

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
БИОМАТЕРИАЛЫ
ОТ ИССЛЕДОВАНИЙ К ПРАКТИКЕ

*Bio***MATs**²⁰²⁵

22-25 СЕНТЯБРЯ 2025 ГОД

МОСКВА, ИМЕТ РАН

СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ

biomats.ru

УДК 620.22:615.465:666.3:675.04

ББК 24.7+34.35+52.8.28с+54.58+55.6+56.6

М76

Международная конференция «Биоматериалы: от исследований к практике». Москва. 22-25 сентября 2025 г. / Сборник материалов. - М.: ИМЕТ РАН, 2025, 354 с.

ISBN 978-5-6054974-0-0

*Выражаем благодарность за финансовую
и информационную поддержку:*



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ
И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



Российская Академия Наук



ИМЕТ РАН

Osteo-Sibear
Resorbable implants[®]

 **ЛЮКОН**

 **SINTEL**

 **CoLab**

Материалы публикуются в авторской редакции

Организаторы конференции:

Институт металлургии и материаловедения
им. А.А. Байкова Российской академии наук
Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Российская академия наук
Отделение химии и наук о материалах
Российской академии наук

Основная тематика конференции

СЕКЦИЯ 1. Металлические материалы

СЕКЦИЯ 2. Керамические материалы

СЕКЦИЯ 3. Полимерные материалы

СЕКЦИЯ 4. Композиционные материалы

СЕКЦИЯ 5. Доклинические и клинические исследования медицинских материалов

СЕКЦИЯ 6. Умные материалы

International online meeting

Организационный комитет

Комлев В.С., чл.-корр. РАН	председатель, ИМЕТ РАН, г. Москва
Юсупов В.С., профессор, д.т.н.	зам. председателя, ИМЕТ РАН, г. Москва
Анаников В.П., академик РАН ИОХ РАН	г. Москва
Анисимова Н.Ю., д.б.н.	НМИЦ онкологии им. Н.Н. Блохина, г. Москва
Гильмутдинова И.Р., к.м.н.	ФГБУ «НМИЦ ТПМ» Минздрава России, г. Москва
Гольдберг М.А., к.т.н.	ИМЕТ РАН, г. Москва
Дробышев А.Ю., чл.-корр. РАН	РОСУНИМЕД, г. Москва
Еникеев Н.А., д.ф.-м.н.	УУНиТ, г. Уфа
Комиссаров А.А., к.т.н.	НИТУ МИСИС, г. Москва
Комаров В.С., к.т.н.	ИМЕТ РАН, г. Москва
Косоруков В.С., к.б.н.	НМИЦ онкологии им. Н.Н. Блохина, г. Москва
Кравчук А.Д. профессор, д.м.н.	НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н.Н. Бурденко, г. Москва
Лукьянкова Е.А., к.т.н.	ИМЕТ РАН, г. Москва
Мартыненко Н.С., к.т.н.	ИМЕТ РАН, г. Москва
Просвирнин Д.В., к.т.н.	ИМЕТ РАН, г. Москва
Петракова Н.В., к.т.н.	ИМЕТ РАН, г. Москва
Рыбальченко О.В., к.т.н.	ИМЕТ РАН, г. Москва
Севостьянов М.А., к.т.н.	ИМЕТ РАН, г. Москва
Сергеева Н.С., профессор, д.б.н.	НМИЦ радиологии, г. Москва
Терентьев А.О., академик РАН	ИОХ РАН, г. Москва
Федотов А.Ю., к.т.н.	ИМЕТ РАН, г. Москва
Шипелин В.А., к.м.н.	ФИЦ питания и биотехнологии, г. Москва
Ярыгин К.Н., чл.-корр. РАН	ИБМХ, г. Москва

Программный комитет

Солицев К.А., академик РАН	сопредседатель, ИМЕТ РАН, г. Москва
Калмыков С.Н., академик РАН	сопредседатель, Вице-президент РАН, г. Москва
Валиев Р.З., профессор, д.ф.-м.н.	зам. председателя, УУНиТ, г. Уфа
Баринов С.М., чл.-корр. РАН	ИМЕТ РАН, г. Москва
Гудилин Е.А., чл.-корр. РАН	МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва
Иванов В.К., академик РАН	ИОНХ РАН, г. Москва
Карякин Н.Н., профессор, д.м.н.	ПИМУ, г. Нижний Новгород
Киселевский М.В., профессор, д.м.н.	НМИЦ онкологии им. Н.Н. Блохина, г. Москва
Колмаков А.Г., чл.-корр. РАН	ИМЕТ РАН, г. Москва
Мерсон Д.Л., профессор, д.ф.-м.н.	ТГУ, г. Тольятти
Прокошкин С.Д., профессор, д.ф.-м.н.	НИТУ МИСИС, г. Москва
Путляев В.И., доцент, к.х.н.	МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва
Рубаник В.В., чл.-корр. НАН РБ	Институт технической акустики НАН Беларуси, г. Витебск
Страумал Б.Б., профессор, д.ф.-м.н.	ИФТТ РАН, г. Черноголовка
Федюшкин И.Л., академик РАН	ИМХ РАН, г. Нижний Новгород
Чвалун С.Н., чл.-корр. РАН	ИСПМ РАН, г. Москва
Шаркеев Ю.П., профессор, д.ф.-м.н.	ИФПМ СО РАН, г. Томск

International committee

Dr. Gleb B. Sukhorukov, professor	Chairperson, QMUL, London, UK Skoltech, Moscow, Russia
Dr. Niyazi Bulut, professor	Firat University, Elazig, Turkey
Dr. Sergey V. Dorozhkin	MSU, Moscow, NUST MISIS, Moscow, IKBFU, Kaliningrad, Russia
Dr. Omer Kaygili, professor	Firat University, Elazig, Turkey
Dr. Shin Kwang Seon, professor	Seoul national university, Seoul, Republic of Korea
Dr. Dina Deyneko, professor	MSU, Moscow, Russia
Dr. Andrey V. Koptyug, associate Professor	Mid Sweden University, Östersund, Sweden

Локальный комитет

Рыбальченко О.В.	председатель, ИМЕТ РАН, г. Москва
Мартыненко Н.С.	уч. секретарь, ИМЕТ РАН, г. Москва
Понарская А.А.	пресс-секретарь, ИМЕТ РАН, г. Москва
Вахрушев Р.А.	ИМЕТ РАН, г. Москва
Гольдберг М.А.	ИМЕТ РАН, г. Москва
Карелин Р.Д.	ИМЕТ РАН, г. Москва
Комаров В.С.	ИМЕТ РАН, г. Москва
Крохичева П.А.	ИМЕТ РАН, г. Москва
Лукьянова Е.А.	ИМЕТ РАН, г. Москва
Огарков А.И.	ИМЕТ РАН, г. Москва
Петракова Н.В.	ИМЕТ РАН, г. Москва
Просвирнин Д.В.	ИМЕТ РАН, г. Москва
Севостьянов М.А.	ИМЕТ РАН, г. Москва
Страумал П.Б.	ИМЕТ РАН, г. Москва
Темралиева Д.Р.	ИМЕТ РАН, г. Москва
Тетерина А.Ю.	ИМЕТ РАН, г. Москва
Токарь А.А.	ИМЕТ РАН, г. Москва
Федотов А.Ю.	ИМЕТ РАН, г. Москва
Чистюхина Э.И.	ИМЕТ РАН, г. Москва
Дормидонтов Н.А.	ИМЕТ РАН, г. Москва (контактное лицо ООО «Техма»)

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

**СИНТЕТИЧЕСКИЕ ИЛИ ПРИРОДНЫЕ ПОЛИМЕРЫ? ЗА И
ПРОТИВ**

Чвалун С.Н.

*Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова
РАН, Москва, Россия*

НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Развитие современных медицинских технологий требует разработки широкого ассортимента биосовместимых биоразлагаемых полимерных и композиционных материалов различной морфологии, с регулируемыми физико-механическими характеристиками и заранее заданными сроками деградации. Функциональные материалы нового поколения для медицины должны обладать биоактивными свойствами, содержать различные терапевтические агенты, запрограммированным образом реагировать на внешние стимулы и др. Применение таких материалов позволяет повысить эффективность лечения пациентов, а также сократить срок терапии за счет отказа от повторной операции для удаления изделия. Для развития персонализированной медицины важно создать материалы для аддитивных технологий (3D-печати и биопечати).

В последнее время биосовместимые и биодеградируемые полимеры активно применяются в регенеративной медицине для изготовления скраффолов – конструкций, поддерживающих клетки при выращивании биоискусственных органов и тканей, в том числе костей. При этом используются как природные, так и синтетические полимеры. В качестве синтетических полимеров обычно используют биодеградируемые полиэфиры (полиактид, поликапролактон, полигликолид и их сополимеры), полиамиды, полиуретан. Каркасы на основе синтетических полимеров обладают высокими механическими свойствами, регулируемым временем деградации, но нередко недостаточной биосовместимостью. Напротив, каркасы на основе природных полимеров характеризуются отличной биосовместимостью, улучшающей адгезию и пролиферацию клеток, как правило, высокой скоростью деградации и механическими характеристиками, соответствующими живым тканям. Более того, фибрillлярные белки: фибронин шелка и коллаген используются для изготовления хирургических нитей, раневых повязок, костной пластики, восстановления сосудов, кожи, в работах по регенерации нервной, мышечной и легочной ткани. Однако и их использование сталкивается с рядом серьезных проблем.

В докладе будут рассмотрены разработанные методы получения биоразлагаемых полимерных и композиционных материалов, а также будут представлены созданные на их основе медицинские изделия:

резорбируемые хирургические нити, винты и штифты для ортопедии, покрытия на раны и ожоги, подавляющие образование рубцов и шрамов, гемостатирующие губок и тампоны, средства для адресной доставки лекарств, тканеинженерные конструкции для коррекции и восстановления различных органов и тканей при разнообразных заболеваниях и травмах.

НАНОСТРУКТУРНЫЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ БИОМАТЕРИАЛЫ ДЛЯ МЕДИЦИНСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ

Валиев Р.З.

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

**ruslan.valiev@ugatu.su*

В последнее десятилетие большой интерес вызывает наноструктурирование методами интенсивной пластической деформации (ИПД), что позволяет значительно повысить механические и функциональные свойства металлов и сплавов. Методы ИПД не только позволяют формировать ультрамелкозернистую (УМЗ) структуру, но и влияют на развитие фазовых превращений, вызывая образование различных наноструктурных особенностей – нанодисперсных частиц вторых фаз, нанодвойников, сегрегации легирующих элементов на границах зерен и т.д., которые приводят к существенному изменению свойств материалов [1]. В настоящем докладе представлены результаты недавних разработок для повышения свойств ряда Ti, Mg и Zn сплавов, перспективных для изготовления медицинских имплантатов улучшенной конструкции и с повышенной остеоинтеграцией [2].

На основе данных компьютерного моделирования определены термомеханические условия для проведения ИПД обработки заготовок из исследуемых сплавов. Выполнено экспериментальное их деформирование, исследована структура полученных заготовок в виде прутков и лент. Показано, что предложенная обработка позволила сформировать УМЗ структуру с размером около 100 нм и образование наноразмерных частиц вторых фаз, а также сегрегаций легирующих элементов на границах зерен. На основе выполненных комплексных исследований рассмотрены физическая природа и механизмы упрочнения полученных наноматериалов. Обсуждаются возможности и перспективы их практического применения.

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ № 22-19-00445-П, <https://rscf.ru/project/22-19-00445/>.

Список используемой литературы:

[1] R.Z. Valiev, I.V. Alexandrov, M. Kawasaki, T.G. Langdon. Ultrafine-Grained Materials. Springer, 2024. — 177 p.

[2] R.Z. Valiev, Y. Zheng, K. Edalati // J. Mater. Sci. 2024. V. 59 5681-

5697

**ГЕНАКТИВИРОВАННЫЕ КОСТНОПЛАСТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ
НА ОСНОВЕ ОКТАКАЛЬЦИЕВОГО ФОСФАТА В
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ И КЛИНИЧЕСКОЙ
ПРАКТИКЕ**

Деев Р.В., Бозо И.Я.

*Институт морфологии человека им. акад. А.П. Авцына ФГБНУ «РНЦХ
им. акад. Б.В. Петровского», Москва, Россия*

*romdey@gmail.com

Управление гистогенетическими процессами в интересах регенеративной медицины остается активно разрабатываемой областью естествознания и практики. Одним из методических направлений таких технологий является генная терапия. Кроме выбора терапевтического гена или их спектра сохраняет актуальность и определение средства доставки. Реконструкция опорных тканей, в частности костной ткани, предполагает применение пластических материалов. Одним из направлений создания костнопластических материалов в том числе с применением аддитивных технологий стало использование матриц из октакальциевого фосфата, насыщение которых гнетерапевтическим препаратом (Неоваскулген, АО «Некстген», Россия) придаёт материалу новые свойства с точки зрения биointеграции, биорезорбции, индукции репаративных процессов.

В докладе будут продемонстрированы данные доклинических исследований по применению генактивированного октакальциевого фосфата в моделях дефектов плоских и трубчатых костей. Будет представлена клиническая результативность при использовании материала в практике челюстно-лицевой хирургии, хирургии ЛОР-органов, вертебрологии, а также практике травматологии и ортопедии в т.ч. при лечении пациентов после высоко-энергетических повреждений.

СОВРЕМЕННАЯ БОЕВАЯ ПАТОЛОГИЯ КОНЕЧНОСТЕЙ.

ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ, ЗАДАЧИ, ПЕРСПЕКТИВЫ

Брижань Л.К.*, Хоминец И.В., Беседин В.Д., Кукушко Е.А.

ФГБУ «Главный военный клинический госпиталь им. академика Н.Н.

Бурденко» Минобороны России, Москва, Россия

doctor@besedinvd.ru

Лечение раненых с боевыми повреждениями конечностей остается одной из ключевых задач военной травматологии и ортопедии. Анализ военно-медицинской статистики за последние десятилетия, начиная с войны в Афганистане и до специальной военной операции, показывает, что ранения конечностей продолжают составлять от 55% до 75% всех боевых санитарных потерь, независимо от интенсивности боевых действий и типа используемого оружия [2].

Современная военная медицина сталкивается с новыми вызовами при лечении пациентов, получивших ранения в условиях современных конфликтов. Эти трудности обусловлены несколькими факторами.

Во-первых, характер ведения боевых действий значительно изменился. Наблюдается широкое применение высокоточного оружия с большой поражающей способностью, активное использование беспилотных летательных аппаратов и кассетных боеприпасов. В то же время, стрелковые бои стали менее распространеными, а существующие средства индивидуальной бронезащиты не могут обеспечить полную защиту от новых типов боеприпасов. Модернизация вооружения и изменение тактики боевых действий привели к тому, что современные боевые травмы характеризуются значительным разрушением и повреждением мягких тканей, что требует сложных реконструктивно-пластических операций. Однако сложность течения раневого процесса, обширные мягкоткано-костные повреждения, высокая микробная контаминация и устойчивость бактерий к антибиотикам делают лечение таких ранений особенно сложным и требуют комплексного подхода [1].

Во-вторых, структура санитарных потерь в современных конфликтах демонстрирует преобладание осколочных ранений и взрывных повреждений, которые составляют до 90% всех случаев [1].

В-третьих, внедрение современной концепции лечебно-эвакуационных мероприятий, включая сокращение этапов медицинской эвакуации и сокращение сроков оказания специализированной помощи, а также использование более эффективных средств первой помощи, привело к снижению летальности на передовых этапах. Это, в свою очередь, увеличило количество пациентов в крайне тяжелом состоянии, которые поступают в центральные военно-медицинские учреждения [1].

Эти факторы требуют оптимизации тактики лечения и совершенствования методик оказания специализированной травматологической помощи раненым [1-2].

Список используемой литературы:

- [1] А.А. Керимов, А. А. Максимов, С. Н. Переходов, В. Д. Беседин, И. В. Хоминец, Е. А. Мурзин. Алгоритм лечения огнестрельных ранений и взрывных поражений конечностей с дефектами мягких тканей. Хирург. 2025;4.
- [2] Керимов А.А., Хоминец И.В., Переходов С.Н., Козлов Н.С., Бекшоков К.К., Нелин М.Н., Кукушко Е.А., Беседин В.Д., Твердохлебов С.И., Козельская А.И. Последовательный остеосинтез в условиях современных вооружённых конфликтов // Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова. 2025. Т. 32, № 2.

КОМПОЗИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ БИОИНЕРТНЫХ ТИТАНОВЫХ И РЕЗОРБИРУЕМЫХ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ И МОНОСЛОЙНЫХ И МУЛЬТИСЛОЙНЫХ БИОПОКРЫТИЙ И ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ДЛЯ ЗАМЕЩЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ КОСТНОЙ ТКАНИ

Шаркеев Ю.П.

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия

²Томский политехнический университет, Томск, Россия

[*sharkeev@ispms.ru](mailto:sharkeev@ispms.ru)

Современным быстро развивающимся направлением науки о материалах или материаловедения является биомедицинское материаловедение и, прежде всего, посвященное материалам для замещения элементов костной ткани. На сегодня любой элемент костной системы живого человека может быть заменен искусственным имплантатом или конструкцией.

В качестве материалов для имплантатов применяют биоинертные резорбируемые металлы и сплавы, керамику, полимеры и углеродные материалы. Наиболее широко применяются металлические материалы. Металлы и сплавы должны иметь заданные механические свойства (пределы прочности и текучести, твердость, предельная пластичность, циклическая долговечность, модуль упругости и др.), которые могут быть достигнуты путем термомеханических обработок, включая интенсивную пластическую деформацию, формируя панель механизмов упрочнения.

Кроме механических свойств имплантаты должны отвечать также определенным требованиям. Это наличие шероховатой пористой поверхности с хорошей смачиваемостью, отсутствие токсичности, биосовместимость и биоинертность. Ряд свойств, в том числе успешная остеointеграция имплантата с костной тканью, обеспечиваются биоинертными или биоактивными покрытия, которые наносятся на поверхность имплантата. Покрытия, наносимые различными методами, могут варьировать от простых однослойных оксидных до сложных многослойных систем с дополнительной модификацией, придавая имплантатам новые многофункциональные свойства.

Особо следует отметить новое направление в медицинском материаловедение – резорбируемые сплавы. Имплантаты из таких сплавов растворяются во время нахождения в организме и замещаются новой генерируемой костной тканью. Известен широкий класс таких сплавов, скорость резорбции которых изменяется на несколько порядков. Имплантатам из резорбируемых сплавов еще в большей степени требуются различного типа биопокрытия.

Таким образом мы приходим к композитным материалам на основе биоинертных или резорбируемых металлических сплавов и однослойных и многослойных биопокрытий, имеющих широкий набор функциональных свойств, обеспечивающих остеоинтеграцию имплантата с костной тканью и его необходимый срок жизни в организме.

Коллектив лаборатории физикиnanoструктурных биокомпозитов ИФПМ СО РАН более тридцати лет работает в области медицинского материаловедения и имеет дело с композитными материалами на основе биоинертных титановых и резорбируемых магниевых сплавов и однослойных и многослойных биоинертных и биоактивных покрытий. Из композитных материалов разрабатываются имплантаты различного типа для замещения поврежденной или утерянной костной ткани. Проводится необходимое биотестирование вплоть до клинических испытаний.

В сообщение представлены результаты, полученные лаборатории совместно с коллегами из других коллективов. От имени сотрудников лаборатории глубокая признательность нашим коллегам, без которых эта сложная комплексная работа не была бы выполнена.

Работа выполнялась в рамках государственных заданий Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, в частности тем FWRW-2021-0004 и FWRW-2021-0007.

ПРИМЕНЕНИЕ СПЛАВА ZX10 ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ БИОРЕЗОРБИРУЕМЫХ ИМПЛАНТАТОВ. ВЛИЯНИЕ ТМО НА МЕХАНИЧЕСКИЕ И КОРРОЗИОННЫЕ СВОЙСТВА

Мерсон Д.Л.*, Данюк А.В., Мерсон Е.Д., Брилевский А.И.

*Тольяттинский государственный университет, Научно-исследовательский институт прогрессивных технологий, Тольятти,
Россия*

*d.merson@tltsu.ru

В настоящее время в мире медицины для изготовления временных металлических конструкций (имплантатов) установился устойчивый тренд по замене традиционных материалов на основе титана и железа на материалы, способные саморастворяться после выполнения служебных задач. В большинстве своем в хирургическую практику внедрены биорезорбируемые имплантаты, изготовленные из сплавов на основе магния. В Тольяттинском государственном университете в 2024 году при финансовой поддержке ООО «Медицинская торговая компания» (Санкт-Петербург) запущено первое в РФ производство биорезорбируемых имплантатов под брендом MgSorb из сплава ZX10 по оригинальной технологии, которая включает в себя ряд термомеханических операций.

Магнию, имеющему гексагональную плотноупакованную кристаллическую решетку, и сплавам на его основе присуще монокристальная и текстурная анизотропия механических и коррозионных свойств. В настоящей работе экспериментально исследованы зависимости этих свойств от кристаллографического направления на примере чистого монокристалла магния, а также для сплава ZX10 в различных состояниях: литое (Л), всесторонняя изотермическая ковка (ВИК), экструзия (Э) после ВИК, волочение (В) после Э+ВИК, и прокатка (П) после ВИК, - в зависимости от ориентации по отношению к технологическим операциям.

В результате проведенных масштабных исследований получены следующие основные результаты:

- Измеряемая традиционными методами скорость коррозии является суперпозицией равномерной и локальной скоростей и не может быть характеристикой ни той, ни другой;
- Базисная плоскость (0001) обладает максимальным сопротивлением к равномерной скорости коррозии. В направлении $<2\bar{1}\bar{1}0>$ равномерная коррозия максимальна, а локальная, наоборот, минимальна. Наиболее интенсивно локальная коррозия идет в направлении $<10\bar{1}0>$. Наихудшее сочетание локальной и равномерной коррозии происходит в направлении $<10\bar{1}1>$;

- В литом, экструдированном и после волочения состояниях условный предел текучести для аналогичных направлений деформации при растяжении в 1,4...1,9 раза выше, чем при сжатии, т.е. для указанных состояний наблюдается значительная анизотропия по знаку приложенной нагрузки. В состоянии после ВИК значения условного предела текучести практически идентичны не только в различных направлениях, но и при смене знака нагружения. С точки зрения соотношения предела текучести и относительного удлинения, наилучшие свойства демонстрирует состояние ВИК + горячая прокатка.
- Наименьшей коррозионной стойкостью обладают те сечения текстурированных полуфабрикатов магниевого сплава ZX10, в которых преобладают зерна с пирамидальной ориентацией, а зерна с базисной ориентацией отсутствуют;
- При разработке технологии изготовления имплантатов из магниевых сплавов необходимо стремиться к тому, чтобы конечная ТМО формировалась на рабочих поверхностях имплантата преимущественно базисную ориентацию.

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ № 23-19-00636.

TRENDS IN BIOMEDICAL MATERIALS. WHERE PHYSICS CAN HELP

Sukhorukov G.B.

¹Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russia.

*²Life Improvement by Future Technologies (LIFT) Center, Moscow, Russia
g.sukhorukov@skoltech.ru*

Biomedical materials are multidisciplinary field and in focus of intensive research for decades. Often modern advances in Physics might have impact of development of biomaterials of new generation. Exploring physics influence we may alter the materials while they are already in biological matter such as cells or entire organism. Some of applications as remote controlled drug delivery using magnetic field, light or ultrasound are well elaborated and are on the way to clinic. Tracking of individual cells can be processed in cell population, but there is a potential to go to track cells in tissues or in body.

Apart of particles and microcapsules, the closer route to clinic is drug-eluting coating of implantable medical devices. Drug-eluting coatings on implantable medical devices with programmed release of various medical components on demand is an actual task for modern development of personalized

medicine. Despite of significant progress in that area there is still limited number of currently existing methods of producing coatings which go beyond the laboratory towards clinical trials. These problems in medical exploitation of drug eluting coatings are relevant with encapsulation efficiency and proper retention of drug in biodegradable polymer coating, programming release and appropriate scaling up facilities. Here Physics helps via ultrasound local stimulation and approaches of additive manufacturing. In this talk we review recent advances and possible step forwards as well as foreseen obstacles on the way to bring biomedical materials with physically controlled properties to clinical practise

**АНТИБАКТЕРИАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ: ИСТОРИЯ, ПРОБЛЕМЫ
И ИХ РЕШЕНИЯ, БАКТЕРИЦИДНЫЕ МЕХАНИЗМЫ,
ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ**

Штанский Д.В.

*Национальный исследовательский технологический университет МИСИС,
Москва, Россия*

История человечества неразрывно связана с борьбой с инфекцией. Несмотря на значительный прогресс в понимании бактерицидных механизмов и разработку различных стратегий борьбы с инфекцией, она по-прежнему является большим вызовом. Рассматриваются основные механизмы подавления бактериальной и грибковой инфекции: (1) воздействие бактерицидных компонентов (антибиотиков, противогрибковых препаратов, бактерицидных ионов, или комбинация ионов и лекарственных препаратов), (2) образование активных форм кислорода, (3) повреждение бактериальной стенки при контакте бактерии с поверхностью имплантата за счет механического повреждения или микрогальванического взаимодействия, и (4) предотвращение адгезии бактерий за счет создания антиадгезивной поверхности [1-10]. Также рассмотрены различные методы получения антибактериальных поверхностей и факторы, влияющие на выделение бактерицидных ионов (концентрация бактерицидного компонента, рельеф и шероховатость поверхности, наличие различных типов наночастиц (катодов и анодов), окисление поверхности). Показано, что при оптимальных условиях возможно достижение высокого антибактериального и противогрибкового эффекта при сохранении биосовместимости, что обеспечивает биологическую безопасность медицинских изделий. Приводятся примеры перспективных бактерицидных материалов: имплантатов с покрытиями, раневых повязок, уретральных катетеров и др.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского научного фонда (Соглашение 25-19-00458).

Список используемой литературы:

- [1] A.D. Popova, et al. // ACS Appl. Bio Mater. 7 (2024) 5579-5596.
- [2] V.A. Ponomarev, et al. // ACS Appl. Mater. Interfaces 15 (2023) 50940-50952.
- [3] A.D. Popova, et al. // ACS Appl. Mater. Interfaces 15 (2023) 37274-37289.
- [4] K.Y. Gudz et al. // ACS Appl. Mater. Interfaces, 20(13) (2021) 23452-23468.
- [5] E.S. Permyakova, et al. // Applied Surface Science, 556 (2021) 149751.
- [6] E.S. Permyakova, et al. // Surf. Coat. Technol. 405 (2021) 126538.
- [7] K.Y. Gudz et al. // ACS Appl. Mater. Interfaces 12 (2020) 42485-42498.
- [8] V.A. Ponomarev, et al. // Applied Surface Science 516 (2020) 146068.
- [9] V.A. Ponomarev, et al. // ACS Appl. Mater. Interfaces 11 (2019) 28699-28719.
- [10] V.A. Ponomarev, et al. // ACS Appl. Mater. Interfaces 10 (2018) 24406-24420.

**ВЛИЯНИЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ НА
ПОВЕРХНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ
ДЛЯ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ И РЕГЕНЕРАТИВНОЙ
МЕДИЦИНЫ**

Курзина И.А.^{1*}, Лапуть О.А.¹, Брюзгина А.А.¹, Коржова А.Г.¹,
Хомутова У.В.^{1,2}

¹*Национальный исследовательский Томский государственный
университет, Томск, Россия*

²*Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия*

* kurzina99@mail.ru

В настоящее время вырос спрос на синтез отечественных полимеров и получение изделий на их основе, таких как протезы для костной имплантологии, сердечно-сосудистой хирургии, а также изделия для тканевой инженерии [1, 2]. Исходные характеристики поверхности данных материалов, в первую очередь – отсутствие специфических

функциональных групп, ограничивает их применение в различных областях медицины из-за недостаточной функциональности и, тем самым, сокращая срок службы изделий. Известно, что ионно-плазменная обработка способствует изменению химического состава поверхности, что приводит к улучшению функциональных свойств полимерных материалов. Актуальным является проведение системных исследований по выявлению закономерностей между количеством и типом функциональных групп, химическим составом поверхности, физико-химическими свойствами, а также параметрами плазменной обработки.

Большое значение, влияющее на проявление эффектов при плазменной модификации, оказывает тип газового разряда. В ходе исследований выявлено, что обработка полимерных и композитных материалов плазмой барьера разряда не приводит к ожидаемым изменениям поверхностных свойств [3]. Данный эффект обусловлен тем, что образцы-диэлектрики, помещенные в камеру реактора, выполняют функцию барьера разряда, препятствуя эффективной модификации поверхности. Азотная плазма тлеющего разряда является эффективным инструментом для модификации поверхностных свойств скафандров на основе поликарбоната (ПКЛ) и полилактида (ПЛ), а также композитов из полилактида/гидроксиапатита (ПЛ/ГА). Обработка данной плазмой приводит к образованию азот- и кислородсодержащих функциональных групп, что способствует улучшению смачиваемости поверхности экспериментальных образцов. Несамостоятельный дуговой разряд наряду с тлеющим является перспективным методом модификации поверхности полимеров [1, 2]. Обработка азотной плазмой дугового разряда, оказывает влияние на изменение химического состава поверхности ПЛ, ПЛ/ГА, политетрафторэтилена, что значительно улучшает функциональные характеристики полимерных материалов. К недостаткам дугового разряда относят более высокие температуры процесса и затруднение в контролировании параметров. Увеличение полярности поверхности, а также образование на поверхности $-C-NH_x$, $N-C=O$ / $C=O$ функциональных групп играют решающую роль в сохранности жизнеспособности клеток. Модифицирование полимерных образцов плазмой способствует проявлению образцами биосовместимых и иммуносовместимых свойств – наблюдается увеличение жизнеспособности и роста макрофагов на поверхности всех полимерных и композитных материалов, обработанных плазмой дугового, тлеющего, барьера разрядов. Таким образом создание эффективных полимерных и композитных материалов с высокой биосовместимостью для замещения, реконструкции и регенерации повреждённой костной и кожной ткани является актуальной задачей.

Работа выполнена при поддержке международного проекта Российского научного фонда (РНФ) № 24-43-20044.

Список используемой литературы:

- [1] U.V. Khomutova, A.G. Korzhova, A.A. Bryuzgina et al. // Polymers. 2024. V. 16. #62.
- [2] O.A. Laput, I.V. Vasenina, A.G. Korzhova et al. // Polymers. 2023. V. 15. #3381.
- [3] O.A. Laput, I.V. Vasenina, Ye. G. Shapovalova // ACS Appl. Mat. Int. 2022. V. 14. #41742.

**РЕЗОРБИРУЕМЫЕ КЕРАМИКА И КОМПОЗИТЫ ДЛЯ
РЕГЕНЕРАЦИИ КОСТНОЙ ТКАНИ СО СЛОЖНОЙ ВНУТРЕННЕЙ
АРХИТЕКТУРОЙ**

Путляев В.И.^{1*}, Евдокимов П.В.^{1,2}, Гаршев А.В.^{1,3}, Климашина Е.С.¹,
Филиппов Я.Ю.¹, Ефименко А.Ю.¹, Щербаков И.М.¹, Дубров В.Э.¹

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
Москва, Россия

²Институт общей и неорганической химии имени Н.С. Курнакова РАН,
Москва, Россия

³Университет МГУ-ППИ, Шэнъчжэнь, Китай

*valery.putlayev@gmail.com

Керамика и композиты на основе биодеградируемых полимеров, наполненных резорбируемыми фосфатами кальция, представляют значительный интерес в качестве внутрикостных имплантатов и скаффолдов для тканевой инженерии. Рассмотрены основные требования к подобным материалам с акцентом на их остеоиндуктивные и остеокондуктивные свойства.

Представлены основные принципы создания резорбируемых фосфатных наполнителей, в том числе, очень сложного химического состава с глазеритоподобной структурой. Включение в состав наполнителя различных микрэлементов, позволяет а) стабилизировать полиморфные модификации с необходимым уровнем резорбции, б) обеспечить поступление в организм элементов, включенных в определенные биохимические процессы, позволит способствовать процессам дифференцировки стволовых клеток, остеогенеза и ангиогенеза, иммунного ответа и создания асептического фона в области регенерации кости.

В качестве полимеров рассмотрены термопластичные полизэфиры поликапролактон и полилактид, а также гидрогели на основе ПЭГ-

производных акрилатов. Кратко освещены основные проблемы, возникающие при выборе макропористой архитектуры имплантата. Затронуты два метода аддитивного производства, позволяющие воспроизвести спроектированную архитектуру: термоэкструзионная 3D-печать и стереолитографическая 3D-печать, в основе которой лежит локальная (пиксельная) фотополимеризация. Достоинство стереолитографии - высокое разрешение печати на уровне 1-50 мкм, позволяющее воспроизвести мельчайшие детали изделия, в том числе, различные по связности и размеру поры. Недостатком является значительное увеличение времени, необходимое для создания модели. При переходе от попиксельного сканирования лазерным пучком фотополимеризуемой среды (SLA-метод) к засвечиванию всего слоя модели через фотомаску, создаваемую DMD-проектором (DLP-метод) достигается существенное увеличение производительности печати.

Приведены также примеры использования стереолитографической печати для изготовления форм, используемых при литье низкого давления для термопластичных полимеров с узким окном выработки (полиоксибутират).

Обсуждены проблемы и возможные перспективы использования стереолитографической печати для создания скаффолдов для тканевой инженерии.

Доклад подготовлен авторским коллективом в рамках теоретических и экспериментальных работ при финансовой поддержке гранта РНФ № 22-19-00219-П с использованием оборудования, приобретенного за счет Программы развития Московского университета.

МУЛЬТИЧАСТОТНЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ ПАРАМАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС В ИЗУЧЕНИИ БИОГЕННЫХ И СИНТЕТИЧЕСКИХ ЗАМЕЩЕННЫХ ФОСФАТОВ КАЛЬЦИЯ

Гафуров М.Р.^{1*}, Садовникова М.А.¹, Мамин Г.В.¹, Гольдберг М.А.²,
Петракова Н.В.², Мальцев С.А.², Донская Н.О.², Крохичева П.А.²,
Комлев В.С.²

¹*Казанский федеральный университет, Казань, Россия*

²*Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН,
Москва, Россия*

**marat.gafurov@kpfu.ru*

Доклад посвящен оригинальному обзору техник и возможностей мультичастотных методов электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) в

исследовании материалов биогенного и синтетического происхождения на основе фосфатов кальция (ФК), обусловленный интересом к изучению процессов образования и маркеров кальцификации атеросклеротических отложений на стенках кровеносных артерий [1, 2], использованием замещенных и соподопированных ионами Li, Mn, Al, Fe, Cu, Gd ([3], рисунок 1), Er, Yb, Eu керамик, порошков и цементов трикальцийфосфатов (ТКФ) и гидроксиапатитов (ГА) для различных биомедицинских приложений и в качестве подложек для катализаторов [3-7]. Анализ биологического материала и синтетических образцов с целями определения наличия, природы, концентрации, локализации катионных и анионных парамагнитных примесей, схем зарядовой компенсации и др. потребовал применения нестандартных импульсных и мультичастотных экспериментальных и расчетных методов ЭПР [8], позволяющих значительно расширить рамки структурных физико-химических исследований.

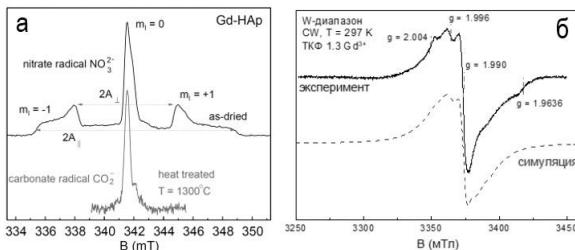


Рисунок 1 – Спектры ЭПР радиационно-индуцированных центров в Gd-ГА в импульсном режиме Х-диапазона СВЧ, позволяющие определить наличие азотных и карбонатных примесей (а) и стационарный спектр ЭПР Gd-ТКФ в W-диапазоне СВЧ после отжига при 1300 °C, позволяющий определить наличие и концентрацию ионов Gd³⁺ (б)

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ №23-63-10056

Список используемой литературы:

- [1] В.А. Абдульянов и др. // Письма в ЖЭТФ 2008. Т. 88. С. 75.
- [2] I.M. Ignatyev et al. // Ann. Vasc. Surg. 2021. V. 72. P. 340.
- [3] V.S. Komlev et al. // Biomed. Technol. 2025. V. 9. P. 100064.
- [4] M.A. Goldberg et al. // Heliyon 2024. V. 10. P. e25291.
- [5] M.A. Sadovnikova et al. // Ceramics 2022. V. 5. P. 1154.
- [6] I. D. Sidorov et al. // Optical Materials 2025. V. 159. #116609.
- [7] B.F. Gabbasov et al. // Journ. Magn. Magn. Mat. 2019. V. 470. P. 109.
- [8] Ф.Ф. Мурзаханов и др. // Коорд. Химия. 2020. Т. 46. С. 653.

International online meeting

CALCIUM-MAGNESIUM PHOSPHATE CEMENTS FOR BONE TISSUE REGENERATION

Goldberg M.A.^{1*}, Krokhicheva P.A.¹, Khayrutdinova D.R.¹, Fomin A.S.¹,
Antonova O.S.¹, Sviridova I.K.², Kirsanova V.A.², Akhmedova S.A.²,
Sergeeva N.S.², Komlev V.S.¹

¹*Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

²*P.A. Hertsen Moscow Oncology Research Institute – branch of National Medical Research Radiological Centre affiliated with Ministry of Health of Russian Federation, Moscow, Russian Federation*

*mgoldberg@imet.ac.ru

Bone pathologies represent a broad group of diseases that affect the skeleton, with the potential to restrict mobility and, in some cases, result in severe complications and even death [1]. The treatment of these conditions frequently necessitates surgical intervention, followed by medication to ensure a favorable outcome [2]. Bone cements based on calcium and magnesium phosphates have been shown to possess several advantages, including high strength, improved resorption kinetics, low toxicity, and enhanced matrix properties [3]. These cements are produced by mixing calcium phosphate and magnesium oxide or phosphate powders [4]. Our research team has developed an innovative approach that guarantees the formation of a stable phase during the synthesis process. This approach enables the production of high-quality cements with enhanced properties, making them a promising option for treating bone pathologies. This makes it possible to control the uniform distribution of components, which contributes to the uniform physical-chemical properties of cement after mixing with cement liquid. The report will present the results of obtaining cements with different magnesium content, as well as those doped with cations of silver, zinc, and gadolinium, to give them functional properties. Materials with antibacterial and cytocompatible properties, as well as osteoconductive properties for some formulations, will be demonstrated. The incorporation of carboxymethylcellulose polymers and sodium hyaluronate into the cement liquid resulted in enhanced cohesion and injectability of the cements. The possibility of biovisualizing the cements during model implantation for monitoring postoperative bone tissue repair will also be discussed.

The physical-chemical study of bone cements was supported by the Russian Science Foundation grant № 23-63-10056. Biological studies of injectable bone cements were carried out with the financial support of the state assignment No. 056-03-2024-113 of the Ministry of Health of the Russian Federation

References:

- [1] Chindamo G, Sapino S, Peira E, et al (2020) Bone diseases: Current approach and future perspectives in drug delivery systems for bone targeted therapeutics. *Nanomaterials* 10
- [2] Wen C, Xu X, Zhang Y, et al (2024) Bone Targeting Nanoparticles for the Treatment of Osteoporosis. *Int J Nanomedicine* 19:1363–1383
- [3] Jia J, Zhou H, Wei J, et al (2010) Development of magnesium calcium phosphate biocement for bone regeneration. *J R Soc Interface* 7:1171–1180. <https://doi.org/10.1098/rsif.2009.0559>
- [4] Ostrowski N, Roy A, Kumta PN (2016) Magnesium Phosphate Cement Systems for Hard Tissue Applications: A Review. *ACS Biomater Sci Eng* 2:1067–1083
- [5] Krokhicheva PA, Goldberg MA, Fomin AS, et al (2024) Gadolinium-doped injectable magnesium-calcium phosphate bone cements for noninvasive visualization. *Journal of Magnesium and Alloys* 12:3698–3716. <https://doi.org/10.1016/J.JMA.2024.09.002>

GREEN NANOTECH FOR A GREENER PLANET

Barzinjy Azeez Abdullah

*Department of Physics, Faculty of Science, Soran University, Kurdistan Region,
Iraq*

azeez.azeez@soran.edu.iq

Green synthesis of nanoparticles (NPs) is an emergent study field in nanotechnology as this process is nonhazardous, green, effective, and inexpensive when compared to other traditional physical and chemical approaches. Nowadays plant-mediated green synthesis and eutectic-based ionic liquids of NPs are obtaining more consideration among investigators worldwide. Wastewater typically contains a mixture of organic and inorganic substances, including azo dyes that can affect water quality and clarity, harmful microorganisms such as bacteria, viruses, and parasites and heavy metals like lead, mercury, cadmium, and chromium. Thus, Green synthesized NPs can be utilized in wastewater treatment owing to their high efficacy and biocompatible property.

