  – скорость света.

Учитывая капиллярную постоянную  $D_L$ , капиллярное давление  $p_L$ , давление  $p$  сил поверхностного натяжения и предполагая максимально возможные значения диаметра  $D_1$ , толщины  $h_1$ , площади  $S_1$  и объема  $V_1$  жидкофазного контакта, получено условие устойчивости жидкофазных контактов между частицами в слое порошка при импульсном лазерном воздействии:

$$r(P_{LR}) = \begin{cases} \frac{1+\sqrt{1+4A_1A_2}}{2A_1}, & \text{если } W_{LR} < W_{kr} \\ D_1, & \text{если } P_{LR} = P_{kr} \\ \left| D_1 - \frac{1+\sqrt{1+4A_1A_2}}{2A_1} \right| \leq 1, & \text{если } W_{LR} > W_{kr} \end{cases}. \quad (15)$$

Увеличение энергии импульса лазерного излучения  $W_{LR}$  до определенного критического значения  $W_{kr}$  способствует процессу формирования жидкофазного контакта, а при  $W_{LR} > W_{kr}$ , наоборот – его разрушению. При этом критическое значение энергии импульса лазерного излучения

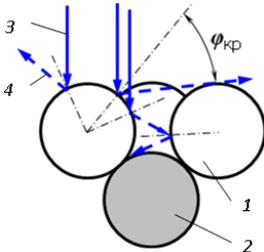
$$W_{kr} = \frac{c_{LR} p_L V_1(D_1)}{8(1+R_{LR})} \frac{D_{LR}^2}{D_1 D_L} \left( \frac{12p}{5p_L} \frac{D_1}{D_L} - 1 \right). \quad (16)$$

Если при импульсном лазерном воздействии учитывать теплоотдачу только внутри частиц порошка, то для расплавления их поверхности необходима энергия

$$W_{LS} \approx \frac{\pi D_{LR}^2 D_1 \gamma}{24(1-R_{LR})\Delta t_{LR}(1-\Pi_0)} \left( (cT_c + \frac{\varepsilon}{\gamma}) \frac{D_0^3 - D_1^3}{D_0^3} + 2cT_c \right) \exp\left(\frac{c\gamma D_1^2}{16\pi\lambda\Delta t_{LR}}\right) \sqrt{\frac{c\lambda}{2\pi\lambda\Delta t_{LR}}}, \quad (17)$$

где  $D_{LR}$  – диаметр фокального пятна;  $\Delta t_{LR}$  – длительность импульса лазерного излучения;  $c$  – удельная теплоемкость;  $T_c$  – температура плавления;  $\varepsilon$  – удельная энергия плавления;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала частиц порошка;  $\Pi_0$  – начальная относительная пористость насыпки сферических частиц.

С помощью (15)-(17) путем численного моделирования определены критические значения мощности лазерного излучения, при которых происходит формирование и разрушение жидкофазных контактов, в зависимости от размеров частиц порошка при различной длительности импульса лазерного излучения. При попадании на поверхность свободно насыпанного порошка поток лазерного излучения рассеивается только в двух верхних слоях частиц, каждый из которых имеет высоту  $h$  равную среднему диаметру  $D_0$  частиц, образуя в местах просветов  $\Phi$  между ними зоны многократного отражения (рисунок 7). Механизм разогрева частиц определяется поглощающими свойствами материала порошка, характеризующимися коэффициентом поглощения  $\eta$  в области инфракрасного излучения, которое формирует на поверхности порошкового слоя тепловой поток  $q$ . Кинетика образования контактов между частицами порошка зависит от энергии  $W$  лазерного излучения. Исходя из этого, предложено под минимальным значением теплового потока  $q_0$  понимать такое его значение, при котором с помощью одного импульса лазерного излучения обеспечивается получение на поверхности предыдущего слоя порошкового материала или на поверхности компактного материала зоны устойчивого контактообразования диаметром, равным



**1 – частицы верхнего слоя; 2 – частицы нижнего слоя; 3 – падающее излучение; 4 – отраженное излучение;  $\varphi_{кр}$  – критический угол отражения**

**Рисунок 7. – Схема взаимодействия лазерного излучения с поверхностью слоя частиц порошка**

диаметру фокального пятна  $D_f$  лазерного луча, и высотой  $h = D_0$ . При этом за основу механизма контактообразования выбрано поверхностное оплавление частиц с образованием жидкофазных контактных шеек. Теплообмен между частицами порошка и окружающей средой в расчетах не учитывали вследствие малой длительности ( $\sim 10^{-3}$  с) процесса формирования такой зоны. Математическая модель учитывает также явление термокапиллярной конвекции, под которым следует понимать движение жидкости, вызванное действием сил поверхностного натяжения. Структура свободно насыпанного порошка, состоящего из сферических частиц одного диаметра, определяется относительной пористостью  $\Pi$  и просветом  $\Phi$ :

$$\Pi = 1 - \frac{\pi}{6(1 - \cos \alpha)\sqrt{1 + 2 \cos \alpha}}, \quad \Phi = 1 - \frac{\pi}{4 \sin \alpha}, \quad (18)$$

где угол  $\alpha$  определяет взаимное расположение сферических частиц в порошке. Тогда поверхностная плотность элементарного теплового потока  $q_0$ , образующегося в результате поглощения энергии импульса лазерного излучения материалом порошковой частицы, распределяется следующим образом:

$$q = \eta \frac{dW_{\text{имп.}}}{dt ds} = q_{01} + q_{02} = \left( \frac{\eta_{01}}{S_1} + \frac{\eta_{02}}{S_2} \right) \frac{dW_{\text{имп.}}}{dt}, \quad (19)$$

где  $\eta_{01}$ ,  $\eta_{02}$  – коэффициенты поглощения для частиц порошка верхнего и нижнего слоев с учетом влияния зоны многократного отражения;  $S_1 \approx 0,75\pi(1 - \Pi)D_F^2$  – площадь поверхности верхнего слоя частиц порошка;  $S_2 \approx 0,7\pi\Phi D_F^2$  – площадь поверхности нижнего слоя частиц порошка, воспринимающая световой поток. Относительное распределение энергии импульса лазерного излучения между верхним и нижним слоями порошка определяется выражениями

$$\omega_1 = \frac{W_1}{W_{\text{имп.}}} \approx \frac{1 - \Pi}{1 - \Pi + 0,93\Phi}, \quad \omega_2 = \frac{W_2}{W_{\text{имп.}}} \approx \frac{\Phi}{1,07(1 - \Pi) + \Phi}. \quad (20)$$

Полученные соотношения позволили определить минимальное значение энергии импульса лазерного излучения, которую необходимо затратить на контактообразование сферических частиц титана диаметром  $D_0 = 0,24$  мм и  $D_0 = 0,35$  мм лазерным лучом с диаметром фокального пятна  $D_F$  равным 0,5 мм, 1 мм, 5 мм и 10 мм. Показано, что при рассчитанных минимальных значениях энергии импульса и  $D_F = 0,5$  мм градиент температуры на поверхностях верхнего и нижнего слоя частиц составит 935 К, а на поверхностях слоя частиц и подложки – 600 К, что позволит обеспечить контактообразование между ними. Если предположить, что средняя энергия одного импульса лазерного излучения  $W_0 = 3$  Дж, а частота следования импульсов  $f = 50$  Гц, то минимальная скорость движения лазерного луча

$$v_0 = \frac{2D_F}{t} = 2 \frac{W_0}{W_{\text{имп.}}} D_F f \quad (21)$$

будет иметь значения  $(1,2-1,3) \cdot 10^{-3}$  м/с. Зная количество зон контактообразования  $n$  на поверхности порошкового слоя, можно рассчитать скорость его спекания:

$$v_{\text{сп}} = v_0 n = 2n \frac{W_0}{W_{\text{имп.}}} D_F f. \quad (22)$$

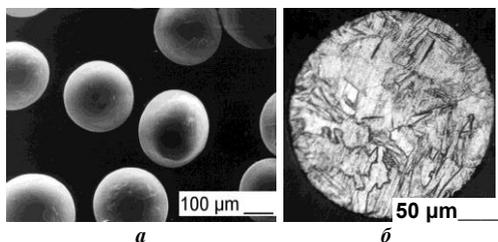
Тогда, если готовое изделие представить в виде конечного набора  $N$  плоских сечений (слоев) толщиной  $h = D_0$ , каждое из которых состоит из определенного числа зон контактообразования, можно рассчитать время изготовления всего изделия.

Компьютерное моделирование распределения температурных полей в слоях сферических частиц порошка титана диаметром 0,2 мм с коэффициентом отражения поверхности 0,6 при импульсном лазерном воздействии на длине волны  $\lambda = 1,06$  мкм в диапазоне изменения максимальной мощности импульса лазерного излучения  $P = 10-600$  Вт при гауссовом распределении мощности по площади фокального пятна диаметром  $D_F = 0,5$  мм показало, что если фокальное пятно полностью покрывает одну из сферических частиц верхнего слоя, межслойные контакты частиц за время воздействия успевают прогреться до температуры плавления только при мощности импульса лазерного излучения свыше 50 Вт. При этом максимальная температура поверхности верхней частицы достигает 5000 К, приводя к перегреву и испарению материала. Если центр фокального пятна совпадает с центром просвета между тремя соседними сферическими частицами слоя, то уже при

мощности импульса лазерного излучения  $P = 12$  Вт обеспечивается контактообразование частиц верхнего слоя и межслойное контактообразование. Изменяя диаметр фокального пятна, интенсивность лазерного излучения и длительность импульса, можно изменять степень нагрева поверхности частиц верхнего и нижнего слоя и управлять процессом контактообразования для получения материалов с заданным градиентом структуры и свойств.

**Третья глава** посвящена исследованиям получения порошковых ФГМ электроимпульсными методами воздействия – электроимпульсным спеканием (ЭИС) и электроразрядным модифицированием (ЭРМ).

Для проведения экспериментов в качестве модельных использовали сферические порошки титана ВТ1-00, полученные методом плазменного распыления в вакууме, с микроструктурой в виде зерен  $\alpha$ -фазы с небольшим количеством игольчато-пластинчатой мартенситной  $\alpha'$ -фазы гранулометрических составов  $(-0,2+0,16)$  мм,  $(-0,315+0,2)$  мм и  $(-0,4+0,315)$  мм (рисунок 8). Выбор сферической



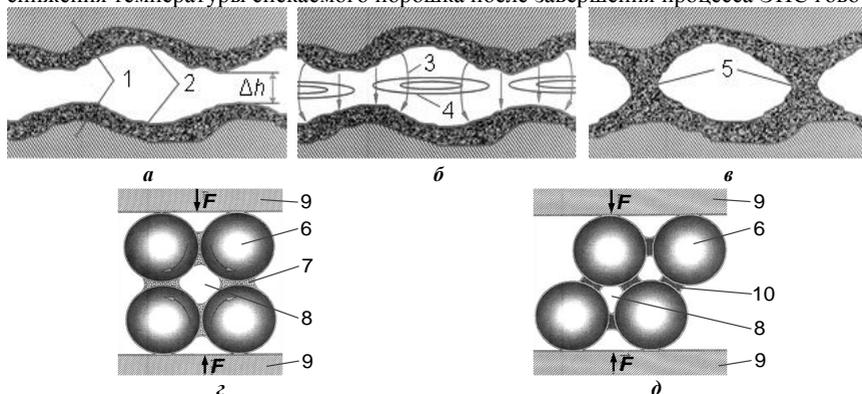
*a* – форма частиц; *б* – микроструктура частиц

**Рисунок 8.** – Частицы порошка титана

формы частиц связан с удобством исследований контактообразования и с более стабильными свойствами, гарантирующими воспроизводимость экспериментальных результатов. Исследования получения ФГМ из других порошков (ниобия, тантала, вольфрама, вольфрамсодержащего твердого сплава) проводились при разработке соответствующих технологических процессов.

Основными параметрами, значения которых контролируются в процессе ЭИС, являются электрический ток, напряжение, длительность импульса, давление прессования порошка и температура. Методики измерения электрических параметров и давления прессования известны и не вызывают затруднений, в то время как измерение температуры осложнено ввиду малой длительности процесса тепловыделения ( $10^{-3}$ - $10^{-4}$  с). Возникновение характерного светового излучения (вспышек) разной интенсивности, цвета и длительности свечения при пропускании через порошок, находящийся под действием сжимающего усилия в прозрачной кварцевой пресс-форме, высоковольтного электрического импульса позволило решить задачу регистрации изменения температуры с использованием двух методов – двухцветной пирометрии и фотоэмиссионного. Разработанные средства и методики измерений обеспечили диапазон измерений от  $1\ 200$  °C до  $6\ 500$  °C с временным разрешением  $\sim 1$  мкс и относительной погрешностью 5-10 %. Анализ результатов измерений показал, что при ЭИС порошка титана скорость подъема температуры до своего максимального значения достигает  $10^8$ - $10^9$  °C/с, а скорость снижения до значений  $2\ 000$ - $3\ 000$  °C составляет  $10^6$ - $10^7$  °C/с. Полученные результаты в совокупности с результатами изменений электрических параметров импульса позволили предложить механизм структурно-фазовых превращений в порошковом материале при взаимодействии конденсированной фазы материала частиц порошка и плазмы электрического дугового разряда, в результате чего происходит быстрый разогрев поверхности ча-

стиц, сопровождающийся образованием жидкой фазы (рисунок 9). Высокая скорость снижения температуры спекаемого порошка после завершения процесса ЭИС гово-



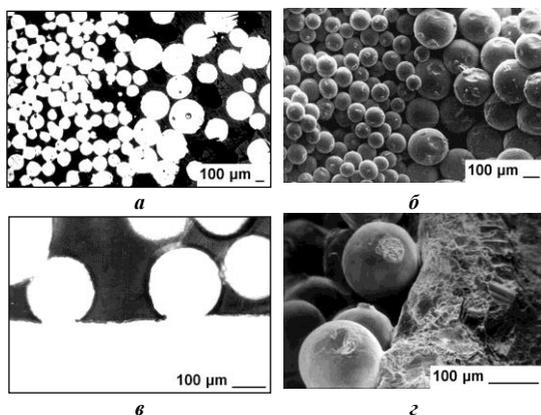
*a* – контакт частиц перед пропусканием импульса тока (этап 1); *б* – микродуговые разряды в момент пропускания импульса тока (этап 2); *в* – образование первичных жидкофазных контактов (этап 3); *з* – начало взаимного скольжения частиц порошка под действием усилия прессования (этап 4); *д* – образование твердой фазы (этап 5)  
 1 – материал частиц; 2 – оксидная пленка; 3 – силовые линии напряженности электрического поля; 4 – силовые линии магнитного поля; 5 – жидкофазные мостики; 6 – частица порошка; 7 – жидкометаллический контакт; 8 – пора; 9 – электрод-пуансон; 10 – контактная шейка;  $\Delta h$  – расстояние между поверхностями частиц порошка в контактной зоне;  $F$  – усилие прессования

**Рисунок 9.** – Этапы контактообразования между частицами порошка при ЭИС

рит о том, что образование жидкой фазы происходит в локальных областях на поверхности и сопровождается быстрым отводом тепла к центру частиц, с возможным появлением микрокристаллических и аморфизированных структур в контактных зонах, что подтверждает результаты математического моделирования и объясняет возникновение градиента свойств порошкового материала.

