

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 621.792.4

**МОНИЧ**  
Сергей Геннадьевич

**ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ  
ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНОВЫХ СТОМАТОЛОГИЧЕСКИХ  
ИМПЛАНТАТОВ**

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности 05.02.07 – Технология и оборудование механической  
и физико-технической обработки

Минск 2017

Научная работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете

Научный руководитель

**Киселев Михаил Григорьевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Конструирование и производство приборов» Белорусского национального технического университета

Официальные оппоненты:

**Девойно Олег Георгиевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий НИИЛ плазменных и лазерных технологий НИЧ Белорусского национального технического университета;

**Сморыго Олег Львович**, кандидат технических наук, доцент, заведующий отделением пористых материалов ГНУ «Институт порошковой металлургии»

Оппонирующая организация

ГНУ «Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси»

Защита состоится 29 сентября 2017 г. в 14<sup>00</sup> часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.03 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, город Минск, проспект Независимости, 65, корпус 6, аудитория 419-б, телефон ученого секретаря: (+375 17) 292-24-04.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан «24» августа 2017 г.

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

О.Г. Девойно

© Монич С.Г., 2017

© Белорусский национальный  
технический университет, 2017

## ВВЕДЕНИЕ

Имплантаты относятся к изделиям медицинского назначения и предназначены для замещения и восстановления функций утраченных органов человека. Наиболее широкое применение имплантаты нашли в стоматологии для устранения дефектов зубных рядов. Изготавливаются такие имплантаты из чистого титана или его сплавов ВТ1-0 ВТ1-00. Условия их эксплуатации связаны с протеканием процессов взаимодействия поверхности имплантата с биологическими жидкостями и тканями организма, в результате чего должно быть обеспечено его прочное закрепление, т.е. интеграция в организм человека. На условия протекания этого процесса оказывают влияние характеристики состояния поверхности имплантата, в частности, параметры ее шероховатости, смачиваемость биологическими жидкостями, величина свободной энергии, адсорбционная способность и емкость, а также прочность соединения с костной тканью. В свою очередь, значения этих характеристик и диапазон их варьирования зависят от применяемой технологии окончательной обработки (модифицирования) поверхности имплантата. В настоящее время из множества известных способов модифицирования поверхности титановых имплантатов наибольшее применение нашла струйно-абразивная обработка. Вместе с тем, представляется перспективным использовать для модифицирования поверхности этих изделий способы, обеспечивающие формирование на ней регулярного или частично регулярного микрорельефа, который, как известно, положительно влияет на ее эксплуатационные показатели. К числу таких ранее не применяемых способов модифицирования поверхности титановых имплантатов следует отнести электроэрозионную обработку, при которой формирование частично регулярного микрорельефа с требуемыми параметрами достигается за счет управляемого расположения на поверхности лунок, полученных в результате последовательного воздействия на нее единичных электрических разрядов. Однако, на сегодня отсутствуют систематизированные научные данные о влиянии предлагаемого способа модифицирования поверхности титановых имплантатов на характеристики ее состояния, ответственные за условия протекания процесса их интеграции. В этой связи, разработка технологии электроэрозионного модифицирования поверхности титановых стоматологических имплантатов с формированием на ней частично регулярного микрорельефа, обеспечивающей повышение ее характеристик, положительно влияющих на протекание процесса интеграции имплантата, является актуальной научно-технической задачей, решение которой имеет важное практическое значение для производства данных изделий.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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

Ряд результатов, составляющих содержание данной диссертационной работы, получены в рамках выполнения заданий ГПНИ «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограмма «Плазменные и пучковые технологии» гранты ГБ 13-15 «Повышение биомеханических характеристик металлических имплантатов путем модифицирования их поверхности за счет совмещенной электроконтактной и виброударной обработки» (№ ГР 20130769, сроки выполнения 02.01.2013 – 31.12.2013), ГБ 14-02 «Разработать технологию модифицирования поверхности металлических имплантатов с применением виброударной электроконтактной обработки» (№ ГР 20140472, сроки выполнения 02.01.2014 – 31.12.2014) и ГБ 15-15 «Влияние электроконтактной модификации винтовой поверхности металлических стоматологических имплантатов на условия их закрепления в костной ткани» (№ ГР 20150515, сроки выполнения 02.01.2015 – 31.12.2015).

### Цель и задачи исследования

Целью исследований является разработка технологии электроэрозионного модифицирования (далее модифицирования) поверхности титановых стоматологических имплантатов с формированием на ней частично регулярного микрорельефа, обеспечивающей повышение характеристик ее состояния, положительно влияющих на протекание процесса их интеграции в организме человека.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи:

- разработать способ формирования на металлической поверхности частично регулярного микрорельефа с использованием энергии электрических разрядов и создать экспериментальное устройство для его реализации;
- исследовать влияние энергии электрического разряда и условий его протекания на форму и размеры единичной лунки, получаемой на поверхности титанового образца;
- исследовать влияние электрических и кинематических режимов модифицирования на высотные и шаговые параметры шероховатости поверхности титанового образца с частично регулярным микрорельефом;
- разработать методику проведения экспериментальных исследований по оценке влияния режимов модифицирования поверхности титановых образцов на характеристики ее состояния, влияющие на процесс интеграции имплантата в организме человека;
- провести экспериментальные исследования влияния режимов модифицирования поверхности титановых образцов на характеристики ее состояния, по результатам которых определить режимы выполнения обра-

ботки, обеспечивающие наибольшие значения этих характеристик состояния поверхности, положительно влияющих на протекание процесса интеграции имплантата в организме человека;

- разработать и внедрить технологический процесс модифицирования поверхности титановых винтовых стоматологических имплантатов, а также установку для его реализации.

#### **Научная новизна**

1. Научно обоснован способ формирования на металлической поверхности частично регулярного микрорельефа с использованием энергии электрических разрядов, представляющего собой совокупность закономерно расположенных и не перекрывающих друг друга лунок, близких по форме к сферической, основанный на локализации места воздействия на нее электрического разряда и управляемого ее перемещения на величину требуемого шага расположения лунок за промежуток времени между двумя последовательными разрядами.

2. Установлено, что полученная математическая модель позволяет описать изменение параметров профиля сечения единичной лунки (диаметр и глубина лунки, диаметр и высота наплывов металла по ее краю) в зависимости от энергии разряда, удельной теплоты испарения металла поверхности и его плотности, позволяющая представить геометрическую модель формирования систематической составляющей микропрофиля модифицированной поверхности с частично регулярным микрорельефом.