In this keynote speech numerous NPs were biologically synthesized using both plant extract and eutectic based ionic liquid medium. Then the mechanism of the NPs formation will be introduced and systematically explained. After that numerous characterization techniques for characterizing the synthesized NPs by both plant extract and eutectic-based ionic liquids mediums will be introduced. These techniques include UV Vis and FTIR spectroscopy analysis, XRD and EDX analysis, SEM and TEM images, DLS and zeta potential analysis, BET

surface area analysis and vibrating-sample magnetometer (VSM) dynamic technique for measuring the magnetic moment for magnetite NPs. Finally, this keynote speech investigates the utilization of these synthesized nanoparticles across a broad spectrum of applications, including wastewater treatment, enhancement of solar cell efficiency, improvement of building materials, nanodentistry, antibacterial, antimicrobial, and anticancer therapies, fabrication of thin films, development of diverse sensors, and other advanced technological domains.

3D PRINTING OF IMPLANTS: NEW ALLOYS, METAMATERIALS, COATINGS AND SURFACE PROPERTY STRUCTURING

Koptyug A.V.^{1*}, Sukhovey Yu.G.², Ukleykin V.E.², Kostolomova E.G.²

¹*Mid Sweden University, Östersund, Sweden*

²*Tyumen Research Center, Russian Academy of Sciences, Tyumen*

**andrey.koptyug@miun.se*

Applications of 3D-printed metallic implants strongly rely on the progress in resolving certain significant issues such as availability of certified materials with adequate properties, and manufacturing of components with demanded geometry and functionality. Today the most common materials used for bio-implant 3D-printing are pure Titanium, Ti-6Al-4V (Ti64, most common), and CoCrMo. Main advantages of Ti64 are well-standardized processing, excellent strength-to-weight ratio and good corrosion resistance. Biocompatibility of Ti64 is also commonly mentioned, although it is not entirely correct as it is rather only biotolerant. Moreover, Ti64 is much stronger than even solid parts of cortical bones. This can lead to undesired effects like stress shielding, and implant loosening and failure. Here possible way forward is through developing more biocompatible alloys with Young's modulus close to that of cortical bone and through applying metamaterial approach in implant design and manufacturing. One can mention the development of so-called \square -Ti alloys with Nb, Zr and Ta. Many such alloys possess excellent biocompatibility, proper Young's modulus together with fatigue tolerance and corrosion resistance [1,2].

Unfortunately, approval of new alloys for implants takes quite some time. On the other hand, metamaterial approach with approved materials already provides solutions 'here and now', for example through additively manufactured combinations of solid and porous implant sections [3]. Resulting mechanical properties of such constructions can easily satisfy that of different bones, and porous interfaces significantly improve implant integration and stability in the body. Unfortunately, direct implantation of porous structures containing air

pockets can lead to the growth of aerobic bacteria, causing complications and implant rejection. Also, direct interface between metallic surfaces and live tissues causes concerns, for example due to possible ion leakage and metal particle loosening in service with 3D-printed implants manufactured using powder bed technologies. Known solutions such as coating by different forms of calcium phosphate, generation of oxides or nitrides, improve the overall implant biocompatibility and integration but are not free of issues. Also, 3D-printed metal surfaces with thin inorganic coatings cannot provide optimal conditions (e.g. surface topography and properties) for the different stages of the implant integration.

One of the ways forward is through using multilayer inorganic- organic coating combinations (e.g. [4]). There is an excellent extension towards functionalized surfaces and filling of the pores through using hardening biopolymers such as hyaluronate. It is achieved through simple and inexpensive dipping-drying cycles. If each of the consecutive layers has different thickness and contains different ‘active agents’ corresponding structure will provide such optimization through the properly timed carrier biopolymer resorption and agent release. In addition, filling porous structures with hard polymers strongly increases its load-bearing capacity before the new bone grows into the pores. Extra advantages are also provided by the combination of hyaluronate and FACTOR-V our new natural agent with antibacterial properties enhancing tissue regeneration [5].

The presentation will show results from fifteen years of practice in 3D-printing of metallic implants using electron beam melting technology (electron beam powder bed fusion, E-PBF).

References:

- [1] I.Yu. Grubova, R.A. Surmenev et al. // ACS Omega. 2023. V. 8. 27519–27533
- [2] I.Yu., Grubova, M Kozadaeva et al. // J. Mater. Res. Technol. 2023. V. 25. 4457-4478
- [3] D. Khrapov, A. Koptyug et al. // Mater. Today Commun. 2024. V. 40. #109580
- [4] A. Mieszkowska, L. Martocq et al. // Polymers. 2025. V. 17(11). #1514
- [5] A. Koptyug, Y. Sukhovei et al. //Int. J. Mol Sci. 2023. V. 24 (9). #8020

NANOCOLLOIDAL GELS BASED ON CELLULOSE NANOCRYSTALS: THE ROLE OF THE NATURE OF NANOPARTICLES AND APPLICATION

Morozova S.M.

*Institute for Electromobility, Moscow Institute of Physics and Technology,
Dolgoprudny
morozova.sm@mipt.ru*

Nanocolloidal gels are a type of gel in which nanoparticles play a key role in gel formation. The use of cellulose nanocrystals (CNC) as nanoparticles has many advantages, including the biocompatibility of CNC, the ability to synthesize it from natural sources on a large scale, its rich surface chemistry, and its anisotropic shape. [1]. A series of hydrogels based on CNC and various polymers was obtained [2, 3].

The fibrillar structure, due to the anisotropy of the CNC shape, opens a way to imitate the nonlinear mechanical properties of biomaterials. Fig. 1a shows the structure of a gel based on CNC covalently cross-linked with gelatin and a copolymer of acrylamide and acrylic acid hydrazide.

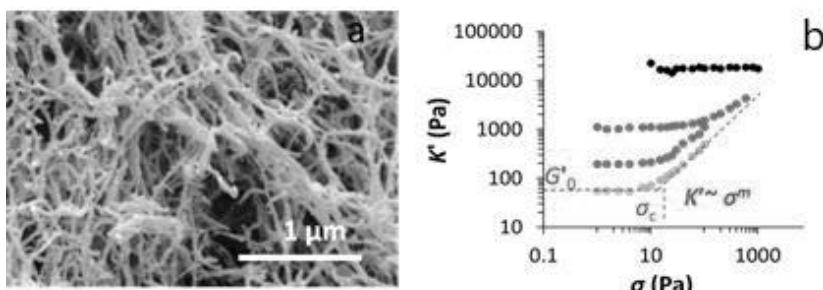


Figure 1 – Image of the CNC-based gel structure using SEM (a) and the gel's nonlinear mechanical properties (b)

The nonlinear mechanical behavior of biomaterials such as neurofilaments, fibrin, collagen, etc. is characterized by resistance to stress under low strain and strain-stiffening under high strain above the critical stress. [4]. Together with our foreign colleagues, we demonstrated the fundamental possibility of biomimicking the mechanical properties of biomaterials in hydrogels based on CNC. [2]. Further development of the work was aimed at studying the effect of the concentration of covalent cross-links between CNC with aldehyde groups on the surface and hydrazide groups of a synthetic copolymer based on acrylamide and acrylic acid hydrazide. It was shown that with an increase in the rigidity of individual fibrils,

i.e., with an increase in the concentration of cross-links, the nonlinear mechanical properties disappear (Fig. 1b).

Fundamental studies of the nonlinear mechanical properties of hydrogels have potential applications for controlling the growth of cell cultures and studying cellular communications [4].

References:

- [1] Y. Ma, S.M. Morozova, E. Kumacheva //Adv. Mater. 2024. V. 36. №. 23. #2312707.
- [2] E. Prince, S. Morozova, Z. Chen, V. Adibnia, I. Yakavets, S. Panyukov, M. Rubinstein, E. Kumacheva // PNAS 2023. V. 120. #e2220755120.
- [3] Y. Huang, S.M. Morozova, T. Li, H. Naguib, E. Kumacheva // Biomacromol. 2023. V. 24. # 1173.
- [4] C. Storm, J.J. Pastore, F.C. MacKintosh, N.C. Lubensky, P.A. Janmey // Nature. 2005. V. 435. #191.

MAGNETIC NANOPARTICLES IN BIOMEDICINE

Abakumov M.A.

¹*NUST MISIS, Moscow, Russia*

²*Pirogov Russian National Research Medical University, Moscow, Russia*
abakumov1988@gmail.com

Modern approaches to the treatment of oncological diseases require the development of highly effective and safe diagnostic and therapeutic tools. One of the promising areas is the creation of magnetic nanoparticles (MNPs) that combine unique physical and chemical properties that allow simultaneous solution of visualization problems, targeted drug delivery and therapy of malignant tumors.

The main objective of the report is to present the latest achievements in the development and application of magnetic nanoparticles for the diagnosis and therapy of oncological diseases.

Our research has allowed us to develop effective methods for the synthesis of magnetic nanoparticles that have pronounced properties in relation to diagnosis and therapy. The most important achievements include:

The possibility of obtaining highly sensitive contrast agents for magnetic resonance imaging (MRI).

Increasing the effectiveness of theranostic drugs by integrating diagnostic and therapeutic functions into one product.

Creation of drugs that improve the survival of animals with models of forms of oncological diseases.

The use of magnetic nanoparticles opens up new horizons in the development of biomedicine and promises to significantly change the practice of diagnosis and treatment of oncological diseases.

BIORESORBABLE MAGNESIUM ALLOYS IS PROMISING MATERIALS FOR MEDICAL PURPOSES

Martynenko N.S.¹, Rybalchenko O.V.¹, Lukyanova E.A.¹, Anisimova N.Y.², Temralieva D.R.¹, Kiselevsky M.V.², Dobatkin S.V.¹

¹A.A. Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²N.N. Blokhin National Medical Research Center of Oncology (N.N. Blokhin NMRCO) of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia

**nataliasmartynenko@gmail.com*

Magnesium alloys are promising materials for creating implants for bone immobilization. In addition to good biocompatibility and a suitable modulus of elasticity and density, they have such a property as bioresorbability, that is, the ability to dissolve in the patient's body during the healing period of an injury. This property allows avoiding repeated surgical intervention to remove the device. In addition, the choice of magnesium-based alloys is due to the absence of a significant toxic effect of Mg on the patient's body, as well as the positive effect of Mg²⁺ ions on the adhesion, proliferation and differentiation of osteogenic cells. However, the main disadvantages of magnesium alloys for medical applications are their high degradation rate and low mechanical properties. These disadvantages can be eliminated by a combination of alloying and deformation processing. However, the choice of the alloying system is limited by the biocompatibility of the alloying elements, and the method and deformation mode used should not lead to a deterioration in the corrosion resistance of the alloy being developed.

The aim of this work is to study the effect of deformation treatment on the mechanical properties, corrosion resistance and biocompatibility of magnesium alloys sing the example of the Mg-Zn-Ca system. The choice of the alloying system is due to the positive effect of Zn and Ca on the mechanical and corrosion properties of pure Mg. In addition, Zn and Ca have good biocompatibility and are important elements for the human body. The conducted research showed that deformation treatment leads to significant strengthening of the Mg-Zn-Ca alloys due to microstructure refinement and precipitation of particles rich in Ca and Zn. At the same time, it is possible to reach high level of ductility and corrosion resistance due to correct choice of method, temperature and degree of deformation. The report will summarize data on global developments in the field

of bioresorbable Mg-Zn-Ca alloys, and also present data obtained by the authors of the work.

Thus, it was shown that the warm rotary swaging of the Mg-1%Zn-0.6%Ca alloy allows to increase the yield stress and ultimate tensile strength values up to 329 ± 7 MPa and 348 ± 5 MPa, respectively, with a ductility level and degradation rate *in vivo* of $17.3 \pm 2.8\%$ and ~ 0.5 mm/year, respectively. The developed alloy had a high level of biocompatibility both under *in vitro* and *in vivo* conditions. In addition, a study of the biological activity of the alloy during contact with tumor cells did not reveal accelerated growth of the latter, which makes the alloys promising materials not only for classical orthopedics, but also for orthopedic oncology.

This work was carried out in accordance with the governmental task No. 075-00319-25-00.

POROUS STRUCTURES FOR ADVANCED BIOACTIVE TITANIUM IMPLANTS

Enikeev N.A.^{1*}, Ryzhkin A.A.¹, Kapustin A.V.¹, Gatina S.A.¹, Anisimova N.Y.²,
Kiselevsky M.V.²

¹*Laboratory of Metals and Alloys under Extreme Impacts, Ufa University of
Science and Technology, Ufa, Russia*

²*N.N. Blokhin National Medical Research Center of Oncology, Ministry of
Health of the Russian Federation, Moscow, Russia*

**nariman.enikeev@uust.ru*

Due to the excellent combination of biomechanical properties, titanium and its alloys are widely used to repair areas of bone tissue affected by tumors. With the development of additive manufacturing, the possibilities for designing personalized implantable systems of complex shape have been significantly expanded, including those based on lattice structures with a complicated inner surface of percolating pores with various geometries. Such structures can provide a better match between the characteristics of the material and the properties of bone tissue, and can also be loaded with both cellular products and drugs with antitumor or antimicrobial effects. As part of this study, samples of porous scaffolds with different pore sizes and geometries were obtained by laser powder bed fusion from VT6 titanium alloy powder. The strength and elastic properties of the samples were determined during compression tests, and virtual testing of mechanical behavior was carried out using the finite element method. Their biocompatibility, their effect on cell adhesion, proliferation, and osteogenic differentiation were also evaluated. It has been found that by adjusting the unit

size and topology it is possible to lower the "effective" elastic modulus of the meta-material to a range of values corresponding to various bone tissues, while maintaining a sufficient level of strength. The proposed approach for designing, modeling, and evaluating the biomechanical properties of lattice structures obtained by additive printing is promising for the development of personalized bioactive implants of a new generation.

The study was supported by the Russian Science Foundation grant #23-69-10003

DEFECT ENGINEERING AND RARE-EARTH DOPING IN ZnO AND NiO: A DFT STUDY OF ELECTRONIC STRUCTURE AND BAND GAP MODULATION

Niyazi Bulut¹, Omer Kaygili¹, Tankut Ates², Serhat Keser³

¹*Department of Physics, NewTrends / Computational & Chemical Physics Laboratory, Faculty of Science, Firat University, Elazığ, Türkiye*

²*Department of Engineering Basic Sciences, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Malatya Turgut Özal University, Battalgazi, Malatya, Türkiye*

³*Department of Chemical Technology, EOSB Vocational School, Firat University, Elazığ, Türkiye*

Zinc oxide (ZnO) and nickel oxide (NiO) are two of the most extensively studied transition metal oxides because of their wide range of applications in electronics, optoelectronics, spintronics, and catalysis. Their intrinsic properties, however, are strongly affected by native point defects and doping strategies. In this talk, I will present density functional theory (DFT) investigations of the structural and electronic properties of pure ZnO and NiO, as well as systems modified by oxygen and zinc vacancies and erbium (Er) doping. The calculated band gaps and density of states (DOS) show significant changes caused by defect formation and dopant incorporation. In ZnO, oxygen and zinc vacancies create localized states near the conduction and valence bands, respectively, thus reducing the band gap and changing carrier concentration. For NiO, defect states play a key role in modifying its Mott–Hubbard insulating behavior. Additionally, Er doping in ZnO and NiO is shown to adjust the electronic structure, offering potential ways to engineer the band gap and improve optoelectronic performance. The results give fundamental insight into defect-driven electronic behavior in ZnO and NiO, emphasizing the importance of defect engineering and rare-earth doping to optimize their functional properties for advanced device applications.

IN SITU FORMED COMPOSITES BASED ON CALCIUM PHOSPHATE AND ZIRCONIA FOR APPLICATIONS IN ORTHOPEDICS

Kannan S.

Centre for Nanoscience and Technology, Pondicherry University, Puducherry-605 014, India

para_kanna@yahoo.com; skannan.nst@pondiuni.edu.in.

Bioceramics generally classified as bioactive and bioinert types have profound application in load bearing orthopaedics for the past five decades. The development of composites by combining bioactive and bioinert ceramics has shown to circumvent the poor mechanical strength of bioactive calcium phosphate and weak bioactivity features of zirconia (ZrO_2). The simple mechanical mixing of the individual ceramic to yield composite encounter with the shortcomings of non-uniform distribution and particle size variations of the two components throughout the bulk of composite and moreover the restriction of heat treatment to attain desired densification is also a major drawback. An in situ synthetic approach that initiates by mixing the necessary components in solution form to yield a composite draws immense attention as the resultant possesses the salient features of tailoring properties to meet specific requirements. Specifically, $\beta\text{-Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ based composites comprising selective metal oxides and rare-earth (RE) elements exhibit tailored component ratios and outstanding thermal stability until 1400 °C during its combination with $c\text{-CeO}_2$, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, $r\text{-TiO}_2$, or ZnO . The accommodation of Ce^{3+} , Ti^{4+} , Zn^{2+} , Al^{3+} , and Fe^{3+} at the defective rhombohedral $\beta\text{-Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ delays its allotropic phase transformation to monoclinic $m\text{-Ca}_3(\text{PO}_4)_2$. Similarly, the dopants of Eu^{3+} , Tb^{3+} , Dy^{3+} , and Gd^{3+} integrate at the $t\text{-ZrO}_2$ or $c\text{-ZrO}_2$ lattice in zirconia-toughened alumina (ZTA). Eu^{3+} , Tb^{3+} , Dy^{3+} , and Gd^{3+} at the ZrO_2 lattice inhibits their degradation to $m\text{-ZrO}_2$ and stabilize the high temperature ZTA. These rare earth doped ZTA composites also offer multi-functionality: Eu^{3+} , Tb^{3+} , and Dy^{3+} impart fluorescence for imaging, while Gd^{3+} and Dy^{3+} provide paramagnetic properties for MRI contrast. Both composite systems demonstrate uniform cation distribution, improved mechanical strength at optimal doping levels, and enhanced ageing resistance, collectively paving the way for advanced bio-ceramics with superior structural, mechanical, and diagnostic performance.

STUDY AND PRODUCTION OF NANOSTRUCTURED NiTi SHAPE MEMORY ALLOYS WITH HIGH LEVEL OF PROPERTIES FOR MEDICAL APPLICATIONS

Komarov V.^{1*}, Karelina R.¹, Cherkasov V.², Khmelevskaya I.²,
Andreev V.¹, Yusupov V.¹, Prokoshkin S.²

¹*Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, RAS, Moscow, Russia*

²*National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia*

**vickomarov@gmail.com*

NiTi-based shape memory alloys (SMA) are attractive functional materials. One of the most effective way to control the SMA functional properties (FP) is a thermomechanical treatment (TMT), which allows creating a wide spectrum of structures from coarse-grained to nanocrystalline. For further development of different TMT modes at the temperatures below 700 °C, it is necessary to know the temperature ranges of dynamic processes of hardening and softening. Development of manufacturing processes of NiTi SMA with high functional characteristics requires more detailed knowledge about the relationship between features of structure formation, kinetics of martensitic transformations, functional properties of SMA and applied regimes of thermomechanical treatment.

In this study, the structure, phase composition and properties of the nickel-enriched NiTi SMA after deformations according to various schemes in a wide temperature range and post-deformation annealing (PDA) was studied. The structure, substructure and phase composition after deformation was examined by X-ray diffraction analysis, light and transmission electron microscopies. The mechanical properties were evaluated by Vickers hardness tests. The value of completely recoverable strain was determined by a thermomechanical method, including deformation by bending in liquid nitrogen and subsequent heating for the shape recovery.

The boundaries of the temperature ranges of the development of dynamic softening processes were determined, as follows: dynamic recovery in 100–300 °C range; dynamic polygonization in 300–600 °C range and dynamic recrystallization above 600 °C. Post-deformation annealing leads to the precipitation of Ni₄Ti₃ phase particles and accompanied by an increase in functional properties of NiTi SMA.

The use of megaplastic torsional deformation allowed to significantly increase the defectiveness of the crystal structure and contributed to the formation of a developed dislocation substructure with an average size of structural elements less than 500 nm. However, due to the non-uniformity of the deformation distribution over the sample cross-section, the formation of this structure was possible only in the peripheral areas.

ABC pressing of NiTi SMA resulted in the formation of a submicrocrystalline structure with an average size of structural elements of 200-250 nm with the accumulation strain $e = 2.1$. As a result of ABC pressing at 300 °C ($e = 2.1$), the highest value of the maximum completely recoverable strain was achieved.

The use of rotary forging up to a diameter of 3 mm resulted in the formation of a mixed nanocrystalline and nanosubgrain structure with an average size of structural elements of 75 nm. The formed structure contributed to an increase in the values of the maximum completely recoverable strain to 10% and more, which is several times higher than this value in samples after control treatment (4%) and shows the prospects for using this processing method to obtain long rods for use in the medical industry.

The study was conducted with financial support from the Russian Science Foundation within the framework of project No. 24-79-10332, <https://rscf.ru/project/24-79-10332/>.

LUMINESCENT MATERIALS IN BONE TISSUE SUBSTITUTES

Deyneko D.V.

*Chemistry Department, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
deynekomsu@gmail.com*

Modern surgery and traumatology are actively developing in the direction of regenerative medicine, where special attention is paid to the restoration of bone tissue in case of its damage, defects or diseases. One of the key areas is the development and use of bone tissue substitutes that can stimulate osteogenesis, provide mechanical support and gradually be replaced by natural bone, and are a solution in the treatment of bone defects caused by injuries, diseases or congenital anomalies.

Recent advances in this area include the integration of luminescent materials into bone substitutes, or implant materials, a development that holds significant promise for improving diagnostic, therapeutic, and monitoring capabilities for bone regeneration. Luminescent materials, particularly rare earth element (REE)-doped phosphates, represent a new generation of bone substitutes with expanded capabilities. REE-doped phosphates with apatite $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ and whitlockite $\beta\text{-Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ (or tricalcium phosphate) structures [1] have attracted considerable attention due to their biocompatibility and effective luminescent properties of REE ions. The emission of these materials allows visualization of the integration of the implant with the surrounding tissues using a non-invasive luminescence spectroscopy method, which allows monitoring the

regeneration and quality of new bone tissue formation. New complex solid solutions with the β -Ca₃(PO₄)₂-type structure with the general formula Ca_{8-x}Sr_xZnEu(PO₄)₇ and Ca_{8-x}Sr_xZnSm(PO₄)₇ (at 0 ≤ x ≤ 8) were synthesized using the high-temperature solid-phase synthesis method [2]. The studies showed that these compounds do not exhibit cytotoxicity towards the aMSC cell line and enhance osteogenic differentiation compared to the control samples. Notably, the Sm³⁺-doped compounds demonstrated effective antibacterial properties against pathogenic microorganisms (*E. coli*, *S. aureus*, *P. aeruginosa* and *E. faecalis*, *C. albicans*), while the Eu³⁺-doped samples did not significantly affect bacterial growth.

The analysis revealed strong emission in the red region of the visible spectrum in both series, corresponding to the $^5D_0 \rightarrow ^7F_2$ transition of Eu³⁺ ions and the $^4G_{5/2} \rightarrow ^6H_{7/2}$ transition of Sm³⁺ ions. When the obtained samples were kept in a Tris-HCl buffer solution (with pH 7.4) for 30 days, a redistribution of the intensity of the REE emission bands was observed, which is associated with the formation of apatite-type phase and the inclusion of REE ions in the structure of newly formed phases. Thus, the study of the photoluminescent properties of new phosphates containing REE ions provides valuable information for monitoring and controlling the bone tissue healing process.

The study was supported by Russian Science Foundation (grant No. 23-73-10007).

References:

- [1] D. Khayrutdinova, M. Goldberg, et al. // Optical Materials. 2025. V. 160, 116736.
- [2] D. Deyneko, V. Lebedev, et al. // Ceram. Int. 2025. V. 51, 21117.

СЕКЦИЯ 1

Металлические материалы

УСТНЫЕ ДОКЛАДЫ

Приглашенный доклад

ТИТАНОВЫЕ СПЛАВЫ ДЛЯ МЕДИЦИНЫ

Колмаков А.Г.*, Севостьянов М.А.

Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН,

Москва, Россия

**imetranlab10@mail.ru*

Титановые сплавы занимают лидирующее положение среди наиболее перспективных и востребованных материалов в современной медицине. Их ключевые преимущества — высокая удельная прочность, биосовместимость и коррозионная стойкость — обуславливают широкое применение в производстве имплантатов и различного медицинского оборудования. [1, 2].

Несмотря на широкое применение, титановые сплавы обладают рядом существенных недостатков, ограничивающих их использование в качестве биоматериалов. К ним относятся: высокий модуль упругости, что может приводить к неравномерному распределению нагрузки; риск аллергических реакций на легирующие элементы, такие как никель или ванадий.

Значительное превышение модуля упругости материала имплантата (чистый титан сплав ВТ6 выше 100 ГПа) над модулем упругости костной ткани (менее 30 ГПа) приводит к явлению стресс-экранирования [3]. Это связано с тем, что более жесткий имплантат воспринимает на себя основную механическую нагрузку, в то время как прилегающая кость оказывается разгруженной, что может привести к её резорбции [4].

Для решения указанных проблем на протяжении последних нескольких десятилетий ведутся интенсивные исследования, направленные на разработку принципиально новых сплавов. Ключевой задачей является создание материалов, обладающих низким модулем упругости при сохранении или улучшении прочностных характеристик существующих имплантационных материалов [5].

Одним из современных направлений исследований является разработка новых β -титановых сплавов с уникальными свойствами. Такие сплавы перспективны для создания ортопедических имплантатов, поскольку обладают более низким модулем упругости, повышенной биосовместимостью и не вызывают аллергических реакций по сравнению с традиционными $(\alpha+\beta)$ -титановыми сплавами [6].

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ № 24-13-00186.

Список используемой литературы:

- [1] Ezugwu E. O., Da Silva R. B., Sales W. F., Machado A. R., Overview of the Machining of Titanium Alloys. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. Encyclopedia of Sustainable Technologies, 2017, pp. 487-506.
- [2] Qizhi Chen, George A. Thouas. Metallic implant biomaterials, Materials Science and Engineering: R: Reports, Volume 87, 2015, Pages 1-57, ISSN 0927-796X.
- [3] R. Huiskes, H. Weinans, B. Vanrietbergen. Clinical Orthopaedics and Related Research, Volume 274, 1992, pp. 124-134.
- [4] Katti, K.S. Biomaterials in total joint replacement // Colloids and Surfaces B: Biointerfaces. Volume 39, Issue 3, 10 December 2004, Pages 133-142.
- [5] Sergienko K.V., Konushkin S.V., Kaplan M.A., Gorbenko A.D., Guo Y., Nasakina E.O., Sudarchikova M.A., Sevostyanova T.M., Morozova Y.A., Shatova L.A., Mikhlik S.A., Sevostyanov M.A., Kolmakov A.G. Physical and Mechanical Properties of Ti-Zr-Nb Alloys for Medical Use // Metals. 2024. V.14. №1311. DOI: 10.3390/met14111311
- [6] Kim H. Y., Fu J., Tobe H., Kim J. I., Miyazaki S. Crystal Structure, Transformation Strain, and Superelastic Property of Ti–Nb–Zr and Ti–Nb–Ta Alloys // Shap. Mem. Superelasticity: 2015. V.1. 107–116 p.

Приглашенный доклад

**ПОДХОДЫ К ОПТИМИЗАЦИИ СВОЙСТВ
БИОРЕЗОРБИРУЕМЫХ МАГНИЕВЫХ ИМПЛАНТАТОВ**
Комиссаров А.А.*, Баженов В.Е., Плегунова С.В., Ершов Н.А.
Университет науки и технологий МИСИС, Россия, г. Москва

В современной медицине распространены операции, необходимые для восстановления костной ткани: остеосинтез, направленная костная регенерация. Возможность применения биорезорбируемых материалов, способных безопасно растворяться в организме пациента, позволяет избегать проблем, вызываемых проведением дополнительных операций по удалению нерастворимых временных имплантатов. К таким материалам предъявляются особые требования: сохранение механических характеристик на начальном этапе резорбции (статических и усталостных); оптимальная скорость коррозии, исключая слишком медленное или быстрое развитие события; биосовместимостью; технологичностью.

К биорезорбируемым имплантатам относят изделия, изготовленные из различных полимерных материалов (ПЛА, ПГК и др.), железа, цинка, магния, а также сплавов этих металлов. Жёсткость и прочность полимеров сильно ограничена материалом, что исключает их применение в нагруженных конструкциях при остеосинтезе. Железо и существующие сплавы на его основе резорбируют медленнее требуемого, что объясняет риск возникновения «эффекта экранирования напряжений». Цинковые сплавы мало пластичны и склонны к хрупкому разрушению, что ограничивает их применение в крупногабаритных имплантатах. Несмотря на высокую скорость резорбции магния в организме, что является его основным недостатком, существуют различные способы его устраниния с помощью легирования, термодеформационной обработки или нанесения покрытия. Соответствие магниевых сплавов требованиям, предъявляемым к материалам биорезорбируемых имплантатов, обуславливает высокий интерес научного сообщества к этой тематике, что подтверждается большим количеством исследований.

В работе представлены результаты изучения особенностей влияния легирования, в том числе и комплексного, магниевых сплавов, получаемых классическими методами обработки, содержащими: галлий, кальций, цинк, марганец, иттрий. Сплавы получали методом литья, обрабатывали резанием с последующей пластической деформацией по различным режимам (прессование, волочение, прокатка, ротационная ковка). Также исследован перспективный метод изготовления персонализированных медицинских изделий на сплаве WE43 методом лазерного плавления порошка (LPBF). Микроструктура и эксплуатационные свойства (механические, коррозионные, цитотоксичность) изучены на всех состояниях.

Разработаны технологические маршруты получения изделий с требуемыми свойствами, от этапа выплавки до финальной обработки готового изделия. Сплавы систем Mg-Zn-Ga, Mg-Ga-Mn, Mg-Ga-Zn-Mn, Mg-Zn-Y-Mn оказались наиболее перспективными, благодаря комплексу их свойств. В таблице 1 указаны значимые сплавы и их свойства.

Таблица 1 – Свойства наиболее перспективных сплавов в разных состояниях

Сплав	Состояние материала	σ_t , МПа	σ_b , МПа	δ , %	СР, мм/год
Mg-2,0Zn-2,0Ga	Экструзия 6,0 + волочение 4,2	340±5	365±5	14,6±0,4	0,36±0,07
Mg-1,0Ga-0,6Mn	Экструзия 6,0	218±12	280±4	11,2±1,1	0,11±0,04
Mg-1,0Ga-1,0Zn-0,6Mn	Экструзия 6,0	204±5	279±5	22,4±2,1	0,28±0,06
Mg-1,5Zn-3,6Y-0,8Mn	Экструзия 6,0 + волочение 5,2	266±5	328±4	12,2±1,6	0,17±0,03
WE43	LPBF	178±10	266±10	7,0±0,9	0,91±0,05

Таким образом, комплексное легирование и управление структурой с помощью передовых технологий позволяют создавать биорезорбируемые сплавы с оптимальным балансом прочности, пластичности и резорбции, что позволяет внедрять их в клиническую практику.

Выполнено в рамках реализации Стратегического проекта «Биомедицинская инженерия и биоматериалы» НИТУ МИСИС (программа «Приоритет 2030»)

Приглашенный доклад

**КЛЕТОЧНАЯ АДГЕЗИЯ И КОЛОНИЗАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ
СПЛАВА ВТ6 С НАНЕСЕННЫМИ ЛАЗЕРОМ НАСЕЧКАМИ**

Страумал Б.Б.¹, Киселевский М.В.², Анисимова Н.Ю.², Новрузов К.М.²,
Храпова Н.Н.¹, Горнакова А.С.¹, Давдян Г.С.¹

¹*Институт физики твердого тела РАН, Черноголовка, Россия*

²*ФГБУ «НМИЦ онкологии им. Н.Н. Блохина» Минздрава России*

Ранее нами была изучена адгезия мышиных пре-остеобластов MC3T3 к поверхности титанового сплава ВТ6 с нанесёнными на неё системами линейных иррегулярных царапин разной глубины [1]. Было показано, что клетки плохо прикрепляются к совершенно гладкой поверхности, затем с ростом шероховатости адгезия возрастает и достигает максимума при глубине канавок около 10 мкм, а на всё более шероховатой поверхности клетки закрепляются всё хуже и хуже.

В данной работе на поверхность полированных подложек из сплава ВТ6 с помощью лазерной гравировки были нанесены системы ромбических насечек с углом между сторонами ромба 50° и разным расстоянием между осями гравированных канавок (115, 125, 150, 175 и 200 мкм). В качестве биологической модели использовали клетки ММСК человека (коллекция ФГБУ «НМИЦ онкологии им. Н.Н. Блохина» Минздрава России), обладающие остеогенным потенциалом.

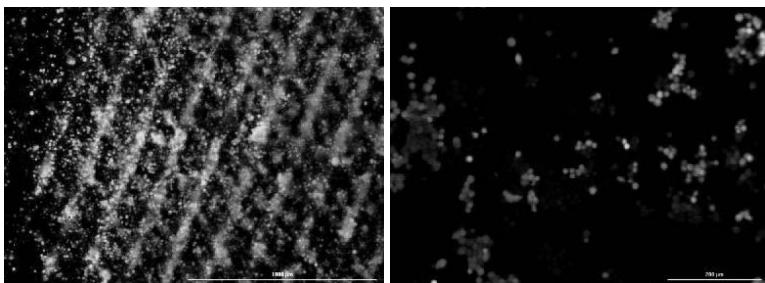


Рисунок 1 – Адгезия ММСК на поверхности образцов сплава ВТ6 с лазерными насечками (слева) и на контрольном образце с полированной поверхностью (справа).

Проведенные эксперименты показали, что, в целом, модификация поверхности лазерными насечками предложенными методами в различных режимах ведет к усилению стимуляции образцами клеточной адгезии и колонизации (Рис. 2). Согласно собранным данным, такой метод модификации стимулировал усиление колонизации клетками поверхности образцов на 91-311% в сравнении с полированными образцами, которые мы рассматривали в качестве контроля. Можно предположить, что профиль в виде канавок, где как можно видеть концентрируется основное количество прикрепившихся ММСК (Рис. 1), создает ограниченное пространство для локального накопления цитокинов и ростовых факторов, которые индуцируют пара- и аутокринную стимуляцию клеток.

Сравнения свойств образцов между собой показали, что наиболее активно стимулировали клеточную адгезию и колонизацию образцы с наименее сложным профилем дна канавок, где концентрировалось наибольшее количество клеток, и с относительно небольшой глубиной канавок (от 50 до 104 нм), не препятствующих контактам между ММСК в разных канавках, но обеспечивающих при этом достаточную площадь для прикрепления клеток в пределах одной канавки.

Список используемой литературы:

- [1] B.V. Straumal, A.S. Gornakova, M.V. Kiselevskiy et al. // J. Mater. Res. 2022. V. 37. P. 2661–2674

Приглашенный доклад

**ОСОБЕННОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ
МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ, ПОЛУЧЕННЫХ ЛАЗЕРНОЙ
3D ПЕЧАТЬЮ**

Казанцева Н.В.

*Институт физики металлов УрО РАН им. М. Н. Михеева, Екатеринбург,
Россия*

**kazantseva-11@mail.ru*

В докладе представлен обзор исследований по структуре и свойствам металлических образцов Ti-6Al-4V и 316L, полученных с помощью лазерной 3D печати. Рассмотрено влияние пористости на процессы деформации и разрушения 3D печатных (СЛС) образцов из порошков стали 316L и титанового сплава Ti-6Al-4V в условиях скоростной деформации на растяжение/сжатие. Показано, что с увеличением скорости деформации при испытаниях на растяжение одновременно возрастают как прочность, так и пластичность СЛС образцов. В отличие от этого факта, с увеличением скорости деформации при испытаниях на растяжение обычных образцов снижаются как прочность, так и пластичность. Анализ процесса деформации СЛС стальных 316L образцов показал существование различных микромеханизмов, связанных с деформацией пористых материалов. Полосы локализации деформации, которые подтверждают наличие нестабильного пластического течения материала при деформации, были обнаружены в СЛС образце стали 316L после сжатия до 30% при комнатной температуре.

Рассмотрены особенности протекания процесса деформации при изгибе в материалах, полученных методом лазерной 3D печати. Обнаружено, что циклическая деформация трехточечным изгибом при комнатной температуре сплава Ti – 6Al – 4V, полученном традиционным способом, как и после СЛС, приводит к транскристаллитному разрушению образца с образованием вязкой составляющей, появление которой связано со способом получения, в результате которого формируется слоистая структура. При циклической деформации такого образца происходит образование пор при локальном разрыве слоев.

*Работа выполнена в рамках государственного задания
Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН.*

Приглашенный доклад

**ИССЛЕДОВАНИЯ, РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ
ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ВЫВОД НА РЫНОК СЕРДЕЧНО-
СОСУДИСТЫХ ИМПЛАНТАТОВ ИЗ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ
ДВОЙНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ TiNi**

Полетика Т.М.¹, Гирсова С.Л.¹, Кудряшов А.Н.², Биттер С.М.¹,
Лотков А.И.¹

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск

²ООО Ангиолайн, Новосибирск

Двойные сплавы на основе TiNi широко применяются в сердечно-сосудистой хирургии как сплавы, проявляющие эффекты сверхэластичности (СЭ) и памяти формы (ЭПФ), которые обусловлены термоупругими мартенситными превращениями (МП) из высокотемпературной кубической B2 фазы в мартенситные R и B19' фазы с ромбоэдрической и моноклинной структурами, соответственно. Одними из основных требований к устройствам для сердечнососудистой хирургии и имплантатам из этих сплавов являются величина и высокая циклическая стабильность проявления эффекта сверхэластичности. В работе представлены результаты исследований и разработка технологий изготовления из сплава на основе TiNi окклюдера для закрытия ушка левого предсердия у больных с мерцательной аритмией предсердий и стентов для периферических сосудов с модифицированной поверхностью ионами кремния методами ионно-плазменных технологий. Для исследований влияния старения на структурно-фазовое состояние, механические и неупругие свойства использовали трубчатые образцы из коммерческого нанокристаллического сплава Ti–50,9 ат.% Ni (Vascotube GmbH) с внешним диаметром 1,63 мм и толщиной стенок 0,23 мм с зёренно-субзёренной структурой со средним размером зёрен-субзёрен 80 нм. Старение с выделением дисперсных когерентных частиц Ti3Ni4 проводили в интервале 300–500°C с выдержкой 1 ч. Механические испытания на одноосное растяжение в режиме нагружение – разгрузка проводили при комнатной температуре со скоростью 4×10^{-5} с⁻¹ на испытательной машине LFM-125. Исследования структуры образцов проводили методами ПЭМ на микроскопе JEM 2100 и РСА на дифрактометре ДРОН-8. Определены размеры, форма и пространственное распределение когерентных выделений Ti3Ni4 вnanoструктуре. Установлено, что наличие в смешанной зёренно - субзёренной структуре ансамбля внутренних границ раздела различного типа способствует гетерогенному распределению наночастиц Ti3Ni4 в объеме B2-матрицы,

что связано с их выделением в области малоугловых границ субзёрен и подавлением распада твердого раствора в нанозёрнах с большеугловыми границами. Исследовано влияние эволюции системы когерентных частиц Ti₃Ni₄ с изменением температуры старения на мартенситные превращения и механические свойства НК сплава TiNi с эффектами памяти формы и сверхэластичности. Показано, что эволюция системы частиц Ti₃Ni₄ и увеличение объёма R-фазы с повышением температуры сопровождаются сдвигом характерных температур МП и изменением механического поведения от сверхэластичности к эффекту памяти формы. Выявлена взаимосвязь эволюции системы выделяющихся частиц Ti₃Ni₄ в процессе отжигов с мультистадийностью мартенситных превращений НК сплава TiNi.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, проект FWRW-2021-0004

**ОПЫТ РАЗРАБОТКИ И ВНЕДРЕНИЯ В ПРОИЗВОДСТВО
БИОСОВМЕСТИМЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ПЛАЗМЕННО-
ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ОКСИДИРОВАНИЯ ДЛЯ
ДЕНТАЛЬНЫХ ИМПЛАНТАТОВ**

Парфенов Е.В.^{1,2*}, Фаррахов Р.Г.², Аубакирова В.Р.^{1,2}, Дюрягин В.С.³,
Парфенова Л.В.⁴

¹Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

²ООО «Анатаз», Уфа, Россия

³ООО «НС Технология», Челябинск, Россия

⁴Институт нефтехимии и катализа УФИЦ РАН, Уфа, Россия

*evparfenov@mail.ru

Плазменно-электролитическое оксидирование (ПЭО) – это сравнительно новая технология формирования биосовместимых покрытий на титановых, магниевых, циркониевых и других биосовместимых сплавах, позволяющая получать пористые покрытия, повышающие совместимость металлического имплантата с костью человека. Начало исследований ПЭО как биосовместимых покрытий относится к рубежу 1990-2000 годов [1]. В начале 2000х годов появились ПЭО-покрытия у имплантатов мировых производителей, хотя технология была названа «искровым анодированием». Наша научная группа начала фокусировку на биосовместимых покрытиях, получаемых методом ПЭО, в 2015 году [2].