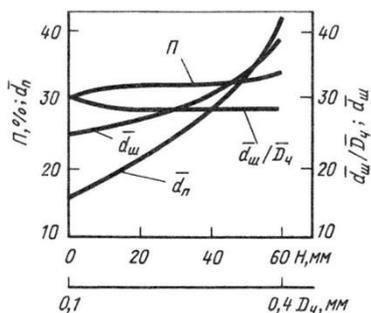
Исследование структуры и прочностных свойств порошковых материалов, полученных из частиц одного гранулометрического состава при однократном электроимпульсном воздействии, показало наличие анизотропии предела прочности при изгибе и предела прочности на срез, выражающейся в увеличении соответствующих значений в среднем на 56 % и на 38 % в направлении пропускания импульса электрического тока при равномерном распределении относительной пористости. Повторное электроимпульсное воздействие в этом направлении приводит к увеличению анизотропии на 5-10 % при практически тех же средних значениях относительной пористости. При дальнейшем повторении импульсов наблюдается электрической пробой и локальное расплавление порошкового материала. Установлено, что дополнительное электроимпульсное воздействие в поперечном первоначальному направлении способствует выравниванию анизотропии с ростом пределов прочности при изгибе и на срез на 10-15 %. Создание градиента структуры и свойств порошковых материалов возможно также путем последовательного наращивания слоев частиц одного гранулометрического состава с пропусканием

различного количества импульсов электрического тока через каждый слой порошка. В направлении пропускания импульсов электрического тока величина предела прочности таких образцов при изгибе на 30-44 % выше, чем в поперечном направлении, а прочность каждого слоя зависит от количества проходящих через них импульсов. Анализ структуры многослойных образцов, полученных последовательным наращиванием слоев из частиц разных размеров, а также созданием поршковых слоев на поверхности компактного титана (рисунок 10) показал, что относительные размеры контактных шеек одинаковы



*a, б* – структуры (не травленные); *б, в* – излом; *a, б* – между частицами размерами  $(-0,2+0,16)$  мм и  $(-0,315+0,4)$  мм; *в, з* – между частицами размером  $(-0,315+0,2)$  мм и компактной подложкой

**Рисунок 10.** – Контакты между частицами титана разных гранулометрических составов, частицами титана и компактной титановой подложкой



**Рисунок 11.** – Изменение пористости  $\Pi$ , отношения среднего диаметра контактной шейки к среднему диаметру частиц  $d_w/d_n$ , среднего диаметра пор  $d_n$  и среднего диаметра шеек  $d_w$  в зависимости от изменения диаметра частиц  $D_q$  по толщине  $H$  образца с градиентом структуры, полученным ЭИС из полидисперсного сферического порошка титана гранулометрического состава  $(-0,4+0,1)$  мм

Установлено, что в результате электроимпульсного воздействия на однородный спеченный порошковый материал в направлении пропускания импульсов электрического тока наблюдается локальное повышение прочности на срез на 65-110 % при уменьшении значений относительной пористости на 3-5 % и возникновение градиента удельного электросопротивления 100-150 Ом·м/мм, что объясняется активацией

процессов ускоренного массопереноса, сопровождающегося ростом относительного размера межчастичных контактов и повышением их прочности при сохранении исходной мелкозернистой структуры материала частиц порошка (рисунки 12, 13).

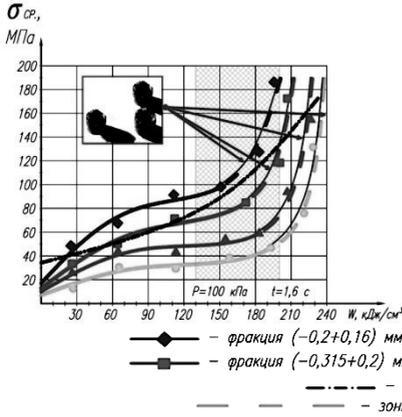


Рисунок 12. – Зависимость прочности на срез от удельной энергии при ЭРМ образцов из сферического порошка титана

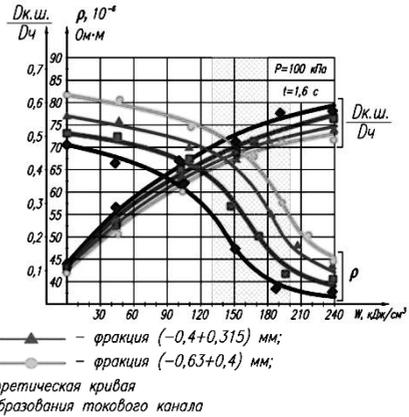
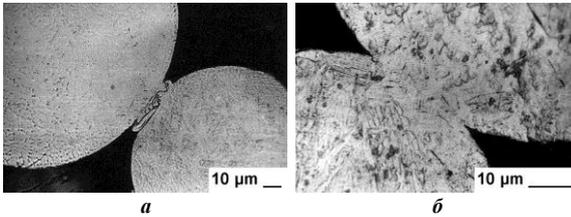


Рисунок 13. – Зависимость относительных размеров межчастичных контактов и удельного электросопротивления от удельной энергии при ЭРМ образцов из сферического порошка титана

Металлографические исследования показали, что при ЭИС происходит быстрый нагрев материала в зоне контакта частиц, образование жидкой фазы и ее кристаллизация с формированием начального межчастичного контакта размером (0,1-0,2) диаметра частицы порошка (рисунок 14, а). Вследствие быстрого отвода тепла



а – после ЭИС; б после – ЭРМ  
Рисунок 14. – Зона контакта между частицами

в объеме частиц титана сохраняется микроструктура исходного порошка с незначительными изменениями количественного соотношения α- и α'-фазы, а в контактной зоне образуется метастабильная структура, близкая к аморфному или микрокристаллическому состоянию. При ЭРМ

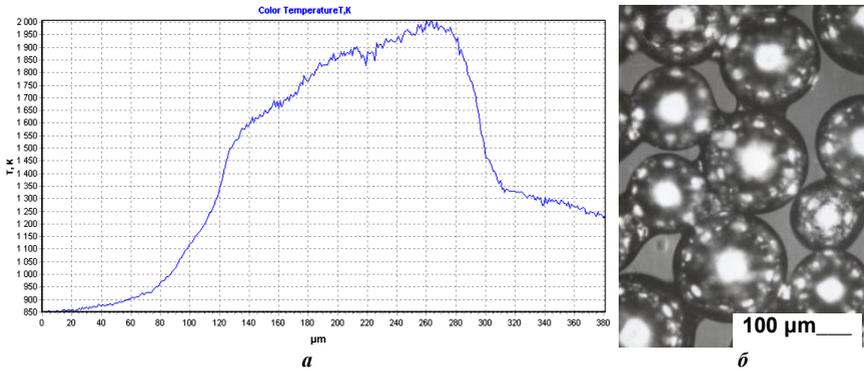
(рисунок 14, б) происходит активация диффузионного механизма контактообразования, наряду с которым идет процесс пластического деформирования частиц под действием прикладываемого усилия сжатия, приводящий к уменьшению расстояний между их центрами одновременно с увеличением размеров контактных шеек до (0,4-0,5) диаметра частицы. В контактной зоне наблюдается ускоренный массоперенос, определяемый устойчивыми в области высоких температур дефектами, в

результате чего игольчатая мартенситная структура  $\alpha'$ -фазы упрочняет внутризёренные границы и дислокации, вызывая повышение микротвердости материала в зоне контакта частиц порошка на 6-8 % и увеличение прочности модифицируемого порошкового материала.

**Четвертая глава** посвящена исследованиям получения порошковых ФГМ импульсным лазерным воздействием.

Экспериментальные исследования проводили на разработанной и изготовленной впервые в Беларуси установке селективного лазерного спекания (СЛС), работающей на длине волны 1064 нм (инфракрасное излучение) с частотой повторения импульсов до 50 Гц. Конструктивное решение установки и параметры лазерного устройства позволяют реализовать идею поверхностного оплавления и соединения частиц порошка между собой посредством жидкофазных контактных шеек. В качестве материала для проведения исследований использовали порошок титана марки ВТ1-00, полученный методом плазменного распыления в вакууме, с частицами сферической формы гранулометрических составов  $(-0,315+0,2)$  мм и  $(-0,4+0,315)$  мм и титановый лист марки ВТ1-00 толщиной 2 мм.

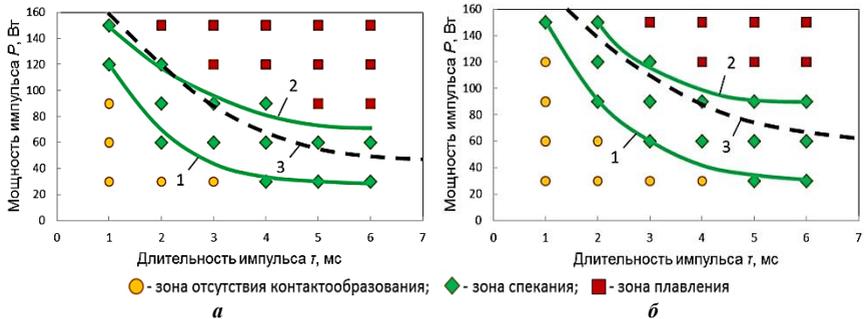
С целью изучения закономерностей СЛС порошковых ФГМ были проведены исследования кинетики образования и роста контактов между частицами, слоями частиц порошка и компактной подложкой. Проведенное компьютерное моделирование (глава 2) показало, что при попадании импульса лазерного излучения на поверхность свободно насыпанного порошка, его энергия распределяется между частицами верхнего и нижнего слоев порошка (или подложки) неравномерно, относительное количество тепла, идущее на разогрев поверхностей частиц зависит от их размера, коэффициента отражения и плотности укладки. Показано, что химическая пассивация поверхности частиц порошка приводит к снижению величины коэффициента отражения на 39-43 % по сравнению с величиной коэффициента отражения исходных частиц и к повышению температуры поверхности слоя на 30-100 К, что существенно влияет на интенсивность образования жидкой фазы и кинетику контактообразования. Установлено, что воздействие на слой частиц порошка одиночных импульсов сфокусированного до 0,5 мм лазерного излучения мощностью 30-90 Вт длительностью 3-4 мс приводит к разогреву зоны воздействия до температур 1900-2000 К и консолидации частиц в фрагменты, примерно равные диаметру фокального пятна. Частицы, находящиеся на границе зоны лазерного воздействия, нагреваются до температур всего 900-1000 К и не участвуют в процессе контактообразования. При этом в центре фокального пятна, где интенсивность лазерного излучения наиболее высокая, на поверхности консолидируемых фрагментов возникает градиент температуры  $\sim 1000$  К, приводящий к испарению материала частиц и образованию кратеров, размеры которых зависят от морфологии поверхности частиц порошка и увеличиваются при уменьшении коэффициента отражения. Расфокусированным до диаметра 1 мм лазерным лучом можно изменить характер распределения мощности лазерного излучения по площади фокального пятна, и, таким образом, уменьшить влияние температурного градиента. При средней мощности лазерного излучения 120 Вт и длительности одиночного импульса 5 мс расфокусировка луча привела к уменьшению градиента температуры по площади фокального пятна на 350-450 К и получению на поверхности монослоя частиц порошка консолидированных фрагментов диаметром около 1 мм (рисунок 15).



*a* – кривая температуры; *б* – консолидированный фрагмент монослоя частиц

**Рисунок 15.** – Распределение температуры на поверхности слоя сферического порошка титана гранулометрического состава  $(-0,315+0,2)$  мм при воздействии расфокусированного до 1 мм импульса лазерного излучения мощностью 120 Вт длительностью 5 мкс

Экспериментально установлены зоны устойчивого контактообразования частиц исследуемых порошков титана при различных параметрах импульсного лазерного воздействия (рисунок 16). Показано, что контактообразование сферических частиц



1 – граница зоны отсутствия контактообразования; 2 – граница зоны расплавления;  
3 – теоретическая кривая критической мощности лазерного излучения  
*a* –  $(-0,315+0,2)$  мм; *б* –  $(-0,4+0,315)$  мм

**Рисунок 16.** – Состояние слоя сферических частиц порошка титана разного гранулометрического состава в зависимости от мощности и длительности расфокусированного до 1 мм импульса лазерного излучения

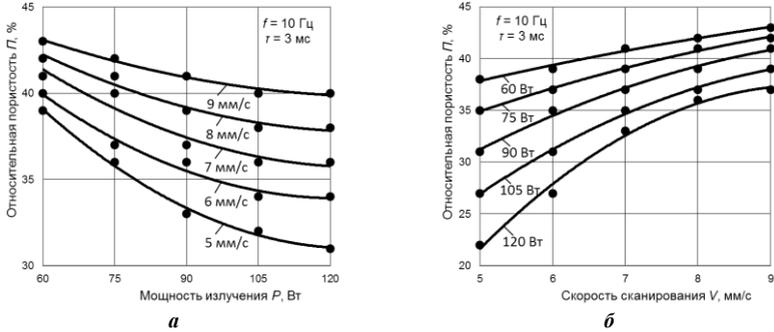
титана при отсутствии полного расплавления возможно расфокусированным до 1 мм лазерным лучом при средней мощности лазерного излучения 30-150 Вт и длительности 1-6 мс. Повышение средней мощности и длительности лазерного излучения приводит к расплавлению частиц и образованию капель, что подтверждает проведенные теоретические расчеты критической мощности лазерного излучения, при которой происходит расплавление и конгломерация частиц порошка, сопровождающаяся разрушением контактных шеек.