3. Разработаны математические модели, описывающие изменение высотных и шаговых параметров шероховатости модифицированной поверхности с частично регулярным микрорельефом в зависимости от энергии разряда и коэффициента расположения лунок, позволяющие установить значения электрических и кинематических режимов выполнения операции (напряжение накопительного конденсатора и его емкость, величина перемещения обрабатываемой поверхности за время между двумя последовательными разрядами и частота их следования), обеспечивающие формирование на модифицируемой поверхности заданной шероховатости.

4. Установлены рациональные режимы обработки поверхности образцов титановых имплантатов, обеспечивающие наибольшие значения ее характеристик, положительно влияющих на протекание процесса интеграции имплантата в организме человека.

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

1. Результаты анализа условий формирования на металлической поверхности частично регулярного микрорельефа с использованием энергии электрических разрядов, позволившие научно обосновать способ модифи-

цирования поверхности образцов титановых имплантатов и создать экспериментальное устройство для его реализации.

2. Результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния энергии электрического разряда и условий его протекания на форму и размеры единичной лунки с учетом образовавшихся по ее краю наплывов металла, позволившие разработать геометрическую модель формирования систематической составляющей микропрофиля модифицированной поверхности с частично регулярным микрорельефом.

3. Результаты теоретических исследований влияния энергии электрического разряда и коэффициента расположения лунок на высотные и шаговые параметры шероховатости модифицированной поверхности, позволившие установить технологические режимы выполнения операции, обеспечивающие формирование на ней заданной шероховатости с частично регулярным микрорельефом.

4. Результаты экспериментальных исследований влияния режимов модифицирования поверхности образцов титановых имплантатов на ее шероховатость, величину свободной энергии, смачиваемость плазмой крови человека, адсорбционную емкость по отношению к ней, адсорбционную способность и на прочность соединения с имитатором костной ткани, позволившие установить рациональные режимы выполнения операции, обеспечивающие наибольшие значения указанных характеристик модифицированной поверхности, положительно влияющих на процесс интеграции имплантата в организме человека.

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

Основные научные и практические результаты диссертации, положения, выносимые на защиту, получены лично соискателем. Им разработана технологическая схема модифицирования поверхности, обеспечивающая управляемое расположение на ней лунок за счет последовательного воздействия единичных разрядов; получена зависимость, описывающая профиль сечения единичной лунки, а также зависимости, позволяющие рассчитать высотные и шаговые параметры шероховатости модифицированной поверхности; разработаны соответствующие методики и проведены экспериментальные исследования по оценке влияния режимов и условий выполнения операции модифицирования поверхности образцов титановых имплантатов на характеристики ее состояния, влияющие на процесс интеграции имплантата; определены рациональные режимы и условия выполнения операции, обеспечивающие наибольшие значения этих характеристик модифицированной поверхности; разработана технология и создано оборудование модифицирования поверхности титановых винтовых стоматологических имплантатов.

Участие соавторов в совместных работах: М.Г. Киселев, как научный руководитель, оказывал консультационную и практическую помощь на всех этапах выполнения настоящей работы; А.В. Дроздов оказал консультационную помощь при разработке геометрической модели процесса формирования шероховатости на модифицированной поверхности; П.С. Богдан участвовал в проведении экспериментов по модифицированию поверхности саморезов; М.В. Макаренко и С.Г. Пашкевич участвовали в проведении экспериментов по оценке адсорбционной способности поверхности образцов имплантатов.

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

Основные положения и результаты работы представлены на следующих международных научно-технических конференциях: Международная научно-техническая конференция «Наука – образованию, производству, экономике» (Минск, 2013-2016 гг.), Международная научно-техническая конференция «Приборостроение» (Минск, 2012-2016 гг.), Международная научно-техническая конференция «Современные методы и технологии создания и обработки материалов» (Минск, 2013- 2016 гг), Международная научно-техническая конференция «Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка» (Минск, 2013, 2016).

Разработанная технология модифицирования поверхности титановых стоматологических имплантатов апробирована в производственных условиях ООО «Верлайн».

#### **Опубликование результатов диссертации**

Основные результаты диссертации опубликованы в 18 научных работах, в том числе в 11 статьях, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, общим объемом 6,2 авторских листа, 5 материалах и тезисах докладов научных конференций, получен 1 патент на полезную модель и 2 патента на изобретение.

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

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Полный объем диссертации 142 страницы. Работа содержит 118 страниц машинописного текста, 32 рисунка на 10 страницах, 12 таблиц на 5 страницах, список использованных источников в количестве 128 наименований на 13 страницах, включая 19 авторских работ, и 3 приложений на 13 страницах.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены ее цель и задачи исследования.

**В первой главе** проведен анализ применяемых способов модифицирования поверхности титановых имплантатов, обоснована перспективность формирования на ней частично регулярного микрорельефа с использованием энергии электрических разрядов.

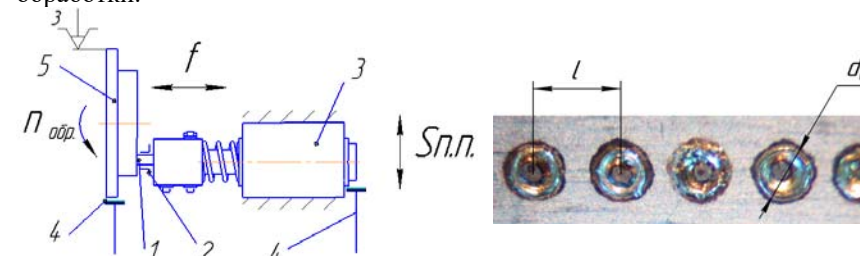
Наибольшее применение титановые имплантаты нашли в стоматологии для устранения дефектов зубных рядов. На условия вживления, т.е. интеграции имплантата в организме человека, существенное влияние оказывают характеристики состояния его поверхности: параметры ее шероховатости, смачиваемость биологическими жидкостями, адсорбционная способность и емкость при взаимодействии с ними, а также прочность соединения с костной тканью. Значения этих характеристик и диапазон их варьирования зависят от применяемой технологии окончательной обработки (модифицирования) поверхности имплантата. На сегодня эта обработка может осуществляться различными способами: химическим оксидированием и химическим травлением, микродуговым оксидированием, струйно-абразивной обработкой, плазменным напылением титанового порошка и порошка гидроксиапатита, а также лазерной обработкой. Во всех случаях важно получить поверхность с развитым микрорельефом в виде множества углублений или пор, которые благоприятно влияют на протекание процесса интеграции имплантата. Наибольшее применение нашла струйно-абразивная обработка, которая наряду с простотой реализации обеспечивает приемлемый уровень характеристик состояния модифицированной поверхности. Последняя представляет собой совокупность перекрывающихся друг друга углублений, полученных в результате хаотического ударного воздействия на материал поверхности абразивных частиц, что исключает возможность управления расположением этих углублений на обрабатываемой поверхности. Чтобы обеспечить на ней не хаотическое, а управляемое расположение углублений следует использовать способы, позволяющие получать регулярный или частично регулярный микрорельеф, который, как известно, способствует повышению эксплуатационных показателей поверхности. На сегодня для получения поверхности детали с таким микрорельефом используют сверление по разметке или в кондукторе, вихревое точение или фрезерование, ударное виброобкатывание, вибродинамическое накатывание и травление через трафарет. Однако для обработки поверхности титановых стоматологических имплантатов в силу их малых размеров, невысокой жесткости и наличия винтовых канавок применение указанных способов ее модифицирования или весьма затруднено, либо экономически нецелесообразно. В этой связи, представляется перспективным использовать для модифицирования поверхности указанных изделий