Наш опыт показывает, что от начала разработки покрытия до серийного производства изделий прошло 8 лет; по состоянию на текущий

момент, технология ПЭО используется на дентальных имплантатах Dental Synthesis уже в течение двух лет. За это время были решены следующие научные и организационные проблемы. Во-первых, были отработаны режимы получения покрытий на образцах на ряде материалов с учетом особенностей технологической установки ПЭО. Научно-исследовательские работы были поддержаны грантами РФФИ и РНФ, что позволило выполнить дорогостоящие испытания образцов с ПЭО покрытиями на биосовместимость. Этап НИР занял 6 лет, в течение которых проводился также поиск индустриального партнера, заинтересованного в изготовлении имплантатов с ПЭО покрытиями. Во-вторых, в 2018 году состоялось важное знакомство с компанией «НС Технология», а в 2019 году был подписан договор о сотрудничестве между университетом и этой компанией. К этому времени «НС Технология» вышла на рынок с российским дентальным имплантатом NCTi и рассматривала возможности расширения продуктовой линейки на основе российских научных разработок, в том числе, наноструктурного титана и ПЭО покрытий [3]. В течение двух лет шла отработка технологии ПЭО покрытия на имплантатах, в том числе с доказательством биосовместимости, при поддержке технологического проекта Евразийского НОЦ мирового уровня. В-третьих, были сформулированы технические требования к опытному образцу технологической установки и в 2022 году началось изготовление автоматизированного источника питания для ПЭО – наиболее сложного элемента системы. В конце 2022 года Фондом содействия инновациям был поддержан наш проект на конкурсе «Старт-1», что позволило зарегистрировать ООО «Анатаз», создать технологическую установку для формирования ПЭО покрытий и перейти в 2024 году к серийному производству имплантатов Dental Synthesis с такими покрытиями.

Таким образом, срок выхода на рынок с разработками в области биосовместимых материалов и имплантируемых устройств составляет от 7 до 9 лет; результативной оказывается стратегия market pull.

Список используемой литературы:

- [1] M. Aliofkhazraei, D. Macdonald, E. Matykina, et al // App. Sur. Sci. Adv. 2021. V. 5. #100121.
- [2] A. Yerokhin, E. Parfenov, A. Matthews // Surf. Coat. Technol. 2016. V. 301. #54.
- [3] E. Parfenov, L. Parfenova, G. Dyakonov, et al // Surf. Coat. Technol. 2019. V. 357. # 669.
- [4] L. Zaynullina, R. Farrakhov, I. Ramazanov, et al // Sovr. Tehnol. Med. 2023. V. 15. # 40.

**СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ НА
ОСНОВЕ СРЕДНЕЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА TiNbZr С
БОРИДНЫМ УПРОЧНЕНИЕМ**

Жеребцов С.В.^{1*}, Озеров М.С.², Воропаева Е.С.², Тагиров Д.В.²

¹*Санкт-Петербургский государственный морской технический
университет, Санкт-Петербург, Россия*

²*Белгородский государственный национальный исследовательский
университет, Белгород, Россия*

*zherebtsov@smtu.ru

Композиты на основе металлической матрицы TiZrNb, армированные боридами, сформированными *in situ*, были получены методом вакуумной дуговой плавки с использованием различного количества диборида титана (0,2, 2,0 и 4,4 мас.%). Были исследованы структура, механические свойства и биосовместимость композитов. Исходные микроструктуры композитов состояли из ОЦК-матрицы TiZrNb и игольчатых частиц (Ti_xNb)B, объемная доля которых составляла ~ 1,0%, 6,8% и 13,2% соответственно. Кроме того, в матрице композитов было обнаружено небольшое количество частиц фазы размером ~ 10 нм. Испытание на сжатие при комнатной температуре показало, что минимальное содержание боридов не оказывает заметного упрочняющего эффекта на механические свойства композита. Увеличение содержания (Ti, Nb)B до 6,8 об.% привело к увеличению предела текучести на 22% до ~900 МПа без видимого снижения пластичности. Композит с 13,2 об.% боридов показал предел текучести 1010 МПа и пластичность при сжатии 9%, что может быть связано с гиперэвтектическим составом и появлением крупных частиц первичного (Ti_xNb)B. Оценка основных механизмов упрочнения показала, что упрочнение за счет передачи нагрузки от упрочнителя к матрице вносит основной вклад в общую прочность композита. Анализ биосовместимости предполагает некоторое снижение скорости пролиферации мезенхимальных стволовых клеток с увеличением количества боридов.

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ № 22-19-00476-П.

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ИССЛЕДОВАНИЮ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ БИОДЕГРАДИРУЕМОГО СПЛАВА Fe-30Mn-5Si: ОТ РЕОЛОГИИ К РАДИАЛЬНО-СДВИГОВОЙ ПРОКАТКЕ

**Антипина М.А.^{1*}, Кадиров П.О.¹, Жукова Ю.С.¹, Шереметьев В.А.¹,
Пустов Ю.С.¹, Коротицкий А.В.¹, Чеверикин В.В.², Прокошкин С.Д.¹**

¹*НИТУ «МИСИС», Москва, Россия*

²*МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

**karavaeva.ma@ya.ru*

В данной работе представлен комплексный подход к исследованию биодеградируемого сплава Fe-30Mn-5Si, сочетающий анализ реологических свойств в условиях горячей деформации и применение радиально-сдвиговой прокатки (РСП) в составе комбинированной термомеханической обработки (ТМО). Целью работы является оптимизация структурного состояния и функциональных характеристик сплава для повышения его в качестве материала для временных имплантатов.

На первом этапе проведены испытания на горячее сжатие в широком диапазоне температур (250–1050 °C) и скоростей деформации (0,1–10 с^{-1}). Установлено, что при температуре 900 °C и скорости деформации 1 с^{-1} реализуются оптимальные условия пластической деформации: минимальные значения максимального напряжения, отсутствие динамической рекристаллизации и равномерное распределение деформации. Эти данные использованы при выборе параметров РСП.

На втором этапе выполнена РСП при 900 °C с истинной степенью деформации $e=1,88$, с последующей продольной прокаткой (ПП) при 700 °C ($e=0,3$). Согласно данным комплексного структурного исследования (оптическая, электронная и EBSD-микроскопия, рентгеноструктурный анализ), РСП приводит к формированию структуры γ -аустенита с размерами зерна 10–20 мкм. Последующая продольная прокатка приводит к дополнительному измельчению до 1–5 мкм и образованию полигонизованной субструктурой. В обоих случаях наблюдается устранение ϵ -мартенсита и переход к однофазному состоянию.

По диаграммам деформации растяжением выявлено значительное повышение прочностных характеристик после ТМО: значение $\sigma_{0,2}$ увеличилось до 490 МПа, σ_b до 935 МПа, относительное удлинение до 28%. Это объясняется эффектом упрочнения за счёт зернограничного механизма и формирования дислокационной субструктуры. Показано, что РСП и РСП+ПП обеспечивают лучшие прочностные характеристики по сравнению с традиционной обработкой и превосходят аналогичные

показатели для сплавов на основе Mg и Zn, используемых в медицинской имплантологии.

Электрохимические испытания в растворе Хэнкса продемонстрировали снижение скорости биодеградации после РСП до 0,22 мм/год (по сравнению с 0,6 мм/год после контрольной обработки), что связано с устранением более электрохимически активной ϵ -мартенситной фазы и снижением количества дефектов кристаллической решетки.

Функциональные испытания на коррозионную усталость показали увеличение числа циклов до разрушения почти в три раза по сравнению с контрольной обработкой: с 2326 до 7162 циклов, что подтверждает улучшение долговечности материала в условиях циклического нагружения и коррозии.

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ № 25-79-10241.

БИОМИМЕТИЧЕСКОЕ ПОКРЫТИЕ СПЛАВА Ti-15Mo

Гатина С.А.^{1*}, Фаррахов Р.Г.¹, Анисимова Н.Ю.², Киселевский М.В.²,
Еникеев Н.А.¹

¹*ФГБОУ ВО Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия*

²*ФГБУ «НМИЦ онкологии им. Н.Н. Блохина» Минздрава России, Москва,*

Россия

**lana_gatina@mail.ru*

Ti-15Mo, сертифицированный для применения в медицине ASTM F2066, относится к псевдо- β -сплавам и является альтернативой наиболее популярному сплаву Ti-6Al-4V. Основные преимущества Ti-15Mo - низкий модуль упругости и отсутствие в составе токсичных для человека Al и V. Однако он уступает по прочности сплаву Ti-6Al-4V. Традиционные способы упрочнения псевдо- β -титановых сплавов, включающие старение, приводят к повышению модуля упругости за счет выделения вторых фаз, что ухудшает биомеханическую совместимость сплава с костью. Одним из перспективных методов повышения прочности сплавов является формирование в них ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры интенсивной пластической деформацией (ИПД). Так, равноканальное угловое прессование (РКУП) сплава Ti-15Mo позволяет получать объемные УМЗ заготовки, обладающие высокой прочностью (1400 МПа) при относительно низком модуле упругости (80 ГПа) за счет сохранения β -фазы, что значительно повышает конкурентоспособность сплава.

Известно, что, несмотря на хорошую биосовместимость, титановые сплавы обычно слабо стимулируют поверхностную адгезию клеток, что ведет к низкой остеointеграции имплантатов. Поэтому актуальным направлением развития медицинских титановых сплавов является повышение их биоактивности за счет модификации поверхности. Наиболее подходящим для титановых сплавов является метод плазменного электролитического оксидирования (ПЭО). Оксидные покрытия обладают развитой пористой поверхностью, имитирующей топографию кости и улучшающей адгезию остеобластов, что призвано усилить остеокондукцию и остеоиндукцию погружных изделий для ортопедии на основе Ti-15Mo. Регулирование химического состава покрытий при ПЭО позволяет приблизить его к химическому составу кости, стимулируя остеогенез. Дополнительно поры покрытий можно заполнять лекарственными препаратами для предупреждения местных осложнений после имплантации.

В данной работе исследовали влияние параметров ПЭО на особенности покрытия сплава Ti-15Mo в крупнозернистом (КЗ) и УМЗ состояниях, а также его биосовместимость *in vitro* и коррозионную стойкость.

В ходе экспериментов *in vitro* с использованием модельных клеток с остеогенным потенциалом было показано, что сплав с покрытием и без не обладает цитотоксичным эффектом. ПЭО покрытие увеличивает сопротивление коррозии сплава. Покрытия УМЗ образцов характеризуются большей пористостью. Показано, что химический состав, размер пор и пористость ПЭО покрытий влияют на остеокондуктивность поверхности, усиливая адгезию мезенхимальных стромальных клеток к поверхности образцов. Полученные данные позволили заключить, что сплав Ti-15Mo с поверхностью, модифицированной методом ПЭО, является перспективным остеокондуктивным и остеоиндуктивным материалом для разработки погружных имплантатов для остеосинтеза и вмещения костных дефектов.

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ № 23-69-10003, <https://rscf.ru/project/23-69-10003/>.

**О РОЛИ СТРУКТУРНОЙ НАСЛЕДСТВЕННОСТИ В
УПРАВЛЕНИИ ФАЗОВЫМИ ПРЕВРАЩЕНИЯМИ И
ФУНКЦИОНАЛЬНО-МЕХАНИЧЕСКИМИ
ХАРАКТЕРИСТИКАМИ СТАРЕЮЩЕГО НИКЕЛИДА ТИТАНА**

Рыклина Е.П.^{1*}, Полякова К.А.¹, Мурыгин С.Р.¹, Комаров В.С.^{1,2},
Конопацкий А.С.¹, Теплякова Т.О.^{1,4}, Андреев В.А.², Полетика Т.М.⁵,
Гирсова С.Л.⁵, Пискунова П.А.¹

¹*НИТУ МИСИС, Москва, Россия*

²*Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН,
Москва, Россия*

³*CRISMAT, CNRS, Normandie Université, ENSICAEN, UNICAEN, Caen,
France*

⁴*Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт,”
Москва, Россия*

⁵*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск,
Россия*

**ryklina@tmo.misis.ru*

Сплавы с памятью формы (СПФ) на основе никелида титана околоэвакиатомных составов широко используются в качестве функциональных материалов, обладающих уникальным комплексом свойств. Сфера их применения чрезвычайно широка – от медицинских имплантатов до интеллектуальных конструкций космической техники. В настоящей работе впервые систематически исследована взаимосвязь между исходным структурным состоянием сплава Ti-50,8 ат.%Ni, микроструктурой, формирующейся в процессе старения, особенностями мартенситных превращений и функционально-механическими характеристиками.

В мелкозернистой структуре сохраняется относительно равномерное распределение частиц Ti_3Ni_4 с высокой частотой, а в крупнозернистой – неравномерное распределение частиц на всех стадиях старения. В смешанной преимущественно ультрамелкозернистой (УМЗ) структуре декорирование субграниц частицами тормозит рост субзерен.

Варьирование исходной структуры позволяет регулировать характеристические температуры МП и их температурные интервалы при охлаждении/нагреве в широком диапазоне. Выявлены условия перехода от двухстадийных к трех- и четырехстадийным мартенситным превращениям в процессе старения для каждого исходного структурного состояния; эти условия определяются степенью гетерогенности распределения частиц фазы Ti_3Ni_4 и уменьшением концентрации никеля в B2-матрице. Выявлены

режимы старения, позволяющие регулировать ширину температурного интервала восстановления формы в широком диапазоне во всех структурных состояниях.

Особенности эволюции микроструктуры в процессе старения предопределяет эволюцию скрытой теплоты МП и температурного гистерезиса, который в значительной мере наследуется при последующем старении. Выявлена корреляция между разницей скрытой теплоты превращения при нагреве и охлаждении и температурным гистерезисом. Наследование исходной структуры предопределяет эволюцию функционально-механических свойств сплава с увеличением температуры и времени отжига; ее неоднозначный характер связан с сохранением или потерей когерентности частиц Ti_3Ni_4 с B2-матрицей. Показано, что эффективность старения определяется исходным структурным состоянием сплава. Обнаружена слабая восприимчивость модуля упругости к размеру рекристаллизованного зерна и особенностям микроструктуры, формирующейся в процессе старения.

Установленные закономерности влияния исходного структурного состояния, а также режима старения на конечный комплекс функционально-механических свойств позволяют осуществлять прецизионное управление важными с практической точки зрения свойствами сплава в широком диапазоне температур эксплуатации. Сформулированы рекомендации, позволяющие получить требуемый уровень функционально-механических свойств путем выбора исходного структурного состояния и режима старения.

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания НИТУ МИСИС, шифр проекта FSME-2023-0006.

**АНОДИРОВАНИЕ ТИТАНА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ
НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ С
АНТИБИОТИКОМ**

Веснин В.Р.*, Скрябин А.С.

Московский государственный технический университет им. Н.Э.

Баумана, Москва, Россия

**vesninvr@bmstu.ru*

Современные имплантанты должны сочетать прочность, устойчивость в биосреде, активное взаимодействие с тканями и защиту от инфекций [1,2]. Наибольшее внимание уделяется модификации поверхности клинически апробированных титанов и их сплавов, в частности Ti–6Al–4V

[3]. Для повышения биосовместимости применяют плазменное, детонационное, газодинамическое напыление, микродуговое оксидирование, электрофорез [4] и анодирование. Последнее позволяет формировать нанотрубчатые структуры диоксида титана (TNT) [5], способные удерживать и высвобождать лекарственные вещества [6], обеспечивая антисептический и остеоинтеграционный эффект.

В работе использовались заготовки и шайбы из BT1-0, а также винты Ti–6Al–4V для *in vivo*-тестирования. Шайбы (16×4 мм) после шлифовки ($R_a \approx 0,1$ мкм) анодировали (30–60 В, 20–90 мин) с последующим сушкой (150 °C, 1 ч) и отжигом (500 °C, 1,5 ч). В одной из схем использовали 40 В, 1 ч в H_3PO_4 (4 %) + HF (0,39 %) с ультразвуковой очисткой. Поверхность насыщали гентамицином (40 мг/мл, 1 ч).

Морфология покрытий исследовалась методами оптической и электронной микроскопии, фазовый состав изучался рамановской спектроскопией. Зафиксированы пики анатаза с примесями рутила и сигналы гентамицина, сохранявшиеся спустя 24 ч. Эффективность винтов проверяли *in vivo* на крысах Wistar с моделью инфицированного дефекта большеберцовой кости (*S. aureus*, $1,5 \times 10^6$ КОЕ). Через 14 суток проводили гистологию и микро-КТ; полученные данные были статистически достоверны ($p < 0,05$).

Установлено, что анодированное покрытие с гентамицином эффективно подавляет развитие бактериальной инфекции *in vivo*, снижает выраженность остеолиза и способствует ускоренному формированию костной ткани. При этом использование антибиотика не оказалось статистически значимого отрицательного влияния на остеоинтеграцию.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 20-79-10190, <https://rscf.ru/project/20-79-10190>.

Список используемой литературы:

- [1] Amirtharaj Mosas K. K. et al. Recent Advancements in Materials and Coatings for Biomedical Implants // Gels. 2022. Vol. 8. No. 5. p. 323.
- [2] Skryabin A. S. et al. Biomechanical and Microtomographic Assessment of the Effectiveness of Osseointegration of Threaded Titanium Implants with Single- and Bilayer Bioceramic Coatings // Bio-Medical Engineering. 2022. Vol. 56. No. 2. pp. 142-145.
- [3] Sarraf M. et al. A state-of-the-art review of the fabrication and characteristics of titanium and its alloys for biomedical applications // Bio-des. Manuf. 2022. Vol. 5, № 2. P. 371–395.
- [4] Skriabin A. S. et al. Titanium Membranes with Hydroxyapatite/Titania Bioactive Ceramic Coatings: Characterization and In

Vivo Biocompatibility Testing // ACS Omega. 2022. Vol. 7. No. 51. pp. 47880-47891.

[5] Cho H.-R., Choe H.-C. Nanotube formation of Ti-6Al-4V alloy and its corrosion behavior // Thin Solid Films. 2022. Vol. 751. P. 139216.

[6] Chopra D., Gulati K., Ivanovski S. Understanding and optimizing the antibacterial functions of anodized nano-engineered titanium implants // Acta Biomaterialia. 2021. Vol. 127. P. 80–101.

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ТРУБ ИЗ СПЛАВОВ
С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ НИКЕЛИДА ТИТАНА ДЛЯ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В МЕДИЦИНЕ И ТЕХНИКЕ**

Карелин Р.Д.^{1*}, Комаров В.С.¹, Черкасов В.В.², Юсупов В.С.¹,
Андреев В.А.¹

¹*Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН,
Москва, Россия*

²*Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия*
**rdkarelina@gmail.com*

Трубы из сплавов с памятью формы (СПФ) на основе никелид титана получили широкое практическое применения в различных областях науки и техники, и в особенности в медицине, где они активно используются для изготовления сердечно-сосудистых стентов. Производство бесшовных труб из никелида титана является сложной технологической задачей. В настоящее время трубы и трубные заготовки из никелида титана в России не производятся. Данный факт говорит о важности разработки технологии их получения в рамках развития импортозамещения. Кроме того, так как свойства СПФ Ti-Ni являются крайне чувствительными к структурно-фазовому состоянию сплава, которое непосредственно определяется технологической схемой его получения, то для успешной разработки новой технологии получения труб требуется решить целый ряд научно-исследовательских задач.

В данной работе представлены результаты комплексного исследования, направленного на разработку научно-технологических основ получения труб из никелида титана. Технологический цикл производства бесшовных труб включает в себя на первом этапе получение полой трубной заготовки (гильзы) из исходного прутка. Как правило, гильзы из никелида титана за рубежом получают методом глубокого сверления, для которого характерен повышенный расход материала. В рамках данной работы была предложена альтернативная схема получения гильзы из СПФ Ti-Ni, которая включает в себя несколько операций

электроэррозионной резки на специальном высокоточном оборудовании. Данная схема позволяет сохранить точность получения гильзы при заметном снижении количества отходов по сравнению с методом сверления.

Для получения готовой трубы была успешно применена раскатка гильз из СПФ Ti-Ni эквиатомного и заэквиатомного по никелю составов на стане винтовой прокатки СВП 70 и мини-стане винтовой прокатки «14-40». В результате проведенных экспериментов установлены критические режимы проведения раскатки, приводящие к появлению макродефектов или разрушению трубных заготовок. В результате проведения прокатки из исходных гильз с внешним диаметром 40 мм и толщиной стенки 10 мм были получены бездефектные трубы из СПФ Ti-Ni с минимальным внешним диаметром 24,6 и 27,5 мм и толщиной стенки 2,3 и 4 мм для станов «14-40» и СВП 70, соответственно.

Далее было проведено комплексное исследование структурно-фазового состояния и свойств всех образцов после винтовой раскатки. Анализ полученных результатов показал, что винтовая раскатка не сопровождается деградацией, а некоторых случаях повышает свойства сплава. Всё это говорит о правильном выборе технологического маршрута прокатки с точки зрения сохранения свойств сплава и возможности последующей дополнительной обработки. Кроме того, установлено, что последеформационный отжиг (ПДО) при температуре 400 °C в течение 1 часа не приводит к ухудшению механических характеристик эквиатомного СПФ Ti-Ni после раскатки. К наиболее перспективным режимам раскатки трубной заготовки СПФ Ti-Ni, как эквиатомного так и заэквиатомного по никелю составов, следует отнести проведение умеренной деформации с относительным обжатием за проход 10-30% при температурах деформации 850-1000 °C. Повышение температуры деформации до 1000 °C значительно снижает нагрузку на оборудование, а также риск разрушения заготовки в процессе раскатки из-за ее захолаживания.

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда в рамках проекта № 23-19-00729, <https://rsrf.ru/project/23-19-00729/>.

БИОМАТЕРИАЛЫ ИЗ НИКЕЛИДА ТИТАНА: ОТ ИССЛЕДОВАНИЙ К ПРАКТИКЕ

Марченко Е.С.^{*}, Ковалёва М.А., Байгонакова Г.А.

*Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия, *89138641814@mail.ru*

Металлотрикотаж, изготовленный из сверхэластичной TiNi проволоки толщиной 40–100 мкм (Рисунок 1), успешно применяют в экспериментальной медицине для пластики мягких тканей [1, 2].

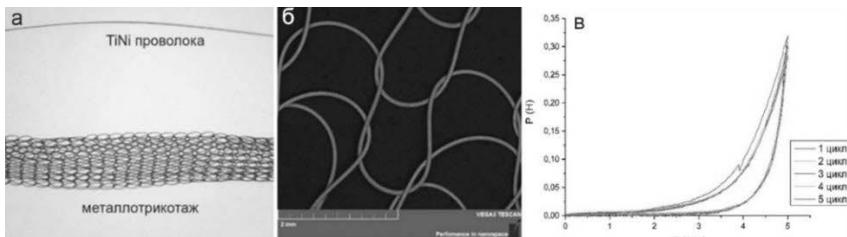


Рисунок 1 – Общий вид металлотрикотажа и проволоки из TiNi (а), увеличенное изображение металлотрикотажа из TiNi (б), кривая при циклической деформации металлотрикотажа из проволоки TiNi 60 мкм на 10 % (в)

Применение металлотрикотажа для реконструкции мягких тканей возможно благодаря подобию их механического поведения. Диаграммы циклического растяжения металлотрикотажа носят гиперупругий характер (Рисунок 1в), и почти полностью повторяют поведение мягких тканей животных при таких же нагрузках. Так как металлотрикотаж изготовлен из проволоки TiNi, её первоначальные свойства оказывают значительное влияние на биомеханику конструкции. Для более глубокого и точного исследования фазового состава исходных и нагруженных тонких проволок были применены методы синхротронного излучения. Проведена серия экспериментов на животных, которая демонстрирует особенности интеграции в организме металлотрикотажа из TiNi и реакцию тканей на материал в различные сроки после имплантации.

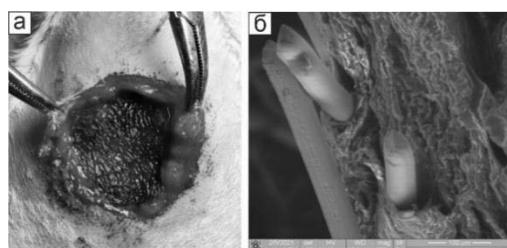


Рисунок 2 – Этап операции животного: выполнено замещение смоделированного дефекта двухслойным металлотрикотажем (а), микроструктура тканевого регенерата на 90-е сутки после имплантации металлотрикотажа (б)

Шероховатая поверхность микропроволоки и двухслойность трикотажной ленты способствуют улучшению пролиферации клеток. Реакция клеток на шероховатость и гетерогенный фазовый состав микропроволоки является условием для формирования разнообразных тканей на ее поверхности. Таким образом, биомеханическая совместимость металлотрикотажа успешно доказана в доклинических испытаниях.

Исследование проводилось при финансовой поддержке Министерства науки и высшего Образования и науки Российской Федерации (Соглашение №075-15-2025-607 от 01/07/2025).

Список используемой литературы:

- [1] A. Chernyshova, L. Kolomiets, T. Chekalkin, et al. // Journal of Investigative Surgery. 2020.
[2] D. Kapoor. // Johnson Matthey Technol. Rev. 2017. V. 61 (1). P. 66–76.

ВЛИЯНИЕ КОМБИНИРОВАННОЙ ИПД ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА МАГНИЕВОГО СПЛАВА Mg-2Zn-2Ga

Никитина М.А.^{1*}, Кулясова О.Б.¹, Боткин А.В.¹, Баженов В.Е.²,
Комиссаров А.А.², Валиев Р.З.¹

¹Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

²Национальный исследовательский технологический университет

МИСИС, Москва, Россия

*nik.marina.al@gmail.com

Многочисленные исследования последних лет свидетельствуют, что магниевые сплавы могут стать альтернативой неразлагаемым металлическим имплантанатам в ортопедии, челюстно-лицевой хирургии, нейрохирургии, сердечно сосудистой хирургии. Магний привлекателен за счет своих свойств – высокой удельной прочности, плотности близкой к человеческой кости, однако в чистом виде прочность магния не достаточная. В этой связи легирование значительно позволяет повысить прочностные характеристики. Так легирование Ga 1-3% сплавов Mg-Zn и Mg-Al позволяет увеличить предел прочности сплава на 15 – 25% за счет образования с магнием интерметаллидных соединений Mg₅Ga₂ и Mg₂Ga [1]. В то же время известно, что равноканальное угловое прессование (РКУП) оказывает значительное влияние на микроструктуру сплава Mg-

2Zn-2Ga, вызывая измельчение зерна, формирование субзеренной структуры с высокой плотностью дислокаций и более равномерное распределение вторичных фаз ($MgZn_2$, Mg_5Ga_2). В результате механические свойства сплава существенно улучшаются: предел прочности увеличивается на 30 – 50% (до 300 – 350 МПа), относительное удлинение возрастает за счет подавления хрупкости, а также повышается усталостная долговечность благодаря однородной мелкозернистой структуре [2]. В данной работе впервые проведены исследования влияния комбинированной обработки, включающей в себя интенсивную пластическую деформацию (ИПД) методом (РКУП) и экструзию на биорезорбируемый магниевый сплав Mg-2Zn-2Ga. Исследована структура и механические свойства при растяжении сплава в различных состояниях. Структура сплава в форме длинномерных прутков после предложенной комбинированной ИПД обработки характеризуется бимодальным распределением зерен по размерам с пиками на 0,5-1 мкм и 4,5-5 мкм, что меньше среднего размера зерен в исходном состоянии на порядок. Полученная структура после комбинированной обработки обеспечила также повышение механических свойств. Предел временного сопротивления до разрушения увеличился на 15 % и составил 370 МПа по сравнению с исходным состоянием (325 МПа – экструзия, волочение и правка) при сохранении пластичности 13%. Скорость коррозии после комбинированной обработки, исследованная по методике выделения водорода, составила около 0,2 мм/год. Обсуждаются физическая природа данных свойств и применение комбинированной ИПД обработки для изготовления биорезорбируемых медицинских имплантатов.

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ № 24-43-20015.

Список используемой литературы:

- [1] V. Bazhenov, A. Li, S.Tavolzhanskii., et al.// Materials. 2022. V. 15. № 19. C. 6849.
- [2] X. Zhang, Y. Li, J.Wang et al. // Journal of Materials Science & Technology. 2022. V. 108. P. 1–12.

КОРРОЗИОННАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ БИОДЕГРАДИРУЕМОГО СПЛАВА Zn-0,5%Ag-0,8%Al ПОСЛЕ РКУП

Нугаманов Ф.В.^{1*}, Хафизова Э.Д.^{1,2}, Абдрахманова Э.Д.¹,
Исламгалиев Р.К.¹

¹*Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия*

²*Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН,
Москва, Россия*

*nugamanovflyur@yandex.ru

В медицине цинк рассматривается как один из наиболее многообещающих материалов для создания стентов. Главным достоинством этого материала в сравнении с другими потенциальными материалами для биодеградируемых стентов является его коррозионная устойчивость, подходящая для использования в медицине. Однако главным препятствием к использованию этого материала является его невысокая прочность. Для увеличения прочности материалов применяют легирование или деформационную обработку, например, интенсивную пластическую деформацию (ИПД) [1].

В исследовании рассмотрен гомогенизированный (300°C) сплав Zn-0,5%Ag-0,8%Al, деформированный методом равноканального углового прессования (РКУП) при 350°C.

Для анализа микроструктуры применяли растровую электронную микроскопию. Механические характеристики определяли с помощью системы Instron 8801, проводя статические испытания при 150°C. Оценку коррозионной устойчивости проводили гравиметрическим методом в растворе Рингера в течение месяца [2].

Результаты механических испытаний приведены в Таблице 1. Применение РКУП привело к увеличению предела прочности и предела текучести в 2 раза при этом удалось повысить пластичность материала в 2,5 раза. В рамках данного исследования проведен детальный анализ взаимосвязи между структурными характеристиками материала и его коррозионным поведением. Особое внимание удалено изучению фундаментальных механизмов, определяющих процессы коррозионного разрушения на микро- и макроуровнях.

Таблица 1 – Механические характеристики сплава после РКУП

Состояние	HV	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ , %
Исходное	$68,55 \pm 7,49$	42 ± 5	44 ± 2	7 ± 1
		42 ± 5	57 ± 3	6 ± 1
РКУП при 350°C	$67,2 \pm 5,0$	90 ± 10	100 ± 5	22 ± 4
		8 ± 1	101 ± 5	14 ± 2

Список используемой литературы:

- [1] М.В. Поленок, Э.Д. Хафизова, Р.К. Исламгалиев // Frontier Materials & Technologies. – 2022. – № 3–2. – С. 25–31.
- [2] Э. Д. Абдрахманова, Э. Д. Хафизова, М. В. Поленок, Р. К. Исламгалиев, & Н. Йылмазер. (2024). // Materials. Technologies. Design, 6 (16), 80–90.

**ВЛИЯНИЕ РАВНОКАНАЛЬНОГО УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ
НА СТРУКТУРНЫЕ, МЕХАНИЧЕСКИЕ И КОРРОЗИОННЫЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦИНКОВОГО СПЛАВА Zn-4Ag-1Cu**

Поленок М.В.^{1*}, Хафизова Э.Д.^{1,2}, Абдрахманова Э.Д.¹,
Исламгалиев Р.К.¹

¹Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

²Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН,
Москва, Россия

*renaweiwei.179@mail.ru

Разработка биосовместимых материалов для медицинских имплантатов, таких как биоразлагаемые костные пластины и сосудистые стенты, представляют значительный научный и практический интерес [1,2]. Ключевыми требованиями к таким материалам являются контролируемая скорость деградации, устойчивость к коррозии, биосовместимость и оптимальное сочетание прочностных характеристик с пластичностью [3,4]. Метод равноканального углового прессования (РКУП) демонстрирует высокую эффективность для модификации микроструктуры и улучшения механических свойств цинковых сплавов. В настоящей работе исследовано влияние метода на РКУП на механические и коррозионные свойства цинкового сплава системы Zn-4Ag-1Cu. Исследование скорости коррозии проводилось параллельно двумя разными гравиметрическими методиками. Исследование включало два подхода: непрерывную выдержку образцов в растворе Рингера до 90 суток и прерывистую методику с периодической очисткой поверхности от продуктов коррозии.

Сравнительный анализ микроструктуры и механических свойств образцов после РКУП-обработки при 150°C с их исходными крупнозернистыми (КЗ) образцами выявил значительное структурно-фазовое преобразование, проявляющееся в формировании ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры (~1 мкм) с равномерно распределёнными частицами вторичных фаз AgZn₃. В результате деформации наблюдалось существенное улучшение механических

характеристик: предел текучести увеличился до 275 ± 10 МПа, предел прочности достиг 350 ± 15 МПа при сохранении пластичности (относительное удлинение $28\pm2\%$), что объясняется действием нескольких механизмов упрочнения, а именно, зернограничное, дисперсионное и дислокационное.

Коррозионные испытания в растворе Рингера выявили существенную зависимость скорости коррозии от структурного состояния материала и режима выдержки. Для УМЗ образцов, полученных методом РКУП, при циклической (прерывистой) выдержке наблюдалось увеличение скорости коррозионного разрушения в 2,6 раза по сравнению с К3 аналогами. Данный эффект объясняется повышенной плотностью границ зерен и структурных дефектов в РКУП-материалах, что способствует активации анодных участков поверхности. Однако при длительной выдержке формируется плотная оксидная пленка на поверхности образцов, что приводит к двукратному снижению скорости растворения металла по сравнению с прерывистым методом.

Полученные результаты демонстрируют эффективность РКУП-обработки для целенаправленного улучшения комплекса механических и коррозионных свойств цинкового сплава Zn-4Ag-1Cu.

Список используемой литературы:

- [1] J. Pinc. Mat. Sci. and Eng. A. 824. 2021. DOI: 10.1016/j.msea.2021.141809.
- [2] D. Pearson, J. Edik, A. Tauscher, E. Pokorny, P. Bowen, J. Goldman. J. Biomed. Mater. rel. B Appendix. Biomaterial. 2012. V. 100B, Iss. 1. P. 58-67. DOI: 10.1002/jbm.b.31922.
- [3] F. Ahadi, M. Azadi, M. Biglari, M. Bodaghi, A. Khaleghian. Heliyon. 2023. V. 9(2).13575. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e13575
- [4] J. Cheng. J. Mater. Sci. Technol. 2007, V. 29, P. 619–627. DOI: 10.1016/j.jmst.2013.03.019.

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СПЛАВА Ti-38Zr-11Nb (ат. %)

Колмаков А.Г.*, Сергиенко К.В., Конушкин С.В., Севостьянов М.А.

Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН,

Москва, Россия

**imetranlab10@mail.ru*

В настоящее время как перспективные для изготовления медицинских имплантов рассматриваются титановые сплавы, легированные цирконием и ниобием, благодаря возможности получения

сплавов, обладающих более подходящими механическими свойствами при сохранении высокой биохимической совместимости, чем традиционные сплавы, такие как ВТ6 или титан ВТ1-0, за счет стабилизации высокотемпературной β -фазы титана с ОЦК-решеткой [1].

По литературным данным, а также используя методы на основе теории d-электронов, соотношения e/a и молибденового эквивалента был выбран состав и выплавлен сплав системы Ti-Zr-Nb - Ti-38Zr-11Nb (ат. %). Согласно современным представлениям в сплаве данного состава можно получить стабильную β -фазу с ОЦК решеткой и низким модулем Юнга. После выплавки, слиток сплава массой 60 г был подвержен гомогенизирующему отжигу при температуре 1000°C в течение 4 часов в вакууме. После выплавки и отжига сплав прокатывали до толщины 2 мм при температуре 600°C на воздухе. С толщины 2 мм до 1 мм пластина прокатывалась при комнатной температуре. Пластины после вырезки дополнительно закаливались в воду с температурой 600°C с выдержкой в течение 5 мин и отжигались при температурах 400°C в течение 1 ч. Из пластин методом электроискровой резки вырезались образцы на растяжения с рабочей зоной 10x1x1 mm³.

Микроструктурный анализ пластин показал наличие удлиненных β -зерен после прокатки и закалки, отжиг не изменил микроструктуру. Модуль упругости, определенный при испытании наноиндентированием, после отжига снизился с 85 до 81 ГПа. Механические испытания показали значительное повышение прочности при растяжении (с 529 МПа до 628 МПа) при одновременном снижении относительного удлинения образцов до разрушения на 32%. Рентгеноструктурный анализ подтвердил наличие β -фазы при любых условиях термообработки, что может быть объяснено использованием Nb в качестве β -стабилизатора и Zr в качестве нейтрального элемента со слабым β -стабилизирующим эффектом в присутствии других β -стабилизаторов. Изменение механических свойств после отжига может быть объяснено выделением малого количества наноразмерной ω -фаз нерегистрируемых рентгенофазовым анализом. Исследования также показали, что коррозионная стойкость сплава Ti-38Zr-11Nb сопоставима с титаном ВТ1-0. У рассматриваемого сплава не обнаружено признаков цитотоксической активности в отношении клеток мlekопитающих при испытаниях *in vitro*.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-13-00186, <https://rscf.ru/project/24-13-00186/>.

Список используемой литературы:

[1] K.V. Sergienko, S.V. Konushkin, Y.A. Morozova et al. // J. Funct. Biomater. 2025, 16, 126. <https://doi.org/10.3390/jfb16040126>

СВЕРХУПРУГИЕ СПЛАВЫ Ti-Zr-Nb ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СЕРИЙНЫХ И ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ОРТОПЕДИЧЕСКИХ ИМПЛАНТАТОВ

Шереметьев В.А.^{1*}, Лезин В.Д.¹, Мурадян А.А.¹, Творогов А.И.¹,
Александровский Э.К.¹, Лукашевич К.Е.¹, Деркач М.А.¹,

Прокошкин С.Д.¹, Браиловский В.²

¹НИТУ МИСИС, Москва, Россия

²Ecole de Technologie supérieure, Montreal, Canada

*sheremetev@misis.ru

Благодаря усилиям ученых в последние десятилетия разработан новый класс сплавов на основе системы Ti-Zr-Nb для изготовления хирургических имплантатов, обладающий высоким потенциалом применения в ортопедии и травматологии. В отличие от традиционных биоматериалов, применяемых в медицинской практике, сплав Ti-Zr-Nb обладает существенными преимуществами: он содержит только биосовместимые/инертные компоненты, характеризуется гораздо более низким модулем упругости (40–60 ГПа против 100–110 ГПа у классического сплава Ti-6Al-4V), выраженным сверхупругим поведением при температуре тела, а также пониженной магнитной восприимчивостью. Разработка технологий для получения имплантатов с повышенным комплексом функциональных свойств из нового материала с применением традиционных методов термомеханической обработки (ТМО) и аддитивных технологий, метода селективного лазерного плавления (СЛП), является ключевой задачей на пути внедрения нового материала в клиническую практику.

Настоящий доклад посвящен обзору результатов работ авторского коллектива лаборатории сплавов с памятью формы НИТУ МИСИС совместно с индустриальным партнером (ООО «Конмет») по созданию и применению традиционных и аддитивных технологий получения полуфабрикатов и имплантатов из сверхупругого сплава Ti-Zr-Nb.

По результатам работ разработана технология комбинированной ТМО сверхупругих сплавов Ti-Zr-Nb, включающая применение различных методов обработки металлов давлением и успешно апробированная при производстве опытных партий длинномерных прутковых полуфабрикатов. Разработаны и утверждены Технические условия на прутки из сплава Ti-Zr-Nb, которые в последующем могут быть использованы при подготовке

регистрационных удостоверений на готовые изделия из указанного материала. Из прутковых заготовок сплава Ti-Zr-Nb изготовлены балки для систем транспедикулярной фиксации позвоночника, которые успешно прошли стандартизированные испытания. Проведенные сравнительные стандартизированные испытания балок для систем транспедикулярной фиксации позвоночника из сплавов Ti-Zr-Nb, продемонстрировавшие их преимущества в низкой жесткости по сравнению с балками из сплавов Ti-Ni и Ti-6Al-7Nb и подтвердившие перспективность данных сплавов в качестве материалов для изготовления спинальных имплантатов.