Установлено, что требуемая для консолидации частиц порошка мощность импульса лазерного излучения при фиксированных значениях его длительности и диаметра фокального пятна зависит от температуры фазовых переходов материала порошка (температур плавления и кипения), среднего размера и коэффициента отражения поверхности частиц. В диапазонах средней мощности 60-120 Вт и скорости сканирования 5-9 мм/с при частоте следования импульсов 10 Гц и длительности импульса 3 мс при диаметре фокального пятна 1 мм количество образующейся жидкой фазы не превышает 10-20 % объема частиц, что обеспечивает их консолидацию и быстрое остывание расплава за счет теплоотвода, не приводя к перегреву и испарению материала.

Выявлен существенный эффект влияния скорости и частоты следования импульсов лазерного излучения на процесс контактообразования частиц. Скорость сканирования лазерного луча в совокупности с частотой следования импульсов определяет величину коэффициента перекрытия фокальных пятен на поверхности порошкового слоя. При этом создаются условия для осуществления непрерывного нагрева поверхности частиц в слое порошка, в результате чего формируется зона плавления, связанная с движением луча лазера по заданной траектории, распределение температуры вдоль которой неравномерно. Необходимая скорость сканирования также зависит от размеров и отражающей способности частиц порошка – с увеличением размера частиц и коэффициента отражения необходимо уменьшать скорость сканирования и, наоборот, для частиц меньших размеров с меньшим коэффициентом отражения – увеличивать. С уменьшением частоты резко возрастает пиковое значение мощности лазерных импульсов, что приводит к перегреву области фокального пятна и интенсивному испарению материала с поверхности частиц порошка, в результате чего наблюдается снижение доли образовавшейся жидкой фазы. Увеличение частоты следования импульсов приводит к более равномерному разогреву порошкового слоя, при этом резко сокращаются скорости нагрева и охлаждения частиц. Количество жидкой фазы на поверхности частиц сокращается, так как тепловая энергия эффективно отводится в объем материала. Показано, что увеличение скорости сканирования от 1 до 9 мм/с при частоте следования импульсов 10 Гц и мощности излучения 90-120 Вт приводит к уменьшению глубины расплавленного слоя на поверхности образца в 2,5 раза. При этом ширина трека на поверхности порошкового слоя уменьшается в 1,6 раза. Установлено, что при скоростях сканирования лазерного луча менее 5 мм/с и средней мощности лазерного излучения 120-150 Вт при длительности импульса более 6 мс в верхнем слое спекаемого порошка могут возникать деформации и трещины вследствие кристаллизации части материала частиц из жидкой фазы в условиях высокого градиента температуры, сопровождающиеся возникновением значительных внутренних напряжений. Увеличение скорости сканирования, частоты и количества наращиваемых слоев снижает степень оплавления поверхности частиц порошка и препятствует тепловой деформации получаемого порошкового материала, однако не позволяет устранить до конца причины возникновения внутренних напряжений, для снятия которых необходимо проведение термообработки. Показано, что морфология поверхности частиц порошка и главным образом коэффициент отражения влияет на глубину проникновения лазерного излучения в верхний слой порошка и определяет кинетику контактообразования между частицами верхнего и нижнего слоев или

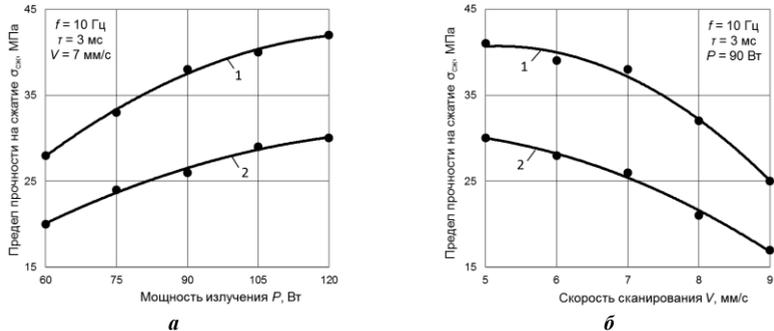
между частицами верхнего слоя и подложкой. Глубина проникновения лазерного излучения в верхний слой порошка зависит также от его пористости, размера и формы пор, коэффициента поглощения лазерного излучения поверхностью частиц нижнего слоя порошка.

Получены зависимости относительной пористости (рисунок 17) и предела прочности на сжатие (рисунок 18) образцов из сферического порошка титана от



$a$  – мощность импульса;  $b$  – скорость сканирования

Рисунок 17. – Зависимость относительной пористости образцов из сферического порошка титана гранулометрического состава  $(-0,315+0,2)$  мм при разных значениях основных параметров расфокусированного до 1 мм импульса лазерного излучения



1 –  $(-0,315+0,2)$  мм; 2 –  $(-0,4+0,315)$  мм

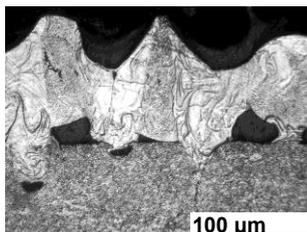
$a$  – мощность импульса;  $b$  – скорость сканирования

Рисунок 18. – Зависимость предела прочности на сжатие образцов из сферического порошка титана разного гранулометрического состава от основных параметров расфокусированного до 1 мм импульса лазерного излучения

мощности импульса лазерного излучения и скорости сканирования луча, позволившие определить диапазоны регулирования основных параметров импульсного лазерного воздействия, необходимые для получения заданного значения градиента структуры и свойств порошкового материала. Показано, что с увеличением мощности импульса лазерного излучения от 60 до 120 Вт и с уменьшением скорости сканирования лазерного луча от 9 до 5 мм/с значения пористости уменьшаются, а

предела прочности на сжатие – увеличиваются на 50-76 %, причем это увеличение не является монотонным. Установлено, что причиной увеличения прочности порошкового материала является рост контактов между частицами порошка за счет увеличивающегося объема жидкой фазы, образующейся при оплавлении поверхности частиц, и повышение прочности материала контактных зон при последующей ускоренной рекристаллизации расплава, приводящей к измельчению зёрненной структуры титана.

При воздействии сфокусированного до 0,5 мм лазерного луча на монослой частиц порошка, расположенных на поверхности компактной подложки, происходит их локальное расплавление (рисунок 19), приводящее к образованию контактов с подложкой в присутствии жидкой фазы. При этом часть лазерного излучения, проникающего в просветы между частицами, разогревает и расплавляет участки поверхности подложки на глубину, равную диаметру частиц, что обеспечивает создание переходного градиентного слоя и высокую прочность сцепления с порошковым слоем.



**Рисунок 19. – Структура слоя сферических частиц титана на поверхности титановой подложки после воздействия сфокусированными до 0,5 мм импульсами лазерного излучения**

Повышение предела прочности на сжатие ФГМ и прочности сцепления порошкового слоя с компактной подложкой обусловлено увеличением микротвердости материала контактных шеек между частицами на 32-44 % по сравнению с микротвердостью материала исходных частиц порошка и связано с образованием мелкозернистой субструктуры в результате быстрого нагрева и охлаждения при импульсном лазерном воздействии. Показано, что последовательное увеличение размеров частиц в каждом слое порошка по мере удаления от подложки и сканирование частиц первого слоя лазерным лучом с диаметром фокального пятна 0,2-0,5 мм, а последующих слоев – лазерным лучом с постепенно увеличивающимся до 1,0 мм диаметром фокального пятна при постоянной удельной энергии импульса позволяет повысить прочность сцепления слоев в 2-4 за счет сохранения относительного количества жидкой фазы на поверхности частиц каждого слоя и создания переходной зоны с градиентом микротвердости 6,1-6,3 ГПа/мм между частицами и компактной подложкой.

**Пятая глава** посвящена исследованию модифицирования поверхности углеродистых и диффузионно-борированных сталей импульсным плазменным воздействием. Экспериментальные исследования процесса импульсного плазменного модифицирования (ИПМ) проводили на специально разработанной и изготовленной установке, в основу которой положен способ генерации импульсной плазмы в воздухе при атмосферном давлении, заключающийся в электродинамическом ускорении непрерывного плазменного потока в кольцевом канале коаксиального плазменного ускорителя. В качестве материалов для проведения исследований использовали образцы из углеродистой стали марок 45, 40X13 и 40X в виде дисков диаметром 30 мм и толщиной 6 мм. Часть образцов из сталей 45 и 40X13 подвергали объемной термической обработке (закалке), а образцы из стали 40X – поверхност-

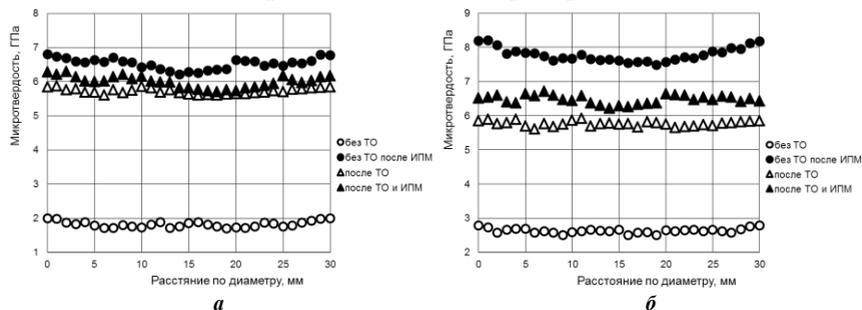
ной химико-термической обработке (борированию). Плоскую поверхность всех образцов шлифовали и полировали.

Исследования параметров генерируемых импульсов плазмы позволили определить основные технические характеристики установки ИПМ (таблица).

Таблица – Технические характеристики установки ИПМ

Наименование параметра	Значение
Напряжение высоковольтных разрядов, кВ	1-3
Частота следования высоковольтных разрядов, Гц	0,1-10
Длительность высоковольтных разрядов, мс	0,5-1,5
Диаметр плазменного потока на выходе, мм	30-40
Температура плазменного потока на выходе, $\times 10^3$ К	10-12
Давление плазменного потока на выходе, МПа, не более	6,5
Скорость плазменного потока на выходе, м/с	$(1-4) \cdot 10^3$
Уровень шума, дБ, не более	110
Максимальная потребляемая мощность, кВт	25

Для оперативной оценки эффективности ИПМ использовали результаты измерений шероховатости и микротвердости поверхности обрабатываемых образцов. Это позволило определить значения длительности и частоты импульсного плазменного воздействия, при которых регистрировались изменения свойств поверхности. Установлено, что после 10 секунд импульсного плазменного воздействия с частотой следования импульсов 10 Гц напряжением 3 кВ значения среднего арифметического отклонения профиля Ra образцов из сталей 45 и 40X13 уменьшались на 13-16 % вне зависимости от термообработки образцов. При этом среднее значение микротвердости обработанной импульсной плазмой поверхности незакаленной стали 45 повышалось в 4 раза, стали 40X13 – в 3 раза (рисунок 20).

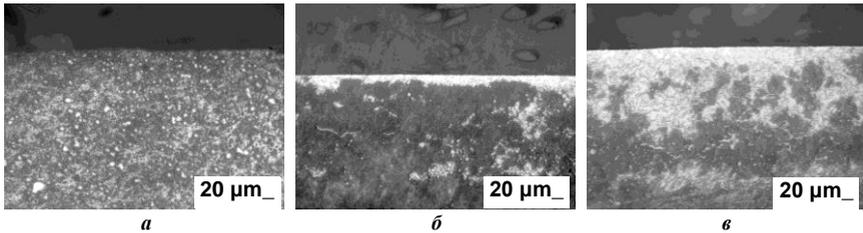


*а* – сталь 45; *б* – сталь 40X13

**Рисунок 20. – Изменение значений микротвердости поверхности по диаметру образцов из углеродистой стали**

Установлено, что в тонком (до 60 мкм) поверхностном слое закаленной стали 45 микротвердость возрастает в 2-3 раза (до 6,5-6,9 ГПа) и по мере удаления от поверхности монотонно снижается до 1,7-2,0 ГПа на расстоянии 100 мкм от поверхности. Кратковременное высокотемпературное воздействие импульсов плазмы в сочетании с относительно высокими скоростями теплоотвода формируют в поверхностных слоях стали 40X13 структурно-модифицированную зону, толщина

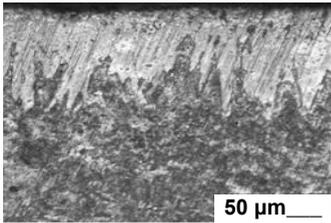
которой зависит от длительности и частоты импульсного плазменного воздействия, а также от скорости теплоотвода с поверхности образца (рисунок 21). В зависимости от соотношения содержания углерода и хрома микротвердость может составлять 8,2-11,2 ГПа и монотонно убывать до значений 6,1-6,3 ГПа.