способ электроэрозионной обработки, при котором формирование частично регулярного микрорельефа с требуемыми параметрами достигается путем управляемого расположения на ней углублений (лунк), полученных в результате последовательного воздействия на нее единичных электрических разрядов. Однако, на сегодня практически отсутствуют систематизированные научные данные о влиянии предлагаемого способа модифицирования поверхности титановых имплантатов на характеристики ее состояния, ответственные за условия протекания процесса их интеграции в организме человека.

**Вторая глава** посвящена методике проведения экспериментальных исследований. В ходе их выполнения использовались образцы имплантатов двух видов: в виде шайбы и цилиндра, изготовленные из титанового сплава ВТ1-0. На основе анализа параметров частично регулярного микрорельефа определены условия его формирования на поверхности образцов путем использования энергии электрических разрядов. В этом случае необходимо, во-первых, локализовать место воздействия на нее электрического разряда, и соответственно, место формирования лунки, а во-вторых, обеспечить управляемое перемещение поверхности относительно электрода-инструмента на требуемую величину шага между лунками, полученными в результате последовательного воздействия на нее электрических разрядов. Для обеспечения этих условий (рисунок 1, а) предложено в качестве электрода-инструмента использовать тонкую (диаметром 0,2-0,3 мм) проволоку из сплава ВТ1-0, которая, благодаря малой площади рабочей поверхности, позволяет локализовать зону прохождения разряда, а применение кондукторной втулки, в которой она установлена по скользящей посадке, обеспечивает точное позиционирование место его воздействия на обрабатываемую поверхность. С целью прерывания электрической цепи, т.е. формирования разрядов, электроду-инструменту с помощью электромагнита сообщаются колебания с частотой  $f$ , направленные перпендикулярно обрабатываемой поверхности, а за время между двумя последовательными разрядами, она перемещается относительно электрода-инструмента на величину требуемого шага между лунками. Получаемый в данном случае частично регулярный микрорельеф (рисунок 1, б) характеризуется диаметром  $d_{л}$  и глубиной  $h_{л}$  лунки, расстоянием  $l$  между центрами соседних лунок, коэффициентом их расположения  $\beta_p = l/d_{л}$  и количеством лунок  $N$  на поверхности площадью 1 мм<sup>2</sup>. На базе настольного токарного станка мод. Т-28 создано экспериментальное устройство, позволяющее осуществлять электроэрозионное модифицирование поверхности образцов с формированием на ней частично регулярного микрорельефа.

В ходе проведения экспериментов напряжение накопительного конденсатора  $U$  изменялось от 60 до 110 В, его емкость  $C$  – от 180 до 450 мкФ, частота прерывания электрической цепи  $f$  была постоянной и

составляла 1,4 Гц, частота вращения образца  $n_{обр}$  варьировалась, исходя из значения коэффициента расположения лунок  $\beta_p$ . В одной серии экспериментов модифицирование осуществлялась на воздухе, а в другой – с применением дистиллированной воды, которая капельно подавалась в зону обработки.

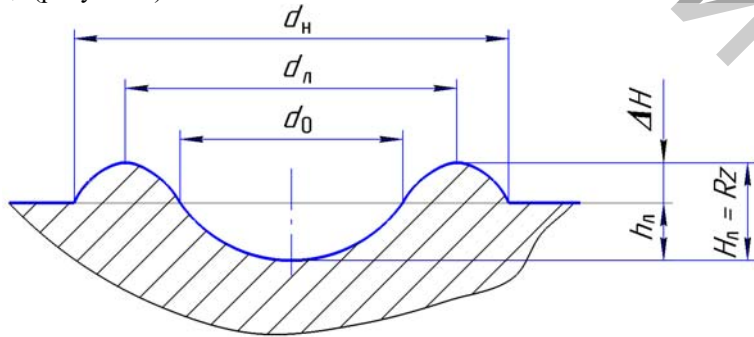


# # а б  
1 – проволочный электрод-инструмент; 2 – кондукторная втулка;  
3 – электромагнит; 4 – токоподводящие контакты;  
5 – обрабатываемый образец

**Рисунок 1. – Технологическая схема электроэрозионного модифицирования поверхности образцов (а) и фотография (увеличение 10<sup>х</sup>), полученного на ней частично регулярного микрорельефа (б)**

Измерение параметров шероховатости поверхности образцов проводилось с помощью профилометра-профилографа Taylor Hobson; смачиваемость поверхности оценивалась методом свободно лежащей капли с определением значения расчетного краевого угла смачивания  $\theta_{расч.}$ ; величина ее свободной энергии оценивалась методом Кельвина по значению контактной разности потенциалов (КРП). Определение адсорбционной емкости исследуемой поверхности образцов осуществлялась с помощью разработанного оригинального способа, основанного на использовании процедуры его центрифугирования. Адсорбционная способность оценивалась путем помещения образцов в раствор человеческого сывороточного альбумина (ЧСА), конфлюэнтность – путем помещения образцов в раствор с фибробластами крови человека. Разработана конструкция имитатора костной ткани с использованием пемзы, которая по своей структуре, в частности, пористости и размеру пор аналогична губчатой кости человека. Создан испытательный стенд для определения прочностных показателей соединения имитатора костной ткани с модифицированной поверхностью образца имплантата, при проведении его испытаний на сдвиг и на отрыв. Приведена статистическая обработка результатов экспериментальных данных.