Разработана аддитивная технология селективного лазерного плавления (СЛП) для получения персонализируемых имплантатов с пористой структурой из сплавов Ti-Zr-Nb с высоким уровнем функциональных свойств. Разработаны и утверждены Технические условия на порошок из сплава Ti-Zr-Nb, которые могут быть использованы при подготовке регистрационных удостоверений на серийные и индивидуальные изделия из указанного материала. По результатам исследования механического поведения показано, что пористые материалы из сплава Ti-Zr-Nb обладают преимуществом в более низком модуле упругости и более высокой относительной усталостной прочности перед аналогичными материалами из сплава Ti-6Al-4V. Изготовлены опытные образцы - прототипы кейджа на основе пористых сплавов Ti-Zr-Nb для замены межпозвоночных дисков шейного отдела позвоночника с применением разработанных режимов СЛП и термической обработки.

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ № 22-79-10299-П.

ПОВЫШЕННАЯ КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ СПЛАВА Mg-

1,2Zn-0,6Zr ПОДВЕРГНУТОГО РКУП С УЛЬТРАЗВУКОМ

Аксенов Д.А.¹, Асфандияров Р.Н.^{1,2}, Шишкунова М.А.², Рааб А.Г.^{1,3},
Сементеева Ю.Р.², Аубакирова В.Р.²

¹ Институт физики молекул и кристаллов УФИЦ РАН, Уфа, Россия

² Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

³ Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа,
Россия

*aksyonova@mail.ru

Магниевые сплавы являются одними из самых перспективных материалов для применения в области восстановительной хирургии и ортопедии, связанной с применением биорезорбируемых имплантатов.

Магний обладает модулем упругости близкому к человеческой кости, высокой удельной прочностью, хорошей биосовместимостью. Основной проблемой применения данных материалов является низкая коррозионная стойкость и неконтролируемое растворение. Одним из способов решения данной проблемы является изменения элементного состава сплавов количественно и качественно. В настоящее время одним из перспективных считается магниевый сплав, содержащий менее 1% цинка и кальция. Такое малое содержание легирующих элементов приводит к уменьшению прочностных характеристик сплава. Совмещенные схемы деформационной обработки позволяют повысить прочность материала, однако при этом ухудшается его коррозионная стойкость.

Выбранный в данной работе сплав системы Mg-Zn-Zr уже в отожженном состоянии имеет рекомендуемые пороговые значения прочности (до 300 МПа), однако его коррозионная стойкость существенно уступала магниевому сплаву с кальцием. Ранее не было предложено методов, существенно улучшающих коррозионную стойкость данного сплава. Известно, что причиной развития коррозии в магниевых сплавах является неоднородность структуры, будь то бимодальное распределение по размеру зерна, неоднородность распределения дислокаций, текстура или частицы вторых фаз – все это приводит к возникновению гальванических пар.

Предложенный в данной работе метод деформационной обработки методом РКУП, совмещенным с ультразвуковым воздействием, позволяет существенно повысить коррозионную стойкость сплава Mg-1,2Zn-0,6Zr при сохранении его высокой прочности 300-310 МПа.

Деформационная обработка проводилась при температуре 300 °C, 1 цикл, со скоростью 1,3 мм/с. Одновременно с этим образец подвергался ультразвуковому воздействию с амплитудой волны 5 мкм, при частоте 20,4-20,6 кГц.

Структурные исследования показали, что сочетание схемы РКУП с ультразвуком позволяет получить более однородную зеренную структуру с размером зерна около 5 мкм, повышенной плотностью дислокаций $5,66 \times 10^4$ м⁻². Прочность образца достигала 310 МПа, а скорость коррозии снизилась с исходного значения 8 мм/год до 3,4 мм/год.

На обработанные предложенным методом образцы далее было нанесено ПЭО-покрытие, которое по полученным данных электрохимических коррозионных исследований дополнительно увеличивают коррозионную стойкость сплава Mg-1,2Zn-0,6Zr более чем в 2,5 раза.

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ № 22-79-10325-П.

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТЫХ ПРУТКОВ ИЗ МАГНИЕВЫХ
СПЛАВОВ МЕТОДАМИ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ ДЛЯ
МЕДИЦИНСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ**

Боткин А.В.*, Волкова Е.П., Валиев Р.З.

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

**botkinav@yandex.ru*

Магниевые сплавы привлекли растущий интерес специалистов в различных областях исследований благодаря перспективам применения в биомедицинских целях из - за хорошей биорасторимости. Успешное использования этих сплавов в качестве конструкционных материалов для изготовления имплантатов связано, в частности, с производством прутков с повышенными прочностными свойствами при обеспечении приемлемой коррозионной стойкости и сохранении биосовместимости. Природу измельчения зерен в магниевых сплавах методами обработки давлением существенно отличающуюся от таковой в ГЦК-металлах, необходимо учитывать при разработке технологических схем изготовления УМЗ прутков.

В настоящей работе представлены результаты анализа известных схем обработки с их преимуществами и недостатками. На основании данных компьютерного моделирования и физических экспериментов предложена для магниевых сплавов трехэтапная обработка, включающая в себя предварительную горячую экструзию, РКУП и последующую экструзию с пониженной температурой. Показано, что указанная обработка обеспечивает в магниевых сплавах формирование ультрамелкозернистой структуры с размером зерна около 1 мкм и как результат приводит к высоким механическим свойствам, а также повышению коррозионной стойкости в прутках-заготовках, предназначенных для изготовления перспективных имплантатов в челюстно-лицевой хирургии.

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ № 24-43-20015. Экспериментальная часть работы выполнена с использованием оборудования ЦКП «Нанотех» ФГБОУ ВО «УУНиТ».

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ
ИЗГОТОВЛЕНИЯ УМЗ ПРУТКОВ ИЗ МАГНИЕВОГО СПЛАВА
Mg-1%Zn-0,18%Ca КОМБИНИРОВАННЫМ МЕТОДОМ
ЭКСТРУЗИИ И РКУП**

Волкова Е.П.*, Боткин А.В., Валиев Р.З.

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

**epvolkova@mail.ru*

Магниевые сплавы являются одними из наиболее перспективных материалов для применения в биомедицинских целях из - за хорошей биорасторимости. Однако, для успешного использования этих сплавов в качестве конструкционных материалов для изготовления имплантатов, актуальной задачей остается производство прутков с повышенными прочностными свойствами при обеспечении приемлемой коррозионной стойкости и сохранении биосовместимости.

В настоящем исследовании для последующего обоснованного проектирования конструкции матрицы с цилиндрическими каналами, пересекающимися под углом 120°, предназначеннной для прессования сплава Mg-1%Zn-0.18%Ca, поведение пластической деформации металлов (равномерность деформации, вид деформированного состояния) в процессе РКУП за один проход анализируется с помощью МКЭ с целью определения влияния величины угла внешнего скругления сопряжения каналов. Условия, которые были рассмотрены для моделирования МКЭ сплава, и набор параметров, используемых в данном исследовании, показаны в таблице 1.

Таблица 1

Модель сплава Mg-1%Zn-0.18%Ca	Жестко вязко-пластичная
Длина заготовки (мм)	40
Диаметр заготовки (мм)	10
Угол пересечения каналов (°)	120
Наружный угол скругления сопряжения каналов (°)	0, 10, 20, 30
Температура (°C)	250
Скорость пuhanсона (мм/с)	0,76
Фактор трения: входной канал-заготовка	0, 0,3, 0,06
выходной канал-заготовка	0, 0,3, 0,3

Так же была выполнена экспериментальная апробация трехэтапной обработки сплава Mg-1%Zn-0.18%Ca при получении прутков, включающей в себя предварительную горячую экструзию, РКУП и последующую экструзию с пониженной температурой, исследованы механические свойства и структура полученных прутков. Показано, что комбинированная обработка исходного гомогенизированного сплава позволила сформировать УМЗ структуру с размером зерна около 215 нм и образование наноразмерных частиц, что обеспечило значительное повышение механических свойств сплава в прутках-заготовках Ø5 мм и длиной ≈ 300 мм, предназначенных для изготовления перспективных имплантатов в челюстно-лицевой хирургии.

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ № 24-43-20015. Экспериментальная часть работы выполнена с использованием оборудования ЦКП «Нанотех» ФГБОУ ВО «УУНиТ».

ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИИ С ТОКОМ НА МИКРОСТРУКТУРУ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОГО БИОМЕДИЦИНСКОГО ТИТАНА GRADE 4

Корольков О.Е.*, Столяров В.В.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

**41zh1k@mail.ru*

Ультрамелкозернистый (УМЗ) титан Grade 4 является перспективным материалом для производства имплантатов для накостного и внутрикостного остеосинтеза. Данный материал может являться хорошей альтернативой титановому сплаву ВТ6, в составе которого имеется условно биосовместимый алюминий и токсичный ванадий [1]. УМЗ Grade 4 не уступает по механическим характеристикам сплаву ВТ6, но имеет и такие же недостатки - недостаточную пластичность. В сплаве ВТ6 данный недостаток в процессе производства имплантатов решается с помощью разогрева до температур близких к точке полиморфного превращения, после чего производится пластическая деформация. Для УМЗ Grade 4 данный способ неприменим, поскольку уже при температуре 400-500 °C начнется процесс рекристаллизации с утратой прочностных свойств УМЗ титана.

Электропластический эффект (ЭПЭ) – явление, при котором наблюдается снижение сопротивления металла деформации, а также повышение его пластичности под влиянием электрического тока высокой плотности [2]. Использование ЭПЭ для деформации УМЗ Grade 4

позволяет получать заданную форму полуфабрикатов имплантатов при температурах не превышающих 400 °C с сохранением размера зерна и соответственно высокой прочности данного материала (Рисунок 1).

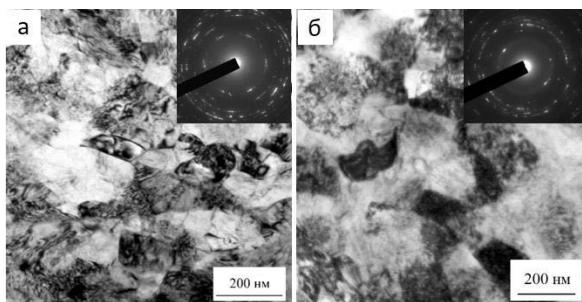


Рисунок 1 – Субмикроструктура УМЗ титана: исходное состояние, до растяжения (а); после растяжения с током $j = 60 \text{ A/mm}^2$; $\tau = 500 \text{ мкс}$; $Q = 10$; $T = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ (б). В вставке снимок микродифракции

Список используемой литературы:

- [1] Иголкин, А.И. Титан в медицине / А.И. Иголкин // Титан. - 1993. - №1. С. 86-90.
[2] Ю.В. Баранов, О.А. Троицкий, Ю.С. Авраамов, А.Д. Шляпин, Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы М.: МГИУ, 2001

**УМЗ СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
БИОРЕЗОРБИРУЕМЫХ МАГНИЕВЫХ И ЦИНКОВЫХ СПЛАВОВ,
ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДАМИ ИПД**

Кулясова О.Б.

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия
elokbox@mail.ru

Переломы костей, возникающие в результате травм, продолжают представлять клинические проблемы для регенерации. Хотя костные трансплантаты являются жизнеспособным вариантом лечения, их клиническое применение ограничено хирургическими рисками. В настоящее время большое применение получили постоянные имплантаты из таких материалов, как Ti, Co-Cr, нержавеющая сталь. Однако большим недостатком применения постоянных имплантатов является необходимость их удаления, что связано с полноценной повторной операцией, а также сложный процесс заживления. Эти недостатки

подчеркивают необходимость разработки следующего поколения металлических материалов, специально предназначенных для регенерации костей. Заживление дефектов длинных костей – это динамичный, многоэтапный процесс, на который влияют такие факторы, как иммунный ответ, механическая нагрузка, остеогенез и ангиогенез. Биорезорбируемые материалы, более приспособлены к динамике регенерации костей, чем биоинертные, и обеспечивают благоприятную среду заживления, что в конечном итоге приводит к улучшению результатов лечения. Биорезорбируемые металлы, такие как магний (Mg), цинк (Zn) и их сплавы, постепенно разрушаются с течением времени после имплантации. Это не только минимизирует риск обструкции, но и высвобождает продукты распада, которые могут оказывать положительное влияние на регенерацию тканей [1]. Было доказано, что ионы Mg и Zn полезны для регенерации костей, поскольку они могут усиливать остеогенез и ангиогенез [2]. Кроме того, считается, что ионы Zn подавляют остеокластогенез и активность резорбции остеокластов [3]. Таким образом, Mg, Zn и их сплавы являются перспективными кандидатами для изготовления биорезорбируемых имплантатов. Однако в магниевые и цинковые сплавы характеризуются невысокой прочностью. Наиболее эффективным подходом повышения прочности является применение методов интенсивной пластической деформации (ИПД), за счет измельчения зернистой структуры [4]. В работе представлена возможность получать длинномерные прутки из магниевых сплавов с УМЗ структурой комбинированными методами, включающими ИПД. Обсуждается трансформация структуры на каждом этапе деформации, механические свойства и коррозионная стойкость магниевых и цинковых сплавов.

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ № 24-43-00154.

Список используемой литературы:

- [1] H. Li, Y. Zheng, L. Qin // Prog. Nat. Sci.: Mater. Int. 2014. V. 24. #414.
- [2] X. Chen, B. Tan, S. Wang et al. // Biomat. 2021. V. 274. #120895.
- [3] M. Yamaguchi, M. N Weitzmann // Mol. Cell. Biochem. 2011. V. 355. #179.
- [4] R.Z. Valiev, A.P. Zhilyaev, T.G. Langdon. Bulk nanostructured materials: fundamentals and applications. Hoboken: Wiley/TMS, 2014.

СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БИОРЕЗОРБИРУЕМЫХ СПЛАВОВ Zn-0.8%Li И Zn-0.8%Li-0.1%Ca

Сиразеева А.Р.*^{*}, Кулясова О.Б., Парфенов Е.В.
Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия
^{*}sirazeeva.arina@mail.ru

Для решения проблемы ортопедических осложнений, возникающих в связи с применением постоянных имплантатов, перспективны имплантаты из биорезорбируемых металлических материалов, например, цинковых сплавов. В данной работе рассматривается два цинковых сплава Zn-0,8Li и Zn-0,8Li-0,1Ca после прокатки. В исходном состоянии механические свойства этих сплавов не удовлетворяют для изготовления из них биорезорбируемых имплантатов. Установлено влияние прокатки на механические свойства исследуемых сплавов [1]. Проанализировано влияние легирования Ca на механические свойства сплава Zn-0,8Li. Показано, что добавление 0,1 вес.% кальция к сплаву Zn-0,8%Li ведет к формированию в структуре Ca-содержащих частиц (рис.1), которые обеспечивают повышение предела прочности на 10% (рис.2).

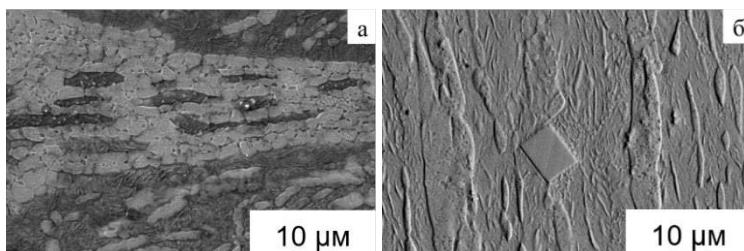


Рисунок 1 – Структура образцов после прокатки: Zn-0,8Li (а); Zn-0,8Li-0,1Ca (б)

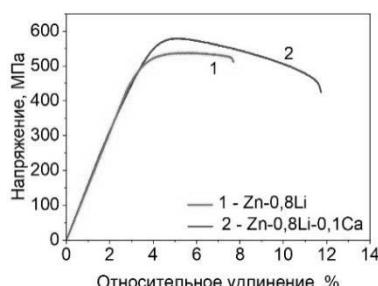


Рисунок 2 – Кривые растяжения сплавов Zn-0,8%Li и Zn-0,8Li-0,1Ca при начальной скорости деформации 10^{-3} с^{-1} после прокатки

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ № 24-43-00154. Работа проводилась с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Нанотех» (Уфимский университет науки и технологий).

Список используемой литературы:

[1] A.R. Khasanova, A.R. Sirazeeva, D.A. Aksenov, B.O. Bolshakov, R.N. Asfandiyarov, O.B. Kulyasova. Effect of rolling on the structure and mechanical properties of the Zn-0.8Li alloy // Russian Physics Journal, 2024, vol. 67. DOI: 10.1007/s11182-024-03278-y.

**МИКРОДУГОВОЕ ОКСИДИРОВАНИЕ ТИТАНА МАРКИ ВТ1-0,
СПЛАВОВ ВТ6 И Ti-38Zr-9Nb (ат. %) ДЛЯ МЕДИЦИНСКОГО
ПРИМЕНЕНИЯ**

Михлик С.А.*, Конушкин С.В., Колмаков А.Г.

*Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН,
Москва, Россия*

**mikhlik.sofia@yandex.ru*

С целью улучшения приживаемости имплантатов часто на их поверхности формируют пористые покрытия, имитирующие по своей морфологии структуру костной ткани. Одним из эффективных способов создания биосовместимых пористых покрытий является микродуговое оксидирование (МДО). В последнее время активно исследуются низкомодульные титановые сплавы, что связано с необходимостью обеспечить биомеханическую совместимость имплантата с тканями организма. Актуальным направлением исследований является разработка методов нанесения покрытий на эти материалы.

Объектами исследования являются прутки диаметром 3 мм и пластины размером 15x10 мм из ВТ1-0, ВТ6 в состоянии поставки и после отжига при 700 °C в течение 30 мин с охлаждением на воздухе и из Ti-38Zr-9Nb (ат.%) после прокатки и закалки с 600°C с выдержкой в течение 5 мин и охлаждением в воде [1, 2]. В качестве электролита был выбран водный раствор, содержащий 2 г/л KOH, 4 г/л Na₃PO₄·12H₂O, 4 г/л Na₂SiO₃·9H₂O. МДО проводилось при напряжении 395–400 В при температуре 27–30 °C в течение 10 мин.

На рис.1 представлена морфология поверхности прутков исследуемых сплавов после термообработки и МДО.

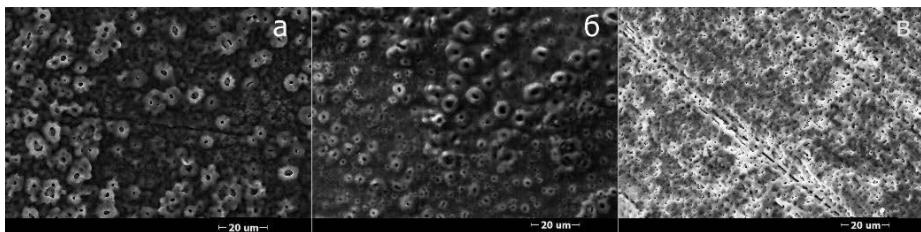


Рисунок 1 – Морфология поверхности после ТО и МДО на BT1-0(а),
BT6(б), Ti-38Zr-9Nb(в)

На всех образцах покрытие получилось равномерным со средним размером пор около 3 мкм. На рис. 2 показано МДО-покрытие для указанных прутков после их циклического нагружения с деформацией до 2% с целью качественной оценки адгезии покрытий.

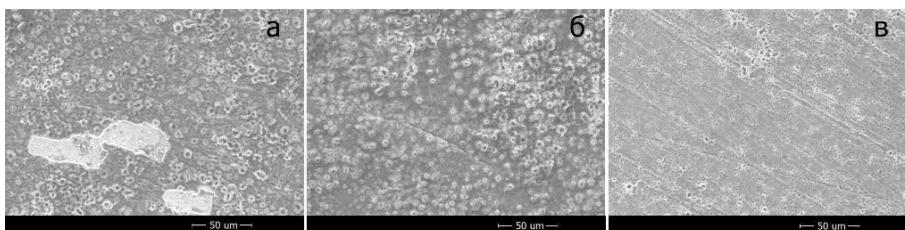


Рисунок 2 – МДО-покрытие после цикл. нагрузления на BT1-0(а), BT6(б),
Ti-38Zr-9Nb(в)

На BT1-0 после испытаний сохранилась значительная часть покрытия. Наблюдаются лишь отдельные участки отслоения. На BT6 и Ti-38Zr-9Nb покрытие полностью сохранилось. На BT6 выявлены единичные трещины.

*Исследование выполнено за счет гранта РНФ № 24-13-00186,
<https://rscf.ru/project/24-13-00186/>*

Список используемой литературы:

- [1] Б.А. Колачев и др. Технология термической обработки цветных металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1992 г.
- [2] Sergienko K. et al. Physical and Mechanical Properties of Ti-Zr-Nb Alloys for Medical Use // Metals. 2024. V. 14. P. 1311.

**ВСЕСТОРОННЯЯ ИЗОТЕРМИЧЕСКАЯ КОВКА КАК СПОСОБ
ДОСТИЖЕНИЯ ПОВЫШЕННОЙ СТОЙКОСТИ
БИОРЕЗОРБИРУЕМОГО СПЛАВА ZX10 К КОРРОЗИОННОМУ
РАСТРЕСКИВАНИЮ ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ В
ФИЗИОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЕ**

Мерсон Е.Д.*, Полуянов В.А., Мягких П.Н., Мерсон Д.Л.

*НИИ прогрессивных технологий, Тольяттинский государственный
университет, Тольятти, Россия*

**Mersoned@gmail.com*

Медицинские магниевые сплавы обладают уникальным комплексом свойств, благодаря которому они являются одним из лучших материалов для биорезорбируемых имплантатов. В отличие от своих традиционных нерастворимых аналогов из титана и нержавеющих сталей, магниевые имплантаты не требуют повторной хирургической операции по их извлечению, поскольку они способны полностью растворяться в человеческом организме после выполнения своей функции. Растворение биорезорбируемого имплантата неизбежно сопровождается уменьшением его живого сечения, поэтому крайне важно, чтобы он сохранял свою несущую способность до полного завершения лечения. Для этого магниевый сплав, из которого изготовлен имплантат, должен обладать не только относительно низкой и контролируемой скоростью резорбции, но и высокой устойчивостью к коррозионному растрескиванию под напряжением (КРН), а также коррозионной усталости (КУ). К сожалению, потеря пластичности в результате КРН при механических испытаниях в физиологических средах для большинства магниевых сплавов обычно варьируется в диапазоне 50-60%, что свидетельствует об их недостаточной стойкости к данному пагубному явлению. В связи с этим целью настоящей работы было установить влияние различных видов термомеханической обработки (ТМО) на стойкость сплава ZX10 к КРН в физиологической среде.

Для исследования был получен сплав ZX10 в виде слитков, которые сначала отжигали по режиму 300 °C / 12 ч. + 430 °C / 24 ч. с последующей закалкой в воду, а затем подвергали различным видам ТМО, включая: горячую экструзию, равноканальное угловое прессование (РКУП) по схеме Conform и всестороннюю изотермическую ковку (ВИК). Путем экструзии при 320 °C был получен пруток 12 мм (ТГУ, г. Тольятти), который затем подвергали РКУП (УУНИТ, г. Уфа) по режиму 400 °C / 2 прохода + 350 °C / 2 прохода по маршруту Вс. ВИК слитка осуществляли по режиму: 4 цикла при 425 °C + 4 цикла при 400 °C + 4 цикла при 375 °C + 4 цикла при 350 °C. Испытания на стойкость к коррозии и КРН

проводили в растворе Хэнкса при температуре 37 ± 1 °C и постоянном уровне pH 7.4 ± 0.1 . Скорость коррозии определяли по потере массы и объему выделившегося водорода за 24 ч. выдержки образцов в коррозионной среде. Для определения стойкости к КРН стандартные цилиндрические резьбовые образцы с рабочей частью 5×25 мм подвергали одноосному растяжению на воздухе и в коррозионной среде при скорости деформирования $5\cdot10^{-6}$ с⁻¹.

В результате проведенных исследований установлено, что ТМО всех видов, исследованных в работе, привела к существенному измельчению зерна литого сплава ZX10 с 566 ± 364 (в термообработанном состоянии) до 12 ± 5.5 , 11.8 ± 5.7 и 1.9 ± 1.4 мкм, соответственно, после экструзии, РКУП и ВИК. При этом предел прочности и удлинение сплава на воздухе выросли со 128 ± 6 МПа и $13\pm2\%$ до 197 ± 5 МПа и $32\pm1\%$ после экструзии, 194 ± 4 МПа и $41\pm2\%$ после РКУП и 220 ± 3 МПа и $32\pm2\%$ после ВИК. При механических испытаниях в коррозионной среде предел прочности и удлинение сплавов составили: 114 ± 2 МПа и $10\pm1\%$ в литом состоянии, 171 ± 7 МПа и $13\pm3\%$ после экструзии, 172 ± 3 МПа и $19\pm2\%$ после РКУП и 193 ± 9 МПа и $30\pm4\%$ после ВИК. Таким образом, после ВИК сплав ZX10 обладает рекордной стойкостью к КРН с потерей пластичности менее 5%.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ 23-19-00636

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ, ФАЗОВОГО СОСТАВА И
МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СПЛАВА СИСТЕМЫ Со-Cr-Мо ДЛЯ
МЕДИЦИНСКИХ ИМЛАНТАТОВ ПРИ КОМБИНИРОВАННОЙ
ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННОЙ ОБРАБОТКЕ**

Скугорев А.В., Гамин Ю.В., Кин Т.Ю., Махмуд Алхаж Али А., Карапашаев
М.М., Галкин С.П.

*Национальный исследовательский технологический университет
МИСИС, Москва, Россия
skugorev.av@misis.ru

Деформируемые сплавы системы Со-Cr-Мо широко используются в качестве биосовместимого износостойкого материала для высоконагруженных костных имплантатов. Объектами исследования являются деформированные полуфабрикаты из сплава системы Со-Cr-Мо с химическим составом по ГОСТ Р ИСО 5832-12-2009 (состав с низким

содержанием углерода), полученные из слитков вакуумно-индукционной выплавки.

Проведены комплексные исследования структуры, фазового состава и механических свойств сплава после всесторонней ковки, в условиях близких к изотермическим и последующей радиально-сдвиговой прокатки с различной степенью деформации.

Показано, что в результате термодеформационной обработки происходит значительное повышение прочностных характеристик сплава как после всесторонней ковки, так после радиально-сдвиговой прокатки. Ковка слитка позволяет существенно измельчить зеренную структуру, что приводит к росту предела текучести сплава в 2,8 раза и предела прочности в 1,8 раза в сравнении с литым состоянием после гомогенизационного отжига. При этом относительное удлинение сохраняется на прежнем уровне.

Радиально-сдвиговая прокатка одновременно повышает прочность и пластичность сплава. По результатам рентгенофазового анализа, РСП способствует изменению фазового состава сплава с увеличением доли ϵ -фазы с ГПУ решеткой. Характерный для РСП градиент структуры снижается по мере увеличения суммарного коэффициента вытяжки, сохраняя тенденцию к более мелкозернистой структуре у поверхности прутков и более крупной в центре, что отражается на среднем размере зерна и уровне механических свойств. Выделения охрупчивающей интерметалличидной σ -фазы не были зафиксированы на всех этапах термодеформационной обработки.

Радиально-сдвиговая прокатка по сравнению с механическими свойствами кованого прутка приводит к повышению предела прочности сплава в среднем на 25 – 45% в зависимости от суммарного коэффициента вытяжки при прокатке, при этом относительное удлинение образцов после растяжения увеличивается на 50 % и менее зависит от степени вытяжки.

Применение комбинированной горячей термодеформационной обработки сплава системы Co-Cr-Mo, сочетающая изотермическую ковку и радиально-сдвиговую прокатку с различными видами последеформационного охлаждения приводит к значительному улучшению как прочностных свойств, так и показателей пластичности исследуемого сплава за счет формирования двухфазного состава и мелкозернистой структуры.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00477, <https://rscf.ru/project/23-19-00477/>

**ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТЫХ БИОДЕГРАДИРУЕМЫХ СПЛАВОВ
НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

Рыбальченко О.В.^{1*}, Анисимова Н.Ю.^{2,3}, Рыбальченко Г.В.⁴

Мартыненко Н.С.¹, Лукьянова Е.А.¹, Табачкова Н.Ю.^{3,5}, Щетинин И.В.³,
Рааб А.Г.^{6,7}, Беляков А.Н.⁸, Добаткин С.В.¹

¹ *Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова*

Российской академии наук, Москва, Россия

² *Национальный медицинский исследовательский центр онкологии имени
Н.Н. Блохина, Москва, Россия*

³ *Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия*

⁴ *Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук,
Москва, Россия*

⁵ *Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии
наук, Москва, Россия*

⁶ *Институт физики молекул и кристаллов Уфимского федерального
исследовательского центра РАН, Уфа, Россия*

⁷ *Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа,
Россия*

⁸ *Международный институт Герберта Гляйтера, Ляонинская академия
материалов, Шэньян, Китай*

*rybalch@mail.ru

Данная работа направлена на улучшение механических, биологических и коррозионных характеристик биодеградируемых Fe-Mn сплавов за счет применения методов интенсивной пластической деформации (ИПД) и дополнительного легирования, используемого как для повышения скорости биодеградации, так и для расширения терапевтических функций изделий из данных сплавов. ИПД методами равноканального углового прессования (РКУП) и кручения под высоким давлением (КВД) была использована для получения ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры. Сплавы обладающие УМЗ структурой демонстрировали не только подходящую прочность, пластичность и биосовместимость, но и повышенную скорость деградации. РКУП при температурах в диапазоне 300 - 450 °C было применено к образцам Fe - Mn сплавов с номинальным содержанием марганца 22-27%, дополнительно легированных Si, Pd, Cu. КВД было использовано для получения предельно измельченной структуры этих сплавов при комнатной и повышенной температурах. Просвечивающая электронная микроскопия выявила образование аустенитной УМЗ структуры в сплавах Fe - Mn с различным содержанием ϵ -марテンсита после

ИПД. Структура сплава Fe – Mn - C после РКУП в интервале 300 - 450 °C определила высокий уровень прочностных характеристик ($\sigma_b \sim 1515 - 1611$ МПа, $\sigma_{0.2} \sim 1327 - 1558$ МПа) при удовлетворительной пластичности ($\delta \sim 11\%$). Сплавы, дополнительно легированные Si, показали $\sigma_b \sim 1200 - 1630$ МПа и $\sigma_{0.2} \sim 1000 - 1400$ МПа при относительном удлинении $\sim 14 - 8,5\%$. Повышение прочности сплавов дополнительно легированных Pd ($\sigma_b \sim 1545 - 1669$ МПа, $\sigma_{0.2} \sim 1488 - 1577$ МПа) сопровождается снижением δ до 4%. Установлено, что наличие в структуре сплавов специальных двойниковых границ повышает их коррозионную стойкость, а формирование преимущественно зернико-субзернистой структуры увеличивает скорость коррозии до 0,4 мм/год. Максимальная скорость деградации Fe-Mn-C сплавов составляет $0,63 \pm 0,3$ мм/год. Тогда как РКУП сплава Fe-Mn-Pd при температурах 300 °C и 450 °C увеличивает скорости деградации до $1,08 \pm 0,2$ и $0,97 \pm 0,36$ мм/год соответственно за счет измельчения структуры, увеличения плотности границ структурных элементов и высвобождения частиц интерметаллической фазы Mn₂Pd₃.

Результаты исследования гемолиза и цитотоксичности показали, что обработка сплавов методом ИПД не приводит к ухудшению их биосовместимости *in vitro*.

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ № 25-23-00208.

ДОКЛИНИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ БИОДЕГРАДИРУЕМЫХ ЦИНКОВЫХ СПЛАВОВ: ОЦЕНКА ТОКСИЧНОСТИ И ОСТЕОИНТЕГРАЦИИ

Хафизова Э.Д.^{1,2*}, Билялов А.Р.³, Галаутдинов М.Ф.³, Щекин В.С.³,
Заманова Р.А.³, Поленок М.В.¹, Абдрахманова Э.Д.¹

¹*Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия*

²*Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН,
Москва, Россия*

³*Башкирский государственный медицинский университет Министерства
здравоохранения РФ, Уфа, Россия*

*ela.90@mail.ru

Растет потребность в разработке инновационных биодеградируемых материалов для остеосинтеза и сосудистой хирургии, в частности для создания биодеградируемых стентов и имплантатов нового поколения. Современные металлические стенты обладают рядом ограничений, включая риск долгосрочных осложнений (рестеноз, тромбоз, хроническое

воспаление) и необходимость пожизненного приема лекарственных препаратов, снижающих агрегацию (склеивание) тромбоцитов и предотвращающих образование тромбов. В этой связи биоразлагаемые стенты представляют собой перспективную альтернативу, так как они постепенно рассасываются после выполнения своей функции, снижая риск осложнений и устранивая необходимость в повторных вмешательствах.

Цинковые сплавы представляют особый интерес благодаря оптимальной скорости деградации и хорошей биосовместимости. В данной работе изучены свойства двух перспективных цинковых сплавов – Zn-4%Ag-1%Cu и Zn-1%Fe-1%Mg.

Эксперимент проведен на 16 кроликах породы Шиншилла, разделенных на 4 группы. В первой группе имплантировали винты Zn-4%Ag-1%Cu в бедренную кость, во второй - винты сплава Zn-1%Fe-1%Mg, в третьей и четвертой - пластины в мышцу сплава Zn-1%Fe-1%Mg и Zn-4%Ag-1%Cu, соответственно. Контрольной группе выполняли рассверливание кости без имплантации. Наблюдение продолжалось 12 недель с последующей эвтаназией животных и забором материала для исследований.

Результаты показали хорошую переносимость имплантатов. Рентгенологически отмечено отсутствие признаков воспаления и остеолиза вокруг имплантатов. Гистологический анализ выявил формирование тонкой фиброзной капсулы вокруг пластин без значимой воспалительной реакции. При имплантации винтов наблюдалось образование костной мозоли без признаков отторжения. Исследование внутренних органов показало сохранность их структуры, что свидетельствует об отсутствии системной токсичности.

Полученные данные позволяют сделать вывод о хорошей биосовместимости и безопасности изученных цинковых сплавов.

Авторы выражают искреннюю благодарность коллективу Уфимской городской ветеринарной станции за профессиональную помощь в проведении рентгенографических исследований и биохимического анализа крови в рамках данного эксперимента.

КОМПЛЕКСНОЕ ОПИСАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА ЧЕРЕЗ СРЕДНИЕ ЛИНЕЙНЫЕ РАЗМЕРЫ ПОР И МЕЖПОРОВЫХ ПЕРЕГОРОДОК

Никифоров Г.А., Галимзянов Б.Н., Мокшин А.В.

*Казанский (Приволжский) Федеральный Университет им. В.И. Ленина,
Казань, Россия, nikiforov121998@mail.ru*

Исследование свойств пористых материалов является актуальной задачей в связи с их широким применением в промышленности и медицине [1]. Пористые материалы обладают повышенной шумо- и термоизоляцией, возможностью хранения энергоносителей и высокой степенью интеграции с живыми тканями. В связи с этим актуальной задачей является получение пористого материала с заданными механическими и функциональными свойствами. Добиться этого можно путем изменения пористости и морфологии пористой структуры. На сегодняшний день хорошо изучены зависимость от пористости таких механических свойств, как модуль Юнга, пределы прочности, текучести и упругости [2]. Такой параметр, описывающий вклад твердой матрицы, как пористость, на практике не достаточен. Например, в работах [3] было обнаружено уменьшение указанных механических характеристик с ростом среднего линейного размера (СЛР) пор, при этом конкретный вид зависимости не был выявлен. Уже в работе [4] было предложено обобщенное выражение зависимости механических свойств от пористости и от СЛР пор. В свою очередь наиболее полным образом описать механические характеристики можно описать через распределения линейных размеров пор и межпоровых перегородок. В совокупности эти два распределения не только содержат информацию об объемной доле твердой матрицы, но и об особенностях ее морфологии. Однако математическое описание зависимости механических свойств от указанных распределений крайне затруднительно. На практике используются значения СЛР пор и перемычек.

В связи с этим в настоящей работе будет исследована комплексная зависимость таких механических характеристик, как модуль Юнга, предел прочности и предел текучести от СЛР пор и межпоровых перегородок на примере пористого никелида титана. Рассмотрены случаи низкопористых и высокопористых систем. Результаты получены на основе анализа экспериментальных данных и молекулярно-динамического моделирования. В ходе настоящей работы был разработан алгоритм для расчета распределений линейных размеров пор и межпоровых перегородок в рамках моделирования молекулярной динамики.

Работа выполнена за счет предоставленного в 2024 году Академией наук Республики Татарстан гранта на осуществление фундаментальных и прикладных научных работ в научных и образовательных организациях, предприятиях и организациях реального сектора экономики Республики Татарстан.

Список используемой литературы:

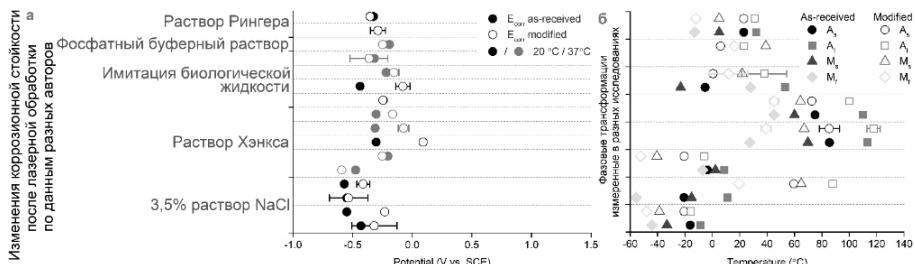
- [1] Liu P.S., Chen G.F. Porous Materials. Processing and Applications. – Butterworth-Heinemann: Elsevier, 2014. – 560 pp.
- [2] Ji S., Gu Q., Xia B. // Journal of Materials Science. 2006. V. 41. № 6. P. 1757-1768.
- [3] C. Torres-Sanchez, F.R.A. Al Mushref, M. Norrito et al // Mater. Sci. Eng. C. 2017. V. 77. P. 219–228.
- [4] Galimzyanov B.N., Nikiforov G.A. et al // Crystals. 2023. V. 13. #1656.

**ЛАЗЕРНАЯ И ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ОБРАБОТКА
ПОВЕРХНОСТЕЙ СПЛАВОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ НА ОСНОВЕ
НИКЕЛИДА ТИТАНА**

Слободян М.С., Марков А.Б.

*Томский научный центр Сибирского отделения Российской академии
наук, Томск, Россия
sms.msc@yandex.ru*

В настоящем обзорном докладе представлены достижения в области модификации поверхности сплавов с памятью формы на основе никелида титана (NiTi СПФ) лазерными и электронными лучами, а также критически оценено их соответствие требованиям, предъявляемым к медицинским изделиям и хирургическим имплантам [1]. Первоначально кратко изложены основные положения стандартов, регулирующих данную сферу деятельности [2]. Кроме того, описаны физические механизмы, обеспечивающие эффекты памяти формы и сверхпластичности сплавов, а также уточнена специфика NiTi СПФ. Затем сформулированы основные проблемы, возникающие при эксплуатации медицинских изделий и хирургических имплантов из NiTi СПФ с обоснованием необходимости модификации поверхности сплавов для повышения их функциональных характеристик. В основной части доклада обобщены результаты различных методов лазерной и электронно-лучевой обработки поверхности NiTi СПФ (Рисунок 1). В заключение представлены выводы авторов, сделанные на основании проведенного анализа литературы, после чего предложены направления дальнейших исследований в этой области и даны общие рекомендации по их проведению, а также детализации представленной информации.



а – коррозионная стойкость; б – температуры фазовых трансформаций

Рисунок 1 – Примеры изменений функциональных свойств поверхностных слоев NiTi СПМ после лазерной и электронно-лучевой обработки:

Исследование проведено в рамках государственного задания ТНЦ СО РАН FWRF-2024-0006.

Список используемой литературы:

- [1] M.S. Slobodyan, A.B. Markov // Russ. Phys. J. 2024. V. 67. No. 5. P. 565–615.
- [2] ASTM F2063-18 Standard specification for wrought nickel-titanium shape memory alloys for medical devices and surgical implants

ОЧИСТКА АДДИТИВНО ПОЛУЧАЕМЫХ ПОРИСТЫХ СТРУКТУР ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ДЛЯ МЕДИЦИНСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ОТ ДЕФЕКТОВ ПЕЧАТИ

Рыжкин А.А.*[,] Еникеев Н.А.

НИЛ «Металлы и сплавы при экстремальных воздействиях»,

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

*alex.sandr00@bk.ru

Биосовместимые пористые материалы используют в качестве костных имплантатов и скаффолдов, в том числе в качестве платформы для локализованной доставки лекарственных препаратов к пораженным тканям. 3D-печать методом селективного лазерного сплавления обеспечивает достаточную точность и экономическую обоснованность для создания передовых биоактивных имплантов. В то же время, дефекты печати, такие как недорасплавленные частицы на внутренней поверхности пор и остаточный порошок, являются нежелательными с точки зрения

биосовместимости. Кроме того, качество внутренней поверхности может влиять на пластичность и усталостные свойства напечатанных изделий.