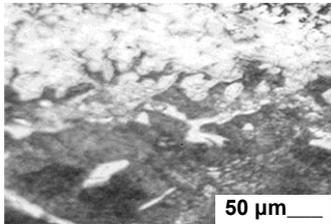
*a* – до ИПМ; *б* – после 10 импульсов; *в* – после 60 импульсов

**Рисунок 21. – Микроструктура поверхностного слоя стали 40X13 до и после ИПМ**

Установлено повышение микротвердости борированной на глубину 100-150 мкм поверхности стали 40X после ИПМ с 13,7-14,3 ГПа до 15,9-16,8 ГПа (на 17-20 %) и превращение игольчатой формы боридов в округлую (рисунок 22). По-



*a*



*б*

*a* – до ИПМ; *б* – после ИПМ

**Рисунок 22. – Микроструктура борированного слоя в стали 40X до и после ИПМ**

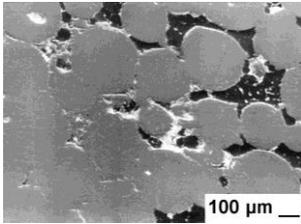
сле проведения ИПМ увеличения толщины борированного слоя отмечено не было, однако зафиксировано образование переходной зоны с градиентом микротвердости 32-33 ГПа/мм, что связано с рекристаллизацией боридов в результате нагрева и быстрого охлаждения поверхности. Известно, что бориды игольчатой формы, образовавшиеся в результате химико-термической обработки с малыми скоростями охлаждения, имеют повышенное содержание бора – 10-11 мас.%. В неравновесных условиях нагрева и охлаждения при воздействии концентрированных потоков импульсной плазмы происходит рекристаллизация боридов. Моноборид железа FeV кристаллизуется в виде полиэдров, на которых, вследствие быстрого теплоотвода в сторону сердцевины, зарождается слой Fe<sub>2</sub>V. Кристаллы FeV оказываются заключенными в оболочку Fe<sub>2</sub>V, образуя изолированные друг от друга включения округлой формы, окруженные более вязким материалом стальной матрицы. Микроструктура борированной поверхности после ИПМ с градиентным распределением боридов по толщине диффузионного слоя имеет

явные преимущества перед микроструктурой слоя, полученного традиционным диффузионным борированием и имеющего ярко выраженное игольчатое строение с четкой границей с основным металлом без переходной зоны. Результаты применения ИПМ борированной поверхности углеродистой стали свидетельствуют о

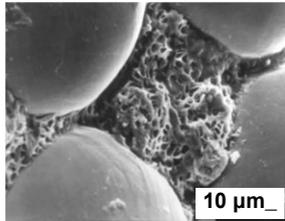
повышении ее физико-механических свойств и эксплуатационных характеристик изделий, работающих при знакопеременном нагружении, а также в условиях динамических и термических ударов.

**Шестая глава** посвящена разработке новых технологий и перспективам получения ФГМ с повышенными эксплуатационными характеристиками импульсными электрофизическими методами.

Одной из областей применения ФГМ на основе титана (рисунок 23) является



**Рисунок 23.** – Градиентный пористый слой из сферических частиц титана на поверхности имплантата



**Рисунок 24.** – Прорастание костной ткани в пористую структуру имплантата

медицина, в частности – имплантология. Показано, что ФГМ на основе титана обладают высокой биологической совместимостью, прочностью, ресурсом работы, интеграцией с биологическими тканями (рисунок 24), необходимыми для пожизненной им-

плантации изделий в организм человека. Разработано шесть технологических процессов получения имплантатов электроимпульсными методами (рисунок 25) и два

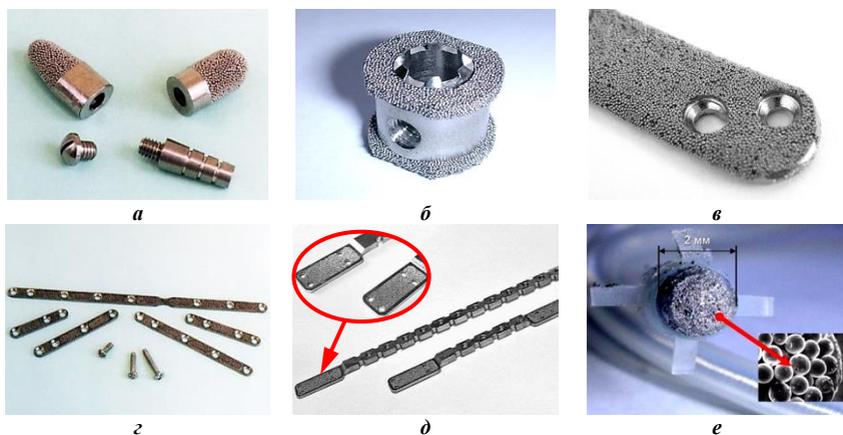


**Рисунок 25.** – Основные технологические операции получения имплантатов

технологических процесса СЛС, зарегистрированы технические условия на четыре вида изделий. Имплантаты (рисунок 26) успешно прошли сертификационные испытания и разрешены к серийному производству и применению в медицинской практике, что подтверждено четырьмя регистрационными удостоверениями Министерства

здравоохранения Республики Беларусь №№ ИМ-7.3989, ИМ-7.3990, ИМ-7.96841, ИМ-7.96843, регистрационным удостоверением Министерства здравоохранения Российской Федерации № 98/935, регистрационным удостоверением Министерства здравоохранения Украины № 396/97. Новизна конструкций имплантатов, способов их получения и применения защищены шестью патентами Республики Беларусь.

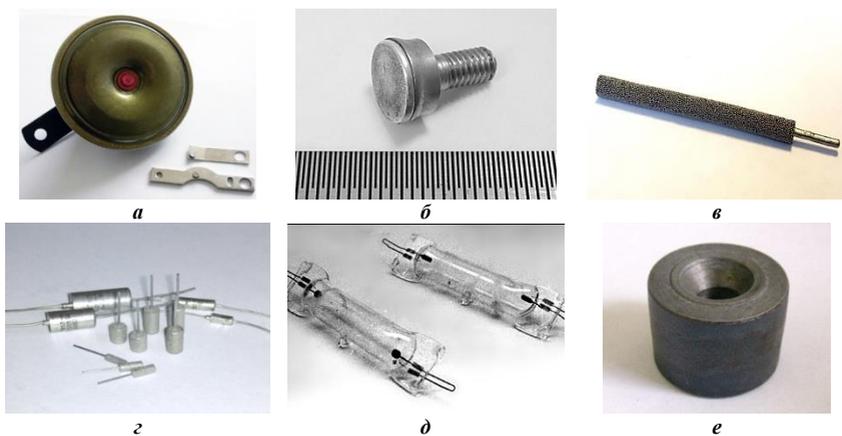
Для создания устройств современной электроники и электротехники широко используется электропроводные материалы с повышенными требованиями к величине электроемкости, частоте коммутации, термо- и электроэрозионной стойкости.



*a* – дентальные; *б* – позвоночника; *в, г* – минипластины; *д* – нижней челюсти;  
*е* – контактная головка эндокардиального провода-электрода

**Рисунок 26. – Имплантаты из ФГМ на основе титана**

Повышение прочности и износостойкости обрабатывающего, прессового, штампового инструмента является важной задачей в строительстве и промышленности. Показано, что внедрение технологий, использующих импульсные электрофизические методы, позволяет решать задачи получения градиентных структур, эффективно обеспечивающих выполнение требуемых функций. Разработанные технологические процессы и изделия (рисунок 27) внедрены на предприятиях Республики Беларусь и Российской Федерации.



*a* – контактный узел звукового сигнала; *б* – контактный узел кулачкового контактора;  
*в* – электродная матрица биосенсора; *г* – объемно-пористые аноды конденсаторов;  
*д* – катоды газоразрядных ламп; *е* – втулка правильно-отрезного станка

**Рисунок 27. – Изделия для электротехники, электроники, биологии и строительства**

Технологии получения и опытные партии вольфрамовых и серебряных контактных узлов с повышенным ресурсом работы для электроконтактных прерывателей внедрены в производство автомобильных звуковых сигналов в ОАО «Горизонт» (г. Минск) и в производство железнодорожных контакторов в ЧУП «ЭНВА» (г. Молодечно). Опытная партия титановых электродных матриц с градиентом пористой структуры использована в производстве клеточных электрохимических биосенсоров высокой чувствительности во ВНИИ микробиологических производств (г. Минск). Технология и оборудование для получения ниобиевых и танталовых объемно-пористых анодов оксидно-полупроводниковых конденсаторов повышенной емкости с градиентом удельного электрического сопротивления внедрены на заводе радиодеталей (г. Новосибирск) и в ОАО «Электонд» (г. Сарапул). Ресурсосберегающая технология получения вольфрамовых катодов газоразрядных ламп с градиентом концентрации эмиссионного материала внедрена в серийное производство на опытном заводе ОАО «ЛИСМА-ВНИИИС» (г. Саранск). Технология изготовления и опытная партия втулок с внутренним градиентным износостойким слоем, используемых для правки арматурной проволоки, внедрены на комбинате железобетонных изделий Министерства обороны Республики Беларусь. По разработанной технологии изготовлены и успешно прошли эксплуатационные испытания в УП «ГорремЛивнесток» (г. Минск) стойкие к абразивному износу сопла каналопровывочных насадок. Технология ИПМ рабочих поверхностей штампового и медицинского инструмента внедрена на ОЭП ГНУ ИПМ (г. Минск).

Показана возможность повышения путем ЭРМ эксплуатационных характеристик спеченного твердого сплава. Установлено, что электроимпульсное воздействие позволяет в четыре раза уменьшить содержание хрупкой  $\eta$ -фазы в твердом сплаве марки ВК8, показавшем на испытаниях в СП «Букар» (г. Минск) повышение износостойкости на 10-15 %. Показана возможность получения стеклокерамических ФГМ с эффектом люминесценции для применения в светодиодной осветительной технике. Установлены технологические режимы получения прозрачного материала из порошка стекла производства ОАО «Оптик» (г. Лида) с добавкой высокодисперсного порошка люминофора для преобразования монохромного излучения синего светодиода в диапазон волн белого цвета. Результаты проведенного исследования использованы при получении детекторов инфракрасного излучения на основе керамики, активированной ионами редкоземельных элементов. Испытания, проведенные в Институте прикладных физических проблем им. А.Н.Севченко (г. Минск), показали, что полученные ФГМ могут быть рекомендованы для использования в качестве преобразователей для визуализации инфракрасного лазерного излучения. Установлено, что после электроимпульсного воздействия не происходит кристаллизация порошков аморфных сплавов, перспективных для изготовления электротехнических изделий с высокой магнитной проницаемостью, жаропрочных термоизоляционных элементов, защиты электронного оборудования от электромагнитного излучения, коррозионностойких фильтрующих элементов. Исследовано получение путем электроимпульсного воздействия волоконно-сетчатых ФГМ из титана и жаростойких сталей, показавших на испытаниях в ООО «Стальные фильтрующие материалы» (г. Москва) высокую эффективность очистки газов от полидисперсной пыли.

Результаты проведенных в диссертационной работе исследований внедрены в учебный процесс в Белорусском национальном техническом университете (г. Минск), в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ» (г. Москва), в Донском государственном техническом университете (г. Ростов-на-Дону).

Общий объем реализованной товарной и научно-технической продукции с использованием результатов диссертационной работы составил 700 тыс. долларов США, получен экономический эффект 295 тыс. долларов США, долевое участие соискателя составляет 52 %.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Сформулированы общие принципы применения импульсных электрофизических методов для получения ФГМ и определена концепция формирования градиентов структуры и свойств порошковых и компактных материалов, заключающаяся в создании направленных взаимосвязанных силовых и тепловых потоков, различающихся по плотности, скорости и глубине проникновения вводимой энергии, позволяющих обеспечить локальное изменение структуры и свойств обрабатываемого материала. Отмечено, что наиболее эффективными и перспективными для получения ФГМ являются электроимпульсные, импульсные лазерные и импульсные плазменные методы, основанные на воздействии концентрированных потоков тепловой энергии, выделяемой при прямом пропускании импульсов электрического тока или возникающей в результате физических явлений, создаваемых импульсным электрическим током [1, 4, 28, 57].

2. В результате математического моделирования распределения тепловой энергии, выделяющейся при пропускании импульса электрического тока через порошок, находящийся в цилиндрической пресс-форме при осевом двухстороннем сжатии, установлено, что ее количество зависит от параметров электрического импульса, структурных характеристик, электрического сопротивления и теплофизических свойств порошка. Показано, что суммарное действие осевых сил сжатия и электромагнитных сил, возникающих при прохождении импульсов электрического тока, приводит к появлению градиента электрического сопротивления порошка по объему пресс-формы и неравномерному выделению тепловой энергии в контактах между частицами, способствуя формированию градиента структуры и свойств порошкового материала. Определена величина градиента температуры в зоне контакта сферических частиц титана, достигающая  $\sim 10^7$  К/м после пропускания импульса электрического тока, что позволило предположить существование механизма структурно-фазовых превращений в порошковом материале, заключающемся во взаимодействии конденсированной фазы материала частиц порошка и плазмы электрического дугового разряда, приводящем к плавлению и жидкофазному вязко-пластичному течению материала контактных зон с увеличением их размера под действием внешних сил и образованию неравновесных микрокристаллических структур при охлаждении. Установлено, что при величине удельной энергии 130-190 кДж/см<sup>3</sup> модифицирующего электроимпульсного воздействия по сечению однородного спеченного порошкового материала возможно формирование градиента прочности 20-50 МПа/мм [1, 6-9, 20, 29, 41, 64, 76, 77, 79, 80, 86].