**Третья глава** посвящена теоретико-экспериментальным исследованиям влияния режимов и условий модифицирования поверхности образца на параметры формируемой на ней шероховатости. На основании анализа основных стадий протекания процесса однократного электроконтактного взаимодействия электрода-инструмента с обрабатываемой поверхностью и результатов экспериментов установлено, что определяющее влияние на форму и размеры получаемого на поверхности образца следа обработки оказывает стадия пробоя межэлектродного промежутка (МЭП) длительностью  $\sim 40$  мкс, завершающаяся формированием на ней лунки, по форме близкой к сферической, имеющей по краю наплывы металла. Получены и проанализированы экспериментальные данные, отражающие влияние энергии электрического разряда и условий его протекания на геометрические параметры лунки, сформированной на полированной поверхности образца (рисунок 2).



**Рисунок 2.** – Схематичное представление профиля сечения единичной лунки

В частности, на диаметр лунки в плане  $d_n$ , ее глубину  $H_n$ ; диаметр наплывов металла  $d_n$  по ее краю и их высоту  $\Delta H$ ; радиус лунки  $r_0 = d_0/2$  и ее глубину  $h_n$  относительно исходного положения поверхности, а также на значения коэффициентов  $k_L = r_0/h_n$  и  $k_H = (d_n - 2r_0)/h_n$ , соответственно, характеризующих форму лунки и форму наплывов металла по ее краю. Установлено, что с повышением энергии электрического разряда с 0,5 до 4,5 Дж размеры указанных параметров лунки увеличиваются. В частности, значение  $r_0$  возрастает с 251 до 325,  $h_n$  – с 12 до 24,  $d_n$  – с 542 до 1252,  $\Delta H$  – с 20 до 50 мкм. При этом значение коэффициента  $k_L$  снижается с 12 до 6, т.е. увеличение глубины лунки происходит более интенсивно, чем ее радиуса, а значение коэффициента  $k_H$  наоборот – возрастает с 5 до 8, т.е. увеличение ширины наплывов металла опережает возрастание их высоты. Их наибольшим значениям соответствует обработка на воздухе, а при использовании дистиллированной воды размеры лунок оказываются в среднем на 5–6 % меньше.

Исходя из установленных значений коэффициентов  $k_L$  и  $k_H$  и результатов экспериментов получена аналитическая зависимость, описывающая профиль сечения получаемой лунки, учитывающая энергию электрического разряда  $E = CU^2/2$ , удельную теплоту испарения металла  $L$  и его плотность  $\rho$ :

$$S = a \cdot \sqrt[3]{\frac{CU^2 k_L}{2\pi\rho L \cdot \left(4,5 - \frac{1}{3k_L}\right)}} \cdot \sin(k\theta) / \theta,$$

где  $S$  и  $\theta$  – координаты произвольной точки, фиксирующей данную траекторию;  $a$  – коэффициент, зависящий от условий обработки ( $a=0,44$  – при модифицировании на воздухе и  $a=0,32$  – с применением дистиллированной воды);  $k_L$  – коэффициент формы лунки ( $k_L = 12$  при  $E = 0,5$  Дж и  $k_L = 6$  при  $E=4,5$  Дж);  $k$  – коэффициент, зависящий от энергии электрического разряда  $k=2,8$  – для  $E=0,5$  Дж,  $k=3,3$  – при  $E=2,0$  Дж и  $k=4,0$  – при  $E=4,5$  Дж.

С использованием этой зависимости, а также сделанных допущений (лунки имеют одинаковые размеры и расположены на абсолютно гладкой исходной поверхности с коэффициентом расположения лунок  $\beta_p$  большим либо равном 1) разработана геометрическая модель формирования систематической составляющей профиля модифицированной поверхности, на основе которой, а также результатов экспериментов получены формулы для расчета высотного  $Rz$  и шагового  $Sm$  параметров шероховатости модифицированной поверхности с частично регулярным микрорельефом при различных режимах и условиях выполнения операции.

На основе геометрического моделирования различного расположения лунок на гладкой поверхности в форме квадрата площадью 1 мм<sup>2</sup> получены и проанализированы теоретические зависимости, отражающие влияние параметров частично регулярного микрорельефа на изменение ее площади  $S_n$  и объема лунок  $Q_n$ . Показано, что наибольшие значения  $S_n$  и  $Q_n$  обеспечиваются при формировании микрорельефа со следующими параметрами  $d_n = 0,5$  мм;  $N=4$  и  $\beta_p = 1$ . С учетом этих данных рассчитаны режимы электроэрозионного модифицирования поверхности титана ( $U = 84$ В;  $C = 450$  мкФ;  $l = 500$  мкм), позволяющие получить на ней частично регулярный микрорельеф, параметры которого обеспечивают наибольшие значения площади и объема лунок.

**В четвертой главе** представлены результаты экспериментальных исследований влияния режимов и условий модифицирования поверхности образцов на исследуемые характеристики ее состояния. Установлено, что с увеличением энергии электрического разряда значения параметров  $Rz$  и  $Sm$  шероховатости образцов возрастают. Так при модифицировании на возду-

хе с повышением  $U$  с 60 до 110 В ( $C = 400$  мкФ) значение  $Rz$  увеличилось с 43,5 до 56,5 мкм и  $Sm$  - с 290 до 420 мкм. Использование дистиллированной воды приводит к снижению как высотных, так и шаговых параметров шероховатости поверхности образцов в среднем, соответственно, на 8 и 10 %.