В рамках представленного исследования разработан метод удаления остаточного порошка в пористых структурах из биосовместимого титанового сплава с последующей обработкой поверхности внутренних каналов с использованием различных растворов. Методом селективного лазерного сплавления были напечатаны образцы из титанового сплава Ti-6Al-4V, обладающие разнообразными параметрами пространственных конфигураций и внутренней топологии. Образцы подвергли обработке в концентрированных растворах плавиковой кислоты и натриевой щелочи с использованием электрохимической обработки. В ходе работы изучали зависимости, влияющие на скорость растворения остаточного порошка, глубину очистки каналов пористых структур, влияние обработки поверхности каналов на механические характеристики, а также биосовместимость образцов после электрохимической обработки. Рассматриваются проблемы, связанные с аддитивным производством этих структур для соответствия медицинским требованиям.

На основе результатов, полученных в ходе проведённых испытаний, возможно улучшить комбинации качества внутренней и внешней поверхности, биосовместимость и механические характеристики пористых имплантатов. Полученные результаты сопоставлены с литературными данными по эффективности и перспективности применения пористых медицинских имплантатов, полученных методом 3D-печати.

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ № 23-69-10003.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЕФОРМАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ПРЕССОВАНИЕМ НА КОМПЛЕКС ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ БИОРЕЗОРБИРУЕМЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Mg-Zn-Y-Mn

Ершов Н.А.*, Баженов В.Е., Плегунова С.В., Комиссаров А.А.

Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия

Высокой востребованностью в современном мире обладают восстановительные операции, направленные на регенерацию костной ткани. Важную роль в процессе операций занимают биорезорбируемые изделия, способные обеспечить механическую поддержку в процессе заживления и при этом не препятствовать естественному восстановлению

кости. Особый интерес вызывают перспективные классы материалов, в том числе биорезорбируемые металлические сплавы на основе магния.

Исследования проводились на сплавах: Mg–0,5Zn–1,2Y–0,8Mn (сплав №1), Mg–1,0Zn–2,4Y–0,8Mn (сплав №2) и Mg–1,5Zn–3,6Y–0,8Mn (сплав №3). Плавка проведена в печи сопротивления с защитной атмосферой. Слитки обрабатывали резанием с последующей деформационной обработкой прессованием (горячая экструзия) при температурах 400 °C и 450 °C. Таким образом получены прутки диаметром 20 мм, на которых проводились исследования механических (по ГОСТ 1497-2023) и коррозионных, по выделению водорода в растворе Хенкса, свойств. Результаты испытаний приведены в таблице 1.

Таблица 2 – Свойства сплавов системы Mg-Zn-Y-Mn после прессования при 400 °C и 450 °C

Сплав	Предел текучести, МПа	Временное сопротивление разрушению, МПа	Относительное удлинение, %	Скорость коррозии, мм/год	Размер зерна, мкм
Температура экструзии 400 °C					
Сплав №1	209±9	263±3	7,8±1,3	0,08±0,05	4,1±0,2
Сплав №2	313±12	325±8	2,6±1,5	0,20±0,09	3,2±0,2
Сплав №3	333±17	356±11	4,2±2,7	0,15±0,05	3,4±0,2
Температура экструзии 450 °C					
Сплав №1	258±14	268±19	1,5±0,9	0,13±0,03	2,9±0,2
Сплав №2	304±5	318±9	2,3±1,1	0,16±0,02	3,9±0,4
Сплав №3	339±11	365±5	4,0±2,7	0,17±0,05	2,2±0,1
Требуемые значения [1]	>200	>250	>10,0	<0,50	-

С увеличением содержания Zn и Y наблюдался тенденция роста прочности и снижения пластичности. Влияние температуры экструзии на свойства незначительно. Все исследованные сплавы после горячей экструзии удовлетворяют прочностным и коррозионным требованиям.

Ни один сплав не достиг требуемого минимального относительного удлинения в 10,0 %, что обусловлено наличием нерекристаллизованных зёрен в микроструктуре. Ближайшее к требуемому значению пластичности в 7,8±1,3 % у сплава №1 после экструзии при 400 °C, обладающего наибольшим размером зерна. Повышение температуры экструзии до 450 °C привело к пятикратному снижению пластичности сплава №1, в то время как для сплавов №2 и №3 изменения пластичности были незначительными. Сплав №3 обладает лучшими прочностными характеристиками и несмотря на низкую пластичность, которая будет улучшена за счёт подбора режима последеформационного отжига.

"Выполнено в рамках реализации Стратегического проекта "Биомедицинская инженерия и биоматериалы" НИТУ МИСИС (программа "Приоритет 2030")"

Список используемой литературы:

[1] Chen Y., Xu Z., Smith C., Sankar J. Recent advances on the development of magnesium alloys for biodegradable implants // Acta Biomaterialia. – 2014. – V. 10. – I. 11. – P. 4561-4573.

**ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ОБРАБОТКИ НА
ФОРМИРОВАНИЕ СОСТАВА, СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ
БИОМЕДИЦИНСКОГО СПЛАВА Mg-Ca-Zn**

Хрусталёв А.П.*, Марченко Е.С., Жуков И.А.

*Национальный исследовательский Томский государственный
университет, Томск, Россия*

**khrustalevap@yandex.ru*

Магний и его сплавы могут использоваться в качестве биоразлагаемых костных имплантатов и стентов, поскольку они обладают хорошей биосовместимостью, физико-механическими свойствами, включая высокую прочность и низкий модуль Юнга [1,2]. Однако есть проблемы, связанные с высокой скоростью биодеградации в агрессивной среде организма, что приводит к интенсивному выделению водорода. Микродуговое оксидирование (МДО) позволяет эффективно повышать коррозионные свойства магниевых сплавов и улучшать биодеградацию [27–30]. Цель работы - изучение влияния параметров МДО на структуру и свойства покрытий сплавов Mg-Ca-Zn.

Сплав Mg-Ca-Zn получен с использованием метода литья в кокиль с применением в качестве исходных компонентов магния, кальция и цинка чистотой 99,99 %. МДО покрытия на сплаве синтезировались с использованием стальной ванны объемом 10 л, температурой электролита 20-25°C, мощностью импульсного источника 6 кВт, напряжение 450 В, длительностью импульса 150 мкс и частотой импульсов 50 Гц. Время МДО обработки варьировалось в диапазоне от 5 до 20 минут.

В результате МДО на поверхности сплава Mg-Ca-Zn формируется плотное покрытие с градиентной структурой, состоящее из аморфных и аморфно-нанокристаллических слоев. Аморфный слой в основном состоит из O, P и Mg (рисунок 1). В аморфном слое также обнаружены включения, обогащенные фтором. Сформированный слой во всех образцах имеет пористую структуру с высокой шероховатостью. С увеличением времени выдержки в электролите наблюдается заметное уменьшение концентрации по F.

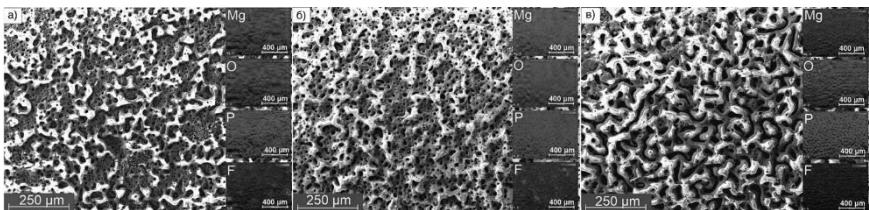


Рисунок 1 – РЭМ изображения поверхности покрытий сплава Mg-Ca-Zn после 5 (а), 10 (б) и 20 (в) минут МДО обработки

Скруч-тестирование под линейно возрастающей нагрузкой в диапазоне 0,01–30 Н выявило хорошую прочность адгезии покрытий. С увеличением времени выдержки в электролите полное отслоение покрытия происходит при более высокой нагрузке.

Исследование проводилось при финансовой поддержке Министерства науки и высшего Образования и науки Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2025-607 от 01/07/2025).

Список используемой литературы:

- [1] Y.F. Zheng, X.N. Gu, F. Witte // Mater. Sci. Eng. R. Rep. 2014. V. 77. #1–34.
- [2] I. Antoniac, M. Miculescu, V. Manescu et al. // Mater. 2022. V. 15. #1148.
- [3] M.H. Song, W.J. Yoo, T.J. Cho et al // Int. J. Mol. Sci. 2019. V. 20. #3761.
- [4] Y. Gu, S. Bandopadhyay, C.F. Chen et al // J. Alloys Compd. 2012. V 543. #109–117.

БИОСОВМЕСТИМОСТЬ И КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ МЕТАЛЛОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИТОВ TiNbZr, АРМИРОВАННЫХ БОРИДАМИ

Тагиров Д.В.

Белгородский государственный национальный исследовательский
университет, Белгород, Россия
[tagirov@bsuedu.ru](mailto>tagirov@bsuedu.ru)

Среднеэнтропийные сплавы системы Ti-Nb-Zr обладают низким модулем упругости, высокой удельной прочностью, отличной коррозионной стойкостью и биосовместимостью, что делает возможным их применение в медицине. В то же время твердость и износостойкость

этих сплавов может быть недостаточно высокой. Одним из способов упрочнения сплавов на основе титана является введение боридных частиц TiB в качестве высокопрочного армирующего компонента. Такой подход обеспечивает повышение прочностных характеристик, но добавки бора могут ухудшить биосовместимость композитов. Таким образом, в данной работе внимание сосредоточено на изучении биосовместимости и коррозионной стойкости композитов на основе эквиатомного сплава TiNbZr с различным содержанием боридов.

Композиты TiNbZr-(Ti,Nb)B с разным содержанием (2,5 и 12,4 об. %) упрочнителя были получены методом вакуумной дуговой плавки. Микроструктура композитов состояла из оцк матрицы TiNbZr и волокон (Ti,Nb)B. Бориды имели игольчатую форму со средним диаметром 0,4 - 2,0 мкм. Введение максимального количества боридов снижает коррозионную стойкость по сравнению с неармированным состоянием и композитом с 2,5 об. % упрочнителя. Также было установлено, что добавление в эквиатомную матрицу TiNbZr волокон (Ti,Nb)B несколько повышает модуль упругости, без заметного снижения биосовместимости. На основании полученных результатов можно рассматривать композиты TiNbZr-(Ti,Nb)B как перспективные биосовместимые материалы.

Выражаем благодарность Российскому научному фонду за финансовую поддержку (грант № 22-19-00476-П).

ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ И БИОСОВМЕСТИМОСТИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА Ti-38Zr-9Nb МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Сударчикова М.А.^{1*}, Шарко А.А.², Конушкин С.В.¹, Селезнева И.И.²,

Сергиенко К.В.¹, Морозова Я.А.¹, Насакина Е.О.¹, Каплан М.А.¹,

Севостьянов М.А.¹

¹ Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН,
Москва, Россия

² Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН,
Московская обл., Пущино, Россия

*mariah.sudar@yandex.ru

Выбор материала для имплантов оказывает прямое влияние на исход хирургического вмешательства и долговечность импланта. Наиболее распространённые титановые сплавы обладают коррозионной стойкостью и биосовместимостью, однако имеют недостатки. В частности, модуль упругости, значительно превышающий аналогичный показатель у костной

ткани, вызывает эффект экранирования нагрузки, приводящий к резорбции кости и снижению срока службы имплантата. Дополнительной проблемой является токсичность некоторых легирующих элементов (например, алюминий и ванадий), способных вызывать воспалительные и аллергические реакции. Эти недостатки могут вызывать значительные осложнения, требующие в последующем хирургического вмешательства.

Актуальной альтернативой являются новые титановые β -сплавы, содержащие нетоксичные элементы — ниобий, цирконий, tantal. Они позволяют снизить модуль упругости материала, приблизив его к значению костной ткани, и тем самым повысить стабильность имплантата и уменьшить риск его расшатывания. Одним из перспективных представителей этой группы является экспериментальный сплав Ti-38Zr-9Nb. Целью работы являлось исследование физико-химических свойств и биосовместимости титанового сплава Ti-38Zr-9Nb, не содержащего токсичных легирующих элементов, и сравнение его с промышленными сплавами BT1-0 и BT6, традиционно применяемыми в медицине.

Для получения сплава использовали йодидный титан, цирконий и ниобий высокой чистоты. Выплавка проводилась в аргонодуговой печи с последующим гомогенизирующими отжигом и деформационной обработкой. Были получены пластины различной толщины, прошедшие холодную и тёплую прокатку, а также рекристаллизационный отжиг. Образцы сплавов подвергали долгосрочному выдерживанию в растворе Рингера, моделирующем физиологические условия, с периодическим анализом вышедших ионов металлов в растворы. Было установлено, что сплав Ti-38Zr-9Nb и чистый титан обладают высокой коррозионной стойкостью. Коррозионная стойкость дополнительно оценивалась методом потенциодинамического поляризационного сканирования. Сплав Ti-38Zr-9Nb демонстрирует наличие пассивного состояния в анодной области. Цитотоксичность оценивалась по прямому контакту с фибробластами новорожденных мышей. Также проводился MTT-тест с использованием вытяжек из материалов в соответствии с международными стандартами. Сплав Ti-38Zr-9Nb показал хорошую клеточную адгезию и жизнеспособность фибробластов на уровне или выше контрольных образцов.

Сплав Ti-38Zr-9Nb обладает высокой коррозионной стойкостью, сравнимой с коммерчески чистым титаном. По результатам биологических испытаний, материал не вызывает цитотоксических реакций и обладает хорошей биосовместимостью. Учитывая низкий модуль упругости и отсутствие токсичных легирующих компонентов, сплав Ti-38Zr-9Nb является перспективным материалом для дальнейших исследований в качестве материала для имплантатов.

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ № 24-13-00186, <https://rscf.ru/project/24-13-00186>.

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ, МЕХАНИЧЕСКИХ И
КОРРОЗИОННЫХ СВОЙСТВ БИОРЕЗОРБИРУЕМЫХ
МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Mg-Ga-X (x=Zn, Mn)**

Плегунова С.В., Баженов В.Е., Ершов Н.А., Комиссаров А.А.

*Национальный исследовательский технологический университет
МИСИС, Москва, Россия*

Среди наиболее важных областей медицины, где требуется замена постоянных имплантатов на биорезорбируемые, можно выделить челюстно-лицевую хирургию и ортопедию, где в качестве изделий представителей рассматриваются винты, спицы. В области сердечно-сосудистой хирургии значительный интерес представляют коронарные стенты и кава-фильтры. Сплавы магния наиболее схожи с костной тканью (модуль упругости), обладают высокой остеокондуктивностью, более технологичны в производстве. Комплексное легирование в сочетании с проведением термодеформационной обработки позволяет изменять микроструктуру, достигая требуемых эксплуатационных свойств.

В работе исследованы сплавы магния с галлием, цинком и марганцем. Для получения сплавов в качестве исходных материалов использовали: магний Mg98, цинк ЦВ0, галлий 6N, лигатуру Mg–3Mn (мас. %). Полученные слитки подвергали термической обработке, при температуре 500 °C в течении 8 часов, после обрабатывались точением для получения требуемого сечения (50 мм в диаметре) с целью проведения экструзии со скоростью 1-2 мм/с до 6 мм (степень обжатия составила 69). Температура матрицы и заготовки составила 300 °C.

Металлографические, механические и коррозионные исследования проводились согласно стандартам: ГОСТ 5639-82, ГОСТ 1497-2023, ASTM G1-2011, соответственно. Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Эксплуатационные характеристики разработанных магниевых сплавов

Сплав	d _{cpl} , мкм	d _{cpl} , мкм	σ _т , МПа	σ _в , МПа	δ, %	Скорость коррозии, мм/год
Mg-0,1Ga	13,59±0,37	11,88±0,73	155,4±13,5	243,1±3,3	13,9±2,6	0,19±0,11
Mg-1,0Ga	23,51±0,71	20,58±0,29	170,2±10,0	244,0±4,3	12,9±3,3	0,52±0,19
Mg-1,0Ga-1,0Zn	20,02±0,31	23,02±0,35	146,6±4,8	240,9±4,7	15,5±1,8	0,28±0,12
Mg-0,1Ga-0,6Mn	14,89±0,96	10,31±0,25	160,0±15,0	251,5±1,8	17,2±2,1	0,14±0,08
Mg-1,0Ga-0,6Mn	14,45±0,77	12,04±1,03	218,1±11,7	279,5±3,6	11,2±1,1	0,11±0,04
Mg-1,0Ga-1,0Zn-0,6Mn	5,08±1,18	7,62±1,53	203,9±5,2	278,5±4,7	22,4±2,1	0,28±0,06
Требуемые свойства [1]	–	–	>200	>250	>10,0	<0,50

Легирование только галлием до 1 % показало себя неэффективно, при таких концентрациях происходит твёрдорастворное упрочнение, но не образуется дисперсная фаза. Добавлении цинка и марганца (по отдельности и совместно) приводит к уменьшению размера зерна за счёт упрочнения твёрдого раствора и образования частиц α -Mn.

Сплавы Mg-1,0Ga-0,6Mn и Mg-1,0Ga-1,0Zn-0,6Mn легированный галлием и марганцем обладает требуемым комплексом свойств для применения в биомедицине и являются перспективными кандидатами на упрочнение за счёт обработки волочением, поскольку сохранили высокую пластичность, их скорость резорбции в растворе Хенкса и прочностные параметры оптимальны для изготовления медицинских изделий.

Менее перспективными являются Mg-0,1Ga и Mg-1,0Ga, которые хоть и обладают близкими пределами текучести и времененным сопротивлением разрушению, однако их относительное удлинение меньше, а в случае Mg-1,0Ga скорость коррозии наибольшая из исследованных сплавов. Возможно, это связано с неравносным и достаточно большим размером зерна, волочение может быть проведено и для этих сплавов, но по более мягким режимам, с большей температурой промежуточной выдержки.

"Работа выполнена в рамках реализации Стратегического проекта "Биомедицинская инженерия и биоматериалы" НИТУ МИСИС (программа "Приоритет 2030")"

Список литературы:

- [1] Chen Y., Xu Z., Smith C., Sankar J. // Acta Biomaterialia. – 2014. – Vol. 10. – Is. 11. – P. 4561-4573.

СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫХ ИОНОВ С МЕТАЛЛАМИ

Андрianова Р.Р., Докука В.Н., Скопинцев Д.А., Хайрутдинов Р.Р.

АО ГНЦ ТРИНИТИ, Москва, Троицк, Россия

rbrandrianova@triniti.ru

В настоящее время существует большое количество методов, используемых в материаловедении для исследования состава металлических сплавов и композиционных материалов, имеющих в основе металлы и металлические соединения. Для определения их химического состава наиболее часто используется метод оптического эмиссионного спектрального анализа. Эмиссионный метод [1] позволяет исследовать исключительно верхний слой образца, так как в его основе лежит принцип аблации вследствие нагрева. Это ограничивает применение классического эмиссионного спектрального анализа для тугоплавких металлов и сплавов и некоторых видов стали.

Целью работы является использование метода аблации материалов под воздействием бомбардировки ионами водорода с энергией несколько десятков эВ и выше, применяемого в области термоядерной физики [2]. Это расширяет возможности применения классического эмиссионного спектрального анализа для тугоплавких металлов и сплавов и некоторых видов стали. Концептуально новые методы исследования состава материалов требуют не только разработки технологии, операционных карт и методов контроля измерений, но и больших затрат на новое оборудование. Концентрация химических элементов в предложенном методе измеряется аналогично путем регистрации интенсивности спектра.

Для решения представленной задачи разработана модель взаимодействия высокoenергичных ионов с металлами, которая позволяет рассчитывать коэффициенты распыления металла высокoenергичными атомами. Модель использует теоретические зависимости для коэффициентов распыления в зависимости от энергии водородного пучка и вида материала бомбардируемой мишени, которые приведены в работе [3].

Тестирования модели и полученных коэффициентов в дальнейшем предполагается на установке КСПУ [2]. Плазменный ускоритель предназначен для генерации высокoenергетических компрессионных плазменных потоков для эффективной модификации поверхностных свойств материалов, недоступной для других методов, решения ряда задач

управляемого термоядерного синтеза и исследования взаимодействия плазмы с различными материалами.

Список используемой литературы:

[1] Воробьев Р.А. – Современные методы определения химического состава металлических материалов.

[2] Н.С. Климов, Д.В. Коваленко, В.Л. Подковыров, Д.М. Кочнев, А.Д. Ярошевская, Р.В. Урлова, А.Н. Козлов, В.С. Коновалов – Экспериментальное исследование интегральных характеристик потока плазмы и разряда квазистационарного сильноточного плазменного ускорителя с собственным магнитным полем, ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2019, т. 42, вып. 3.

[3] W. Eckstein – Sputtered Energy Coefficient and Sputtering Yield, IPP 17/29, 2011

**МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА Ti-38Zr-11Nb
ЛЕГИРОВАННОГО СЕРЕБРОМ**

Горбенко А.Д.^{1,2*}, Жидков В.К.^{1,3}, Каплан М.А.¹, Колмаков А.Г.¹,
Севостьянова Т.М.⁴, Севостьянов М.А.¹

*¹Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова
Российской академии наук, Москва, Россия*

*²Национальный исследовательский технологический университет
МИСиС, Москва, Россия*

*³Московский государственный технический университет имени Н.Э.
Баумана, Москва, Россия*

*⁴Российский национальный исследовательский медицинский университет
им. Н.И. Пирогова, Москва, Россия*

** artemgorbenk@yandex.ru*

Современная медицинская наука активно разрабатывает новые технологии, направленные на улучшение состояния пациентов и оптимизацию лечебных процессов. Одним из перспективных направлений является использование титановых сплавов с антимикробным действием для изготовления имплантатов. Например, сплавы системы Ti-Zr-Nb сочетают высокую прочность с упругостью, близкой к костной ткани. Введение в их состав серебра (Ag), обладающего бактерицидными свойствами, позволяет создавать ортопедические материалы, минимизирующие вероятность послеоперационных инфекций. Поэтому в данной работе рассматривается группа титановых сплавов Ti-38Zr-11Nb-(0-3)Ag, потенциально обладающая низким модулем Юнга и

антибактериальными свойствами, а конкретно уровень их механических свойств (в виде проката) и влияние степени легирования серебром на них.

Механические характеристики сплавов получали при испытаниях на растяжение, проводившихся на испытательной машине INSTRON 3382. Плоские образцы с головками изготавливали из пластин и вырезались на электроэррозионном станке. Для получения данных по одной экспериментальной точке проводили по пять опытов. В ходе испытаний определялись значения относительного удлинения, условного предела текучести и предела прочности.

Таблица 1 – Механические свойства пластин в зависимости от состояния и содержания Ag

Состав	Состояние	δ , %	σ_u , МПа
Ti-38Zr-11Nb	прокатка	12,1±0,8	636±22
	прокатка+закалка 600°C, 5 мин, в воду	10,0±2,0	661±12
Ti-38Zr-11Nb-1Ag	прокатка	10,9±2,6	621±32
	прокатка+закалка 600°C, 5 мин, в воду	10,1±0,6	647±14
Ti-38Zr-11Nb-2Ag	прокатка	11,3±2,5	620±17
	прокатка+закалка 600°C, 5 мин, в воду	4,5±0,5	635±34
Ti-38Zr-11Nb-3Ag	прокатка	12,7±1,5	748±31
	прокатка+закалка 600°C, 5 мин, в воду	3,3±0,8	778±52

Наблюдается зависимость между проведением термической обработки и повышением предела прочности. Сплавы и в прокатанном, и в закаленном состоянии при концентрациях серебра 0–2 ат. % демонстрируют примерно одинаковую прочность, с учетом погрешности. Но при доведении уровня легирования серебром до 3 ат. % прочность резко возрастает. Относительное удлинение в прокатанных сплавах с учетом погрешности не изменяется в зависимости от содержания серебра. При этом в пластинах, подвергнутых термической обработке, повышение содержания Ag более 1% приводит к уменьшению пластичности. Вероятно, что наибольшую роль во всех наблюдаемых изменениях механических характеристик играет формирование интерметаллидной фазы AgZr₃, состоящей из элементов с более низкими (относительно титана) температурами плавления.

Таким образом, представлены механические свойства сплавов Ti-38Zr-11Nb-(0-3)Ag после прокатки и закалки. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-73-00168.

БИОСОВМЕСТИМОСТЬ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВОВ Ti-Mo

**Горнакова А.С.^{1,*}, Корнева А.В.², Новрузов К.М.³, Шайсултанов Д.Г.⁴,
Афоникова Н.С.¹, Анисимова Н.Ю.³, Страумал Б.Б.¹, Тюрин В.А.⁵,
Давдян Г.С.¹**

**¹ Институт физики твердого тела им. Ю.А. Осьпяяна РАН,
Черноголовка, Россия**

**² Институт металлургии и материаловедения им. А. Крупковского ПАН,
Краков, Польша**

**³ Национальный медицинский исследовательский онкологический центр
им. Н.Н. Блохина РАМН, Москва, Россия**

**⁴ Белгородский государственный национальный исследовательский
университет, Белгород, Россия**

**⁵ Научно-исследовательский институт нанотехнологий и
наноматериалов Тамбовского государственного университета им. Г.Р.
Державина, Тамбов, Россия**

***alenahas@isspp.ac.ru**

Одним из широко используемых титановых сплавов в биомедицине остается BT6 (Ti6Al4V). Как правило, этот сплав используется в отожжённом $\alpha+\beta$ -состоянии. К отрицательным свойствам титановых сплавов в $\alpha+\beta$ -состоянии относят его высокий модуль упругости, что часто приводит к резорбции кости, контактирующей с протезом, и как следствие, к ухудшению его фиксации в кости. Поэтому, в последние годы обратили внимание на однофазные титановые сплавы с β -структурой и более низким модулем упругости. Было показано, что легирование титана цирконием, молибденом и tantalом приводит к понижению модуля упругости материала без потери прочности. И второй важный фактор, это то, что указанные элементы имеют более низкую токсичность, по сравнению компонентами алюминием и ванадием [1-3].

Было исследовано влияния различных видов обработки материала на биосовместимость двух- и трехкомпонентных сплавов Ti-10вес.%Mo, Ti-10вес.%Mo-1 вес.%Cu, Ti-15вес.%Mo и Ti-15вес.%Mo-1вес.%Si. Четыре сплава изучались в трех состояниях: после изготовления, после термообработки при 1000°C и после кручения под высоким давлением (КВД).

Выводы: КВД обработка материала привела к ухудшению цитотоксичности и уменьшению клеточной адгезии для всех исследованных сплавов Ti-Mo. Исследования показали, что наилучшая клеточная адгезия и цитотоксичность зафиксирована у отожжённых

образцов. Низкие значения твердости (283 HV) и модуля Юнга (106 ГПа) наблюдаются у отожжённого образца сплава Ti-15вес.%Mo, а также высокие значения клеточной адгезии и цитотоксичности для этого сплава, что говорит о его возможной перспективе применения в области конструкционных биоматериалов.

«Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-22-00222, [https://rscf.ru/project/24-22-00222/»](https://rscf.ru/project/24-22-00222/)

Список используемой литературы:

- [1] Б.Б. Страумал, А.С. Горнакова, А.Р. Кильмаметов, Е. Рабкин, Н.Ю. Анисимова, М.В. Киселевский. Сплавы для медицинских применений на основе β -титана. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 6(2020). 52-64.
- [2] Junior J.R.S.M., Nogueira R.A., Araujo R.O., Donato T.A.G., Arana-Chavez V.E., Claro A.P.R.A., Moraes J.C.S., Buzalaf M.A.R., Grandini C.R. Preparation and Characterization of Ti-15Mo Alloy used as Biomaterial. *Materials Research*. 14(2011) 107-112
- [3] Lin D.-J., Chuang C.-C., Lin J.-H.C., Lee J.-W., Ju C.-P., Yin H.-S. Bone formation at the surface of low modulus Ti-7.5Mo implants in rabbit femur. *Biomaterials* 28 (2007) 2582–2589.

НОВЫЕ СВЕРХУПРУГИЕ СПЛАВЫ СИСТЕМЫ Ti-Zr-Nb-Sn

Гундерова С.Д.*, Деркач М.А., Шереметьев В.А.

Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия

**gynderova@mail.ru*

Демографическая яма и как следствие стремительное старение населения увеличивают спрос на высокотехнологичные ортопедические имплантаты. Возрастные изменения опорно-двигательного аппарата, такие как остеопороз, дегенеративные заболевания суставов и повышенная хрупкость костей, требуют разработки новых материалов, которые будут обладать биологической и механической совместимостью, а также высоким комплексом функциональных свойств, что обеспечивает комфорт при ношении изделия и снижение риска повторной операции.

Ранее активно изучалась система Ti-Zr-Nb, среди данной системы выделился сплав Ti-18Zr-15Nb (в ат. %), который уже прошёл все проверки и готов к выпуску. Однако, в недавних зарубежных исследованиях было установлено, что легирование тройной системы Ti-Zr-Nb оловом (Sn), которое также является биосовместимым компонентом, обеспечивает

дополнительные возможности для применения упрочняющего старения с сохранением высокого уровня сверхупругих свойств, что является следствием смещения мартенситных точек и развития выгодной нам ориентировки текстуры. Это существенно повышает возможности управления структурой и свойствами этих сплавов методами термомеханической обработки. Так же перспективным направлением исследований является увеличение содержания циркония (Zr), за счет которого увеличивается кристаллографический ресурс обратимой деформации.

Впервые в России были выплавлены слитки сплавов системы Ti-Zr-Nb-Sn, это низкоциркониевый сплав Ti-18Zr-12,5Nb-2Sn (Ti18Zr,) который является аналогом Ti-18Zr-15Nb, и высокоциркониевый сплав Ti-40Zr-8Nb-2Sn (Ti40Zr). Были получены первые результаты по новым сплавам.

Методом оптической микроскопии показано, что исследуемые сплавы Ti18Zr и Ti40Zr после горячей прокатки и отжига имеют преимущественно равноосную структуру с размером зерна около 100-1000 мкм. Основной фазой является β -фаза, период решетки которой для сплава Ti40Zr (3,42 Å) выше чем у сплава Ti18Zr (3,35 Å). При последующей деформации выделяется α'' -мартенсит, который полностью превращается в β -фазу при последеформационном отжиге (ПДО). ПДО при некоторых температурах так же приводят к образованию α -фазы. Механические свойства по режиму ХП $e=0,3 + \text{ПДО } 550-600^\circ\text{C } 30 \text{ мин}$ сочетают в себе предел прочности (σ_b) $\approx 650-700 \text{ МПа}$ у Ti40Zr и (σ_b) $\approx 600 \text{ МПа}$ у Ti18Zr с пластичностью (δ) $\approx 11-13\%$ у Ti40Zr и (δ) $\approx 8-9\%$ у Ti18Zr. А также сверхупругая обратимая деформация ε_r^{SE} достигает $\approx 4,5\%$ у сплава Ti40Zr, в то время как на сплавах без олова значения ε_r^{SE} варьировались около 3 %.

СВОЙСТВА БИОРЕЗОРБИРУЕМОГО ЦИНКОВОГО СПЛАВА Zn-0.8%Li-0.1%Mn, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ РКУП-CONFORM

Кулясова А.Г.^{1,2*}, Сиразеева А.Р.¹, Кулясова О.Б.¹

¹Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

²Башкирский государственный медицинский университет, Уфа, Россия

*kulyasova-01@mail.ru

По данным Росстата, медицинские учреждения в России регистрируют более 3 млн детских травм ежегодно. Таким образом, в больницы в связи с травмами обращается примерно каждый восьмой ребенок в возрасте до 18 лет. Переломы рук и ног составляют примерно 20% от всех полученных травм. Современная практика травматологии

показывает, что в настоящее время при показаниях к операции при лечении перелома устанавливается имплантат, титановый или стальной, который извлекается путем полноценной повторной операции через 1-1,5 года. В случае детской травматологии за это время организм ребенка растет и сдерживающий имплантат может привести к нарушению естественного роста кости. Применение биорезорбируемых имплантатов позволит избежать повторной операции в большинстве случаев, что сократит нагрузку на Фонд обязательного медицинского страхования по позиции высокотехнологичной медицинской помощи «Ортопедия». В отличие от других материалов для биорезорбируемых имплантатов, цинковые сплавы наиболее перспективны с точки зрения скорости коррозии, а именно: сплавы на основе Zn растворяются быстрее, чем сплавы на основе Fe и медленнее, чем сплавы на основе Mg. Однако цинковые сплавы характеризуются относительно невысокими значениями прочности. Известно, что для повышения прочностных характеристик используются методы интенсивной пластической деформации (ИПД), в результате применения которой происходит структурно-фазовая трансформация. В работе рассмотрено влияние ИПД методом РКУП-conform на изменение структуры, механических и коррозионных свойств биорезорбируемого цинкового сплава Zn-0.8Li-0.1Mn.

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ № 24-43-00154.

ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫЕ ПОКРЫТИЯ НА ТИТАНОВОМ СПЛАВЕ ВТ6: СТРУКТУРА И СВОЙСТВА

Николаев А.А.^{*}, Хайтулов А.Р., Рамазанов К.Н.

Уфимский университет науки и технологий, Уфа,

*nikolaev.aa@ugatu.su

Одной из главных задач материаловедения является создание материалов с улучшенным комплексом свойств. Для решения этой задачи изготавливаются сплавы на основе одного элемента (например, Fe, Ti, Al, Ni и др.), легируемые дополнительными элементами для достижения необходимых физико-механических и эксплуатационных свойств. Такие сплавы успешно применяются в различных отраслях промышленности и медицине в зависимости от условий работы. Но поскольку научно-технический прогресс идет вперед, увеличиваются и требования к характеристикам материалов, применяемых в новых продуктах. Так, одной из возможных решений данной задачи является создание

высокоэнтропийных сплавов (ВЭС). Данные сплавы представляют собой новый класс материалов, состоящий как минимум из пяти элементов, равномерно распределенных в кристаллической решетке. Название «высокоэнтропийные» связано с высоким уровнем энтропии (неупорядоченности) в их структуре, что обеспечивает улучшенную термическую стабильность фазового состава и структурного состояния, а также способствует повышению механических, физических и химических свойств сплава [1]. За последнее время проведено множество экспериментов с различными системами ВЭС, однако наиболее перспективные исследования касаются применения высокоэнтропийных сплавов в качестве защитных покрытий и пленок [2]. Использование покрытий из ВЭС вместо объемных сплавов значительно снижает стоимость изделий, а также расширяет область применения [3]. В связи с этим исследование и разработка высокоэнтропийных покрытий является актуальной задачей.

Обзор публикаций по тематике высокоэнтропийных покрытий показал, что существует интерес у научного сообщества к проведению исследования как существующих систем высокоэнтропийных сплавов, так и разработке новых систем. Несмотря на хорошую изученность объемного сплава Кантора, имеющиеся публикации по покрытиям из данного материала не позволяют сделать однозначный вывод о границах применимости высокоэнтропиных покрытий и закономерностях их формирования PVD методами. В связи с этим исследования по установлению закономерностей формирования высокоэнтропийных покрытий и определения границ применимости данных покрытий являются актуальными и позволят сформировать научные основы для получения покрытий схожих систем PVD методами.

В настоящей работе показаны результаты осаждения магнетронным способом высокоэнтропийных покрытий по трем различным технологиям. Представлены результаты исследования элементного и фазового составов, микротвердости, а также оценки износостойкости.

Список используемой литературы:

- [1] Фирстов С. А. и др. Новый класс материалов—высокоэнтропийные сплавы и покрытия //Вестник российских университетов. Математика. – 2013. – Т. 18. – №. 4-2. – С. 1938-1940.
- [2] Громов В. Е. и др. Покрытия из высокоэнтропийных сплавов: состояние проблемы и перспективы развития //Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия. – 2022. – Т. 65. – №. 10. – С. 683-692.

[3] Rong Z. et al. Microstructure and properties of FeCoNiCrX (XMn, Al) high-entropy alloy coatings //Journal of Alloys and Compounds. – 2022. – Т. 921. – С. 166061.

**ЭВОЛЮЦИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ, МАРТЕНСИТНЫХ
ПРЕВРАЩЕНИЙ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ГОРЯЧЕДЕФОРМИРОВАННОГО НИКЕЛИДА ТИТАНА**

Пискунова П.А.^{1*}, Рыклина Е.П.¹, Полякова К.А.¹, Мурыгин С.Р.¹,
Комаров В.С.^{1,2}, Конопацкий А.С.^{1,3}, Теплякова Т.О.^{1,4}, Андреев В.А.²,
Полетика Т.М.⁵, Гирсова С.Л.⁵

¹НИТУ МИСИС, Москва, Россия

*²Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН,
Москва, Россия*

*³CRISMAT, CNRS, Normandie Université, ENSICAEN, UNICAEN, Caen,
France*

*⁴Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”,
Москва, Россия*

*⁵Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, 634021
Томск, Россия*

**piskunova@p-ol.ru*

Никелид титана (NiTi) представляет собой перспективный функциональный материал, широко применяемый в медицине и технике благодаря уникальному комплексу физико-механических характеристик. Ключевой особенностью сплава является возможность целенаправленного изменения его функциональных свойств за счёт варьирования режимов старения. Это позволяет оптимизировать эксплуатационные характеристики материала в соответствии с конкретными инженерными или медицинскими требованиями, открывая новые перспективы для его практического применения.

Исследование проводили на проволочных образцах сплава Ti 50,8 ат. % Ni диаметром 0,6 мм, полученных горячим волочением в интервале температур 700–750 °C. Последующее старение осуществляли при температурах 300, 430 и 500 °C в течение 10 ч. Микроструктуру изучали с использованием просвечивающего и сканирующего электронных микроскопов. Мартенситные превращения (МП) исследовали методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) на приборе «Mettler Toledo 3+». Испытания на растяжение выполняли на разрывной машине «ISTRON 5966» до разрушения со скоростью деформации 20 мм/мин в диапазоне температур $-196 \leq T \leq 60$ °C. По диаграммам растяжения

определяли функционально-механические характеристики в исходном состоянии и после старения: дислокационный предел текучести (σ_t), предел прочности (σ_b), фазовый предел текучести (σ_f), параметр $\Delta\sigma = \sigma_t - \sigma_f$, модуль Юнга (E), относительное удлинение (δ_t), соответствующее значению σ_t , и удлинение при разрушении (δ_b). После старения при 300 °C частицы Ti₃Ni₄ не определяются. При повышении температуры с 430 до 500 °C наблюдается увеличение диаметра частиц в 2,7 раза. После горячей деформации в сплаве протекает прямое МП в две стадии: R→B2 и R→B19'; последующее старение сопровождается постепенным сближением пиков превращений. Температурная зависимость фазового предела текучести и модуля Юнга имеет выраженный V-образный характер с минимумом в точке M_h. Наиболее высокое значение σ_b и $\Delta\sigma = 1100$ МПа определяется после старения при 430 °C при температуре M_h; минимальное значение 200 МПа – в исходном деформированном состоянии. Полученные значения $\Delta\sigma$ в 1,5–2 раза превышают уровень значений рекристаллизованного никелида титана и являются рекордными для никелида титана. Повышение температуры старения сопровождается увеличением модуля Юнга при температурах выше M_h, при одновременном повышении пластичности. Старение при температуре 430 °C позволяет обеспечить оптимальное сочетание ресурса обратимой деформации $\Delta\sigma$, модуля Юнга E и пластичности.

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания НИТУ МИСИС, шифр проекта FSME-2023-0006.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АДДИТИВНО ПОЛУЧАЕМОГО ПОРИСТОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА ДЛЯ ОРТОПЕДИЧЕСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ

Рыжкин А.А., Еникеев Н.А., Мельников Д.С.

НИЛ «Металлы и сплавы при экстремальных воздействиях», Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

alex.sandr00@bk.ru

Востребованность разработки и внедрения материалов с пористой структурой обусловлена перспективами их применения в области биомедицины. Биосовместимые пористые материалы могут быть использованы в качестве заменителей костной ткани и каркасов для клеточной инженерии, включая возможность направленной доставки лекарственных средств к поврежденным участкам. Технология 3D-печати предоставляет возможность создавать персонализированные изделия со

сложной внутренней геометрией, что позволяет точно настраивать механические свойства создаваемых объектов и повышать их биосовместимость.

В рамках данной работы были разработаны различные варианты геометрии пористых структур, адаптированные для 3D-печати, с применением моделей трижды периодических минимальных поверхностей. Сформированы модели структур с разнообразными параметрами пространственной конфигурации и внутренней топологии. На их основе методом селективного лазерного плавления были изготовлены образцы из титанового сплава Ti-6Al-4V. В процессе исследования изучалось соответствие между спроектированными и реализованными структурами, а также их механические свойства как в исходном состоянии после печати, так и после термообработки.