3. В результате математического моделирования распределения тепловой энергии в контактных зонах между частицами и слоями частиц при импульсном лазерном воздействии с учетом влияния энергии сил поверхностного натяжения материала частиц, светового давления и гравитации получены зависимости для определения граничных значений мощности импульсов лазерного излучения, необходимой для формирования и разрушения жидкофазных контактов. Установлен механизм контактообразования частиц в двух верхних слоях порошка в условиях многократного отражения лазерного излучения, заключающийся в поверхностном оплавлении частиц с образованием жидкофазных контактов под действием сил поверхностного натяжения, позволивший описать связь структурных характеристик слоев и относительного распределения энергии между ними. Показано, что разность температур на поверхностях верхнего и нижнего слоя сферических частиц титана не должна превышать 935 К, а на поверхностях слоя частиц и компактной титановой подложки – 600 К, что позволяет обеспечить контактообразование между ними без полного расплавления частиц верхнего слоя. Путем компьютерного моделирования показано, что изменяя размер фокального пятна, интенсивность лазерного излучения и длительность импульса, можно изменять степень нагрева поверхности частиц верхнего и нижнего слоя и управлять процессом контактообразования для формирования градиента структуры и свойств порошкового материала [12, 13, 39, 43, 46, 72].

4. В результате экспериментальных исследований изменения температуры при электроимпульсном спекании порошков титана, тантала и ниобия в зависимости от энергии, длительности и количества импульсов электрического тока, основанных на регистрации возникающего светового излучения с временным разрешением ~1 мкс, обеспечивших диапазон измерений от 1 200 °С до 6 500 °С с относительной погрешностью 5-10 %, уточнен механизм структурно-фазовых превращений, заключающийся в возникновении в контактных зонах между частицами, преимущественно в направлении пропуска импульсов электрического тока, микродуговых плазменных разрядов, приводящих к образованию жидкой фазы, вязкопластичном скольжении частиц под действием усилия прессования и быстром отводе тепла от контактных зон к центру частиц с образованием твердой фазы, позволивший определить необходимое соотношение между параметрами электрического импульса и усилием прессования в процессе формирования и направленного изменения структуры и свойств порошкового функционально-градиентного материала. Показано, что за время одного импульса электрического тока происходит быстрый разогрев материала частиц до температуры 5 400-5 600 °С со скоростью  $10^8$ - $10^9$  °С/с, сопровождающийся образованием жидкой фазы, и быстрое охлаждение до 2 000-3 000 °С со скоростью  $10^6$ - $10^7$  °С/с, что предполагает появление неравновесных градиентных структур в спеченном порошковом материале [1, 2, 16, 27, 30, 44, 50, 52, 54, 58, 62, 66, 93-99, 101, 102, 104-106, 110, 111].

5. Экспериментально установлена анизотропия прочностных свойств порошкового материала из сферических частиц титана одного размера, полученного при однократном электроимпульсном воздействии в направлении приложения усилия прессования и пропуска импульса электрического тока, выражающаяся в увеличении предела прочности при изгибе в среднем на 56 % и предела прочности на срез в среднем на 38 % при равномерном распределении относительной пористости. Показана возможность устранения анизотропии путем повторного пропуска

ния импульсов электрического тока в поперечных первоначальному направлениях, что вызывает дополнительный эффект повышения прочности порошкового материала на 10-15 %. Установлено, что в результате электроимпульсного воздействия на однородный спеченный порошковый материал наблюдается повышение прочности на срез на 65-110 % в направлении пропускания импульсов электрического тока при уменьшении значений относительной пористости на 3-5 % и возникновение градиента удельного электросопротивления 100-150 Ом·м/мм, что объясняется активацией процессов ускоренного массопереноса в этом направлении, сопровождающихся ростом размера контактных зон и повышением их прочности при сохранении исходной мелкозернистой структуры материала частиц порошка [1-3, 11, 14, 15, 17, 22, 31, 44, 47, 50, 57, 61, 63, 67, 69, 71, 81, 82, 88].

6. В результате исследований влияния структуры и морфологии поверхности сферических частиц в слое порошка титана при импульсном лазерном воздействии на распределение тепловой энергии установлено, что предварительная химическая пассивация порошка снижает величину коэффициента отражения поверхности частиц на 39-43 %, приводя к повышению температуры на 30-100 К и существенно влияя на интенсивность образования жидкой фазы. Установлено, что при постоянной мощности лазерного излучения скорость сканирования лазерного луча и частота следования импульсов, наряду с размером частиц и коэффициентом отражения поверхности, влияют на глубину расплавленного слоя. Показано, что количество жидкой фазы в размере 10-20 % объема частиц обеспечивает устойчивое контактообразование и быстрое остывание расплава за счет теплоотвода, не приводя к перегреву и испарению материала частиц, а ускоренная рекристаллизация расплава способствует измельчению зёрновой структуры титана и повышению прочности на сжатие порошкового материала на 50-76 % [5, 34, 48, 51, 61, 78].

7. В результате исследований процесса образования жидкой фазы между сферическими частицами титана и компактной титановой подложкой при последовательном воздействии импульсов лазерного излучения с постоянной величиной удельной энергии, но с изменяющимися в пределах от 0,5 мм до 1,0 мм размерами фокального пятна на слое порошка с изменяющимся размером частиц, доказана возможность получения градиентной переходной зоны между частицами и компактной подложкой с градиентом микротвердости 6,1-6,3 ГПа/мм, позволившей за счет сохранения относительного количества жидкой фазы на поверхности частиц обеспечить повышение прочности сцепления порошковых слоев в 2-4 раза [18, 19, 24, 35, 48, 56].

8. В результате исследований влияния энергии, длительности и частоты импульсного плазменного воздействия в воздухе при атмосферном давлении на изменение структуры, фазового состава, морфологии и микротвердости поверхности углеродистых сталей и сталей с диффузионно-борированной поверхностью установлен эффект градиентного упрочнения и структурно-фазовых изменений в поверхностных слоях толщиной 50-100 мкм углеродистых сталей, позволивший обеспечить повышение микротвердости поверхности в 3-4 раза при уменьшении на 13-16 % значений среднего арифметического отклонения профиля поверхности. Установлено образование плавного перехода от борированного слоя толщиной 100-150 мкм к стальной матрице с повышением микротвердости поверхности на 17-20 % за счет преобразования формы и распределения боридов в структуре слоя [23, 25, 26, 55, 59, 60, 65, 69, 87].

9. В результате исследований эксплуатационных характеристик ФГМ из тугоплавких металлов, вольфрамсодержащего твердого сплава и углеродистой стали показано, что градиентная пористая структура поверхности материала, полученного ЭИС из сферических частиц титана, позволяет без увеличения геометрических размеров на порядок повысить эффективность взаимодействия имплантируемых в организм человека изделий медицинского назначения с окружающими тканями. При этом модуль упругости в зависимости от структурных характеристик ФГМ составляет от 26 до 81 ГПа, что сопоставимо с модулем упругости кости, прочность на сжатие в 2 раза выше, а усталостная прочность в 3 раза выше, чем у кости. Установлено увеличение прочности на срез спеченных порошковых вольфрамовых контактных элементов звуковых сигналов после ЭРМ в 1,5-1,6 раза в результате уменьшения количества пор и измельчения зеренной структуры материала. Показано, что полученный ЭИС ФГМ из порошков тантала и ниобия позволяет увеличить емкость оксидно-полупроводниковых конденсаторов на 30 % и снизить материалоемкость на 40 %, а ФГМ из порошка вольфрама с градиентным распределением по объему эмиссионного материала – увеличить удельную эмиссию катодов газоразрядных ламп в 2,6-3,2 раза, снизить материалоемкость на 20 % без уменьшения прочности. Установлено, что снижение примерно в 4 раза количество хрупкой  $\eta$ -фазы в спеченном твердом сплаве ВТ8 после ЭРМ позволило повысить его износостойкость на 10-15 %. Показано, что ИПМ штампового инструмента из углеродистых сталей за счет создания градиентных поверхностно-упрочненных слоев способствует повышению его эксплуатационных характеристик [1, 2, 10, 21, 26, 28, 31–33, 36–38, 40, 42, 45, 48, 49, 53, 55–57, 61, 66, 68–70, 73–75, 81–85, 87, 89, 108].

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

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработано новое технологическое оборудование: автомат для ЭИС объёмно-пористых анодов конденсаторов (КД ИСПФ.48.258.00.000), установки для ЭИС челюстно-лицевых и дентальных имплантатов (КД ИСПФ.48.343.00.000), контактных головок эндокардиального провода-электрода (КД ИСПФ.48.351.00.000), установка СЛС (КД ИСПФ.43.010.00.00.000), установка ИПМ (КД ИСПФ.26.003.00.000). Разработаны и внедрены в практическую медицину восемь новых технологических процессов, зарегистрированы технические условия на получение четырех видов изделий медицинского назначения: дентальных имплантатов ТУ РБ 100219793.313-2003 (ТД ИСПФ.01265.01674), минипластин для остеосинтеза костей лицевого скелета ТУ РБ 100219793.314-2003 (ТД ИСПФ.01265.01673, ИСПФ.01265.01975), имплантатов позвоночника ТУ ВУ 100219793.373-2010 (ТД ИСПФ.251.02165.00007, ИСПФ.26.04.00.000), индивидуальных имплантатов для протезирования нижней челюсти ТУ ВУ 100219793.368-2010 (ТД ИСПФ.01265.01980), контактных головок эндокардиального провода-электрода (ТД ИСПФ.01265.01882, ИСПФ.26.12.00.000). Технологии, оборудование и опытные партии изделий медицинского назначения внедрены в АО «Специальное конструкторское бюро медицинской электротехники» (г. Каменец-Подольский, Украина), в ОАО «Литий-элемент» (г. Саратов, Россия). Технологии электроимпульсного модифицирования (ТД ИСПФ.01271.02067), сварки (ТД ИСПФ.25.01190.00030), спекания (ТД ИСПФ.01165.0176448), импульсного лазерного получения объемных порошковых изделий (ТД ИСПФ.25.02165.00003) внедрены в производство изделий из ФГМ с повышенными эксплуатационными характе-

ристиками: втулок правильно-отрезных станков – на 214 комбинате железобетонных изделий Министерства обороны Республики Беларусь (г. Минск), контактов автомобильных звуковых сигналов – в ОАО «Горизонт» (г. Минск), контактов кулачковых контакторов – в ЧУП «ЭНВА» (г. Молодечно), объемно-пористых анодов конденсаторов – на заводе радиодеталей (г. Новосибирск, Россия) и в ОАО «Элеконд» (г. Саранск, Россия), вольфрамовых катодов газоразрядных ламп – на опытном заводе ОАО «ЛИСМА-ВНИИИС» (г. Саранск, Россия). Технология ИПМ рабочих поверхностей штампового и медицинского инструмента (ТД ИСПФ.01251.02224) внедрена на ОЭП ГНУ «Институт порошковой металлургии имени академика О.В. Романа» (г. Минск). Разработанные и внедренные технологические процессы и оборудование для их осуществления использованы при производстве импортозамещающих, имеющих экспортный потенциал и социальную значимость товаров, общий объем выпуска которых в сопоставимых ценах составил более 400 тыс. долларов США [1, 2, 10, 31, 33, 36, 38, 40, 42, 45, 48, 49, 53, 56, 57, 61, 70, 73–75, 81–83, 85, 90–92, 100, 107].

Определены перспективные направления дальнейших исследований: ЭРМ рабочих элементов твердосплавного металло- и деревообрабатывающего, прессового, штампового, породоразрушающего инструмента; электроимпульсное получение алмазосодержащих, стеклокерамических, аморфных, наноструктурных, волокнуво-сетчатых ФГМ [21, 26, 28, 32, 37, 47, 53, 55, 66, 68, 69, 84, 87, 89, 108].

Разработанные изделия, технологическое оборудование, устройства и способы получения ФГМ защищены 19 патентами Республики Беларусь, двумя патентами Российской Федерации и одним патентом Евразийской патентной организации [90–111].



**СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ****Монографии**

1. Белявин, К.Е. Теория и практика электроимпульсного спекания пористых порошковых материалов / К.Е. Белявин, В.В. Мазюк, Д.В. Минько, В.К. Шелег. – Минск: Ремико, 1997. – 180 с.
2. Стрижаков, Е.Л. Разрядно-импульсная обработка материалов: монография / Е.Л. Стрижаков, С.В. Нескоромный, Д.В. Минько. – Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 2016. – 201 с.

**Главы в монографиях**

3. Минько, Д.В. Особенности формирования структуры и свойств порошковых материалов при электроимпульсном спекании / Д.В. Минько, К.Е. Белявин, Н.В. Решетников // Современные перспективные материалы / А.В. Алифанов [и др.]; под ред. В.В. Клубовича. – Витебск: Изд-во УО «ВГТУ», 2011. – Гл. 16. – С. 450–486.
4. Минько, Д.В. Современные электрофизические методы получения композиционных материалов и модифицированных поверхностных слоев деталей / Д.В. Минько, К.Е. Белявин, В.К. Шелег // Перспективные материалы и технологии / А.В. Алифанов [и др.]; под ред. В.В. Клубовича. – Витебск: Изд-во УО «ВГТУ», 2013. – Гл. 22. – С. 453–472.
5. Минько, Д.В. Формирование структуры и свойств функционально-градиентных материалов на основе титана при импульсном лазерном воздействии / Д.В. Минько, К.Е. Белявин, В.К. Шелег // Перспективные материалы и технологии: монография. В 2-х т. Т. 2 / А.В. Алифанов [и др.]; под ред. В.В. Клубовича. – Витебск: УО «ВГТУ», 2017. – Гл. 1. – С. 5–30.