Наименьшим значением контактной разности потенциалов (КРП=32 мВ), т.е. наименьшей величиной свободной энергии, характеризуется поверхность образца в ее исходном состоянии (после точения) при  $Rz = 6,4$  мкм и  $Sm = 6,4$  мкм. В результате ее струйно-абразивной обработки значение КРП несколько возрастает, достигая 35 мВ. Наибольшее значение КРП=156 мВ наблюдается после модифицирования поверхности образцов на воздухе при  $U = 110$  В и  $C = 400$  мкФ и несколько меньшим (КРП = 105 мВ) – при использовании дистиллированной воды. Наименьшей смачиваемостью плазмой крови человека ( $\theta_{расч.} = 54,3^\circ$ ) обладает поверхность образца в исходном состоянии. После ее струйно-абразивной обработки значение  $\theta_{расч.}$  снизилось до  $17,9^\circ$ , т.е. смачиваемость поверхности повысилась. В результате модифицирования по мере увеличения шероховатости поверхности образца ее смачиваемость возрастает, достигая своего наибольшего значения ( $\theta_{расч.} = 7,1^\circ$ ) при  $Rz = 55-60$  мкм и  $Sm = 460-480$  мкм. Установлено, что по сравнению с полированной поверхностью образцов ( $Rz = 1,15-1,30$  мкм), а также после ее струйно-абразивной обработки ( $Rz = 11-11,5$  мкм), применение модифицирования ( $Rz = 47,5-50$  мкм) обеспечивает наибольшее значение удельной адсорбционной емкости  $q$  поверхности при взаимодействии с плазмой крови человека. Так, значение  $q$  составило  $0,0040$  мг/мм<sup>2</sup>, против,  $0,0025$  и  $0,0020$  мг/мм<sup>2</sup> соответственно, после струйно-абразивной обработки и на полированной поверхности образца. Наибольшей адсорбционной способностью при взаимодействии с раствором человеческого сывороточного альбумина (ЧСА) обладает поверхность образца после ее модифицирования ( $Rz = 44$  мкм;  $Sm = 384$  мкм). В этом случае приращение массы цилиндрического образца диаметром 5 мм и длиной 20 мм за 48 часов составило 20 мкг против 5 мкг на поверхности образца после ее струйно-абразивной обработки, а на полированной поверхности образца адсорбции ЧСА не наблюдалось. Исследования на конглоэнтность (отношение площади, занимаемой клетками к площади поверхности, на которой они растут) показали, что ее значение у поверхности образца после модифицирования ( $Rz = 46$  мкм;  $Sm = 390$  мкм) составляет 70 %, против 7 % у поверхности, подвергнутой струйно-абразивной обработке, а значение жизнеспособности (процентное соотношение живых клеток к их общему количеству) у поверхности образца после модифицирования составляет 95 %, против 10 % у поверхности после ее струйно-абразивной обработки.

На рисунке 3 представлены экспериментальные зависимости напряжения отрыва поверхности образца от имитатора костной ткани при испытаниях соединения на сдвиг и на отрыв от значения параметра  $Rz$  ее шероховатости.

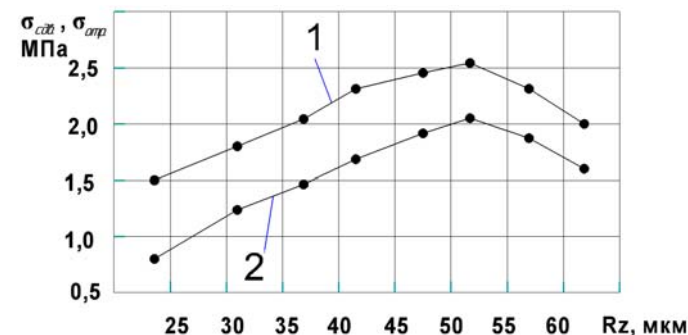


Рисунок 3. – Зависимость напряжения отрыва поверхности образца на сдвиг (кривая 1) и на отрыв (кривая 2) от имитатора костной ткани от значения параметра  $Rz$  ее шероховатости

Исходя из их анализа, установлен оптимальный диапазон параметров шероховатости поверхности образцов после ее модифицирования ( $Rz = 47,5-52,5$  мкм;  $Sm = 410-504$  мкм), при котором обеспечивается наибольшая прочность ее соединения с имитатором костной ткани. В этом случае напряжение сдвига ( $\sigma_{сдв.}$ ) и отрыва ( $\sigma_{отр.}$ ) соответственно составляют 2,58 и 2,06 МПа, которые в 5,7 раза превосходят аналогичные показатели, полученные при использовании поверхности образцов после струйно-абразивной обработки.

На основании обобщенного анализа полученных экспериментальных данных определены режимы и условия выполнения модифицирования, обеспечивающие, в сравнении со струйно-абразивной обработкой, повышение характеристик ее состояния, положительно влияющих на протекание процесса интеграции имплантата в организме человека. В частности, напряжение накопительного конденсатора должно составлять  $U=75-85$  В при его емкости  $C=350-400$  мкФ; прямая полярность;  $\beta_p=1,0-1,1$  и применение дистиллированной воды.

**Пятая глава** посвящена разработке технологии электроэрозионного модифицирования поверхности титановых винтовых стоматологических имплантатов, представляющих собой цилиндр с резьбой (рисунок 4, а), который ввинчивается в кость челюсти.

В ходе проведенных экспериментальных исследований с использованием винтовых титановых имплантатов было установлено, что при модифицировании их исходной поверхности с коэффициентом расположения

лунок  $\beta_p$  больше единицы за счет формирования по их краям наплывов металла (рисунок 4, б) исходный диаметр изделий увеличивается в среднем на 2–3 %. Показано, что эти наплывы металла, при вкручивании имплантата выполняют роль своеобразных конструктивных элементов, вызывающих снижение, по сравнению с имплантатами в исходном состоянии, прикладываемого момента сил, а при его выкручивании они служат дополнительными антиротационными элементами, которые приводят к увеличению соответствующего момента сил, т.е. препятствуют выкручиванию.

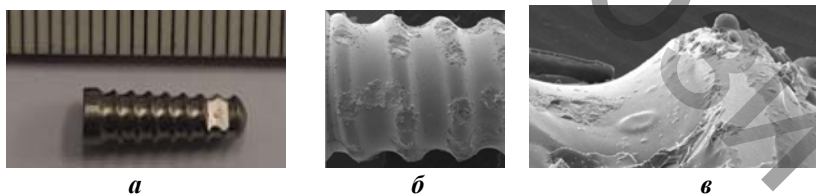


Рисунок 4. – Фотография винтового стоматологического имплантата производства ООО «Верлайн» до (а) и после электроэрозионного модифицирования его поверхности (б) – с увеличением  $5^x$  и (в) –  $100^x$

Так, максимальный момент при вкручивании имплантата с модифицированной поверхностью в губчатую кость уменьшился по сравнению с исходной поверхностью на 5–6 %, а максимальный момент при его выкручивании увеличился на 10–12 %. По результатам проведенных исследований определены рациональные режимы и условия модифицирования титановых винтовых стоматологических имплантатов ( $U = 70\text{--}80$  В;  $C = 350\text{--}400$  мкФ; диаметр титанового проволочного электрода-инструмента 0,2–0,3 мм;  $\beta_p = 1,0\text{--}1,1$ ; прямая полярность с использованием дистиллированной воды). На основании этих данных разработана технология электроэрозионного модифицирования поверхности титановых винтовых стоматологических имплантатов БНТУ.01300.00006, а также спроектирована и изготовлена специальная установка АТЮФ.041815.0007, обеспечивающая их обработку в полуавтоматическом режиме с производительностью 9 штук в час. На ней была обработана опытная партия (15 штук) титановых винтовых стоматологических имплантатов производства ООО «Верлайн», которые успешно прошли технические и медицинские испытания, включая органолептические, санитарно-химические, токсикологические, исследования на цитотоксичность, на пирогенность, микробиологические исследования на стерильность.