Результаты, полученные в ходе проведенных испытаний, открывают возможности для оптимизации комбинации механических характеристик пористых имплантатов. Полученные данные показывают влияние геометрии внутренней поверхности на механические свойства пористого материала. Были сопоставлены результаты испытаний на растяжение и сжатие образцов следующих дизайнов: Gyroid листовой, Gyroid скелетный, IWP и Diamond, основанные на моделях трижды периодической минимальной поверхности. Получены зависимости упругих и прочностных свойств пористых образцов от параметров элементарной ячейки моделей. Показано, что, варьируя эти параметры, можно проектировать пористые биосовместимые имплантанты с различными комбинациями механических свойств и получать индивидуальные решения для медицинских применений.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-69-10003.

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЛАВОВ ГРУППЫ Ti-Zr-Nb МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Сергиенко К.В.^{1*}, Морозова Я.А.¹, Севостьянова Т.М.², Конушкин С.В.¹,
Каплан М.А.¹, Горбенко А.Д.¹, Сударчикова М.А.¹, Севостьянов М.А.¹,
Колмаков А.Г.¹

¹*Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН,
Москва, Россия*

²*Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования "Российский национальный*

*исследовательский медицинский университет имени Н.И. Пирогова"
Министерства здравоохранения Российской Федерации, Москва, Россия
shulf@yandex.ru

В последние годы метастабильные β титановые сплавы стали ключевым объектом исследований в качестве материала для будущего поколения эндопротезов суставов благодаря своему потенциальному перспективному комплексу свойств, включая более низкий модуль Юнга, по отношению к применяемым сегодня металлическим материалам для эндопротезов. Это позволяет обеспечить лучшую механическую биосовместимость между имплантатом и костью, в которой он зафиксирован, что позволяет избежать излишнего локального перенапряжения на костях и суставах, и неравномерного распределение нагрузки [1-3].

Объектом исследования являлись три сплава (at. %): Ti-36Zr-9Nb, Ti-38Zr-9Nb и Ti-40Zr-9Nb. Эквивалент Mo является эмпирическим параметром, представляющим вклад легирующих элементов в стабильность β -фазы по сравнению с Mo.

Установлено, что сплавы (at. %) Ti-36Zr-9Nb, Ti-38Zr-9Nb и Ti-40Zr-9Nb как после прокатки, так и после прокатки и закалки имеют однородную микроструктуру, состоящую из зёрен полизадрической формы β -Ti, стабилизированного Nb и Zr. Размер зёрен после прокатки составляет ~ 100 мкм, а после закалки — ~ 170 мкм.

Проведение закалки является рациональным для изученных сплавов, так как она практически не оказывает влияние на модуль Юнга E, микротвердость и прочностные характеристики, но повышает пластичность и проявление эффекта сверхупругости. Достигнутые значения E ~ 50 - 60 ГПа достаточно близки к значениям E костных тканей человека.

Сплав Ti-38Zr-9Nb обладает наиболее сбалансированным комплексом механических характеристик по сравнению с двумя другими сплавами: при примерно одинаковых значениях E и микротвердости, он имеет большие характеристики прочности и пластичности, а также у него более выражено проявляется эффект сверхупругости.

В связи с достаточно высокими механическими характеристиками ($\sigma_b \sim 630$ - 660 МПа, $\delta \sim 14$ - 23 %) изученные сплавы могут применяться не только для имплантатов, но и в качестве конструкционных материалов для широкого спектра задач. Большой запас пластичности после закалки обеспечивает значительный потенциал дополнительного увеличения прочностных показателей.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-13-00186, <https://rscf.ru/project/24-13-00186/>

Список используемой литературы:

- [1] S. Pagani, E. Liverani, G. Gianluca et al. // Mechanical and in vitro biological properties of uniform and graded Cobalt-chrome lattice structures in orthopedic implants. 2021. Wiley Online Library, 109(12), 2091–2103.
- [2] M. Semlitsch, // Mechanical Properties of Selected Implant Metals Used for Artificial Hip Joints. 2018. Metal and Ceramic Biomaterials, 1–22.
- [3] T. Kilner, W.M. Laanemäe et al. // Static mechanical properties of cast and sinter-annealed cobalt-chromium surgical implants. 1986. Journal of Materials Science, 21(4), 1349–1356.

МАГНИЕВЫЕ СПЛАВЫ С РЗМ ДЛЯ МЕДИЦИНСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Лукьянова Е.А.^{1*}, Мартыненко Н.С.¹, Рыбальченко О.В.¹,
Анисимова Н.Ю.², Киселевский М.В.², Тарытина И.Е.¹, Темралиева Д.Р.¹,
Добаткина Т.В.¹, Добаткин С.В.¹

¹*Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН,
Москва, Россия*

²*ФГБУ «НМИЦ онкологии им. Н.Н. Блохина» Минздрава России, Москва,
Россия*

**helenelukyanova@gmail.com*

Исследование и разработка магния и его сплавов в качестве разлагаемых биоматериалов стали горячей темой в области науки и техники металлических биоматериалов в XXI веке. Будучи одним из основных макроэлементов в организме человека, магний желателен из-за его превосходной биосовместимости, благоприятной биоразлагаемости и превосходного остеогенеза. Однако быстрая скорость деградации и недостаточная механическая прочность ограничивают его использование. Легирование магния редкоземельными металлами (РЗМ) является удобным и распространенным методом для восполнения этих недостатков. РЗМ обладают многочисленным положительным эффектом на механические, коррозионные и технологические свойства магниевых сплавов, однако остаются вопросы о биопригодности этих элементов из-за ограниченности данных о их физиологическом воздействии. Тем не менее прослеживаются некоторые особенности в их влиянии на биосовместимость. Существует разница в биологическом действии этих элементов в зависимости от их принадлежности к иттриевой или цериевой

подгруппе. РЗМ цериевой подгруппы, в частности, проявляют выраженную гепатотоксичность, в отличие от РЗМ иттриевой подгруппы, которые в свою очередь, демонстрируют большее сродство к костной ткани и, следовательно, более длительный биологический период полураспада. Результаты, связанные с неблагоприятными биологическими эффектами, указывают на то, что Y, Ce, Pr, Gd, Dy, Yb, Sm и Eu должны быть тщательно изучены перед их использованием в качестве легирующих элементов для биомедицинских сплавов на основе магния. Tb и Ho также могут вызывать опасения, но в меньшей степени, поэтому могут иметь определенный потенциал. Пригодность Tm, Lu и Er недостаточно ясна. Сплавы Mg-Lu проявили неудовлетворительную гемостовместимость. Влияние Sc изучено в большей степени, поэтому он рассматривается как весьма эффективный элемент с точки зрения биологического воздействия. В целом, в качестве легирующих элементов для магния Y, La, Ce, Pr более подходят для ортопедического применения, тогда как Sc, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Tm, Yb – для применения в сердечно-сосудистой хирургии. Более того, для дальнейшей разработки магниевых сплавов, содержащих РЗМ, с улучшенными комплексными характеристиками предлагается добавлять другие нередкоземельные элементы (например, Zn). Хотя воздействие отдельных РЗМ вызывает некоторые потенциальные опасения, общий физиологический ответ на использование готовых сплавов позволяет предположить, что они могут быть приемлемыми. Успешное применение сплавов Mg-РЗМ показывает, что во многих случаях положительный эффект от добавления РЗМ имеет более важное значение, чем отказ от их использования. Так, более контролируемая деградация с использованием РЗМ позволяет в свою очередь добиться удовлетворительного биологического отклика, что подтверждается успешным применением клинических имплантатов Mg-РЗМ, представленных в настоящее время на рынке [1]. Одним из примеров использования таких сплавов является магниевый сплав WE43 (Mg-Y-Nd-Zr). В работе проведен анализ микроструктуры, механических и коррозионных свойств, а также биосовместимости сплава WE43 в зависимости от деформационной обработки.

Работа выполнена в соответствии с государственным заданием № 075-00319-25-00.

Список используемой литературы:

[1] W. Weng, A. Biesiekierski, Y.Li, M. Dargusch, C. Wen. A review of the physiological impact of rare earth elements and their uses in biomedical Mg alloys. *Acta Biomaterialia*. 2021.V. 130. P. 80-97.

РАЗРАБОТКА ПОРИСТЫХ БИОМАТЕРИАЛОВ ИЗ СПЛАВА Ti-6Al-4V С ПОВЫШЕННОЙ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТЬЮ

Творогов А.И.*, Лезин В.Д., Востриков Н.Ф., Шереметьев В.А.

НИТУ МИСИС, Москва, Россия

****arrrttv@gmail.com***

В настоящее время, аддитивные технологии, в том числе селективное лазерное плавление (СЛП), позволяет создавать персонализируемые титановые имплантаты для ортопедии, значительная часть конструкции которых содержит пористые материалы. Благодаря их развитой внутренней поверхности формируются оптимальные условия для прорастания косной ткани внутрь имплантата. Также изготавливаемые имплантаты обладают более низким модулем упругости, близким к таковому у костной ткани (0,1–30 ГПа). Процесс производства пористых имплантатов можно разделить на три этапа: дизайн, изготовление и пост-обработка. Цель данной работы – отработка технологических подходов к созданию и обработке пористых материалов из сплава Ti-6Al-4V с целью повышения их усталостной прочности.

На этапе дизайна были выбраны критерии для пористых структур (ПС), основанные на литературных данных: конструкционная пористость (КП) > 65%, размер пор > 900 мкм, толщина структурных элементов в диапазоне 250–340 мкм. В данной работе применяли два типа ПС: регулярные на основе ячейки ромбододекаэдра (тип РД) и стохастические на основе полиэдров Вороного (Тип В). С учетом обозначенных критериев были отобраны модели с ПС типа РД с размером 1500, 1750 и 2000 мкм и типа В с максимальным размером пор 1100, 1200 и 1300 мкм. Все образцы были изготовлены по технологии СЛП из медицинского сплава Ti-6Al-4V.

Установлено, что у образцов типа РД разница теоретической и реальной КП составляет 8–15 % и растёт при снижении размера ячейки, у образцов типа В данная величина не превышает 4 %. Исследование макроструктуры методом компьютерной томографии образцов обоих типов показало, что основными причинами снижения КП является дополнительное наплавление материала в нижней части конструкционных элементов и приплавленный порошок на всей поверхности образцов. Это также привело к снижению размеров пор на 200–300 мкм по сравнению с исходными моделями.

Модуль Юнга в зависимости от пористости образцов с ячейкой типа РД линейно снижается в диапазоне 1,3–3,7 ГПа при постоянном размере ячейки. Образцы типа В проявляют модуль Юнга 0,9–2,3 ГПа, величина которого при варьировании одного из параметров меняется нелинейно. Условный предел текучести у образцов типа РД имеет схожие зависимости

в диапазоне 40–160 МПа. При изменении одного параметра ПС типа В условный предел текучести серий образцов изменяется линейно от 20 до 90 МПа.

Приплавленный порошок на поверхности пористого материала является одним из серьёзных дефектов при производстве имплантатов. Он занимает полезное пространство и снижает усталостную прочность материала. Для удаления порошка в данной работе применяли направленное пропускание воды и раствора кислот сквозь пористый материал с двух сторон с постоянной скоростью потока и контролем времени (метод динамического химического протравливания (ДХП)). Было установлено, что в результате применения ДХП, способствующего удалению порошка с внутренней поверхности при сохранении требуемой геометрии образцов типа РД с размером ячейки 2000 мкм и толщиной перемычки 340 мкм, КП повышается на 5-6 %. Также наблюдается повышение предела текучести по отношению к пористости и повышение усталостной прочности: 28 % от предела текучести после ДХП, аналогичное значение для образцов без химической обработки составляет 25 %

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ № 21-79-10299-П.

УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТЫЕ БИОРАЗЛАГАЕМЫЕ СПЛАВЫ Fe-Mn-C-Si С ТЕРАПЕВТИЧЕСКИМ ЭФФЕКТОМ

Темралиева Д.Р.^{1*}, Рыбальченко О.В.¹, Анисимова Н.Ю.^{2,3},

Мартыненко Н.С.¹, Рыбальченко Г.В.⁴, Лукьянова Е.А.¹,

Табачкова Н.Ю.^{3,5}, Щетинин И.В.³, Киселевский М.В.^{2,3}, Добаткин С.В.¹

¹*Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова*

Российской академии наук, Москва, Россия

²*Национальный медицинский исследовательский центр онкологии имени Н.Н. Блохина, Москва, Россия*

³*Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия*

⁴*Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия*

⁵*Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Россия*

* *diana4-64@mail.ru*

Биодеградируемые сплавы на основе Fe-Mn рассматриваются в качестве потенциальных материалов для изготовления временных

медицинских имплантатов. Целью данной работы является исследование возможности повышения скорости биодеградации сплавов Fe-Mn-Cu-C путем создания ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры с использованием интенсивной пластической деформации кручением под высоким давлением (КВД), при этом особое внимание уделено структурным и фазовым изменениям в исследуемых сплавах. Сплавы составов Fe-29%Mn-1%C, Fe-29%Mn-0,3%Cu-0,8%C, Fe-29%Mn-1%Cu-1%C и Fe-29%Mn-3%Cu-1%C (мас. %) были взяты после гомогенизационного отжига при температуре 1050 °C в течение 10 часов в вакууме в кварцевых трубках с последующим охлаждением в воде. Рентгеноструктурный анализ показал полностью аустенитную структуру сплавов в исходном состоянии. Деформация кручением под давлением ($P = 4$ ГПа) проводилась при 200 °C, 300 °C и при комнатной температуре на образцах диаметром 20 мм. Структура сплавов Fe-Mn-Cu-C после деформации была подробно изучена методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). ПЭМ анализ выявил измельчение структуры со средним размером зерна ~50 мкм до УМЗ состояния. Показано, что КВД приводит к повышению микротвердости исследуемых сплавов с ~2,5 ГПа до ~7 ГПа за счет формирования ультрамелкозернистой структуры. Коррозионные свойства сплавов Fe-Mn-Cu-C оценивали с помощью электрохимических измерений методом потенциодинамической поляризации (ПДП). Детальное исследование сплавов в исходном состоянии и после КВД позволило выявить влияние деформации на скорость коррозии. ПДП-анализ сплавов в исходном состоянии показал, что добавление меди несколько увеличивает коррозионный потенциал, что свидетельствует о тенденции к повышению восприимчивости к коррозии. Кроме того, скорость коррозии сплавов с добавлением меди выше, чем скорость коррозии сплава без меди. Результаты исследования скорости коррозии, полученные методом ПДП, соответствуют уровню скорости деградации при измерении потери массы при инкубации образцов в полной ростовой среде в течение 1 суток. Дальнейшая инкубация образцов в данной питательной среде снижает скорость коррозии за счет экранирования процесса деградации продуктами коррозии.

Результаты исследования гемолиза и цитотоксичности показали, что обработка сплавов КВД не привела к ухудшению их биосовместимости *in vitro*, но изменила реактивность иммунных клеток.

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ № 25-23-00208.

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ СТРУКТУРЫ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И БИОСОВМЕСТИМОСТЬ АУСТЕНИТНЫХ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ

**Токарь А.А.^{1*}, Рыбальченко О.В.¹, Анисимова Н.Ю.², Киселевский М.В.²,
Мартыненко Н.С.¹, Лукьянова Е.А.¹, Просвирин Д.В.¹, Беляков А.Н.³,
Добаткин С.В.¹**

*¹ Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова
Российской академии наук, Москва, Россия*

*² Национальный медицинский исследовательский центр онкологии имени
Н.Н. Блохина, Москва, Россия*

*³ Международный институт Герберта Гляйтера, Ляонинская академия
материалов, Шэньян, Китай*

**tokarb2005@mail.ru*

В работе представлено исследование ультрамелкозернистых (УМЗ) аустенитных нержавеющих сталей 316L и 08X18H10T, полученных равноканальным угловым прессованием (РКУП) при 400 °C со средним размером структурных элементов около 200 нм. Выбранная температура РКУП превысила температуру начала образования мартенсита деформации в метастабильной нержавеющей стали 08X18H10T и позволила получить полностью аустенитную структуру сталей. Измельчение структуры оказало значительное влияние на механическую прочность, повысив как предел прочности, так и предел выносливости обеих сталей. Стали имели практически идентичные микроструктурные характеристики и, как следствие, похожие прочностные свойства. Поскольку химический состав сталей отличался друг от друга, ожидалось ощутимое различие в химическом поведении и биологических характеристиках этих сталей. Однако как сталь 316L, так и 08X18H10T после РКУП продемонстрировали практически одинаковую биосовместимость *in vitro* по сравнению с медицинской сталью 316L с крупнозернистой структурой. В частности, не было обнаружено изменений гемолитической активности, цитотоксичности, и влияния на пролиферацию и апоптоз опухолевых клеток под воздействием образцов после РКУП.

УМЗ структура в нержавеющих сталях обеспечивает значительно более высокую стойкость к коррозии, чем обычные крупнозернистые аналоги в связи с большей диффузией Cr и лёгкостью образования компактного слоя оксида Cr. В данной работе одинаковое содержание хрома в сталях 316L и 08X18H10T привело к одинаковым изменениям оксидного слоя после РКУП. В результате РКУП не только не оказалось негативного влияния на биосовместимость сталей, но и стимулировало

пролиферативную активность мультипотентных мезенхимальных стромальных клеток (ММСК).

Было установлено, что кратковременная инкубация (менее 4 часов) с образцами стали 08Х18Н10Т делает коэффициент индуцированного гемолиза ниже, чем при инкубации с образцами стали 316L. Сталь 08Х18Н10Т как в крупнозернистом, так и в УМЗ состоянии в целом приводила к слабой гемолитической активности. Поэтому возможной причиной данного эффекта могло быть более низкое содержание Ni в составе стали 08Х18Н10Т. При этом данный эффект исчезал с увеличением времени инкубации.

Помимо существенного улучшения эксплуатационных характеристик РКУП может способствовать снижению веса медицинских изделий, что особенно важно при создании имплантируемых протезов для замещения дефектов скелета за счет существенного повышения удельных прочностных и усталостных свойств сталей.

Работа выполнена в соответствии с государственным заданием № 075-00319-25-00.

**ВЛИЯНИЕ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ СТРУКТУРЫ МЕТОДОМ
ВСЕСТОРОННЕЙ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ КОВКИ НА
МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЦИНКОВОГО СПЛАВА Zn-0,8%Li**

Хасanova А.Р.*, Кулясова О.Б., Астанин В.В.

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

**xasanova-0303@mail.ru*

Общий уровень травматизма в Российской Федерации на 80 % формировался за счет травм: поверхностных и открытых ран, вывихов, растяжений, травм мышц и сухожилий, а также переломов верхних и нижних конечностей [1], в связи с чем современная медицина остро нуждается в биорасторимых имплантатах, материалами для которых послужат полностью безопасные для человеческого организма и способные раствориться в нем сплавы – магниевые и цинковые. Однако несмотря на большое количество проведенных исследований магниевых сплавов такие недостатки, как выделение водорода и большая скорость коррозии, до сих пор не исправлены. Поэтому внимание исследователей на данный момент направлено на цинковые сплавы, не уступающие магнию в биосовместимости и при этом обладающие хорошей коррозионной стойкостью. В свою очередь чистый Zn и сплавы на его основе имеют

низкие показатели механических свойств, что препятствует изготавлению имплантатов.

Повышения механических свойств можно добиться легированием и интенсивной пластической деформацией (ИПД) [2]. Было установлено, что легирование цинковых сплавов литием (Li) оказывает наилучшее упрочняющее действие [3], организму человека Li не вредит, так как он поддерживает иммунную систему, а также снижает нервную возбудимость [4]. Открытая всесторонняя изотермическая ковка (ВИК) – метод ИПД, являющийся наиболее эффективным способом наноструктурирования за счет аккумулирования изменений с накоплением деформации и поэтапного уменьшения размера зерна [5, 6]. Таким образом, в работе обсуждается трансформация структуры, изменение механических свойств и коррозионной стойкости биорасторимого сплава Zn-0,8вес.%Li за счет формирования ультрамелкозернистой структуры методом ВИК.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 24-43-00154). Исследовательская часть работы проводилась с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Нанотех» (Уфимский университет науки и технологий).

Список используемой литературы:

- [1] Щетинин, С.А. Анализ частоты и последствий травматизма в России / С.А. Щетинин // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2 (1). – URL: <https://science-education.ru/article/view?id=17871> (дата обращения: 13.02.2025).
- [2] Валиев, Р. З. Объемные наноструктурные материалы: фундаментальные основы и применения / Р. З. Валиев, А. П. Жиляев, Т. Дж. Лэнгдон. – Санкт-Петербург: Эко-Вектор, 2017. – 479 с.
- [3] Huang H., Li G., Jia Q. et al. Recent advances on the mechanical behavior of zinc based biodegradable metals focusing on the strain softening phenomenon // Acta Biomaterialia. – 2022. – №152. – С. 1-18. DOI:10.1016/j.actbio.2022.08.041.
- [4] В каких продуктах содержится литий больше всего? // b-apteka.ru: [сайт]. – 2022. – URL: https://b-apteka.ru/articles/v-kakih-produktah-soderzhitsya-litiy-bolshe-vsego?utm_referrer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2F (дата обращения 24.06.2025).
- [5] Маркушев М.В. К вопросу об эффективности некоторых методов интенсивной пластической деформации, предназначенных для получения

объемных наноструктурных материалов // Письма о материалах. – 2011. – №1(1). – С. 36-42.

[6] Салищев Г.А., Валиахметов О.Р., Галеев Р.М., Малышева С.П. Формирование субмикрокристаллической структуры в титане при пластической деформации и ее влияние на механическое поведение // Металлы. – 1996 – №4. – С.86.

МИКРОСТРУКТУРА, МЕХАНИЧЕСКАЯ И КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ БИОРАЗЛАГАЕМОГО МАГНИЕВОГО СПЛАВА

Mg-Zn-Ca ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ МЕТОДОМ РКУП

Худододова Г.Д.^{1*}, Namvarian R.², Кулясова О.Б.¹, Исламгалиев Р.К.¹,
Валиев Р.З.¹, Ebrahimi R.²

¹ Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

²Ширазский университет, Шираз, Иран

*Khudododova.gd@gmail.com

Одним из перспективных направлений научных исследований в последнее время является разработка биорасторимых металлических материалов применительно к изготовлению медицинских имплантатов, поскольку в этом случае не требуется повторной операции по удалению отслужившего имплантата.

Магниевые сплавы все чаще признаются перспективными материалами для биомедицинских имплантатов из-за их низкой плотности, биосовместимости и благоприятных механических свойств [1-2]. Однако достижение баланса между механической прочностью и коррозионной стойкостью остается актуальной проблемой. В этом исследовании оценивается влияние деформационной обработки, включающей РКУП совмешённой с экструзией (РКУП-СЭ) и дополнительное РКУП, 4 прохода, на микроструктуру, механические и коррозионные свойства магниевого сплава Mg-1%Zn-0.18%Ca. Применение этой комбинированной обработки + ТО 175°C, привело к измельчению зерненной структуры, зерна вытянутые, сама структура неоднородна по объему (рис. 1а). При наблюдении в ПЭМ средний размер мелких зёрен составил 210 нм. Показано, что сплав с измельченной зерненной структурой после дополнительного ТО 175°C способен проявлять предел прочности 395 МПа при пластичности 9%. Результаты коррозионных испытаний, проведенных гравиметрическим методом для сплава Mg-1Zn-0,18Ca, представлены в таблице 1.

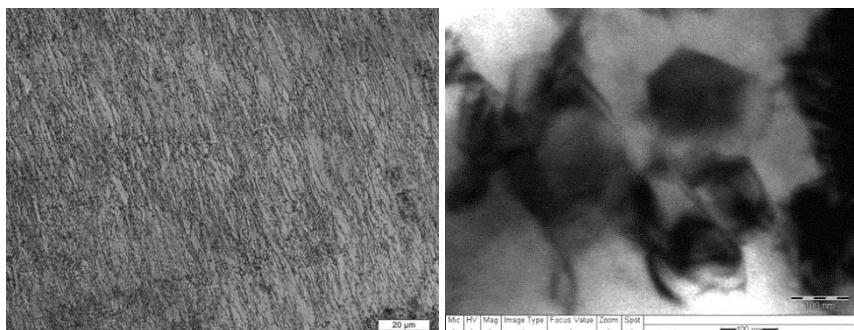


Рисунок 1 – Структура образца после деформационной обработки: (а) оптическая металлография, (б) ПЭМ

Таблица 1 – Механические свойства исследуемого сплава до и после деформации

Состояние	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	ε , %	Скорость коррозии, мм/г
Гомогенизация	90	112	17	4,8
РКУП-СЭ+РКУП+ ТО 175°C	360	395	9	0,9

Работа выполнена при поддержке РНФ № 24-43-20015.

Список используемой литературы:

- [1] H. Tapiero, K.D. Tew. Trace elements in human physiology and pathology: zinc and metallothioneins. // Biomedicine & Pharmacotherapy. 2003. V. 57. Iss. 9. PP. 399–411.
- [2] G.L. Song Control of biodegradation of biocompatible magnesium alloys. // Corrosion Science. 2007. V. 49. Iss. 4. PP. 1696–1701.

ВЛИЯНИЕ РОТАЦИОННОЙ КОВКИ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БИОРЕЗОРБИРУЕМЫХ СПЛАВОВ Zn-1Mg И Zn-1Mg-0,1Mn

Мартыненко Н.С.*, Чистюхина Э.И., Темралиева Д.Р., Рыбальченко О.В., Лукьянова Е.А., Андреев В.А., Добаткин С.В.

Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова
Российской академии наук, Москва, Россия

*nataliasmartyko@gmail.com

Сплавы системы Zn-Mg с низким содержанием Mg являются перспективными медицинскими материалами для изготовления

биорезорбируемых имплантатов нового поколения. Однако из-за низкого содержания Mg данные сплавы характеризуются малыми значениями механической прочности, а из-за хрупкости формирующихся богатых Mg фаз – низкой пластичностью. Поэтому для улучшения данных характеристик была проведена деформационная обработка методом ротационной ковки (РК) на сплавах Zn-1Mg и Zn-1Mg-0,1Mn. РК проводили при 200 °C с уменьшением диаметра заготовки с 19 до 6 мм ($\varepsilon = 2,31$).

В исходном, отожженном состоянии структура обоих сплавов состоит из зерен α -Zn размером 30 – 40 мкм, окруженных сеткой богатой Mg эвтектической фазы. После РК происходит существенное измельчение зерна и в обоих сплавах формируется вытянутая вдоль направления РК структура (Рисунок 1). Однако в сплаве Zn-1Mg средняя ширина зерна α -Zn составляет ~1 мкм, а его длина – ~1,5 – 2 мкм. А в сплаве Zn-1Mg-0,1Mn длина и ширина вытянутого зерна α -Zn составляет ~0,5 – 0,7 мкм и ~1 мкм соответственно. При этом разница в размере зерна определила разницу в уровне механических свойств (Таблица 1).

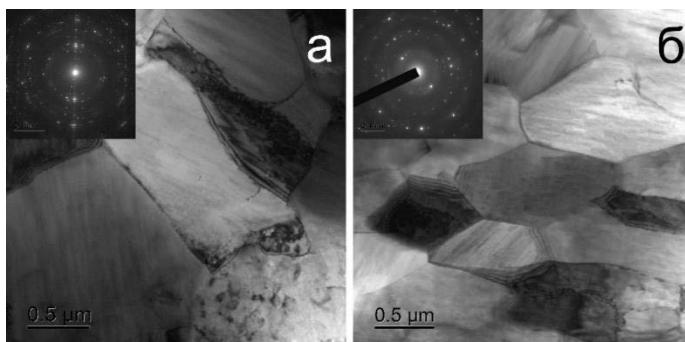


Рисунок 1 – ПЭМ-микроструктура сплавов Zn-1Mg (а) и Zn-1Mg-0,1Mn (б) после РК

Таблица 1 – Механические свойства сплавов Zn-1Mg после РК

Сплав	Состояние	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	ε , %
Zn-1Mg	Отжиг	153 ± 7	156 ± 3	$0,2 \pm 0,04$
	РК	223 ± 23	248 ± 9	$10,3 \pm 2,0$
Zn-1Mg-0,1Mn	Отжиг	95 ± 3	100 ± 7	$1,6 \pm 0,4$
	РК	274 ± 8	295 ± 4	$4,5 \pm 0,8$

В обоих сплавах наблюдается одновременное повышение прочности и пластичности. Однако в сплаве Zn-1Mg-0,1Mn прирост прочности гораздо выше, по сравнению со сплавом Zn-1Mg. Так условный предел текучести и предел прочности сплава Zn-1Mg-0,1Mn после РК выросли в ~2,9 раз, тогда как в сплаве Zn-1Mg – только в ~1,5 и ~1,6 соответственно. Однако в случае сплава Zn-1Mg после РК наблюдается существенный рост пластичности (примерно в 50 раз), тогда как в сплаве Zn-1Mg-0,1Mn – только в ~2,8 раз.

Работа выполнена в соответствии с государственным заданием №075-00319-25-00.

МИКРОСТРУКТУРА И СВОЙСТВА СПЛАВА Mg-Y-Zn-Zr ПОСЛЕ РОТАЦИОННОЙ КОВКИ

Лукьянова Е.А.*¹, Тарытина И.Е.¹, Слижевская Я.Ю.¹, Мартыненко Н.С.¹, Рыбальченко О.В.¹, Темралиева Д.Р.¹, Добаткина Т.В.¹, Андреев В.А.¹, Добаткин С.В.¹

*Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН,
Москва, Россия*

*elukyanova@imet.ac.ru

Редкоземельные элементы (РЗЭ) представляют особый интерес для легирования сплавов магния уже длительное время благодаря своим уникальным химическим и физическим свойствам. Использование этих элементов может способствовать разработке современных сплавов магния для использования в качестве биоразлагаемых ортопедических имплантатов и сердечно-сосудистых стентов. Прочность и пластичность сплавов Mg-РЗЭ могут быть улучшены путем добавления других легирующих элементов. Известно, что в сплавах магния с РЗЭ иттриевой подгруппы при добавлении Zn формируются структуры с длиннопериодной упорядоченной фазой (LPSO), которые обеспечивают повышение пластичности и коррозионной стойкости [1,2]. Также различные методы деформационной обработки позволяют в значительной степени повышать прочность магниевых сплавов.

В работе исследовано влияние ротационной ковки (РК) на структуру и механические свойства сплава Mg-6Y-1Zn-0,5Zr. РК осуществляли с нагревом прутка до ~475 °C при комнатной температуре в несколько проходов с различной степенью вытяжки $\mu = 2,5$ и $\mu = 4,5$. Структура сплава в исходном после гомогенизации недеформированном состоянии состояла из светлых зерен магниевого твердого раствора со средним

размером ~ 25 мкм, включений второй фазы, богатой иттрием и цинком, и черных кристаллов фазы α -Zr. В зернах магниевого твердого раствора наблюдались ламенарные выделения LPSO-фазы. После РК со степенями вытяжки $\mu = 2,5$ и $\mu = 4,5$ средний размер зерен магниевого твердого раствора составил ~ 16 и ~ 18 мкм соответственно. Таким образом, ротационная ковка вне зависимости от степени вытяжки не приводила к существенному изменению размера зерна магниевого твердого раствора. Однако внутри зерен магниевого твердого раствора наблюдались двойники деформации, и их интенсивность с увеличением степени вытяжки возрастала. При этом ламенарная LPSO-фаза в пределах зерен магниевого твердого раствора не наблюдалась, а включения фазы, богатой иттрием и цинком, располагались вдоль направления ковки.

В таблице 1 представлены механические свойства исследуемого сплава при растяжении при комнатной температуре до и после РК. Прочностные свойства сплава после РК существенно повышались, при этом пластичность сплава оставалась на достаточно высоком уровне. По мере увеличения степени вытяжки прочностные свойства также возрастили, а пластичность снижалась незначительно.

Таблица 1 – Механические свойства сплава Mg-Y-Zn-Zr до и после РК

Состояние сплава	σ_B, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %
Гомогенизация	275 ± 4	210 ± 5	$18,4 \pm 0,3$
РК ($\mu = 2,5$)	368 ± 11	298 ± 7	$16,8 \pm 0,4$
РК ($\mu = 4,5$)	381 ± 8	335 ± 8	$15,1 \pm 0,5$

Работа выполнена в соответствии с государственным заданием № 075-00319-25-00.

Список используемой литературы:

- [1] M. Yamasaki, K. Hashimoto, K. Haghara, Y. Kawamura // Acta Mater. 59 (9) (2011) 3646–3658
- [2] Z. Leng, J. Zhang, T. Yin, L. Zhang, X. Guo, Q. Peng, M. Zhang, R. Wu // J. Mech. Behav. Biomed. Mater. 28 (2013) 332–339

БЕЗНИКЕЛЕВЫЙ НИЗКОМОДУЛЬНЫЙ ТИТАНОВЫЙ СПЛАВ ДЛЯ ОРТОПЕДИЧЕСКИХ ИМПЛАНТАТОВ, ПОЛУЧАЕМЫХ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ

Колмаков А.Г.¹, Севостьянов М.А.¹, Каплан М.А.¹, Конушкин С.В.¹,

Хейфец М.Л.², Грецкий Н.Л.², Губкин С.В.³

¹ИМЕТ РАН, Москва, Российская Федерация

²ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларусь», Минск, Беларусь

³ГНУ «Институт физиологии НАН Беларусь», Минск, Беларусь

На современном этапе особенно актуальна разработка биосовместимых сплавов, отвечающих критериям современной персонализированной медицины: 1) отсутствие в сплаве вредных для человека, в т.ч. канцерогенных, легирующих элементов, 2) модуль упругости, близкий к модулю упругости костных тканей человека, 3) повышенная по отношению к используемым титановым сплавам биосовместимость и остеointеграция, 4) сопоставимая с ними коррозионная стойкость в физиологических средах.

Кроме того, в настоящее время отсутствуют сферические порошки биосовместимых сплавов, требуемых для аддитивного производства персонализированных имплантатов, производимых на основе полученных методами компьютерной томографии оцифрованных моделей.

Современные биосовместимые сплавы и керамика не обеспечивают комплекс свойств – высокую удельную прочность, низкий модуль Юнга и замедленный ответ на нагрузки. Перспективным решением являются сверхупругие титановые сплавы системы Ti-Zr-Nb, исключающие токсичные элементы и демонстрирующие оптимальное сочетание механической прочности, износостойкости и биосовместимости. Применение аддитивных технологий, позволяет перейти к персонализированной медицине, включающей индивидуальный учет необходимой геометрии импланта. Применение 3D-печати требует разработки высококачественных сферических порошков с контролируемым гранулометрическим составом и низким содержанием примесей, что напрямую влияет на физико-механические свойства конечных изделий.

Предлагается инновационный подход, включающий не только оптимизацию состава сплава и методов получения порошков, но и модификацию поверхности образцов материала. На основании подхода планируется производство персонализированных имплантатов с требуемым химическим и фазовым составом, структурой материала, которое объединит аддитивное производство, использующее биосовместимый сплав Ti-Zr-Nb и функциональные покрытия.

Научная идея основывается на использовании возможностей управления технологическим наследованием при передаче функциональных, физико-механических и биохимических свойств новых безникелевых титановых сплавов и поверхностей ортопедических имплантатов, изготовленных из них по различным традиционным и аддитивным технологиям.

Привлечение новых дополнительных операций для воздействия распределёнными электромагнитными полями и концентрированными потоками энергии предоставят возможность повысить однородность структуры и устраниить дефекты поверхностного слоя. Это позволит не только сохранить в процессе обработки полученные уникальные свойства сплава, но и повысить их в готовом изделии.

Кроме того, технологии предлагается дополнить финишной абразивно-полимерной галтовкой сложно профильных поверхностей изделий, как при окончательной доводочной операции, так и при подготовке поверхности под покрытие.

НОВЫЕ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫЕ СПЛАВЫ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ $\text{Co}_{35}\text{Ni}_5\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Mn}_{20}$

Астафурова Е.Г.*, Астапов Д., Астафуров С.В., Загибалаева Е.А.,
Лучин А.В.

*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск,
Россия*

**elena.g.astafurova@ispms.ru*

Исследованы микроструктура, фазовый состав и особенности развития термоупругого ГЦК-ГПУ-ГЦК мартенситного превращения (МП) в новых неэвакиатомных сплавах с эффектом памяти формы на основе системы $\text{Co}_{35}\text{Ni}_5\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Mn}_{20}(\text{Si},\text{B})$. Сплавы $\text{Co}_{31.4}\text{Ni}_{4.7}\text{Cr}_{24.4}\text{Fe}_{18.7}\text{Mn}_{20.8}$ (5Ni), $\text{Co}_{30.9}\text{Ni}_{4.4}\text{Cr}_{24.0}\text{Fe}_{17.5}\text{Mn}_{22.7}\text{B}_{0.5}$ (5Ni-B) и $\text{Co}_{34.1}\text{Ni}_{4.3}\text{Cr}_{24.3}\text{Fe}_{15.7}\text{Mn}_{20.8}\text{Si}_{0.8}$ (5Ni-Si) были получены методом дуговой плавки в атмосфере аргона. Перед испытаниями образцы были гомогенизированы: выдержка при температуре 1473 К (48 ч) с закалкой в воду комнатной температуры. После гомогенизации все сплавы обладали разориентированной крупнокристаллической структурой.

С использованием метода измерения электросопротивления сплава и механических свойств (одноосное статическое растяжение) в интервале температур от 77К до 673К были установлены основные особенности и характеристические температуры МП в исследуемых сплавах. На зависимостях $\rho(T)$ наблюдали замкнутые петли гистерезиса, что свидетельствовало о развитии термоупругого МП в сплавах. Характерные температуры начала МП при охлаждении M_s по зависимостям $\rho(T)$ определить не удалось, но температуры обратного МП A_f определяются однозначно: A_f составляют 440, 400 и 385К для сплавов 5Ni, 5Ni-B и 5Ni-Si, соответственно. Электронно-микроскопический и рентгеноструктурный анализ показал, что при комнатной температуре

(300К) гомогенизированные сплавы обладают преимущественно аустенитной структурой (с ГЦК кристаллической решеткой). При этом в микроструктуре формировалась небольшая доля ГПУ-маргентсита охлаждения, что свидетельствовало в пользу того, что температуры M_s находятся вблизи комнатной температуры. Эти данные подтверждаются при изучении температурной зависимости условного предела текучести. Зависимости $\sigma_{0,2}(T)$ имеют типичный вид для сплавов с термоупругими МП. Величины M_s , определенные с их помощью, не зависят от состава сплава и составляют 283К. Ниже температуры M_s напряжения уменьшаются с ростом температуры и соответствуют температурной зависимости мартенситной фазы, в интервале температур выше температуры M_s происходит увеличение напряжений до достижения температуры M_d , которая соответствует равенству напряжений для возникновения мартенсита под нагрузкой и пластического течения в аустенитной фазе. Выше температуры M_d зависимости имеют нормальный вид и описывают температурную зависимость напряжений течения аустенитной фазы. Температуры M_d близки для трех исследуемых материалов: 303К для сплавов 5Ni и 5Ni-Si и 313К для сплава 5Ni-B. Таким образом, легирование бором и кремнием уменьшает температурный интервал развития превращения $\Delta T = M_s - A_f$: 160, 120 и 100К соответственно для сплавов 5Ni, 5Ni-B и 5Ni-Si. При этом легирование бором способствует увеличению температурного интервала развития мартенситного превращения под нагрузкой $\Delta T = M_d - M_s$ на 10К. Величины эффекта памяти формы, определенные по величине обратимой деформации в сплавах после растяжения при 77К и нагрева до 673К, слабо зависят от состава материала и составляют $\approx 1\%$.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-19-00197, <https://rscf.ru/project/25-19-00197/>. Результаты получены с использованием оборудования ЦКП «Нанотех» Института физики прочности и материаловедения СО РАН.

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВОВ Ti-40Zr-(10-12)Ta (ат.%)

Конушкин С.В.*, Волчихина М.А., Севостьянов М.А., Колмаков А.Г.

Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН,

Москва, Россия

**venev.55@mail.ru*

В настоящее время в биомедицинском материаловедении внимание привлекают титановые сплавы, легированные цирконием и tantalом,

благодаря возможности получения сплавов, обладающих более подходящими механическими свойствами при сохранении высокой биохимической совместимости, чем традиционные сплавы, такие как ВТ6 или титан ВТ1-0, за счет стабилизации высокотемпературной β -фазы титана с ОЦК-решеткой [1].