**Статьи в рецензируемых журналах и сборниках**

6. Основные закономерности теплообмена в частицах порошка при электроимпульсном спекании / К.Е. Белявин, Д.В. Минько, В.В. Мазюк, О.О. Кузнечик // Машиностроение: Сб. научн. трудов. Под ред. И.П. Филонова. – Мн.: УП «Технопринт», 2001. – Вып. 17. – С. 157–161.
7. Белявин, К.Е. Распределение температуры в порошковом материале при электроимпульсном спекании / К.Е. Белявин, Д.В. Минько, О.О. Кузнечик // Порошковая металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов. – Минск, 2002. – Вып. 25. – С. 95–99.
8. Белявин, К.Е. Моделирование процесса электроимпульсного спекания металлических порошков / К.Е. Белявин, Д.В. Минько, О.О. Кузнечик // Инженерно-физический журнал. – 2004. – Т. 77. – № 3. – С. 136–143.
9. Белявин, К.Е. Влияние активного и реактивного сопротивления на процесс тепловыделения при конденсаторной сварке порошковых материалов / К.Е. Белявин, Д.В. Минько, О.О. Кузнечик // Сварка и родственные технологии: республиканский межведомственный сборник научных трудов. – Минск, 2004. – Вып. 6. – С. 25–26.
10. Применение технологии и оборудования конденсаторной сварки для получения изделий из порошков тугоплавких металлов / К.Е. Белявин, Д.В. Минько, О.О. Кузнечик, Н.В. Решетников // Сварка и родственные технологии: республи-

канский межведомственный сборник научных трудов. – Минск, 2005. – Вып. 7. – С. 34–36.

11. Исследование фотоэмиссионным методом температуры процесса электроимпульсного спекания порошков титана / К.Е. Белявин, К.Н. Каспаров, Д.В. Минько, О.О. Кузнечик, Н.В. Решетников // Порошковая металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов. – Минск, 2006. – Вып. 29. – С. 263–267.

12. Исследование влияния мощности импульсно-периодического лазерного излучения на устойчивость жидкометаллических контактов между частицами порошка при селективном лазерном спекании / К.Е. Белявин, Д.В. Минько, Р.П. Быков, О.О. Кузнечик // Порошковая металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов. – Минск, 2006. – Вып. 29. – С. 268–272.

13. Моделирование процесса наплавки при импульсно-периодическом лазерном воздействии на порошок титана / К.Е. Белявин, Д.В. Минько, Р.П. Быков, О.О. Кузнечик // Сварка и родственные технологии: республиканский межведомственный сборник научных трудов. – Минск, 2006. – Вып. 8. – С. 13–16.

14. Измерение температуры порошков тугоплавких металлов при электроимпульсной обработке / К.Е. Белявин, К.Н. Каспаров, Д.В. Минько, О.О. Кузнечик, Н.В. Решетников // Сварка и родственные технологии: республиканский межведомственный сборник научных трудов. – Минск, 2006. – Вып. 8. – С. 36–40.

15. Белявин, К.Е. Исследование свойств пористых изделий из порошка титана, полученных методом электроразрядной обработки / К.Е. Белявин, Д.В. Минько, Н.В. Решетников // Сварка и родственные технологии: республиканский межведомственный сборник научных трудов. – Минск, 2006. – Вып. 8. – С. 53–57.

16. Установка порошковой лазерной стереолитографии и области ее применения / К.Е. Белявин, Д.В. Минько, Ю.А. Чивель, В.К. Павленко // Порошковая металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов. – Минск, 2007. – Вып. 30. – С. 35–43.

17. Исследование влияния электроконтактного нагрева на свойства заготовок из порошка титана, полученных методом электроимпульсного спекания / К.Е. Белявин, Д.В. Минько, Н.В. Решетников, Л.Н. Дьячкова // Порошковая металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов. – Минск, 2007. – Вып. 30. – С. 258–263.

18. О припекании сферических порошков титана под воздействием твердотельного лазера / К.Е. Белявин, Д.В. Минько, О.О. Кузнечик, Р.П. Быков, Д.А. Зятягин // Порошковая металлургия. – 2008. – № 7/8. – С. 155–160.

19. Белявин, К.Е. Селективное лазерное спекание пористых материалов и покрытий из порошков титана с частицами сферической формы / К.Е. Белявин, Д.В. Минько, Р.П. Быков // Порошковая металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов. – Минск, 2008. – Вып. 31. – С. 200–204.

20. Теоретические исследования формирования межчастичных контактов при электроразрядном спекании порошковых материалов / К.Е. Белявин, Ю.Н. Гафо, Д.В. Минько, Н.В. Решетников // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки. – 2009. – № 3. – С. 139–145.

21. Исследование влияния электроимпульсной обработки на структурно-фазовые изменения в спеченном твердом сплаве марки ВК8 / К.Е. Белявин,

Д.В. Минько, С.В. Побережный, Н.В. Решетников // *Металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов.* – Минск, 2009. – Вып. 32. – С. 199–209.

22. Сравнительные исследования микроструктуры и прочности пористых материалов из порошка титана, полученных спеканием в вакууме и методом электроконтактного нагрева в защитной атмосфере / К.Е. Белявин, Д.В. Минько, Н.В. Решетников, Л.Н. Дьячкова // *Литье и металлургия.* – 2010. – № 4. – С. 122–127.

23. Кузнечик, О.О. Импульсная обработка воздушной плазмой поверхности среднеуглеродистой стали / О.О. Кузнечик, Д.В. Минько, К.Е. Белявин // *Литье и металлургия.* – 2010. – № 4. – С. 133–136.

24. Исследование процесса селективного припекания импульсным лазером сферических порошков титана / Р.П. Быков, К.Е. Белявин, Д.В. Минько, О.О. Кузнечик // *Литье и металлургия.* – 2010. – № 4. – С. 137–140.

25. Исследование особенностей генерации импульсной плазмы в воздухе при атмосферном давлении / Ю.А. Чивель, О.О. Кузнечик, Д.В. Минько, И.С. Никончук, А.Н. Чумаков, К.Е. Белявин // *Инженерно-физический журнал.* – 2011. – Т. 84. – № 5. – С. 1028–1033.

26. Воздушно-импульсная обработка борированной поверхности легированной стали / О.О. Кузнечик, А.А. Стефанович, Д.В. Минько, Ю.Н. Сараев / *Технология машиностроения.* – 2011. – № 8. – С. 47–49.

27. Минько, Д.В. Фотоэмиссионный метод измерения температуры в процессе электроимпульсного спекания порошков тугоплавких металлов / Д.В. Минько, О.О. Кузнечик // *Приборы и методы измерений.* – 2012. – № 1(4). – С. 92–98.

28. Импульсные электрофизические технологии получения покрытий и модифицирования поверхности материалов / Д.В. Минько, К.Е. Белявин, О.О. Кузнечик, В.В. Makeев // *Металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов в 2 ч.* – Минск, 2013. – Вып. 34. – Ч. 2. – С. 58–71.

29. Оценка характера распределения давления в порошке при электроимпульсном спекании в условиях одноосной двухсторонней упругой подпрессовки / О.О. Кузнечик, Д.В. Минько, К.Е. Белявин, Е.Г. Григорьев / *Инженерно-физический журнал.* – 2013. – Т. 86. – № 5. – С. 1163–1173.

30. Регистрация температуры микроплазменных процессов при ЭИС порошков титана / О.О. Кузнечик, Д.В. Минько, К.Е. Белявин, Е.Г. Григорьев // *Порошковая металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов.* – Минск, 2013. – № 36. – С. 49–54.

31. Minko, D. A porous materials production with an electric discharge sintering / D. Minko, K. Belyavin // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials.* – 2016. – V. 59. – P. 67–77.

32. Минько, Д.В. Электроимпульсное прессование в вакууме стеклокомпозиционных материалов / Д.В. Минько // *Современные методы и технологии создания и обработки материалов: Сб. научных трудов. В 3 кн. Кн. 1. Материаловедение / редакция: С.А. Астапчик (гл. ред.) [и др.].* – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2016. – С. 204–212.

33. Минько, Д.В. Физические и биомеханические свойства компактно-пористого титана / Д.В. Минько, К.Е. Белявин // *Современные методы и технологии создания и обработки материалов: Сб. научных трудов. В 3 кн. Кн. 1. Материал-*

ловение / редколлегия: А.В. Белый (гл. ред.) [и др.]. – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2017. – С. 195–206.

34. Минько, Д.В. Влияние параметров импульсного лазерного воздействия на формирование градиента структуры пористых материалов из порошка титана / Д.В. Минько // *Литье и металлургия*. – 2018. – № 3(92). – С. 88–94.

35. Минько, Д.В. Особенности формирования градиентных пористых и компактно-пористых порошковых структур при селективном лазерном спекании сферического порошка титана марки ВТ1-0 / Д.В. Минько // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение*. – 2018. – Т. 20. – № 4. – С. 24–33.

#### **Материалы конференций**

36. Technology of powder metallurgy and spraying protective coatings for implants production / A.Ph. Ilyshenko, V.V. Savich, K.E. Belyavin, D.V. Minko // *Proceedings of the III Symposium on Orthopedic and Prosthetic Engineering IOP 2001*. – Bialystok, 2001. – P. 57–65.

37. Белявин, К.Е. Особенности получения пористых малогабаритных и тонкостенных изделий из сферических порошков титана / К.Е. Белявин, Д.В. Минько, О.О. Кузнецик // *Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия: Материалы докладов 5-й международной научно-технической конференции, Минск, 18-19 сентября 2002 г.* – Минск, 2002. – С. 95–96.

38. Пористый дентальный имплантат корневидной формы / К.Е. Белявин, Д.В. Минько, О.О. Кузнецик, О.П. Чудаков, И.Ю. Федченко // *Материалы международной научно-технической конференции «Наука - образованию, производству, экономике»*. В 2-х томах. Том I. / Под ред. Б.М. Хрусталева. – Минск, 2003. – С. 130–134.

39. Исследование процесса селективного лазерного спекания сферического порошка титана / К.Е. Белявин, Д.В. Минько, О.О. Кузнецик, В.К. Павленко, Ю.А. Чивель, М.В. Петрушина // *Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия: 6-я междунар. науч.-техн. конф., Минск, 6-7 апреля 2004 г.: Материалы докл.* / Ред. кол. А.Ф. Ильюшенко [и др.]. – Минск, 2004. – С. 324–325.

40. Лазерная технология изготовления индивидуальных трехмерных имплантатов из композиционного титана / Н.С. Казак, К.Е. Белявин, Д.В. Минько, О.О. Кузнецик, Ю.А. Чивель, В.К. Павленко // *Лазерно-оптические технологии в биологии и медицине: Материалы международной конференции. Минск, 14-15 октября 2004 г.* В 2-х томах. Том 1. – Минск, 2004. – С. 201–206.

41. Belyavin, K. Influence of the plasma phenomena on process sintering of powders by Electric Discharge / K. Belyavin, D. Minko, O. Kuznechik // *PM2004. Powder Metallurgy World Congress and Exhibition. Proceedings. 17-21 October 2004, Vienna, Austria*. – Vienna, 2004. – V. 2. – P. 271–276.

42. Belyavin, K. Application of Porous Products of Spherical Titanium Powders in Implant Surgery / K. Belyavin, V. Sheleg, D. Minko // *PM2004. Powder Metallurgy World Congress and Exhibition. Proceedings. 17-21 October 2004, Vienna, Austria*. – Vienna, 2004. – V. 2. – P. 537–544.

43. New Technology of Selective Laser Sintering / K.E. Belyavin, D.V. Minko, Yu.A. Chivel, V.K. Pavlenko // EURO PM2005 Congress and Exhibition. Proceedings. 2-5 October 2005, Prague, Czech Republic. – Prague, 2005. – V. 3. – P. 67–72.

44. Measurement of temperature of powder materials during electrodischarge sintering / K.E. Belyavin, K.N. Kasparov, D.V. Minko, O.O. Kuznechik // V International Conference “Plasma Physics and Plasma Technology”. Contributed papers. Vol. II. Minsk, Belarus, September 18-22, 2006. – Minsk, 2006. – P. 623–626.

45. Belyavin, K.E. Production of porous titanium products by a powerful impuls of an electric current / K.E. Belyavin, D.V. Minko, N.V. Reshetnikov // V International Conference “Plasma Physics and Plasma Technology”. Contributed papers. Vol. II. Minsk, Belarus, September 18-22, 2006. – Minsk, 2006. – P. 627–630.

46. Investigation of influence of Pulse-periodical laser radiation power on stability of liquid-metal contacts between powder Particles during selective laser sintering / K.E. Belyavin, D.V. Minko, R.P. Bykov, O.O. Kuznechik // Extended Abstracts of 2006 Powder Metallurgy World Congress, September 24-28, 2006. BEXCO, Busan, Korea. Part 1. – Busan, 2006. – P. 518–519.

47. Belyavin, K.E. A New Technology of Hardening Porous Materials of Titan Powders / K.E. Belyavin, D.V. Minko, N.V. Reshetnikov // Extended Abstracts of 2006 Powder Metallurgy World Congress, September 24-28, 2006. BEXCO, Busan, Korea. Part 2. – Busan, 2006. – P. 1012–1013.

48. Белявин, К.Е. Исследование процесса порошковой лазерной стереолитографии и получение объемных имплантатов из композиционного титана / К.Е. Белявин, Д.В. Минько, Р.П. Быков // Защитные покрытия, сварка и контроль: мат. докл. Междунар. техн. конф., Минск, 30 апреля 2006 г. / Ред. кол. А.Ф. Ильющенко [и др.]. – Минск, 2006. – С. 53–57.

49. Использование электроконтактной сварки для получения неразъемного соединения вольфрам-сталь при изготовлении контактных узлов звуковых сигналов / К.Е. Белявин, Д.В. Минько, Н.В. Решетников, Ю.Н. Гафо, О.О. Кузнецик, Р.П. Быков // Защитные покрытия, сварка и контроль: мат. докл. Междунар. техн. конф., Минск, 30 апреля 2006 г. / Ред. кол. А.Ф. Ильющенко [и др.]. – Минск, 2006. – С. 58–61.