Экспериментами на кроликах породы Шиншилла были проведены патогистологические исследования костной ткани. Установлено, что на 7-е

сутки после имплантации имплантат с модифицированной поверхностью по сравнению с имплантатом с полированной поверхностью уменьшает зону травматического некроза костной ткани, снижает избыточное давление имплантата на кость и равномерно распределяет нагрузку, что снижает риск развития осложнений. Данные результаты свидетельствуют о перспективности применения имплантатов с модифицированной поверхностью в клинических условиях.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. В результате анализа существующих способов модифицирования поверхности титановых стоматологических имплантатов установлено, что перспективным является создание способа, позволяющего получить на металлической поверхности частично регулярный микрорельеф с использованием энергии электрических разрядов, основанного на локализации места воздействия на нее электрического разряда (места расположения лунки – единичной микронеровности) и управляемого ее перемещения относительно электрода-инструмента на величину требуемого шага расположения лунок за промежутки времени между двумя последовательными разрядами [2, 7, 8, 10, 15].

2. В результате экспериментальных исследований влияния режимов электроэрозионного модифицирования на геометрические параметры получаемой единичной лунки установлено, что с повышением энергии электрического разряда  $E$  с 0,5 до 4,5 Дж увеличение ее глубины  $h_n$  происходит более интенсивно, чем ее радиуса  $r_0$  (отношение  $r_0/h_n$  снижается с 12 до 6), а увеличение ширины наплывов металла по краю лунки опережает возрастание их высоты (их отношение увеличивается с 5 до 8), на основании чего получена аналитическая зависимость, адекватно описывающая профиль сечения единичной лунки с учетом энергии электрического разряда, удельной теплоты испарения металла поверхности и его плотности. Теоретически установлено, что наибольшей площадью поверхности сферических лунок и их объемом на модифицированной исходной гладкой поверхности титана характеризуется частично регулярный микрорельеф при  $d_n = 0,5$  мм;  $h_n = 0,08$  мм;  $N=4$ ;  $\beta_p = 1,0$  [1, 7, 10, 11, 12].

3. На основе разработанной теоретически и экспериментально подтвержденной геометрической модели формирования систематической составляющей профиля модифицированной поверхности, связывающей форму, размеры единичных лунок и расстояние между ними, а также напряжение накопительного конденсатора и его емкость, величину перемещения обрабатываемой поверхности за время между двумя последовательными разрядами, наличие или отсутствие дистиллированной воды, получены аналитические зависимости для расчета высотного  $Rz$  и шагово-



го  $Sm$  параметров шероховатости модифицированной поверхности титанового образца. Установлено, что с повышением энергии электрического разряда, за счет увеличения напряжения накопительного конденсатора и его емкости значения высотного и шагового параметров шероховатости модифицированной поверхности возрастают. Так, при обработке на воздухе поверхности титанового образца повышение напряжения накопительного конденсатора с 60 до 110 В вызывает увеличение значения параметра  $Rz$  с 43,5 до 56,5 мкм и параметра  $Sm$  с 280 до 420 мкм. Применение дистиллированной воды приводит к снижению этих параметров в среднем на 8–10 %. Также установлено, что при обработке с коэффициентом расположения лунок равном или больше единицы за счет образовавшихся по их краям наплывов металла происходит увеличение на 2–3 % толщины плоского образца и диаметра цилиндрического относительно их исходных размеров [9].

4. На основе обобщенного анализа результатов исследования влияния режимов модифицирования поверхности образцов титановых имплантатов на шероховатость и характеристики ее состояния, положительно влияющих на протекание процесса интеграции имплантата, определены рациональные режимы и условия выполнения обработки, при которых модифицированная поверхность обладает наибольшими значениями исследуемых характеристик ее состояния. В частности, обработку следует осуществлять проволочным электродом-инструментом диаметром 0,2–0,3 мм из сплава ВТ1-0; напряжение накопительного конденсатора должно составлять 75–85 В при его емкости 350–400 мкФ; использовать прямую полярность при коэффициенте расположения лунок 1,0–1,1, в качестве диэлектрической жидкости применять дистиллированную воду [10, 11].

5. В результате экспериментальных исследований влияния режимов электроэрозионного модифицирования и струйно-абразивной обработки поверхности образцов титановых стоматологических имплантатов установлено, что применение электроэрозионного модифицирования повышает по сравнению со струйно-абразивной обработкой величину свободной энергии поверхности в 3 раза, смачиваемость плазмой крови человека в 2,2 раза; удельную емкость по отношению к ней при взаимодействии с плазмой крови человека в 1,8 раза; адсорбционную способность при взаимодействии с раствором человеческого сывороточного альбумина в 5 раз; конфлюэнтность (отношение площади, покрытой клетками, к общей площади образца) культуры фибробластов человека  $F/v$  в 10 раз; прочность соединения с имитатором костной ткани в 5,7 раза [3, 4, 5, 6, 14].

6. В результате экспериментальных исследований влияния режимов электроэрозионного модифицирования поверхности винтовых титановых стоматологических имплантатов на момент вкручивания и выкручивания их в губчатую кость установлено, что образовавшиеся на ней по краям

лунок наплывы металла при их вкручивании в губчатую кость выполняют роль своеобразных конструктивных элементов, приводящих к снижению на 5–6% (в сравнении с имплантатом в исходном состоянии) прикладываемого к нему момента сил, а при выкручивании они служат дополнительными антиротационными элементами, вызывающими увеличение на 10–12 % соответствующего момента сил, что в совокупности повышает функциональные показатели этих изделий [9].

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

1. По результатам проведенных исследований разработана технология электроэрозионного модифицирования поверхности титановых винтовых стоматологических имплантатов (БНТУ.01300.00006) [14, 16, 18] и конструкция установки для ее реализации (АТЮФ.041815.0007), которые приняты к внедрению на предприятии ООО «Верлайн», занимающимся производством данных изделий. Опытная партия имплантатов (15 штук) изготовленных с применением технологии электроэрозионного модифицирования их поверхности успешно прошли технические и медицинские испытания, включая органолептические, санитарно-химические, токсикологические, исследования на цитотоксичность, на пирогенность, микробиологические исследования на стерильность.