По литературным данным, а также используя методы на основе теории d-электронов и

молибденового эквивалента были подобраны составы сплавов системы Ti–Zr–Ta: Ti-40Zr-10Ta, Ti-40Zr-11Ta, Ti-40Zr-12Ta (ат. %). После выплавки, данные сплавы были подвержены гомогенизирующему отжигу при температуре 1000°C в течение 12 часов в вакууме. После выплавки и отжига сплавы прокатывались до толщины 1,5 мм при температуре 600°C на воздухе. В качестве финальной термической обработки была выбрана закалка с температур (600-700) °C с выдержкой в течение 5 мин и охлаждением в воде.

На рисунке 1 представлены зависимости механических свойств исследуемых сплавов от термической обработки.

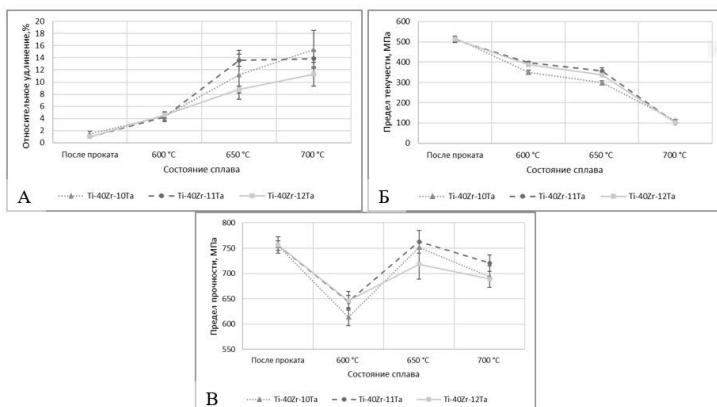


Рисунок 1 – Зависимость относительного удлинения ϵ (а), предела текучести σ_t (б), предела прочности σ_b (в) сплавов Ti-40Zr-(10-12)Ta от термической обработки

Результаты исследования показали, что сплавы после прокатки находятся в деформированном состоянии с низкой пластичностью. Закалка с 650-700°C позволяет значительно повысить пластичность сплавов с одновременным понижением предела текучести и незначительным понижением предела прочности сплавов.

Список используемой литературы:

- [1] Volchikhina, M.A., Konushkin, S.V., Mikhlik, S.A. et al. The Structure and Mechanical Properties of Ti-(36-40)Zr-9Ta (at %) Alloys for Medical Purposes. Inorg. Mater. Appl. Res. 15, 1321–1328 (2024). <https://doi.org/10.1134/S2075113324700941>

**ВЛИЯНИЕ СТАРЕНИЯ НА МИКРОСТРУКТУРУ И
МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БИОМЕДИЦИНСКОГО СПЛАВА
Co-28Cr-6Mo ПОСЛЕ РАДИАЛЬНО-СДВИГОВОЙ ПРОКАТКИ**

Кин Т.Ю.*[,] Гамин Ю.В., Галкин С.П.

*Национальный исследовательский технологический институт МИСИС,
Москва, Россия*

*tatianakin@mail.ru

Сплав системы Co-Cr-Mo широко применяется в биомедицине благодаря высокой прочности, коррозионной стойкости и износостойкости. Традиционные методы, такие как горячая ковка, имеют ряд технологических ограничений в виде высокой трудоемкости и невозможности получения длинномерных полуфабрикатов малого и среднего диаметра. Ранее показано [1, 2], что РСП является эффективным способом обработки сплава системы Co-Cr-Mo, при этом влияние постдеформационной обработки (старения) после РСП не изучено. В работе проведен анализ влияния температур старения на фазовый состав (РФА), микроструктуру (ОМ, СЭМ) и механические свойства сплава Co-28Cr-6Mo после РСП.

Гомогенизированный слиток предварительно подвергся изотермической ковке и далее деформирован с применением РСП при $T=1190\text{ }^{\circ}\text{C}$ в 5 проходов с суммарным коэффициентом вытяжки 2,95. После РСП прутки охлаждены в воде и термообработаны в интервале температур 850-1100 $^{\circ}\text{C}$ в течение 2 ч. Для определения механических свойств проведены испытания на растяжение и измерения твердости (HV). Анализ результатов показал, что РСП обеспечивает получение ультрамелкозернистой структуры, сочетающей ϵ -ГПУ и γ -ГЦК фазы. Старение при 850 $^{\circ}\text{C}$ привело к формированию бимодальной структуры (100 % ϵ -ГПУ) с мелкодисперсными частицами σ -фазы (Рисунок 1) и высоким значениям механических свойств: предел прочности $\sigma_b=1223,3$ МПа, предел текучести $\sigma_{0,2}=704,7$ МПа и относительное удлинение $\delta=35\%$ (Таблица 1). При более высоких температурах (например, $T=1100\text{ }^{\circ}\text{C}$) отмечен рост зерна, снижение прочности и образование смешанной γ/ϵ

структурь. Твёрдость коррелировала с долей ε -ГПУ фазы, достигая максимума (386 HV) для образцов, состаренных при 850 °C.

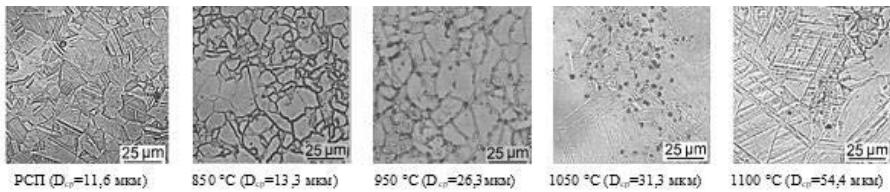


Рисунок 1 – Микроструктура образцов сплава Co-28Cr-6Mo после старения

Таблица 1 – Механические свойства и фазовый состав сплава

Состояние	σ_b , МПа	$\sigma_{0.2}$, МПа	δ , %	ε -ГПУ	γ -ГЦК	σ -фаза	HV
RCP	946,2	423,5	23,5	85	15	0	340
RCP+850 C	1223,3	704,7	35,2	96	0	4	386
RCP+1100 C	873,7	387,0	20,3	51	49	0	293

Исследование показало, что комбинация РСП и старения при 850 °C обеспечивает благоприятное соотношение прочности и пластичности сплава Co-28Cr-6Mo, что делает данный метод обработки перспективным для биомедицинских применений.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00477

Список используемой литературы:

- [1] Y. Gamin, T. Kin, S. Galkin, S. // Met. Mater. Int. 2024. 31, 1106–1115.
[2] С.П. Галкин, Ю.В. Гамин, Т.Ю.Кин и др.// Чёрные металлы. 2023. № 9. С. 47-53.

ДЕФОРМАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ СПЛАВА С ЭПФ НА ОСНОВЕ TiNi С ПОКРЫТИЕМ НИТРИДА ТИТАНА ДЛЯ МЕДИЦИНСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Багрец Д.А.*, Рубаник В.В., Рубаник В.В. мл., Урбан В.И.
ГНУ «Институт технической акустики НАН Беларуси, Витебск,
Беларусь
**bagurets@gmail.com*

Цель работы состояла в моделировании деформационного поведения сплава Ti–55,84 мас.% Ni (TiNi) с покрытием нитрида титана (TiN) толщиной ~ 1 мкм, нанесенным вакуумно-дуговым способом. Режим нанесения покрытия (прежде всего, значения тока дуги и потенциала смещения) подбирали таким образом, чтобы обеспечить постоянную температуру образцов на уровне 400–420 °C для формирования комплекса функциональных свойств, оптимальных для применения данного сплава в качестве конструкционного материала при изготовлении медицинских изделий со свойством сверхэластичности (ортодонтических дуг, дилататоров, стентов, контрацептивов и др.) [1]. Деформационное поведение исследовали по кривым трехточечного изгиба, полученным в режиме циклирования до деформации ~ 6 % при температуре от 6 до 37 °C.

На основе установленных закономерностей изменения упруго-силовых характеристик исследуемых образцов от температуры испытания была получена деформационная кривая (рисунок 1), позволяющая прогнозировать механическое поведение изделия из никелида титана, например стента, до и во время его имплантации в организм человека. На начальном этапе изделие охлаждают до 6–8 °C и, деформируя его, заправляют в проводник (катетер). Максимальное напряжение на этой стадии соответствует точке *a* и составляет: $\sigma_M = 520$ МПа при $T_d = 6$ °C. Задаваемая максимальная деформация (точка *b*) может достигать 6–7 %. После заправки в отсутствие внешней нагрузки изделие находится в стесненном состоянии и генерирует реактивные напряжения, величина которых до введения в организм составляет ~ 160 МПа (точка *c*). Разница напряжений в точках *b* (под нагрузкой) и *c* (в отсутствие внешней нагрузки) определяет величину механического гистерезиса. При введении в организм и нагреве до температуры тела наблюдается рост реактивных напряжений до ~ 200–220 МПа. Высвобождаясь из катетера, стент воздействует на стенки патологически суженного органа, расширяя его. По мере уменьшения деформации (расширения просвета полого органа) величина напряжений возрастает, а их среднее значение в пределах разгрузочного плато (участок *c-d*) составляет $\sigma_c = 325$ МПа. Длина плато при $\varepsilon_{max} = 6,5$ % равняется ~ 5 %.

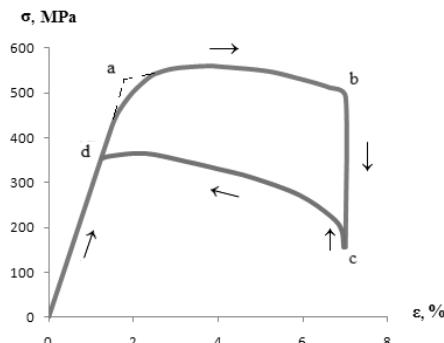


Рисунок 1 – Модельная деформационная кривая медицинского изделия (стента) из сплава Ti-55,84 мас.% Ni с TiN-покрытием (стрелками указано направление изменения нагрузки)

Список используемой литературы:

[1] В.В. Рубаник, В.В. Рубаник мл., Д.А. Багрец и др. // Доклады НАН Беларуси. 2021. Т.65, №1. С.119-128.

БИОСОВМЕСТИМОСТЬ IN VITRO СПЛАВОВ Ti-40Zr-(10-12)Ta ат%

Морозова Я.А.*, Волчихина М.А., Конушкин С.В., Севостьянов М.А.
Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН,

Москва, Россия

*yasya12987@gmail.com

В современном мире, возраст-ассоциированным заболеваниям уделяют особое внимание. Данные заболевания приобрели хронический характер, требующий длительного и постоянного лечения. К числу основных патологий, частота встречаемости которых повышается, можно отнести заболевания опорно-двигательного аппарата (ОДА). Лечение повреждений ОДА требует комплексного подхода, учитывающего не только хирургический результат, но и перспективы дальнейшей реабилитации, включая качество остеоинтеграции имплантата. Ключевой задачей в имплантологии остается разработка биосовместимых, коррозионностойких материалов с оптимальным сочетанием высокой прочности и низкого модуля упругости. Используемые в настоящее время титановые сплавы имеют модуль Юнга более 110 ГПа, что значительно больше, чем модуль упругости костей человека, не превышающий 30 ГПа. В связи с этим, создание новых титановых сплавов для имплантологии,

обладающих низким модулем упругости, стало одним из приоритетных направлений [1,2].

Объектом исследования выступили β -титановые сплавы системы Ti-Zr-Ta состава Ti-40Zr-10Ta ат.%, Ti-40Zr-11Ta ат.% и Ti-40Zr-12Ta ат.%, характеризующиеся стабилизированной β -фазой, обуславливающей низкий модуль упругости, сопоставимый с костной тканью. Легирование сплава Та и Zr, а также последующая термообработка сплава позволяет стабилизировать и зафиксировать β -фазы [3]. В данной работе оценивалась биосовместимость данных сплавов в сравнительном аспекте с технически чистым титаном марки BT1-0.

Первичную деформацию слитков системы сплавов Ti-40Zr-(10-12)Ta толщиной ~18 мм проводили теплой прокаткой при предварительном нагреве до температуры 600 °C на двухвалковом стане ДУО-300 в несколько этапов до конечной толщины заготовок 2 мм. В качестве термической обработки была выбрана закалка в воду при температуре 700 °C с предварительной выдержкой в течение 5 мин для фиксации β -фазы.

Образцы в виде пластин размером 5×5 мм были получены с помощью электроэррозионной резки с последующей механической полировкой до зеркального состояния и помещены в планшеты. К каждому образцу добавляли 200 мкл суспензии хондроцитов (5×10^4 клеток) в культуральной среде. Образцы выдерживались в CO₂ инкубаторе в течение 72 часов. Оценку жизнеспособности клеток выполняли с помощью двойного окрашивания Hoechst 34580 и 2 мКМ пропидий йодидом.

Проведенное исследование образцов титановых сплавов на пролиферацию и жизнеспособность хондроцитов человека показало, что культивирование клеток около всех образцов не вызывало значимых изменений жизнеспособности, плотности культуры, конфлюентности и размеров клеток и их ядер. На всех образцах был виден рост клеток на границе образцов и под их поверхностью. Наиболее выраженный рост хондроцитов на металле был отмечен для образца Ti-40Zr-12Ta ат%.

Список используемой литературы:

- [1] В.С. Мякотных, Е.С. Остапчук, В.Л. Постовалова // Успехи геронтологии. – 2018. – Т. 31. – №. 2. – С. 250-259.
- [2] L. Lin et al. //Journal of Orthopaedic Translation. – 2014. – Т. 2. – №. 1. – С. 35-42.
- [3] M.A. Volchikhina et al. The Structure and Mechanical Properties of Ti-(36–40) Zr-9Ta (at%) Alloys for Medical Purposes // Inorganic Materials: Applied Research. – 2024. – Т. 15. – №. 5. – С. 1321-1328.

УСТОЙЧИВОСТЬ КОЛЛОИДНЫХ РАСТВОРОВ СЕРЕБРА, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ

Федотов М.А.

Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН,

Москва, Россия

mfedotov@imet.ac.ru

Процессы образования наночастиц при импульсной лазерной абляции в жидкости еще недостаточно изучены. Количество работ, посвященных данной теме, постоянно растет. Все больше появляется исследований по лазерной абляции серебра, золота, меди, железа, цинка и других металлов. Коллоидные частицы серебра находят широкое применение в медицине, как дезинфицирующее и стерилизующее средство, и сельском хозяйстве. Наночастицы серебра хорошо известны своим антимикробным действием, и могут выступать в качестве активных агентов для борьбы с устойчивостью к противомикробным препаратам [1]. Целесообразна применимость наночастиц серебра в качестве биоактивной добавки, повышающей урожайность за счет улучшения прорастания семян и стимулирования роста побегов, что показано в работе [2]. Метод лазерной абляции является одним из наиболее перспективных, по сравнению с химическим синтезом, для получения антимикробных препаратов [3]. При получении коллоидных растворов наночастиц важнейшее значение для практического их использования имеет стабильность раствора. Необходимо, чтобы частицы вещества не выпадали в осадок, не собирались в крупные агломераты, сохраняли свои основные свойства длительное время.

Коллоидные растворы серебра получали методом лазерной абляции в жидкости с использованием наносекундного импульсного твердотельного лазера Nd:YAG с длиной волны 1064 нм и энергией в импульсе 2,5 Дж. Частота следования импульсов составляла 1 Гц.

Коллоидные растворы серебра, полученные в дистиллированной воде склонны к осаждению в течение длительного времени за счет протекания процессов коагуляции и седиментации в растворе. Для снижения влияния данных процессов используются стабилизирующие агенты в виде неионогенных, анионных, катионных поверхностно-активных веществ или полимеров [4]. Для стабилизации коллоидных растворов серебра были выбраны следующие поверхностно-активные вещества с диапазоном концентраций от 0,1 до 0,5 мМоль: «Triton X-100», цетилтриметиламмоний бромид («СТАВ») и полисорбат 80 («Tween-80»).

Результаты исследований показали, что при использовании различных поверхностно-активных веществ с целью предотвращения

осаждения и коагуляции дисперсной фазы наиболее предпочтительным является «Triton X-100», обеспечивающий стабильность гидрозоля более 7 суток без снижения оптической плотности и изменения формы кривой оптической плотности и морфологии наночастиц.

Список используемой литературы:

- [1] Sportelli M.C. et al. The Pros and Cons of the Use of Laser Ablation Synthesis for the Production of Silver Nano-Antimicrobials // Antibiotics, 2018, 7, 67.
- [2] Sonali K. Kale et al., Emerging Agriculture Applications of Silver Nanoparticles, ES Food and Agroforestry, V.3, P.17-22, 2021.
- [3] Yaqoob A.A. et al. Silver nanoparticles: various methods of synthesis, size affecting factors and their potential applications—a review. Applied Nanoscience, 2020, 10, 1369–1378.
- [4] Kvítek L., Panáček A., Soukupová J., Kolář M., Večeřová R., Prucek R., Holecová M., Zbořil R. Effect of Surfactants and Polymers on Stability and Antibacterial Activity of Silver Nanoparticles (NPs) // The Journal of Physical Chemistry C, 2008, 112 (15), p. 5825-5834 DOI: 10.1021/jp711616v

СЕКЦИЯ 2

Керамические материалы

УСТНЫЕ ДОКЛАДЫ

Приглашенный доклад

БАРОТЕРМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ КАК ФАКТОР СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ZRO₂ ДЛЯ ЭСТЕТИЧЕСКОЙ ОРТОПЕДИЧЕСКОЙ СТОМАТОЛОГИИ

Подзорова Л.И., Падалко А.Г., Ильичёва А.А., Пенькова О.И.,
Михайлина Н.А., Пыров М.С., Сиротинкин В.П.

*Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН,
Москва, Россия*
lpodzorova@imet.ac.ru

Представлен краткий экскурс по историческим и современным материалам, применяемым в реставрационной ортопедической стоматологии для замены утраченных зубов.

Показано, что использование керамических материалов на основе ZrO₂ (TZP) связано с переходом на компьютерные технологии «Computer Assisted Design/Computer Aided Manufacturing» (CAD\CAM) протезирования и реставрации зубов.

Отмечено, что керамики на основе диоксида циркония, стабилизированного в тетрагональной форме катионами иттрия (Y-TZP) получили наибольшее распространение как материал для изготовления коронок и мостовидных протезов зубов. Указано, что Y-TZP керамика обладает высокой прочностью, биоинертностью, существенно превышающей этот показатель для металлических протезов, не вызывает аллергии, биосовместима со слизистой оболочкой и тканями полости рта. Однако, данная керамика не обладает высокой устойчивостью к хрупкому разрушению, сопоставимой с материалами Ce-TZP и Sm-TZP.

Приведено описание функциональных свойств керамических материалов, разработанных в лаборатории в системах ZrO₂ – Yb₂O₃ и ZrO₂ – Sm₂O₃ на основе исходных порошков, синтезированных гидролизным золь-гель методом, и представляющих интерес для ортопедической стоматологии [1-3].

Убедительно доказана возможность существенного повышения механических свойств керамических материалов, при сохранении основного фазового состава, путем удаления остаточной пористости по механизму пластической деформации трехмерных дефектов, до приведения в контакт стенок пор, и заключительной диффузионной сварки этих стенок, в результате одновременного воздействия высоких давлений и температур в методике горячего изостатического прессования (ГИП). В

некоторых случаях достигается формирование материала с теоретической плотностью.

Приведены результаты влияния баротермического воздействия (БТВ) на механические и оптические характеристики разработанных керамических материалов систем $ZrO_2 - Yb_2O_3$ и $ZrO_2 - Sm_2O_3$.

Показано, что разработанная керамика имеет прочность при статическом изгибе до 800 МПа, и согласно международному стандарту ISO 6872: 2015 «Dentistry — Ceramic materials» может применяться для изготовления как одиночных коронок, так и четырехзвенных мостовидных протезов.

Установлено, что применение БТВ позволяет получать не только высокопрочную TZP керамику, но и значительно повысить оптические характеристики, в особенности, транслюцентность, материалов, необходимых для эстетического аспекта зубных реставраций.

Исследование проведено в рамках госзадания № 075-00319-25-00

Список используемой литературы:

[1] Подзорова Л.И., Ильичёва А.А., Кутузова В.Е. и др. Патент на изобретение 2744546 С1, 2021.

[2] Подзорова Л.И., Ильичёва А.А., Михайлина Н.А. и др. Патент на изобретение RU 2838117 С1, 2025.

[3] Подзорова Л.И., Падалко А.Г., Ильичёва А.А. и др. Патент на изобретение RU 2841561 С1, 2025.

Приглашенный доклад

СВОЙСТВА ГИДРОКСИАПАТИТА С КАТИОННЫМИ ЗАМЕЩЕНИЯМИ

Быстров В.С.^{1*}, Парамонова Е.В.¹, Авакян Л.А.², Макарова С.В.³,
Булина Н.В.³

¹Институт математических проблем биологии РАН, Институт
прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Пущино, Россия

²Южный федеральный университет, физический факультет, Ростов-на-
Дону, Россия

³Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск,
Россия

*vsbys@mail.ru

Гидроксиапатит (ГАП) – широко известный биоматериал, являющийся основным минеральным компонентом костей и зубов

человека и позвоночных [1,2]. Он обладает естественной биосовместимостью с костными тканями организма человека. Поэтому, прежде всего область применения ГАП - это ортопедия, травматология, костная и стоматологическая хирургия, использование в качестве наполнителя и покрытия для костных имплантатов [1, 2]. Биологический костный ГАП отличается от его синтетических соединений, как своим стехиометрическим дисбалансом, так и наличием значительного количества различных примесных атомов и ионов, которые определяют важные свойства ГАП и влияют на его биосовместимость. Кристаллическая структура апатитов является достаточно гибкой и позволяет формировать здесь много различных составов и легко встраивать ионы, допуская широкий спектр замещений. Поэтому для достижения желаемых эффектов и получения лучшей биосовместимости очень важен правильный подбор таких заместителей.

В данной работе для исследования влияния замещений ионов Са на ряд катионов (Mg, Zn, Sr, Mn, Fe) применяются разработанные нами подходы моделирования и 2-х этапного расчета методами теории функционала плотности, включающие обменно-корреляционные функционалы PBE (Perdew-Burke-Ernzerhof) в приближении обобщенного градиента (GGA) на 1-м этапе оптимизации катион-замещенных структур ГАП, и расчеты с гибридным функционалом HSE/HSE06 (Heyd-Scuseria-Ernzerhof) на 2-м этапе. Этот подход позволил получить более точные значения всей энергетической зонной структуры ГАП и ширины его запрещенной зоны Eg. Было получено, что чистый стехиометрический ГАП имеет Eg ~7.4-7.8 эВ, а появление различных структурных дефектов и введение замещения ионов Са катионами приводят к изменению всей энергетической зонной структуры ГАП и появлению уровней энергии в запрещенной зоне, что изменяет ее ширину и фотоэлектронные свойства ГАП. В итоге, регистрируемые в экспериментах по измерению ширины зоны ГАП значения являются данными фотовозбуждения с разных уровней, что дает эффективное значение Eg* ~4.0-5.5 эВ. При этом изменяются механические, пьезоэлектрические, электронные свойства ГАП, в т.ч. работа выхода электрона, что изменяет величину электрического потенциала поверхности ГАП. А это влияет на адгезию и рост живых клеток костной ткани, изменяет биосовместимость имплантатов, покрытых таким катион-модифицированным ГАП. В работе представлены результаты детальных ТФП расчетов [2-6], показывающие изменение свойств ГАП в зависимости от концентрации вводимых катионных замещений. Результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученными при механохимическом синтезе ГАП образцов с такими замещениями при разных концентрациях

вводимых катионов [5]. Результаты работы показывают возможности управления поверхностным электрическим потенциалом ГАП введением в образцы катионных замещений и влияния на адгезию и рост клеток на поверхности такого катион-модифицированного ГАП материала.

Список используемой литературы:

- [1] С.М. Баринов, В.С. Комлев. Биокерамика на основе фосфатов кальция. М.: Наука, 2005.
- [2] V. Bystrov, E. Paramonova, L. Avakyan et al. // Nanomaterials 2021. V. 11. #2752.
- [3] L. Avakyan, E. Paramonova, V. Bystrov et al. // Nanomaterials 2021, V. 11. #2978.
- [4] V.S. Bystrov, E.V. Paramonova, L.A. Avakyan et al. // Materials 2023. V. 16. #5945.
- [5] N.V. Bulina, N.V. Eremina, S.V. Makarova et al. // Materials 2024. V. 17. #416.
- [6] V. Bystrov, E. Paramonova, L. Avakyan et al. // Next Mat. 2025. V. 8 #100583.

Приглашенный доклад

**НЕОРГАНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ МЕДИЦИНСКИХ
ПРИМЕНЕНИЙ**

Сафонова Т.В.

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,

Москва, Россия

saftronovatv@my.msu.ru

Неорганические материалы применяют, как правило, для лечения или компенсации дефектов костной ткани. Неорганические материалы для медицинских применения должны быть биосовместимыми и, в зависимости от применяемых подходов лечения, обладать способностью деградировать или проявлять устойчивость к деградации в среде организма. Неорганическая составляющая костной ткани представлена карбонат-гидроксиапатитом. В состав костной также входят различные катионы, среди которых следует упомянуть ионы натрия, калия, магния. Именно поэтому при создании материалов для костных имплантатов основное внимание уделяется различным фосфатам кальция.

Рассмотрены различные методы получения неорганических материалов, фазовый состав которых принадлежит к оксидным системам,ключающим оксиды кальция, магния, натрия, калия, фосфора, кремния,

серы, углерода, водорода. Такие материалы получают из расплавов (стекло, ситаллы), из порошковых систем в результате протекания реакций химического связывания (цемент, композиты с неорганической матрицей), а также в результате спекания, протекающего по различным механизмам (керамика) при использовании высокотемпературной обработки.

Представлены принципы создания порошковых прекурсоров (смесей или паст) для получения неорганических (керамических или вяжущих) материалов с заданным фазовым составом и микроструктурой в различных оксидных системах. Рассмотрены особенности формования вяжущих материалов и предкерамических образцов/изделий из различных порошковых систем.

При получении цементного камня или керамики необходимо использование порошков, обладающих комплексом заданных свойств. Рассмотрены различные методы получения порошков, включая осаждение из растворов (в том числе из смешанно-анионных или смешанно-катионных растворов), твердофазный синтез и синтез в условиях механической активации.

Подчеркнута важность комплексного исследования физико-химических и функциональных свойств вновь создаваемых материалов методами *in vitro* и *in vivo*.

Доклад подготовлен в рамках выполнения государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова, регистрационный номер AAAA-A21-121011590082-2 с использованием оборудования, приобретенного за счет Программы развития Московского университета.

МАТРИКСЫ ИЗ ТРИКАЛЬЦИЙФОСФАТА, ПОЛУЧЕННЫЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

**Фадеева И.В.^{1*}, Новиков М.М.², Черебыло С.А.², Тютькова Ю.Б.¹,
Дудорова А.А.³, Осипова Е.Ю.³**

***¹Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН,
Москва, Россия***

²НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

³НМИЦ ДГОИ им. Дмитрия Рогачева, Москва, Россия

****fadeeva_inna@mail.ru***

Керамика из трикальцийфосфата (ТКФ, $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) используется в медицине для восстановления поврежденных костных тканей. Остеокондуктивные свойства определяются наличием связной системы макропор (размером не менее 100 мкм), необходимых для циркуляции

жидкостей организма, а также для остеоинтеграции имплантата с окружающей костной тканью. Для создания керамики с пористой структурой используют метод стереолитографии, который позволяет по трехмерной цифровой модели с заданной геометрией изготавливать керамические образцы с заданной архитектурой.

ТКФ синтезировали осаждением из водных растворов солей с последующей термообработкой при 900 °С. Полученный порошок ТКФ смешивали с акриловой фотополимерной композицией, оптимизированной для излучения 405 нм в соотношении 60:40 по весу. 3D печать материала проводили с помощью LCD принтера на фторопластовой ленте. Обжиг полученных образцов проводили при температурах 1100 и 1200 °С.

Проведены эксперименты на клетках и изучено влияние пористости и архитектуры трехмерной конструкции на развития клеточных культур. В 3D-культурах МСК увеличились отложения кальция проявилась положительная окраска на щелочную фосфотазу (рис.1), что подтверждает остеогенную дифференцировку.

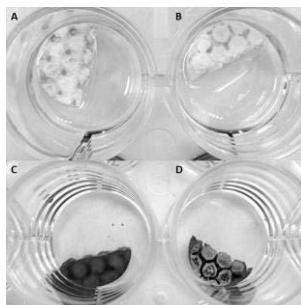


Рисунок 1 – Окрашенные на щелочную фосфотазу образцы матрикса, до дифференцировки (B) и после дифференцировки (A); (C-D) - Окрашенные на ARS образцы матрикса, до дифференцировки (D) и после дифференцировки (C)

Таким образом, полученная с использованием аддитивных технологий керамика из ТКФ перспективна для использования в медицине при лечении поврежденных костных тканей.

Синтез ТКФ и физико-химическое исследование полученных образцов выполнены в рамках Госзадания №. 075-00319-25-00. Стереолитографическая 3D печать проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

ЦЕМЕНТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ ФОСФАТ МАГНИЯ - ФОСФАТ КАЛЬЦИЯ, ДОПИРОВАННЫЕ ИОНАМИ ЕВРОПИЯ

Никишина Е.Е.^{1*}, Тихолюк В.О.¹, Хайрутдинова Д.Р.², Комлев В.С.²

¹*МИРЭА-Российский технологический университет, Институт тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

²*Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва, Россия*

*nikishina@mirea.ru

В современной медицине наиболее известными материалами, предназначенными для восстановления поврежденной костной ткани, являются кальций фосфатные цементные материалы. В настоящее время начали набирать популярность кальций-магний фосфатные цементные (КМФЦ) материалы. Они обладают высокой механической прочностью, биосовместимостью и остеокондуктивностью. В последние годы возникла потребность в малоинвазивной хирургии. Одними из материалов, используемыми в данной области, являются материалы, обладающие люминесцентными свойствами. Ионы редкоземельных металлов обладают антибактериальной активностью и способностью к люминесценции в широком диапазоне электромагнитного излучения.

Цель настоящей работы заключалась в разработке и исследовании цементных материалов в системе фосфат кальция - фосфат магния с соотношением $(\text{Ca}+\text{Mg})/\text{P}=1,67$ и замещением 60 мол. % Mg в структуре, допированного катионами европия в количестве до 1,0 ат. %, и исследовании физико-химических и механических свойств полученного материала.

В ходе работы методом химического осаждения из водных растворов и последующей термообработки синтезированы порошковые материалы на основе системы фосфат магния-фосфат кальция при соотношении $(\text{Ca}+\text{Mg})/\text{P}=1,67$ и замещением 60 мол.% Mg в структуре (в качестве предшественников выступали нитраты кальция и магния и фосфат аммония). Данные материалы были получены как с внедрением до 1,0 ат.% Eu^{3+} , так и без него.

Проведено исследование синтезированных фаз с использованием физико-химических методов анализа (РФА, РФС, ИК-спектроскопия, СЭМ, БЭТ). Результаты РФА и ИК-спектроскопии подтвердили наличие фазы станфилдита $\text{Mg}_3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_4$ и незначительного количества фазы оксида магния MgO . С помощью рентгенофлюоресцентного анализа определено содержание Eu^{3+} в синтезированных порошках. На спектрах люминесценции образцов наблюдается характерное свечение ионов Eu^{3+} .

на длине волны 394 нм ($^7\text{F}_0 - ^5\text{L}_6$), причем с увеличением концентрации ионов Eu³⁺ интенсивность свечения увеличивается. Размеры частиц полученных порошков лежат в диапазоне 100–200 нм, частицы имеют чешуйчатую форму. Наибольшая удельная площадь поверхности составила до 53 м²/г.

Далее получали цементные материалы, состоящие из фазы стан菲尔дита Mg₃Ca₃(PO₄)₄ и ньюберита MgHPO₄·3H₂O.

Исследования показали, что механическая прочность цементов возрастала с увеличением количества введенных ионов европия Eu³⁺ (для цементов с содержанием 1,0 ат.% Eu³⁺ она составила 41 МПа). Структура полученных цементов – плотная, бесспористая, состоящая из частиц чешуйчатой и кубической формы. Размер частиц для образцов, содержащих до 0,1 ат.% Eu³⁺ составил 2–3 мкм, для образцов с содержанием 0,5–1,0 ат.% Eu³⁺ – 0,5–1 мкм.

Таким образом, в результате проведенной работы разработаны и исследованы новые цементные материалы в системе фосфат кальция–фосфат магния, обладающие высокой механической прочностью, удобным временем схватывания, приемлемым уровнем pH и заданным фазовым составом, отвечающие основным критериям биоцементных материалов и предназначенные для восстановления дефектов костной ткани.

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ № 23-63-10056.

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ БИОМАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ФОСФАТОВ КАЛЬЦИЯ ДЛЯ РЕГЕНЕРАЦИИ И НЕИНВАЗИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ ЗАБОЛЕВАНИЙ КОСТНОЙ ТКАНИ

Петракова Н.В.^{1*}, Зобкова Ю.О.¹, Мальцев С.А.¹, Кузнецова П.А.¹, Егоров А.А.¹, Низамутдинов А.С.², Пудовкин М.С.², Гафуров М.Р.², Комлев В.С.¹

¹ Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН,
Москва, Россия

² Казанский федеральный университет, Казань, Россия

*petrakova.nv@mail.ru

Необходимость разработки новых многофункциональных биоматериалов обусловлена повышенным спросом на медицинские изделия для костного имплантации. Такие изделия должны охватывать полный спектр требований к систематическому и эффективному лечению травм и патологий костной системы, а также

обеспечивать качественный мониторинг процессов репарации в послеоперационный период.

Синтетические кальцийфосфатные материалы широко применяются в создании костных имплантатов благодаря вариативности их фазового и химического состава и возможности регулирования архитектуры изделий для обеспечения оптимальных условий для направленного остеогенеза. Функциональность этих материалов расширяется посредством придания дополнительных терапевтических свойств за счет возможности насыщения пористых скэффолдов лекарственными препаратами и биоактивными молекулами, а также включения в кристаллическую решетку соответствующих активных ионов-допантов.

Включение в структуру фосфатов кальция ионов, способных к люминесценции, повышает прикладную ценность таких медицинских изделий в формате решения одновременно нескольких задач: заполнение дефектов костной ткани при оперативном лечении заболеваний и повреждений костной ткани и обеспечение высокого контраста и точной дифференциации твердых тканей и биоматериала в дальнейших процессах восстановления дефекта. Использование ионов редкоземельных элементов в качестве ионов-активаторов фотolumинесценции в заданном диапазоне излучения позволит совершенствовать методы неинвазивной диагностики, такие как оптическая и люминесцентная томография.

В настоящей работе приведены некоторые результаты исследования влияния допирования фосфатов кальция ионами редкоземельных элементов на фазовый состав, структурные свойства, термическую стабильность, а также магнитные и оптические свойства материалов для выявления их функциональных свойств. Рассматриваются новые запросы в части как фундаментальных исследований материалов медицинского назначения, так и расширения прикладного значения разрабатываемых материалов.

Исследование проведено при финансовой поддержке РНФ № 23-63-10056.

ВЛИЯНИЕ ФАЗОВЫХ И СТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НА БИОИНТЕГРАЦИЮ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ФОСФАТОВ КАЛЬЦИЯ ДЛЯ РЕГЕНЕРАЦИИ КОСТНОЙ ТКАНИ

**Тетерина А.Ю.^{1*}, Смирнов И.В.¹, Минайчев В.В.^{1,2}, Смирнова П.В.¹,
Фадеев Р.С.^{1,2}, Фадеева И.С.², Комлев В.С.¹**

*¹Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова
Российской академии наук, Москва, Россия*

²Институт теоретической и экспериментальной биофизики Российской академии наук, Москва, Россия

Перспективным подходом создания материалов для регенеративной медицины является использование низкотемпературных кальцийфосфатных соединений (КФС), максимально соответствующих естественным компонентам кости, в частности гидроксиапатит (ГАп) и его прекурсоры – дикальцийфосфат дигидрат (ДКФД) и октакальциевый фосфат (ОКФ). Тем не менее эти материалы до сих пор не получили широкого клинического применения, что может быть связано с выраженной вариабельностью биологических эффектов, наблюдаемых при имплантации КФС-материалов – от эффективной аугментации костной ткани до полного отторжения импланта, сопровождающегося разрушением собственной костной ткани.

В данной работе с применением подхода низкотемпературной химической трансформации получены КФС различного фазового состава и проведены комплексные *in vitro* и *in vivo* исследования интегративного, индуцирующего, регенеративного, иммуногенного и провоспалительного потенциала соединений, являющихся участниками цикла естественной биоминерализации костной ткани (ДКФД→ОКФ→ГАп). Выявлены основные закономерности использования экспериментальных КФС-материалов в условиях нормального и напряженного иммунного статуса экспериментальных животных, и достоверно выявлено, что биологическая безопасность и остеокондуктивность *in vivo* при любых вариантах сравнения убывает в ряду ДКФД>ОКФ>ГАп.

Выявлены оптимальные технологии получения КФС как в виде основных и эффективных для имплантации низкотемпературных мономатериалов – прекурсоров гидроксиапатита (ДКФД и ОКФ), так и их одно- и двузамещенных вариантов с обязательным максимальным введением в структуру ионов стронция, которые могут позволить перейти к созданию материалов с заданными, прежде всего противовоспалительными и иммуномодулирующими свойствами.

Полученные результаты могут позволить решить проблему использования резорбируемых КФС-материалов в современной ортопедической хирургии, связанную с вариабельностью биологических эффектов. Текущие исследования показывают, что полученные прототипы материалов (прежде всего ДКФД, ОКФ и его Sr-замещенные варианты) обладают наиболее выраженными противовоспалительными и прогенеративными свойствами, что делает их наиболее перспективными для пациентов с неоднозначным иммунным профилем в месте имплантации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 21-73-20251-П «Влияние структурных и фазовых трансформаций кальцийфосфатных соединений на механизмы биointеграции или отторжения материалов, предназначенных для регенерации костной ткани».

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БИОКЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ ДВОЙНЫХ СИЛИКАТОВ И ФОСФАТОВ НАТРИЯ-КАЛЬЦИЯ

Каймонов М.Р.

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт лекарственных и ароматических растений, Москва, Россия

² Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

**M.R.Kaimonov@yandex.ru*

Для создания материалов, предназначенных для лечения дефектов костной ткани, интерес вызывает система $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{P}_2\text{O}_5$. Материалы, разработанные в рамках данной системы, в частности, биостекло Bioglass 45S5 и стеклокерамика на его основе, демонстрируют способность связываться как смягкими тканями, так и с костной тканью в испытаниях *in vivo* [1]. В то же время, система $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{P}_2\text{O}_5$ не ограничивается исключительно составами биостекла Bioglass 45S5 и его производными материалами, что открывает возможности для разработки как новых подходов, так и функциональных материалов медицинского назначения на основе данной оксидной системы [2]. Изучение квазибинарных систем в рамках оксидной системы $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{P}_2\text{O}_5$ представляет собой перспективное направление для разработки композиционных керамических материалов, предназначенных для восстановления дефектов костной ткани.

Для получения керамических материалов использовали порошки на основе $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ и $\text{Na}_2\text{O} \times \text{SiO}_2 \text{ уH}_2\text{O}$. Трикальцийфосфат, $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, получали соосаждением из водных растворов соответствующих солей-прекурсоров с последующей термической обработкой синтезированного порошка при 1000°C. Гидратированный порошок силиката натрия получали из водных растворов силиката натрия путем сушки последних в тонком слое до постоянной массы с последующим измельчением. Керамические материалы получали из предкерамических образцов, сформованных одноосным прессованием, которые затем подвергали

термической обработки в интервале температур 500 – 1100°C. Изучение эволюции фазового состава от температуры и установление зависимости свойств керамических материалов от фазового состава и морфологической архитектуры было произведено с использованием комплекса взаимодополняющих современных методов физико-химического анализа. Для оценки биосовместимости керамических материалов были проведены испытания *in vitro* с использованием фетальных мезенхимальных стромальных клеток человека. Для всех исследуемых составов наблюдается увеличение прочности на сжатие с увеличением температуры термообработки. Оценка биосовместимости показала перспективу использования керамических материалов на основе составов $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ и $\text{Na}_2\text{O} \times \text{SiO}_2 \text{ yH}_2\text{O}$.

Таким образом, в работе были получены керамические материалы на основе $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ и $\text{Na}_2\text{O} \times \text{SiO}_2 \text{ yH}_2\text{O}$ и изучены эволюция фазового состава в зависимости от температуры, физико-химические свойства материалов, включая изменение микроструктуры и прочностных свойств в зависимости от фазового состава и температуры термообработки. Полученные материалы могут быть рекомендованы для использования в регенеративной хирургии.