50. Investigation of Influence of Electrical Discharge Treatment on Properties of Half-Finished Parts from Titanium Powder Produced by the Method of Electrical Discharge Sintering / K.E. Belyavin, D.V. Minko, N.V. Reshetnikov, A.N. Mazurenko // International Powder Metallurgy Congress Et Exhibition EURO PM2007. 15-17 October 2007, Toulouse, France. Proceedings. – Toulouse, 2007. – Vol. 3. – P. 203–210.

51. Development of technologies for layer-by-layer laser synthesis of 3D parts in Russia and Belarus / V.V. Vasiltsov, A.N. Grezev, A.V. Evseev, V.Ya. Panchenko, K.E. Belyavin, Yu.A. Chivel, D.V. Minko, V.K. Pavlenko // International Conference on Lasers, Applications, and Technologies 2007: Advanced Lasers and Systems, Proc. SPIE 6731. (August 09, 2007); doi:10.1117/12.752839.

52. Устройство диагностики быстропротекающих процессов электроконтактной сварки и наплавки порошковых материалов / О.О. Кузнецик, Д.В. Минько, А.А. Радченко, К.Е. Белявин // Сварка и родственные технологии: мат. докл. Междунар. симп., Минск, 26 марта 2008 г. / Ред. кол. А.Ф. Ильющенко [и др.]. – Минск, 2008. – С. 75–77.

53. Упрочнение порошкового вольфрама при сварке контактных узлов звуковых сигналов импульсным током / К.Е. Белявин, Д.В. Минько, Н.В. Решетников, О.О. Кузнечик // Международная научная конференция «Перспективные материалы и технологии» 27-28 марта 2008 г., Витебск, Беларусь: сборник материалов / под общ. ред. В.В. Клубовича. – Витебск, 2008. – С. 211–218.

54. Белявин, К.Е. Регистрация быстропротекающих процессов спекания и припекания при электроимпульсной обработке порошковых материалов / К.Е. Белявин, О.О. Кузнечик, Д.В. Минько // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка: Материалы докладов 8-й международной научно-технической конференции, Минск, Беларусь, 27-28 мая 2008 г. – Минск, 2008. – С. 70–71.

55. Импульсно-плазменная обработка поверхности медицинского инструмента / Д.В. Минько, О.О. Кузнечик, Ю.А. Чивель, В.В. Хроленок // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: III Междунар. научн.-техн. конф. (Минск, 15-17 октября 2008 г.): сб. материалов. В 4 кн. Кн. 2. Высокоэнергетические технологии получения и упрочнения материалов и деталей машин / ред. коллегия: С.А. Астапчик (гл. ред.) [и др.]. – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2008. – С. 252–256.

56. Получение пористых материалов и покрытий с помощью селективного лазерного спекания / К.Е. Белявин, Д.В. Минько, Р.П. Быков, О.О. Кузнечик // Пористые проницаемые материалы: технологии и изделия на их основе. Материалы докладов Международного симпозиума, 21-22 октября 2008 г. – Минск, 2008. – С. 188–191.

57. Электроимпульсные процессы получения пористых материалов и покрытий / К.Е. Белявин, Д.В. Минько, О.О. Кузнечик, Н.В. Решетников // Пористые проницаемые материалы: технологии и изделия на их основе. Материалы докладов Международного симпозиума, 21-22 октября 2008 г. – Минск, 2008. – С. 191–196.

58. Установка импульсно-плазменного упрочнения рабочих поверхностей деталей и инструмента / Д.В. Минько, О.О. Кузнечик, Ю.А. Чивель, И.С. Никончук // Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин: сб. науч. трудов VII Междунар. науч.-техн. конф. В 3-х т. Т. III / под общ. ред. П.А. Витязя, С.А. Астапчика. – Новополоцк, 2009. – С. 60–64.

59. Обработка поверхности конструкционной среднеуглеродистой стали импульсными потоками воздушной плазмы / О.О. Кузнечик, Д.В. Минько, П.Н. Василевский, В.А. Зеленин, Ю.Н. Сараев // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: V Междунар. науч.-техн. конф. (Минск, 15-17 сентября 2010 г.): сб. материалов. В 3 кн. Кн. 2. Высокоэнергетические технологии получения и обработки материалов. Технологии и оборудование инженерии поверхностей / ред. коллегия: С.А. Астапчик (гл. ред.) [и др.]. – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2010. – С. 261–265.

60. Импульсно-плазменная установка и ее применение в обработке борированной поверхности легированной стали / О.О. Кузнечик, Д.В. Минько, А.А. Стефанович, А.Н. Чумаков, И.С. Никончук, Ю.Н. Сараев, В.С. Корко // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка: Материалы докладов 9-й международной научно-

технической конференции, Минск, Беларусь 29-30 сентября 2010 г. – Минск, 2010. – С. 288–290.

61. Белявин, К.Е. Опыт использования импульсных электрофизических технологий для получения пористых материалов и покрытий / К.Е. Белявин, Д.В. Минько // Пористые проницаемые материалы: технологии и изделия на их основе. Материалы докладов IV Международного симпозиума, 27-28 октября 2011 г. – Минск, 2011. – С. 114–131.

62. Минько, Д.В. Исследование динамики изменения температуры с помощью фотоэмиссионного пирометра в процессе электроимпульсного спекания порошков тугоплавких металлов / Д.В. Минько, О.О. Кузнецик // Приборостроение–2011: Материалы 4-й Международной научно-технической конференции. 16-18 ноября 2011 г. – Минск, 2011. – С. 116–118.

63. Kuznechik, O.O. Registration of spark plasma sintering temperature of titanium powders / O.O. Kuznechik, D.V. Minko, K.E. Belyavin // VII International Conference “Plasma Physics and Plasma Technology”. Contributed papers, vol. I. Minsk, Belarus, September 17-21, 2012. – Minsk, 2012. – P. 80–83.

64. Minko, D.V. Theoretical and experimental estimation of influence skin and pinch effects on spark plasma sintering process of powders / D.V. Minko, K.E. Belyavin, O.O. Kuznechik // VII International Conference “Plasma Physics and Plasma Technology”. Contributed papers, vol. I. Minsk, Belarus, September 17-21, 2012. – Minsk, 2012. – P. 164–167.

65. Pulsed plasma surface treatment of constructional steel in the air / I.S. Nikonchuk, A.N. Chumakov, O.O. Kuznechik, D.V. Minko // VII International Conference “Plasma Physics and Plasma Technology”. Contributed papers, vol. III. Minsk, Belarus, September 17-21, 2012. – Minsk, 2012. – P. 438–441.

66. Минько, Д.В. Разработка метода электроимпульсного спекания в вакууме оптически прозрачных стеклокомпозитов / Д.В. Минько, А.В. Парханович // Приборостроение–2013: Материалы 6-й Международной научно-технической конференции. 20-22 ноября 2013 г. – Минск, 2013. – С. 342–343.

67. Temperature variation with high voltage consolidation of titanium powder / O. Kuznechik, D. Minko, K. Belyavin, E. Grigoryev // European Congress and Exhibition on Powder Metallurgy. European PM Conference. Proceedings. Vol. 2: Gothenburg, Sweden. – Gothenburg, 2013. – P. 329–332.

68. Минько, Д.В. Преобразователи инфракрасного излучения на основе стеклокомпозитов, активированных ионами редкоземельных элементов / Д.В. Минько, К.Е. Белявин, Г.В. Шаронов // Приборостроение–2015: Материалы 8-й Международной научно-технической конференции. В 2 томах. Том 1. 25-27 ноября 2015 г. – Минск, 2015. – С. 190–191.

69. Минько, Д.В. Импульсные электрофизические методы получения композиционных материалов и модифицированных структур / Д.В. Минько, К.Е. Белявин, В.К. Шелег / Инновации в машиностроении: сборник трудов VII Международной научно-практической конференции / под ред. В.Ю. Блюменштейна. – Кемерово: КузГТУ, 2015. – С. 337–341.

70. Minko, D. Biomechanical properties of composite compact-porous titanium produced by electric discharge sintering / D. Minko, K. Belyavin, V. Sheleg // IOP Conf.

Series: Materials Science and Engineering, 2017. – V. 218. – № 012008; doi:10.1088/1757-899X/218/1/012008.

71. Минько, Д.В. Анизотропия свойств пористых материалов из сферических порошков титана при электроимпульсном воздействии / Д.В. Минько, К.Е. Белявин // Пористые проницаемые материалы: технологии и изделия на их основе: материалы 6-го Междунар. симп. (Минск 19-20 окт. 2017 г.) / Нац. акад. наук Беларуси [и др.]; ред. кол. А.Ф. Ильюшенко [и др.]. – Минск, 2017. – С. 218–234.

#### Тезисы докладов

72. Новая лазерная технология получения пористых порошковых изделий / К.Е. Белявин, Д.В. Минько, Ю.А. Чивель, В.К. Павленко // Современное материаловедение: достижения и проблемы. MMS–2005. Тезисы докладов международной конференции, Киев, Украина, 26-30 сентября 2005 г. / под ред. В.В. Скорохода. – Киев, 2005. – Т. 1. – С. 178–179.

73. Белявин, К.Е. Пористые контактные головки эндокардиальных электродов для электростимуляции сердца / К.Е. Белявин, В.В. Макеев, Д.В. Минько // Тезисы докладов V съезда кардиологов Республики Беларусь // Медицинские новости. – 2005. – № 8. – С. 29.

74. Hardening of the Porous Powder Titanium Material of Medical Purpose by Treatment by Electrical Discharge / К.Е. Belyavin, D.V. Minko, N.V. Reshetnikov, A.N. Mazurenko, G.G. Demchenkov // MetFoam 2007. Conference on Porous Metals and Metallic Foams. September 5-7, 2007, Montreal, Canada. Bookabstract. – Montreal, 2007. – P. 133.

75. Белявин, К.Е. Пористый порошковый титановый имплантационный материал с повышенными прочностными свойствами / К.Е. Белявин, Д.В. Минько, Н.В. Решетников // Международная конференция «HighMatTech–2007». Тезисы докладов / под ред. академика НАН Украины В.В. Скорохода. – Киев, 2007. – С. 203.

76. Минько, Д.В. Моделирование электроимпульсного нагрева в процессах получения материалов и покрытий на основе порошков тугоплавких металлов / Д.В. Минько, О.О. Кузнечик, К.Е. Белявин // Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий. Тезисы докладов 5-й международной конференции МЕЕ–2008. 22-26 сентября 2008 г. Большая Ялта, Жуковка, Автономная республика Крым, Украина. – Ялта, 2008. – С. 60.

77. Математическая модель электроразрядного спекания пористых порошковых материалов / К.Е. Белявин, Ю.Н. Гафо, Д.В. Минько, Н.В. Решетников // Наука – образованию, производству, экономике. Материалы 6-ой международной научно-технической конференции. В 3 томах. Том 1. – Минск, 2008. – С. 194.

78. Селективное лазерное спекание порошковых материалов из титановых сплавов / К.Е. Белявин, Д.В. Минько, Р.П. Быков, О.О. Кузнечик // Международный симпозиум «Перспективные материалы и технологии», Витебск, 25-29 мая 2009 г.: сборник тезисов / гл. ред. В.В. Рубаник. – Витебск, 2009. – С. 200–201.

79. Белявин, К.Е. Влияние давления подпрессовки на структуру порошковых материалов при электроконтактной обработке / К.Е. Белявин, О.О. Кузнечик, Д.В. Минько // Материалы 8-ой международной научно-технической конференции

«Наука – образованию, производству, экономике». В 4-х томах. Т. 1. – Минск, 2010. – С. 322.

80. Белявин, К.Е. Деформация металлических порошков под действием магнитного поля импульсного тока / К.Е. Белявин, О.О. Кузнечик, Д.В. Минько // Материалы 8-ой международной научно-технической конференции «Наука – образованию, производству, экономике». В 4-х томах. Т. 1. – Минск, 2010. – С. 323.

81. Электроимпульсное спекание пористых порошковых материалов / Д.В. Минько, К.Е. Белявин, В.К. Шелег, О.О. Кузнечик // Перспективные технологии консолидации материалов с применением электромагнитных полей. 2-й международный научный семинар. Тезисы докладов. Москва, 20–23 мая 2013 г. – Москва, 2013. – С. 28–30.

82. Белявин, К.Е. Упрочнение пористых порошковых материалов электрическим током / К.Е. Белявин, Д.В. Минько // Перспективные технологии консолидации материалов с применением электромагнитных полей. 3-й международный научный семинар. Тезисы докладов. Москва, 12–14 мая 2014 г. – Москва, 2014. – С. 49–51.

83. Минько, Д.В. Применение спекания электрическим током для получения изделий медицинского назначения / Д.В. Минько, К.Е. Белявин // Перспективные технологии консолидации материалов с применением электромагнитных полей. 3-й международный научный семинар. Тезисы докладов. Москва, 12–14 мая 2014 г. – Москва, 2014. – С. 51–52.

84. Минько, Д.В. Получение порошковых стеклокомпозиционных материалов электроимпульсным прессованием в вакууме / Д.В. Минько, К.Е. Белявин // Перспективные технологии консолидации материалов с применением электромагнитных полей. 4-й международный научный семинар. Тезисы докладов. Москва, 2–5 июня 2015 г. – Москва, 2015. – С. 28–31.

85. Минько, Д.В. Биомеханические свойства композиционного компактно-пористого титана, полученного методом электроимпульсного спекания / Д.В. Минько, К.Е. Белявин, В.К. Шелег // Перспективные технологии консолидации материалов с применением электромагнитных полей. 5-й международный научный семинар. Тезисы докладов. Москва, 29–31 августа 2016 г. – Москва, 2016. – С. 42–43.

86. Самосогласованная модель электроимпульсного упрочнения дисперсно-порошковых систем на основе тугоплавких металлов и самофлюсующихся сплавов / К.Е. Белявин, Д.В. Минько, В.К. Шелег, О.О. Кузнечик // Перспективные технологии консолидации материалов с применением магнитных полей. 6-й международный научный семинар. Тезисы докладов. Пансионат РАН «Звенигородский» Московская обл. 01–03 июня 2017 г. – Москва, 2017. – С. 33–34.