2. Разработанный способ определения адсорбционной емкости поверхности с использованием процедуры центрифугирования может быть использован при проведении исследований по оценке влияния шероховатости поверхности образцов на ее адсорбционную емкость при взаимодействии с различными жидкостями [19].

3. Конструкция имитатора костной ткани с применением пемзы [13, 17] может быть использована при оценке прочности соединения с ним образцов имплантатов, изготовленных из различных материалов и при различном состоянии их поверхности.

4. Результаты проведенных исследований внедрены в учебный процесс подготовки инженеров-электромехаников по специальности 1-38 02 02 «Биотехнические и медицинские аппараты и системы».

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в рецензируемых научных изданиях

1. Особенности формирования следов обработки на поверхности титанового образца при однократном электроконтактном воздействии на нее проволочным электродом-инструментом / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, С. Г. Монич, П. С. Богдан // Наука и техника. – 2013. – № 2. – С. 23–27.
2. Исследование стадий взаимодействия проволочного электрода-инструмента с поверхностью заготовки при ее электроконтактной обработке / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, С. Г. Монич, П. С. Богдан // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та. – 2013. – № 2. – С. 3–10.
3. Киселев, М. Г. Методика и аппаратные средства определения прочностных характеристик соединения поверхностей имплантата и имитатора костной ткани, полученного с использованием фиксирующего материала / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, С. Г. Монич // Метрология и приборостроение. – 2013. – № 2. – С. 11–15.
4. Влияние режимов и условий электроконтактной обработки поверхности образцов металлических имплантатов на параметры ее шероховатости и прочность соединения с имитатором костной ткани / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, П. О. Корзун, С. Г. Монич // Материалы, технологии, инструменты. – 2013. – Т. 18, № 2. – С. 73–81.
5. Киселев, М. Г. Методика и аппаратные средства определения емкости поверхности способом центрифугирования взаимодействующей с ней жидкости / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, С. Г. Монич // Метрология и приборостроение. – 2013. – № 4. – С. 29–33.
6. Влияние способов обработки поверхности металлических имплантатов на ее цитотоксичность и адсорбционные свойства / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, С. Г. Монич, С. Г. Пашкевич, М. О. Хотянович, М. В. Макаренко // Материалы, технологии, инструменты. – 2014. – Т. 19, № 4. – С. 75–80.
7. Киселев, М. Г. Влияние электроконтактной и последующей электрохимической обработки поверхности металлических имплантатов на ее шероховатость и прочность соединения с имитатором костной ткани / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, С. Г. Монич // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2014. – № 4. – С. 21–29.
8. Теоретическое и экспериментальное исследование процесса формирования лунки на обрабатываемой поверхности при однократном электроконтактном воздействии / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, П. С. Богдан, С. Г. Монич // Материалы. Технологии. Инструменты. – 2014. – Т. 19, № 3. – С. 75–80.
9. Влияние электроконтактной обработки поверхности самореза на условия его вкручивания в образцы из различных материалов и выкручи-

вания из них / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, С. Г. Монич, П. С. Богдан // Наука и техника. – 2015. – № 5. – С. 3–9.

10. Киселев, М. Г. Формирование поверхности с частично регулярным микрорельефом методом электроэрозионной обработки / М. Г. Киселев, С. Г. Монич, Д. Г. Лапутина // Механика машин, механизмов и материалов. – 2017. – № 1. – С. 64–70.

11. Теоретическая оценка влияния параметров частично регулярного микрорельефа, полученного на гладкой поверхности методом электроэрозионной обработки, на изменение ее площади и емкости / М. Г. Киселев, В. Л. Габец, С. Г. Монич, Д. Г. Лапутина // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2017. – № 2. – С. 25–31.

### Материалы конференций

12. Киселев, М. Г. Способ электроконтактной обработки металлических имплантатов проволочным электродом-инструментом / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, С. Г. Монич // Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка : сб. докл. 8-го Междунар. симп., Минск, 10–12 апр. 2013 г. : в 2 ч. / НАН Беларуси; редкол.: П. А. Витязь (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2013. – Т. 2. – С. 96–101.
13. Дроздов, А. В. Технология изготовления образцов имитаторов костной ткани для испытания степени модификации поверхностей металлических имплантатов ткани / А. В. Дроздов, С. Г. Монич // Новые направления развития приборостроения : материалы 6-й Междунар. студен. науч.-техн. конф., Минск, 24–26 апр. 2013 г. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: О. К. Гусев (пред.) [и др.]. – Минск, 2013. – С. 294.
14. Монич, С. Г. Устройство для модификация поверхности металлического имплантата путем электроконтактной обработки / С. Г. Монич // Актуальные вопросы физики и техники : материалы II Респ. науч. конф. студентов, магистрантов и аспирантов, посвящ. памяти акад. В. А. Белого, Гомель, 18 апр. 2013 г. : в 2 ч. / Гомел. гос. ун-т; редкол.: А. В. Рогачев (гл. ред.) [и др.]. – Гомель, 2013. – Ч. 1. – С. 66–69.
15. Киселев, М. Г. Оценка эффективности применения электроконтактной обработки поверхности образцов имплантатов с целью повышения прочности ее соединения с имитатором костной ткани / М. Г. Киселев, С. Г. Монич // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 3 кн. / Физ.-техн. ин-т НАН Беларуси ; редкол.: С. А. Астапчик (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2013. – Кн. 1: Материаловедение. – С. 171–179.
16. Киселев, М. Г. Технология и установка для электроконтактной обработки поверхности винтовых металлических стоматологических имплантатов / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, С. Г. Монич // Порошковая ме-

таллургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка: сб. науч. тр. 12-й Междунар. науч.-техн. конф., сб. науч. тр. / Нац. акад. наук Беларуси; редкол.: А. Ф. Ильюшенко (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2016. – С. 263–265.

#### Патенты

17. Имитатор костной ткани : пат. ВУ 10052 / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, С. Г. Монич. – Опубл. 30.04.2014.

18. Способ электроконтактной обработки поверхности заготовки из токопроводящего материала : пат. ВУ 19510 / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, П. С. Богдан, С. Г. Монич. – Опубл. 30.10.2015.

19. Способ определения удельной емкости твердого материала : пат. ВУ 20848 / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, С. Г. Монич. – Опубл. 28.02.2017.