87. Белявин, К.Е. Импульсно-плазменное упрочнение рабочих поверхностей формообразующего инструмента из углеродистой стали / К.Е. Белявин, Д.В. Минько // Материалы 15-й Международной научно-технической конференции «Наука – образованию, производству, экономике». В 4-х томах. Т. 1. – Минск, 2017. – С. 436.

88. Минько, Д.В. Анизотропия структуры и свойств пористых материалов, полученных электроимпульсным спеканием сферических порошков титана / Д.В. Минько, К.Е. Белявин // Синтез и консолидация порошковых материалов:

Сборник тезисов Международной конференции (23–26 октября 2018 г., Черноголовка). – Москва, 2018. – С. 467–473.

89. Белявин, К.Е. Особенности технологии электроконтактного нанесения износостойких покрытий на внутреннюю поверхность стальных втулок / К.Е. Белявин, Д.В. Минько // Материалы 16-й Международной научно-технической конференции «Наука – образованию, производству, экономике». В 4-х томах. Т. 1. – Минск, 2018. – С. 337.

### Патенты

90. Способ восстановления непрерывности тела нижней челюсти после резекции: пат. ВУ 5058 / И.В. Залуцкий, А.Г. Жуковец, Д.В. Овчинников, К.Е. Белявин, Д.В. Минько. – Оpubл. 30.03.2003.

91. Дентальный имплантат для непосредственной имплантации: полз. модель ВУ 851 / К.Е. Белявин, Д.В. Минько, О.П. Чудаков, И.Ю. Федченко. – Оpubл. 30.06.2003.

92. Имплантат костный: полз. модель ВУ 1508 / К.Е. Белявин, Д.В. Минько, О.П. Чудаков, И.П. Кречотнев. – Оpubл. 30.09.2004.

93. Устройство для разравнивания поверхности порошковой засыпки: полз. модель ВУ 1664 / Ю.А. Чивель, Е.Л. Погудо, Д.В. Минько, В.К. Павленко. – Оpubл. 30.12.2004.

94. Установка для послыйного лазерного спекания порошковых материалов: полз. модель ВУ 1757 / К.Е. Белявин, Д.В. Минько, О.О. Кузнечик, Ю.А. Чивель, В.К. Павленко. – Оpubл. 30.03.2005.

95. Электроконтактная установка для электроимпульсной обработки порошковых материалов: полз. модель ВУ 2620 / К.Е. Белявин, Д.В. Минько, О.О. Кузнечик, Н.В. Решетников. – Оpubл. 30.04.2006.

96. Лазерная установка для высокотемпературной обработки порошковых материалов и покрытий: полз. модель ВУ 2621 / К.Е. Белявин, Д.В. Минько, О.О. Кузнечик, Р.П. Быков, Н.В. Решетников. – Оpubл. 30.04.2006.

97. Установка для обработки порошковых материалов высоковольтным электрическим разрядом: полз. модель ВУ 2622 / К.Е. Белявин, Д.В. Минько, О.О. Кузнечик, Н.В. Решетников. – Оpubл. 30.04.2006.

98. Машина контактной сварки: полз. модель ВУ 3242 / К.Е. Белявин, Д.В. Минько, Ю.Н. Гафо, О.О. Кузнечик, Н.В. Решетников, Р.П. Быков, И.Н. Власенко, А.О. Товпик. – Оpubл. 30.12.2006.

99. Установка порошковой лазерной стереолитографии: пат RU 2299787 / К.Е. Белявин, Д.В. Минько, О.О. Кузнечик, Ю.А. Чивель, В.К. Павленко. – Оpubл. 27.05.2007.

100. Способ фиксации отломков костей лицевого скелета при травматическом повреждении: пат. ВУ 9266 / И.В. Кречотнев, К.Е. Белявин, Д.В. Минько, О.П. Чудаков. – Оpubл. 30.06.2007.

101. Ускоритель плазмы: пат. ВУ 10941 / К.Е. Белявин, О.О. Кузнечик, Д.В. Минько, В.В. Хроленок. – Оpubл. 30.08.2008.

102. Фотозмиссионный пирометр для измерения температуры поверхности нагретого тела: пат. ВУ 10993 / К.Е. Белявин, Д.В. Минько, О.О. Кузнечик, К.Н. Каспаров, А.Б. Краснобаев. – Оpubл. 30.08.2008.

103. Способ получения пористого порошкового материала: пат. ВУ 11257 / К.Е. Белявин, Д.В. Минько, Н.В. Решетников, О.О. Кузнечик. – Оpubл. 30.10.2008.

104. Импульсно-периодический плазмотрон: пат. RU 2343651 / Ю.А. Чивель, И.С. Никончук, Д.В. Минько, О.О. Кузнечик. – Оpubл. 10.01.2009.

105. Фотоэмиссионное устройство для измерения температуры поверхности нагретого тела при быстропротекающих тепловых процессах: пат. ВУ 12525 / О.О. Кузнечик, Д.В. Минько, Ю.Н. Гафо, М.В. Голяков, К.Е. Белявин. – Оpubл. 30.10.2009.

106. Фотоэмиссионное устройство для измерения температуры поверхности нагретого тела при быстропротекающих тепловых процессах: пат. ВУ 12550 / О.О. Кузнечик, Д.В. Минько, Р.П. Быков, В.В. Хроленок, К.Е. Белявин. – Оpubл. 30.10.2009.

107. Имплантат для межтелового спондилодеза: пат. ВУ 12746 / К.Е. Белявин, Д.В. Минько, Н.В. Решетников, А.Н. Мазуренко. – Оpubл. 30.12.2009.

108. Способ изготовления твердосплавных изделий на основе карбида вольфрама: пат. ВУ 13641 / С.В. Побережный, К.Е. Белявин, Д.В. Минько, Н.В. Решетников. – Оpubл. 30.10.2010.

109. Пластина для остеосинтеза: полез. модель ВУ 6880 / Д.В. Минько, В.В. Барьяш. – Оpubл. 30.12.2010.

110. Импульсно-периодический плазмотрон: пат. ВУ 16022 / Д.В. Минько, О.О. Кузнечик. – Оpubл. 30.06.2012.

111. Устройство для электроимпульсного прессования порошков: пат. ЕАПО 026036 / Д.В. Минько, К.Е. Белявин, Т.В. Колонтаева. – Оpubл. 28.02.2017.

## РЭЗІЮМЭ

Мінько Дзмітрый Вацлававіч

**Тэарэтычныя і тэхналагічныя асновы атрымання  
функцыянальна-градыентных матэрыялаў  
імппульснымі электрафізічнымі метадамі**

**Ключавыя словы:** электрычны імпульс, лазернае выпраменьванне, імпульсная плазма, парашок, спяканне, марфалогія, кантакт, структура, тэмпература, фазавы ператварэнне, градыент, трываласць, мікрацвёрдасць

**Мэта працы:** распрацоўка тэарэтычных і тэхналагічных асноў атрымання функцыянальна-градыентных матэрыялаў з выкарыстаннем імпульсных электрафізічных метадаў для вырабаў з павышанымі эксплуатацыйнымі характарыстыкамі.

**Метады даследавання і апаратура:** матэматычнае і кампутарнае мадэляванне, вымярэнне тэмпературы метадам двухколернай піраметрыі і фотаэмісійным метадам, метады аптычнай фотаметрыі, металаграфічны, рэнтгенаструктурны, рэнтгенафазавы, электронаграфічны аналізы, метады кантактнай прафіламетрыі, стандартныя і арыгінальныя метадыкі даследаванняў фізічных і біямеханічных уласцівасцяў.

**Атрыманя вынікі і іх навізна:** распрацаваны фізіка-матэматычныя мадэлі размеркавання цеплавой энергіі ў часціцах, пластах часціц парашка і ў спечаным парашковым матэрыяле, якія упершыню дазваляюць вызначыць механізмы структурна-фазавых ператварэнняў, якія прыводзяць да фарміравання градыентаў структуры і уласцівасцяў ў парашковых матэрыялах пры імпульсным электрафізічным уздзеянні. Створана тэхналагічнае абсталяванне, метадыкі даследавання энергасілавых параметраў і тэмпературы. Выяўлены асаблівасці фарміравання і накіраванага змянення структуры і уласцівасцяў, распрацаваны метады кіравання фазавымі і структурнымі ператварэннямі ў парашковых матэрыялах пры электраімпульсным і імпульсным лазерным уздзеянні. Вызначаны заканамернасці мадыфікавання структуры, фазавыя складу, фізіка-механічных уласцівасцяў і шурпатаці паверхні вугляродзістых сталей пры імпульсным плазменным уздзеянні ў паветры пры атмасферным ціску.

**Рэкамендацыі па выкарыстанні:** распрацаваны і ўкаранены ў вытворчасць на прадпрыемствах Беларусі, Расіі і Украіны новыя тэхналогіі атрымання функцыянальна-градыентных матэрыялаў і вырабаў з іх біямедыцынскага, электратэхнічнага і інструментальнага прызначэння. Распрацаваны вырабы, тэхналагічнае абсталяванне, прылады і спосабы атрымання функцыянальна-градыентных матэрыялаў абаронены 19 патэнтамі Рэспублікі Беларусь, двума патэнтамі Расійскай Федэрацыі і адным Еўразійскім патэнтам. Агульны аб'ём рэалізаванай таварнай і навукова-тэхнічнай прадукцыі склаў 700 тыс. долараў ЗША.

**Галіна выкарыстання:** медыцына, біялогія, электратэхніка, электроніка, энергетыка, машынабудаванне.

## РЕЗЮМЕ

Минько Дмитрий Вацлавович

**Теоретические и технологические основы получения функционально-градиентных материалов импульсными электрофизическими методами**

**Ключевые слова:** электрический импульс, лазерное излучение, импульсная плазма, порошок, спекание, морфология, контакт, структура, температура, фазовое превращение, градиент, прочность, микротвердость

**Цель работы:** разработка теоретических и технологических основ получения функционально-градиентных материалов с использованием импульсных электрофизических методов для изделий с повышенными эксплуатационными характеристиками.

**Методы исследования и аппаратура:** математическое и компьютерное моделирование, измерение температуры методом двухцветной пирометрии и фотоэмиссионным методом, методы оптической фотометрии, металлографический, рентгеноструктурный, рентгенофазовый, электронографический анализы, методы контактной профилометрии, стандартные и оригинальные методики исследований физических и биомеханических свойств.

**Полученные результаты и их новизна:** разработаны физико-математические модели распределения тепловой энергии в частицах, слоях частиц порошка и в спеченном порошковом материале, впервые позволившие установить механизмы структурно-фазовых превращений, приводящих к формированию градиентов структуры и свойств в порошковых материалах при импульсном электрофизическом воздействии. Создано технологическое оборудование, методики исследования энергосиловых параметров и температуры. Установлены особенности формирования и направленного изменения структуры и свойств, разработаны методы управления фазовыми и структурными превращениями в порошковых материалах при электроимпульсном и импульсном лазерном воздействии. Определены закономерности модифицирования структуры, фазового состава, физико-механических свойств и шероховатости поверхности углеродистых сталей при импульсном плазменном воздействии в воздухе при атмосферном давлении.

**Рекомендации по использованию:** разработаны и внедрены в производство на предприятиях Беларуси, России и Украины новые технологии получения функционально-градиентных материалов и изделий из них биомедицинского, электротехнического и инструментального назначения. Разработанные изделия, технологическое оборудование, устройства и способы получения функционально-градиентных материалов защищены 19 патентами Республики Беларусь, двумя патентами Российской Федерации и одним Евразийским патентом. Общий объем реализованной товарной и научно-технической продукции составил 700 тыс. долларов США.

**Область применения:** медицина, биология, электротехника, электроника, энергетика, машиностроение.

## SUMMARY

Minko Dzmitry Vatslavavich

### **Theoretical and technological basis for obtaining functionally graded materials using pulsed electrophysical methods**

**Keywords:** electric pulse, laser beam, pulsed plasma, powder, sintering, morphology, contact, structure, temperature, phase transformation, gradient, strength, microhardness.

**Purpose of work:** development of theoretical and technological fundamentals for the production of functionally graded materials using pulsed electrophysical methods to obtain products with enhanced operational characteristics.

**Methods of research and the equipment:** mathematical and computer modeling, temperature measurement using two-colour pyrometry and photoemission methods, optical photometry methods, metallographic, X-ray diffraction, X-ray phase, electron diffraction analysis, contact profilometry methods, standard and individual methods for physical and biomechanical properties studies.

**The results obtained and their novelty:** physico-mathematical models of thermal energy distribution in particles, layers of powder particles and sintered powder material, which made it possible for the first time to determine mechanisms of structural-phase transformations leading to the formation of structure and property gradients in powder materials under pulsed electrophysical exposure, were developed. Necessary technological equipment, power parameters and temperature research methods have been created. The features of the formation and directional changes in the powder materials structure and properties were established, methods for controlling phase and structural transformations in powder materials under electric pulse and pulsed laser exposure were developed. Patterns of carbon steels structure modification, phase composition, physico-mechanical properties and surface roughness under pulsed plasma exposure in the air at atmospheric pressure were determined.

**Application recommendations:** new technologies for the production of functionally graded materials and derived products for biomedical, electrical and manufacturing purposes were developed and introduced into production at enterprises in the Republic of Belarus, Russia and Ukraine. The developed products, technological equipment, devices and methods for producing functionally graded materials are protected by 19 patents of the Republic of Belarus, two patents of the Russian Federation and one Eurasian patent. The total volume of commercial, scientific and technical products is amounted to 700 thousand US dollars.

**Field of application:** medicine, biology, electrical engineering, electronics, power engineering, mechanical engineering.