#### РЭЗЮМЭ

**Моніч Сяргей Генадз'евіч**

#### **Тэхналогія электраэразійнага мадыфікавання паверхні тытанавых стаматалагічных імплантатаў**

**Ключавыя словы:** імплантат, тэхналогія, электраэразійнае мадыфікаванне, шурпатаць паверхні, кантактная рознасць патэнцыялаў, змочвальнасць, адсорбцыя, остэаінтэграцыя, павярхоўная энергія, імітатар касцяной тканіны, трываласць на адрыў, трываласць на зрух

**Мэта працы:** распрацоўка тэхналогіі электраэразійнага мадыфікавання паверхні тытанавых стаматалагічных імплантатаў, якая забяспечвае павышэнне характарыстык яе стану, станоўча ўплывае на якасць працэсу інтэграцыі імплантата ў арганізме чалавека.

**Метады даследавання і абсталяванне.** Тэарэтычная частка працы выканана на аснове выкарыстання фундаментальных палажэнняў тэорыі электраэразійнага разбурэння матэрыялаў і іх электраэразійнай апрацоўкі. Лікавыя даследаванні выконваліся з выкарыстаннем сучасных прыкладных праграм і сродкаў вылічальнай тэхнікі. Пры выкананні эксперыментальных даследаванняў выкарыстоўваліся як апрабаваныя, так і спецыяльна распрацаваныя метадыкі і апаратыныя сродкі.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна.** Распрацавана тэхналагічная схема мадыфікавання паверхні імплантатаў, якая забяспечвае кіруемае размяшчэнне на ёй лунак ў выніку паслядоўнага ўздзеяння электрычных разрадаў. Атрыманы залежнасць, якая апісвае профіль перасеку лункі ў залежнасці ад энергіі электрычнага разраду і ўмоў яго праходжання, а таксама залежнасці, якія дазваляюць разлічыць вышынныя і крокавыя параметры мадыфікаванай паверхні.

Атрыманы новыя эксперыментальныя дадзеныя, якія адлюстроўваюць уплыў мадыфікаванай паверхні ўзораў металічных імплантатаў на яе шурпатаць, а таксама на значэнні яе фізіка-механічных і біямеханічных характарыстык, на аснове якіх вызначаны рацыянальныя рэжымы і ўмовы выканання аперацыі, што забяспечвае найбольшыя значэнні гэтых характарыстык мадыфікаванай паверхні. Распрацавана тэхналогія і створана спецыяльнае абсталяванне для мадыфікавання паверхні тытанавых шрубавых стаматалагічных імплантатаў з выкарыстаннем энергіі электрычных разрадаў.

**Рэкамендацыі па выкарыстанні:** вынікі працы выкарыстаны на прадпрыемстве ТАА «Вердайн».

**Галіна прымянення:** прадпрыемствы па вырабе імплантатаў.

## РЕЗЮМЕ

Монич Сергей Геннадьевич

**Технология электроэрозионного модифицирования поверхности титановых стоматологических имплантатов**

**Ключевые слова:** имплантат, технология, электроэрозионное модифицирование, шероховатость поверхности, контактная разность потенциалов, смачиваемость, адсорбция, остеоинтеграция, поверхностная энергия, имитатор костной ткани, прочность на отрыв, прочность на сдвиг

**Цель работы:** разработка технологии электроэрозионного модифицирования поверхности титановых стоматологических имплантатов, обеспечивающей повышение характеристик ее состояния, положительно влияющих на качество процесса интеграции имплантата в организме человека.

**Методы исследования и оборудование.** Теоретическая часть работы выполнена на основе использования фундаментальных положений теории электроэрозионного разрушения материалов и их электроэрозионной обработки. Численные исследования выполнялись с использованием современных прикладных программ и средств вычислительной техники. При выполнении экспериментальных исследований использовались как апробированные, так и специально разработанные методики и аппаратные средства.

**Полученные результаты и их новизна.** Разработана технологическая схема модифицирования поверхности имплантатов, обеспечивающая управляемое расположение на ней лунок в результате последовательного воздействия электрических разрядов. Получены зависимость, описывающая профиль сечения лунки в зависимости от энергии электрического разряда и условий его протекания, а также зависимости, позволяющие рассчитать высотные и шаговые параметры модифицированной поверхности. Получены новые экспериментальные данные, отражающие влияние модифицирования поверхности образцов металлических имплантатов на ее шероховатость, а также на значения ее физико-механических и биомеханических характеристик, на основе которых определены рациональные режимы и условия выполнения операции, обеспечивающие наибольшие значения этих характеристик модифицированной поверхности. Разработана технология и создано специальное оборудование для электроэрозионного модифицирования поверхности титановых винтовых стоматологических имплантатов.

**Рекомендации по использованию:** результаты работы использованы на предприятии ООО «Верлайн».

**Область применения:** предприятия по изготовлению имплантатов.

## SUMMARY

Monich Sergey Gennad'evich

**Technology electrical discharge machinery surface modification of titanium dental implants**

**Key words:** implant, technology, electrical discharge machinery, surface roughness, the contact potential difference, wettability, adsorption, osseointegration, surface energy, bone simulator, peel strength, shear strength

**The work purpose** - development of technology electrical discharge machinery surface modification of titanium dental implants provide increased performance of its condition, positively affecting the quality of the integration process of the implant in the human body.

**Research methods and equipment.** The theoretical part of the work carried out through the use of basic provisions of the theory of electro-erosion destruction of materials and electrical discharge machining. Numerical studies have been performed with the use of modern software applications and computer equipment. In carrying out pilot studies were used as tested and specially developed techniques and hardware.

**Achieved results and their novelty.** The technological scheme of modifying the surface of the implant, provides a control arrangement of holes on it by successive exposure to electrical discharges. The dependence describing the well-sectional profile depending on the energy of the electric discharge and the conditions of its course, as well as dependencies, allowing to calculate altitude and stepper parameters modified surface. New experimental data reflecting the impact of modified surface of metal implants samples on its roughness, as well as on the value of its physical and mechanical and biomechanical characteristics of which are defined on the basis of rational modes and conditions of the operation to ensure that the highest values of the characteristics of the modified surface. The technology and created special equipment for surface modification of titanium screw dental implant using electrical discharges energy.

**Results of research** are implemented at enterprise OJC "Verline" in Minsk.

**Application area.** Enterprises for the manufacture of implants.

Научное издание

**МОНИЧ**  
Сергей Геннадьевич

**ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ  
ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНОВЫХ СТОМАТОЛОГИЧЕСКИХ  
ИМПЛАНТАТОВ**

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