Список используемой литературы:

- [1] Hench L.L., Paschall H.A. // Journal of Biomedical Materials Research. 1973. V. 7, № 3. P. 25–42.
- [2] Kaimonov M.R., Safronova T.V. // Materials. 2023. V. 16. № 17. P. 5981.

ОРТОФОСФАТ МАГНИЯ ДЛЯ БИОМЕДИЦИНСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ: ОСОБЕННОСТИ РАСТВОРНОГО И ТВЕРДОФАЗНОГО СИНТЕЗОВ, МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И 3D ПЕЧАТЬ

Климашина Е.С.^{1,2*}, Пупanova А.К.¹, Егорова В.А.¹, Мурашко А.М.^{1,2},
Филиппов Я.Ю.^{2,3,4}, Евдокимов П.В.^{1,2}, Путляев В.И.^{1,2}

¹*Химический факультет, Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия*

²*Факультет наук о материалах, Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия*

³*Научно-исследовательский институт механики, Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия*

⁴*Университет МГУ-ППИ, Шенъчжень, Китай*

*esklimashina@gmail.com

Перспективными химическими соединениями для замены костной ткани являются фосфаты магния, поскольку магний-ион подобен кальцию (близкий по размеру радиус иона, одинаковый заряд) и обладает такими свойствами как стимуляция роста костной ткани, ингибирование чрезмерного костеобразования, повышенная прочность.

На первый взгляд, самым простым методом получения дисперсных порошков фосфатов магния для последующего их спекания является осаждение из растворов, однако по сравнению с системой CaO-P₂O₅-H₂O бинарная система MgO-P₂O₅-H₂O изучена существенно меньше с физико-химической и биомедицинской точки зрения. Следует обратить внимание на сложные фазовые взаимосвязи между гидратированными фазами различных фосфатов магния, поэтому классическое осаждение из раствора искомого соединения проблематично из-за склонности фосфатов магния образовывать многочисленные кристаллогидраты, а также метастабильности средних солей фосфатов магния в водной среде [1].

При воспроизведении твердофазной методики, широко описываемой в литературе, получить однофазный ортофосфат магния удается не всегда из-за наличия примесной фазы пирофосфата магния. Гарантированно получить однофазный ортофосфат магния возможно в результате твердофазного синтеза, где соотношение в исходном прекурсоре Mg/P = 2, увеличение времени обжига и дополнительное прессование не оказывают значительного влияния на продукты реакции. Поэтому данная работа нацелена на изучение свойств ортофосфата магния, Mg₃(PO₄)₂, поиск оптимальных условий синтеза, как растворного, так и твердофазного, дальнейшее формование и получение керамических образцов.

Полученные твердофазным способом порошки Mg₃(PO₄)₂ пригодны для создания плотных керамических образцов со средним размером зерна ~1 мкм и однородным распределением пор в объеме, с относительной плотностью ρ_{отн} = 80,5% и механическими характеристиками: <σ_{max}>=31±4 МПа, E=1,7±0,3 ГПа, а при использовании 10% масс. временного технологического связующего, поливинилового спирта, и многоступенчатого обжига удается заметно улучшить механические характеристики: <σ_{max}>=140,75±7 МПа, E=9,1±0,3 ГПа, ρ_{отн}=89,1%, что в обоих случаях сопоставимо с человеческой костной тканью.

Разработана методика получения макропористых материалов со структурой Кельвина на основе порошков ортофосфата магния с 70% пористостью посредством стереолитографической 3D печати. Выбран режим термообработки, обеспечивающий равномерное удаление полимерного связующего, для спекания керамического материала с

заданной архитектурой, позволяющий использовать его в регенеративной медицине.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29- 00396, <https://rscf.ru/project/24-29-00396/>.

Список используемой литературы:

[1] I.I. Preobrazhenskiy, E.S. Klimashina, Y.Y. Filippov, et al. // Inorg. Mater. 2024. V. 60. № 12. P. 1391. <https://doi.org/10.1134/S002016852470162>.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЦИНКА И ХРОМА НА СТРУКТУРУ
И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ЛЕГИРОВАННЫХ
ФЕРРИТОВ ДЛЯ БИОМЕДИЦИНСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ**

Ковалев А.Д. *, Низамов Т.Р., Щетинин И.В.

НИТУ МИСИС, Москва, Россия

**kovalev.ad@misiss.ru*

За последние десятилетия наблюдается рост интереса к ферритам со структурой шпинели в контексте их применения в биомедицине. Благодаря биосовместимости, возможности катионного замещения и разнообразию методов синтеза, такие материалы являются перспективными для адресной доставки лекарств, магнитной гипертермии и в качестве контрастных агентов для магнитно-резонансной томографии (МРТ) [1].

В настоящей работе исследованы оксидные материалы состава $Zn_xCr_xCo_{0,5-x}Fe_{2,5-x}O_4$ ($x = 0,1; 0,2; 0,4$) и образцы промежуточного состава, полученные после 5 часов механической активации и последующего отжига при 1400°C в течение 3 часов. Рентгеноструктурный анализ, нейтронная дифракция и вибрационная магнитометрия позволили обнаружить следующие зависимости: с увеличением содержания цинка и хрома наблюдается рост параметра решетки, что указывает на успешное встраивание легирующих ионов в кристаллическую структуру; максимум удельной намагниченности насыщения зафиксирован при $x = 0,2$ и связан с перераспределением катионов между подрешетками; коэрцитивная сила систематически снижается с увеличением x , достигая 5 кА/м, что является важным параметром для контроля гипертермии.

Наночастицы были получены методом высокоэнергетического измельчения в течение 100 часов в планетарной шаровой мельнице в присутствии олеиновой кислоты и октадецена. По данным просвечивающей электронной микроскопии (рисунок 1), размер частиц составил 10–20 нм. Наблюдалось снижение удельной намагниченности

насыщения, обусловленное поверхностными эффектами. Для биомедицинских испытаний частицы были модифицированы Pluronic F127 и диспергированы в водной среде. Испытания в переменном магнитном поле (частота – 393,1 кГц, амплитуда – 19,9 кА/м) показали генерацию тепла во всех образцах. Максимальный термический эффект достигался у состава $Zn_{0,4}Co_{0,1}Fe_{2,5}O_4$, температура которого за 1,5 минуты достигала 50 °C. Значения удельной мощности поглощения коррелируют с магнитными характеристиками наночастиц.

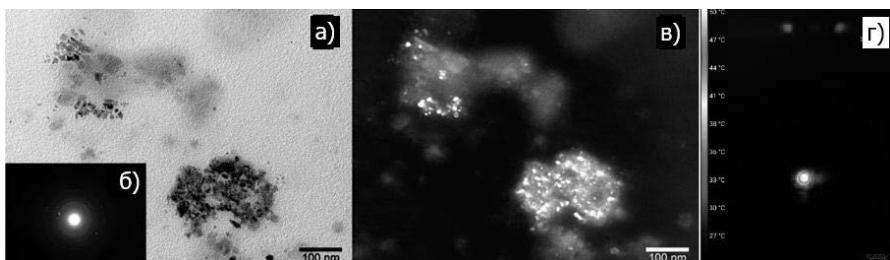


Рисунок 1 – Микрофотография ПЭМ в светлом (а) и темном поле (в), микродифракция (б); измерение теплового эффекта с помощью ИК-камеры на образце $Zn_{0,4}Co_{0,1}Fe_{2,5}O_4$ (г)

Полученные результаты демонстрируют потенциал легированных ферритов со структурой шпинели для использования в технологиях магнитной гипертермии и других биомедицинских приложениях.

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ № 23-73-00114.

Список используемой литературы:

- [1] Yu X. et al. Effect of chromium ion substitution of ZnCo ferrites on magnetic induction heating //Journal of Alloys and Compounds. – 2020. – V. 830. – P. 154724.

МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ФАЗЫ ВИТЛОКИТ, СОДЕРЖАЩИЕ ИОНЫ НЕОДИМА, ДЛЯ БИОВИЗУАЛИЗАЦИИ

Хайрутдинова Д.Р.^{1*}, Гольдберг М.А.¹, Дейнеко Д.В.², Крохичева П.А.¹,
Фомин А.С.¹, Антонова О.С.¹, Комлев В.С.¹

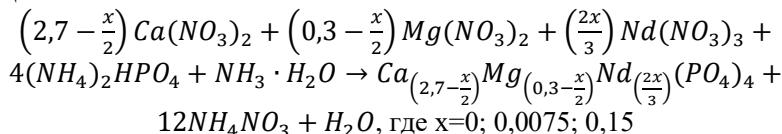
¹ Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН,
Москва, Россия

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Москва, Россия, *dvdr@list.ru

Костный витлокит (КВ) содержится в костной ткани наряду с гидроксиапатитом и играет важную роль на ранних стадиях развития костной ткани. Он характеризуется кристаллической решёткой тригональной конфигурации $R\bar{3}c$, схожей с β -трикальцийфосфатом, но отличается химическим составом. КВ обладает биосовместимостью, механической прочностью и стабильностью в физиологических средах, что делает его перспективным заменителем костной ткани [1]. Добавление ионов неодима, обладающего люминесценцией в области биологического окна (700-1000 нм) позволит применять КВ для биовизуализации [3].

Целью работы являлось получение и исследование материалов на основе КВ, содержащих ионы неодима в количестве 0, 2,5 и 5,0 ат. %.

КВ порошки синтезировали методом химического осаждения по реакции:



Материалы характеризовались однофазным составом, соответствующим формуле КВ - $Ca_{18}Mg_2(HPO_4)_2(PO_4)_{12}$ (JCPDS 87-1582) (Рисунок 1(а)). По данным ИК-спектроскопии в диапазоне волновых чисел 528-624 и 956-1146 cm^{-1} регистрируются фосфат-группы (Рисунок 1(б)). При 920 cm^{-1} обнаружены HPO_4^{2-} группы, наличие которых подтверждает фазообразование костного витлокита [2]. При этом, содержание ионов неодима не оказывают влияния на состав порошков.

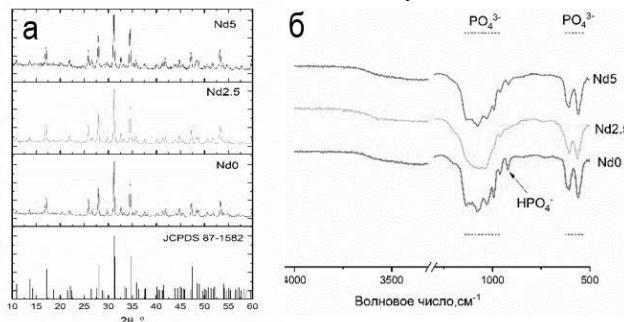


Рисунок 1 – Дифрактограммы (а) и ИК-спектроскопия (б) порошков

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ № 23-63-10056.

Список используемой литературы:

- [1] Batool S. et al. Bone whitlockite: synthesis, applications, and future prospects //Journal of the Korean Ceramic Society. – 2021. – V. 58. – №. 5. – P. 530-547.
- [2] Kizalaite A. et al. Dissolution–precipitation synthesis and thermal stability of magnesium whitlockite // CrystEngComm. – 2023. – V. 25. – №. 30. – P. 4370-4379.
- [3] Ansari A. A. et al. Optically active neodymium hydroxide surface-functionalized mesoporous silica micro-cocoons for biomedical applications //Colloids and Surfaces B: Biointerfaces. – 2020. – V. 189. – P. 110877.

**ОСОБЕННОСТИ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА
КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА
ЦИРКОНИЯ И ОКСИДА АЛЮМИНИЯ**

Оболкина Т.О.^{1*}, Смирнов С.В.¹, Гольдберг М.А.¹, Уткин Д.А.¹,
Хайрутдинова Д.Р.¹, Антонова С.О.¹, Сафонов С.О.¹, Ахмедова С.А.²,
Кирсанова В.А.², Свиридова И.К.², Сергеева Н.С.², Комлев В.С.¹

¹*Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН,
Москва, Россия*

²*Московский научно-исследовательский онкологический институт имени
П.А. Герцена, Москва, Россия*

*obolkina11@gmail.ru

В настоящее время производство керамических изделий на основе диоксида циркония (ZrO_2), оксида алюминия (Al_2O_3) и их соединений осуществляется традиционными методами, которые имеют ограничения в получении изделий сложных геометрических форм с желаемым набором свойств. Методы аддитивного производства (АП) способны устранить данные ограничения, что позволит осуществить переход к персонализированному производству, в первую очередь биомедицинских изделий. Среди различных технологий АП трехмерная печать методом цифровой светодиодной проекции (ЦСП) позволяет производить структуры с высоким разрешением. Однако количество работ, посвященных разработке и исследованию материалов на основе систем ZrO_2 - Y_2O_3 - Al_2O_3 , в том числе, содержащих окрашивающие добавки, для трехмерной печати ограничено [1]. Поэтому актуальной задачей является разработка материалов, адаптированных для трехмерной печати методом ЦСП. В данной работе были получены и исследованы композиционные материалы ZrO_2 -3 мол.% Y_2O_3 - Al_2O_3 (ATZ, Al_2O_3 до 10 масс.%), содержащие добавки на основе силиката натрия, марганца, железа или

кобальта до 3 мол.%. Полученные химическим методом нанопорошки характеризовались удельной поверхностью до $64 \text{ м}^2/\text{г}$. Полученные порошки смешивали с фотополимерной смолой до получения однородной суспензии. Содержание порошка в суспензии составило от 55 до 69 масс.%. Использование добавок на основе марганца и кобальта в составе порошка способствовало снижению толщины отверженного слоя в процессе фотополимеризации по сравнению с материалами без добавок до 2 раз. Изготовление изделий проводили методом послойной фотополимеризации на 3D принтере Photon Mono. После трехмерной печати изделия промывали в этаноле для удаления неотверженной фотополимерной смолы, высушивали на воздухе и подвергали многоступенчатой термической обработке с финальным спеканием до 1450°C . Микротвердость изделий, полученных методом ЦСП, достигала $12,0 \pm 0,6 \text{ ГПа}$ для ATZ-Co, для ATZ-Mn – $11,7 \pm 0,6 \text{ ГПа}$.

Согласно исследованиям *in vitro*, полученные образцы нетоксичны и свидетельствуют о цитосовместимости разработанных материалов.

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ № 25-79-00363.

Список используемой литературы:

- [1] Li Y., Wang M., Wu H., He F., Chen Y., Wu S. Cure behavior of colorful ZrO_2 suspensions during Digital light processing (DLP) based stereolithography process //Journal of the European Ceramic Society. – 2019. – Т. 39. – №. 15. – С. 4921-4927.

СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ

ПОЛУЧЕНИЕ 3D КЕРАМИЧЕСКИХ ТРИКАЛЬЦИЙФОСФАТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ МЕТОДОМ DLP ДЛЯ МЕДИЦИНСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

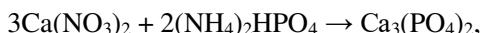
Антонова О.С. *, Оболкина Т.О., Гольдберг М.А., Коновалов А.А.,
Фомин А.С., Комлев В.С.

*Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН,
Москва, Россия*

*oantonova@imet.ac.ru

Регенерация костной ткани играет большую роль в современной медицине, например, в таких ее областях как стоматология, травматология, ортопедия и др. Однако естественные возможности костной ткани зачастую недостаточны, особенно в случае обширных дефектов. В таких случаях требуется некоторый костный матрикс для инициации и стимуляции роста костной ткани. В качестве материала для такого костного матрикса часто используются биокерамические фосфатнокальциевые материалы, например, биокерамика на основе трикальцийфосфата (ТКФ). Выбор материалов на основе ТКФ связан в большей степени с его близостью к костной ткани по своему химическому составу. В настоящее время одним из перспективных методов создания керамических изделий сложной формы является 3D-печать. Такой подход позволяет создавать персонифицированные изделия с заданной пористостью и необходимой геометрией. Для создания 3D изделий была выбрана методика digital light processing (DLP) в связи с высоким разрешением и, следовательно, высокой точностью печати. Целью данной работы является разработка технологии получения порошковых материалов на основе трикальцийфосфата и печати керамических изделий из них с использованием DLP-технологии.

Синтез порошков на основе ТКФ проводили методом химического соосаждения по следующей реакции:



при постоянном перемешивании и контроле уровня pH в диапазоне значений 6,7-7,1 с использованием водного раствора аммиака и уксусной кислоты. После окончания реакции полученный осадок фильтровали на воронке Бюхнера и сушили на воздухе при 60 °C. Полученные порошки были аттестованы с использованием методов РФА, ИК-спектроскопии, БЭТ.

Предварительно для синтезированных порошков ТКФ был исследован процесс спекания на образцах – балочках, полученных одноосным прессованием. Были определены оптимальные условия для получения плотноспеченного керамического материала с открытой пористостью менее 1 % (температурный режим, легкоплавкая спекающая добавка на основе фторидов щелочных металлов и ее количество).

3D-печать проводили методом DLP с использованием коммерческого фотополимерного 3D принтера Anycubic Photon Mono (Китай). Предварительно была отработана технология получения вязкой суспензии из фотополимера на основе метилметакрилата и порошка ТКФ с содержанием твердой фазы до 40 мас.%. Изделия после печати отмывали в УЗ-ванне в среде этилового спирта для удаления непрореагированного фотополимера. Удаление фотополимера проводили в среде азота постепенным нагревом до 360 °C в течение 120 часов. Полученные пористые образцы спекали при температуре 1000 °C.

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ № 25-29-00849.

СИНТЕЗ И СВОЙСТВА ЖЕЛЕЗОЗАМЕЩЕННОГО ГИДРОКСИАПАТИТА

Донская Н.О.^{1*}, Гольдберг М.А.¹, Фомин А.С.¹, Антонова О.С.¹,
Леонов А.В.², Коновалов А.А.¹, Комлев В.С.¹

¹*Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН,
Москва, Россия*

²*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
Москва, Россия*

**nadyadonskaya89@gmail.com*

Гидроксиапатит (ГА) с формулой $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ является основным неорганическим соединением костной ткани и имеет большое значение в биомедицинской области как материал для имплантации и покрытий [1].

Железозамещенный ГА, а также композитные материалы на основе Fe_3O_4 и ГА привлекают внимание благодаря особым свойствам этих материалов. Ионы Fe^{3+} улучшают бактерицидные и минерализующие свойства наноразмерного ГА [2], а также демонстрируют положительное влияние на остеобластоподобное поведение [3].

Синтез порошков железосодержащего ГА в интервале концентраций железа от 0 до 20 мол. % проводили методом осаждения из водных растворов.

После синтеза, согласно данным РФА, порошки были образованы однофазным ГА (Рисунок 1). Введение Fe^{3+} приводило к снижению степени закристаллизованности.

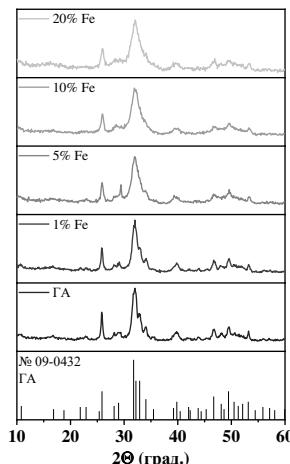


Рисунок 1 – Дифрактограммы порошков FeГА

По данным ПЭМ, порошки были агломерированы, а размер частиц составлял менее 50 нм.

Материалы характеризовались изотермой адсорбции IV типа и наличием мезопористости. Был выявлен Н3-тип петли гистерезиса, характерный для пор, сформированных между пластинчатыми частицами.

Список используемой литературы:

- [1] Bhooshan Kumar V. [и др.]. Biomimetic and mesoporous nano-hydroxyapatite for bone tissue application: a short review // Biomedical Materials. 2020. № 2 (15). С. 022001.
- [2] Sarath Chandra V. [и др.]. Blood compatibility of iron-doped nanosize hydroxyapatite and its drug release // ACS Applied Materials and Interfaces. 2012. № 3 (4). С. 1200–1210.
- [3] Panseri S. [и др.]. Intrinsically superparamagnetic Fe-hydroxyapatite nanoparticles positively influence osteoblast-like cell behaviour // Journal of Nanobiotechnology. 2012. № 1 (10). С. 1–10.

РЕЗОРБИРУЕМАЯ КЕРАМИКА НА ОСНОВЕ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ ФОСФАТОВ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ КОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ

Леонтьев Н.В.*^{*}, Погольская Д.Д., Евдокимов П.В., Путляев В.И.
Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
Москва, Россия

**nleontev@inorg.chem.msu.ru*

В области остеопластических материалов для регенеративного подхода характерен акцент на ускорении процессов интеграции, растворения имплантата и ремоделирования нативной кости, чему способствуют остеоиндуцирующие свойства материала, выполняющего роль пористой матрицы. Рост остеоиндуктивности может быть достигнут внедрением в состав кальцийфосфатного керамического каркаса дополнительных макро- и микроэлементов помимо основных (кальция, фосфора, кислорода), что позволяет а) стабилизировать полиморфные модификации с оптимальным уровнем резорбции, б) обеспечить поступление в организм биоактивных элементов и, тем самым, специфически активировать именно те процессы, которые связаны с остеогенезом. В качестве матрикса, “нагружаемого” остеоиндуцирующими элементами, предлагается использовать структуру глазерита с общей формулой A_2XO_4 , являющуюся родственной трикальцийфосфату.

Согласно теоретическим расчетам наибольшая эффективность стабилизации высокотемпературного твердого раствора со структурой глазерита состава $(Ca, Mg, Sr, Na, K, Cu, Zn)_a(PO_4, SiO_4, GeO_4)_b$, образованного путем изовалентных замещений в системе $CaNaPO_4-Ca_2SiO_4-Ca_3(PO_4)_2$, достигается при $a = 2$, $b = 1$; максимально возможное значение конфигурационной энтропии $7.66R$. Добавление в систему третьего компонента, $Ca_3(PO_4)_2$, должно повлечь снижение pH среды в ходе гидролиза продуктов растворения глазеритного материала и приблизить его к физиологическому ($pH = 7.35-7.45$).

Быстрое охлаждение (закалка) от $1500^{\circ}C$ твердых растворов составов $Ca_{4+x}Na_2(PO_4)_{2+2x}(SiO_4)_{1-x}$ ($x = 0.33, 0.66$) и $Ca_{4+4y}Na_{2-2y}(PO_4)_{2+2y}SiO_4$ ($y = 0.25, 0.5, 0.75$) приводит к стабилизации однофазных соединений со структурой высокотемпературного нагельшмидита. Усложнение химического состава путем введения дополнительных элементов (Mg, Sr, K, Cu, Zn, Ge) способствует стабилизации высокотемпературного нагельшмидита и частичной стабилизации высокотемпературного глазерита при медленном охлаждении от температуры синтеза, что может быть связано с энтропийным фактором.

Керамика

состава
 $\text{Ca}_{6.3}\text{Mg}_{0.175}\text{Sr}_{0.175}\text{Cu}_{0.175}\text{Zn}_{0.175}\text{Na}_{1.5}\text{K}_{1.5}(\text{PO}_4)_5(\text{SiO}_4)_{0.25}(\text{GeO}_4)_{0.25}$ обладает линейной усадкой в ~25%, размер зерна составляет 20–40 мкм. Увеличение доли Ca_2SiO_4 , что отвечает составу $\text{Ca}_{5.4}\text{Mg}_{0.15}\text{Sr}_{0.15}\text{Cu}_{0.15}\text{Zn}_{0.15}\text{Na}_{0.5}\text{K}_{0.5}(\text{PO}_4)_3(\text{SiO}_4)_{0.5}(\text{GeO}_4)_{0.5}$, приводит к снижению усадки до ~23% и росту числа пор. На границах зерен вероятно образование стеклофазы, обогащенной тяжелыми элементами и предположительно способствующей упрощению протекания зернограничной диффузии при спекании.

Исследования острой цитотоксичности материалов показали, что глазеритные керамики на основе составов, включающих более 8 элементов, способствуют активной пролиферации клеток фибробластов. Растворение глазеритоподобных порошков происходит быстрее традиционно используемого в остеопластике $\beta\text{-Ca}_3(\text{PO}_4)_2$. Включение в состав дополнительных элементов может привести к снижению скорости резорбции, обусловленному образованием менее растворимой низкотемпературной фазы. При увеличении мольной доли трикальцийфосфата в нагельшмидтитном твердом растворе значение pH, создаваемое в ходе гидролиза в водной среде уменьшается (вплоть до 7.9), тем самым приближаясь к физиологическому (7.35–7.45). Полученные результаты подтверждают перспективность рассмотренных материалов для создания высокорезорбируемых костных имплантатов.

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ № 22-19-00219.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ГРАНУЛИРОВАНИЯ ФОСФАТОВ КАЛЬЦИЯ

Лобжанидзе П.В.*, Федотов А.Ю., Егоров А.А., Комлев В.С.

Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова

Российской академии наук, Москва, Россия

**paulik_1496@mail.ru*

Современные задачи регенеративной медицины и тканевой инженерии направлены на разработку биоматериалов, способных эффективно интегрироваться в организм, стимулировать восстановление тканей и выполнять функции носителей лекарственных веществ. Востребованным биоматериалом для этих целей являются пористые гранулы на основе ФК с вариацией фракционного состава от 30 до 150 мкм, с бимодальным распределением пор наnano- и микроуровне. Ключевой

задачей технологии таких гранул, является обеспечение их стабильной морфологии. Производство пористых гранул включает приготовление шликера на основе кальцийфосфатного порошка, его распыление в циклоне и последующий обжиг полученных гранул. Характеристики продукта значительно зависят от состава шликера и параметров процесса распыления.

Цель работы – оптимизация параметров гранулирования кальцийфосфатных порошков для получения гранул с заданной морфологией.

Готовили шликер на основе водного раствора поливинилового спирта (ПВС) и порошка фосфата кальция (ФК; гидроксиапатита (ГА) или β -трикальцийфосфата (β -ТКФ)). Варьировали концентрацию водного раствора ПВС от 2 до 10 масс. % и содержание порошка ФК от 20 до 40 масс. %. Распыление проводили с различной температурой воздушного потока, от 140 до 240 °C, скорость подачи шликера была постоянной. Обжиг гранул проводили при 1300 °C для ГА и 1400 °C для β -ТКФ.

Установлено, что повышение концентрации ПВС в растворе с 2 до 10 масс. % способствует увеличению доли частиц сферической формы, помимо ассиметричной формы. При увеличении концентрации ФК в шликере с 20 до 40 масс. % наблюдается увеличение диаметра основной фракции гранул от 40 до 70 мкм. Определено, что повышение входной температуры воздушного потока в распылительной колонне от 140 до 240 °C приводит к нарушению сферичности гранул ФК. На рисунке 1 приведены СЭМ-изображения наиболее оптимальных по морфологии гранул.

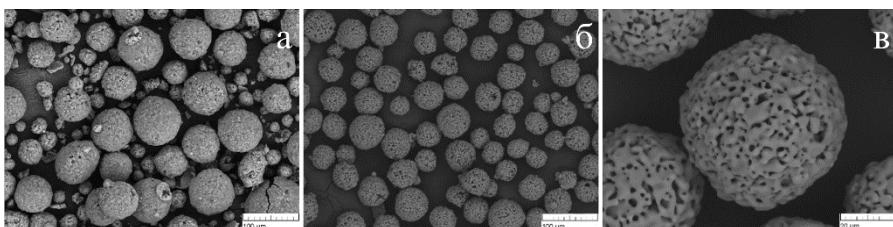


Рисунок 1 – СЭМ-изображения гранул: после распыления (x500) (а); после обжига (x500) (б); после обжига (x2500) (в).

Выявленные закономерности технологии позволяют формировать гранулы с регулируемыми морфологическими свойствами. Оптимизация параметров гранулирования в распылительной колонне и постобработки способствует получению биоматериалов, соответствующих современным требованиям тканевой инженерии. Полученные данные могут быть

использованы при масштабировании технологии и внедрении отечественных биоматериалов в клиническую практику.

Исследование проведено при финансовой поддержке ГЗ № 075-00319-25-00.

ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ПОРОШКОВ $\text{Ca}_{3-2x}(\text{PO}_4)_2:\text{Na}_x,\text{Ln}_x (\text{Ln}=\text{Yb},\text{Er})$

Мальцев С.А.*, Петракова Н.В., Комлев В.С.

Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН,

Москва, Россия

sergmaltshev97@mail.ru

Фосфаты кальция занимают важное место среди керамических материалов медицинского назначения благодаря их высокой биосовместимости и способности к замещению повреждённой костной ткани. Однако успешная имплантация и последующая реабилитация требуют эффективных методов неинвазивной диагностики, таких как рентгенография и компьютерная томография. Несмотря на их широкое применение, эти методы обладают существенными недостатками, включая необходимость использования токсичных контрастных веществ, а также воздействие ионизирующего (рентгеновского) и ультрафиолетового (УФ) излучений, что может приводить к нежелательным побочным эффектам [1].

Альтернативным решением данной проблемы является создание биосовместимых и биоактивных люминесцентных материалов, способных к люминесценции в ИК-диапазоне, характеризующимся более высоким проникновением в биологические ткани и низким деструктивным воздействием [1, 2]. При легировании β -ТКФ трехвалентными ионами редкоземельных элементов (Er^{3+} , Yb^{3+}) возникает необходимость компенсации избыточного положительного заряда, что может существенно влиять на кристаллическую структуру и люминесцентные характеристики материала. Введение одновалентных ионов щелочных металлов в качестве зарядовых компенсаторов приводит к снижению дефектности кристаллической решетки за счет заполнения вакантных катионных позиций и увеличению квантового выхода за счет уменьшения концентрации точечных дефектов, выступающих в качестве центров тушения люминесценции.

Таким образом, разработка ТКФ-керамики, активированной ионами редкоземельных элементов Yb^{3+} и Er^{3+} , открывает новые возможности для создания биоматериалов, сочетающих остеорегенеративные свойства с

функцией контрастной визуализации в безопасном для организма ИК-диапазоне.

Целью работы являлось получение и исследование порошков ТКФ, додиализированных ионами $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ и Na^+ . Синтез ТКФ проводили методом осаждения из растворов нитратов металлов и гидрофосфата аммония. Значение рН поддерживали на уровне 7,7. Полученный осадок отфильтровывали и высушивали, после чего прокаливали при температуре 1300 °C.

По данным рентгенофазового анализа и ИК-спектроскопии установлено, что порошки являются преимущественно однофазными и не содержат примесных фаз. Методом БЭТ установлено, что частицы порошков после синтеза имеют размер 20-25 нм. Методом РФЛА установлен элементный состав порошков. Содержание додиализирующего элемента соотносится с теоретически заданным количеством. Методом фотолюминесцентной спектроскопии получены спектры для ТКФ:Er,Na и ТКФ:Yb,Na. Образцы демонстрируют характеристические длины волны для данных ионов-активаторов. Сододиализование ионами натрия приводит к повышению интенсивности люминесценции.

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ № 23-63-10056.

Список используемой литературы:

- [1] F. Chen et al. // Biomaterials. 2012.
- [2] Тучин, В. В. // Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 488 с. ISBN 978-5-9221-1278-9

ПОЛУЧЕНИЕ БИОАКТИВНОГО МЕЗОПОРИСТОГО СТЕКЛА СОСТАВА CaO-SiO_2 и $\text{CaO-SiO}_2\text{-ZnO}$ МЕТОДОМ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ СИНТЕЗА

Михайличенко А.А.*, Лыткина Д.Н.

Национальный исследовательский Томский государственный

университет, Томск, Россия

nekochan2004@mail.ru

Биоактивные стекла могут быть подходящими веществами для многочисленных биомедицинских применений, таких как доставка лекарств и регенерация костей, в силу их биосовместимости, низкой токсичности, а также способности обеспечить благоприятную среду для роста костной ткани и инициировать превращение неспециализированных

клеток в остеобласти. Регулируя состав биостекла, а также используя модификации ионами металлов или методы улучшения свойств поверхности материала, можно добиться улучшения перечисленных выше свойств.

Целью работы является получение мезопористого биоактивного стекла номинального состава CaO (40%) + SiO_2 (60%) и CaO (45%) + SiO_2 (50%) + ZnO (5%) методом золь-гель синтеза (Рисунок 1). Соотношения были выбраны как наиболее оптимальные для сохранения свойств получаемых материалов. Отсутствие фаз P_2O_5 и Na_2O необходимо для достижения большей деполимеризации и избегания осаждения побочных продуктов.

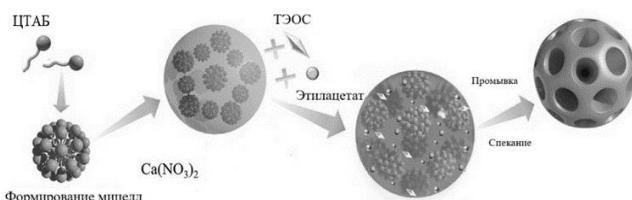


Рисунок 1 - Синтез биоактивного мезопористого стекла

Были получены образцы мезопористого биоактивного стекла с фактическим составом CaO (15%) + SiO_2 (85%) и CaO (30%) + SiO_2 (65%) + ZnO (5%). Размер частиц образца CaO-SiO_2 находится в диапазоне от 100 до 200 нм, $\text{CaO-SiO}_2-\text{ZnO}$ - в диапазоне от 50 до 70 нм, что выяснено с помощью СЭМ и МРСА. Расхождения между номинальным и фактическим составами объясняются этапами промывания и центрифугирования, способными приводить к потере ионов кальция. Согласно результатам РФА (Рисунок 2а), образец CaO-SiO_2 аморфен, так как на рентгенограмме демонстрируется широкий пик только при 2Θ около 23 °, что характерно для аморфной структуры силикатного стекла. Рентгенограмма образца $\text{CaO-SiO}_2-\text{ZnO}$ содержит острые дифракционные пики в диапазоне 10–45 °, которые свидетельствуют о повышенной кристалличности по сравнению с немодифицированным образцом. На ИК спектрах (Рисунок 2б), идентичных для обоих образцов, наблюдаются полосы поглощения при $1101,77 \text{ см}^{-1}$, $806,01 \text{ см}^{-1}$ и $471,85 \text{ см}^{-1}$ характерные для Si-O-Si. Наличие этих полос подтверждает образование тетраэдрических блоков SiO_4 для установления стеклянной сетки мезопористого биостекла.

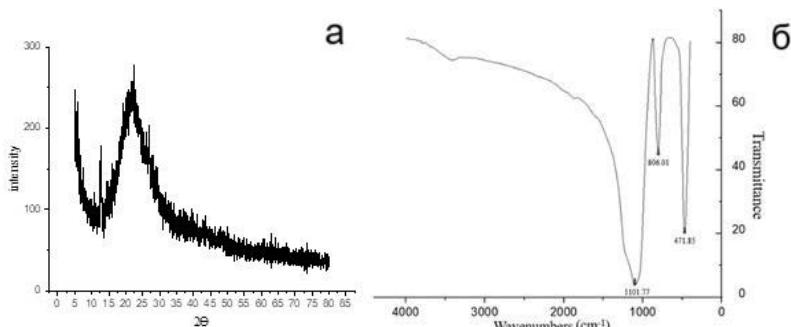


Рисунок 2 – Рентгенограмма (а), ИК спектр биоактивного стекла (б)

РЕЗОРБИРУЕМЫЕ ОСТЕОКОНДУКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ БИФАЗНОЙ КЕРАМИКИ В СИСТЕМЕ $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2-\text{Ca}_{2.5}\text{Na}(\text{PO}_4)_2$

Мурашко А.М.^{1*}, Филиппов Я.Ю.^{1,2}, Дьячкова У.Д.¹, Ефименко А.Ю.¹, Евдокимов П.В.¹, Путляев В.И.¹

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Москва, Россия

² МГУ – ППИ, Шэнъчжэнь, Китай

*murashkoam@my.msu.ru

Бифазная керамика на основе высокотемпературных фаз трикальциевого фосфата (ТКФ) и смешанного фосфата кальция-натрия перспективна для применения в остеопластике за счет возможности контролировать скорость ее растворения в среде организма путем варьирования содержания компонентов в составе. Помимо биорезорбируемости имплантат должен обладать связанный системой макропор, для создания которых в работе используется стереолитографическая 3D печать.

Таким образом, целью данной работы стало создание резорбируемых остеокондуктивных имплантатов со сложной архитектурой порового пространства на основе бифазной керамики в системе $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2-\text{Ca}_{2.5}\text{Na}(\text{PO}_4)_2$ (фаза «A»).

По совокупности данных термического и рентгенофазового анализа уточнен вид квазибинарного разреза фазовой диаграммы $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2-\text{CaNaPO}_4$ в высокотемпературной области для составов $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2-\text{Ca}_{2.5}\text{Na}(\text{PO}_4)_2$. Установлены границы области существования композиции $\alpha\text{-Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ и фазы «A» ($\text{Ca}_{2.5}\text{Na}(\text{PO}_4)_2$), которая лежит в диапазоне от 30 до 60 мол. % трикальциевого фосфата в составе смеси. На основе

уточненной фазовой диаграммы определены условия для получения бифазной керамики в различных комбинациях низкотемпературных и высокотемпературных фаз: α - и β - $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, фаза «А».

Установлено, что введение фазы «А» в состав материалов способствует большему уплотнению керамики при спекании. Наиболее перспективным представляется состав керамики на основе смеси трикальциевого фосфата и фазы «А» в мольном соотношении 1:1, который демонстрирует прочность при сжатии до 120 МПа при плотности до 92 %.

В результате реологических исследований был отработан состав суспензии для стереолитографической печати, включая выбор мономера, содержания ПАВ и порошкового наполнителя. Установлено, что увеличение содержания порошкового наполнителя с 40 до 45 об. % приводит к резкому росту вязкости, снижению фоточувствительности и критической энергии полимеризации, а также к ухудшению разрешающей способности печати. При этом состав порошковой смеси не оказывает существенного влияния на свойства суспензии. Разработан режим термообработки, обеспечивающий равномерное удаление органической матрицы без образования видимых трещин в материале.

Макропористая керамика со структурой Кельвина демонстрирует большую прочность при сжатии по сравнению со структурой гироида. Прочность при сжатии напечатанных керамических материалов составляет до 2.5 МПа, что удовлетворяет требованиям для медицинского применения.

Включение фазы «А» в состав керамики способствует повышению ее растворимости, а также увеличивает формируемый pH среды от 7.5 до 8.5, что соответствует физиологическому диапазону значений. Все предложенные материалы биосовместимы и не проявляют токсического воздействия на клетки МСК, а также могут быть предложены к дальнейшим исследованиям в условиях *in vivo*.

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ № 23-79-10103.

СИНТЕЗ И СВОЙСТВА СМЕШАННЫХ КАЛЬЦИЙ-СТРОНЦИЙ ФОСФАТОВ, ДОПИРОВАННЫХ Zn^{2+} И Eu^{3+}

Никифоров И.В.^{1*}, Жуковская Е.С.¹, Титков В.А.¹, Дейнеко Д.В.^{1,2}

¹МГУ им. М.В.Ломоносова, химический факультет, Москва, Россия

²Лаборатория Арктической минералогии и материаловедения ФИЦ КНЦ

РАН, Анадырь, Россия

** nikiforoviv@my.msu.ru*

Материалы на основе фосфата кальция являются наиболее перспективными и исследуемыми в области материаловедение для регенеративной медицины. Из всего многообразия фосфатов вещества со структурой $\beta\text{-Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ($\beta\text{-TCP}$) имеют больший потенциал. Это возможно за счет кристаллохимической структуры, которая позволяет вводить различные катионы, получая заданные функциональные свойства.

Смешанные фосфаты $\text{Ca}_{8-x}\text{Sr}_x\text{ZnEu}(\text{PO}_4)_7$ ($x = 0, 1.5, 3, 4.5, 6, 7.5, 8$) со структурой $\beta\text{-TCP}$ были получены посредством твердофазного синтеза со ступенчатым отжигом при температурах 500, 900 и 1150°C. После каждой ступени отжига вещества охлаждались до комнатной температуры и перетирались. Было показано что для составов с $0 \leq x \leq 4.5$ наблюдается формирование структуры $\beta\text{-TCP}$ (PDF2 cards №70-2065), в то время как для $x > 4.5$ на дифрактограммах наблюдается примесное количество структуры эвлецина (PDF2 cards №47-1895) от 2 до 6%.

Биосовместимость полученных фосфатов исследовалась с помощью МТТ-теста на МСК стволовых клетках. МТТ-тест показал, что все синтезируемые вещества обладают биосовместимостью и не токсичны для роста стволовых клеток. Возможность ингибирования роста бактерий и грибов была исследована на *E. coli*, *S. aureus*, *P. aeruginosa* и *E. faecalis* и *C. albicans*. Для всех составов $0 \leq x \leq 6.0$ наблюдается замедление роста бактерий уже после 24 часов.

Фотолюминесцентные свойства показывают, что вещества демонстрируют стабильную фотолюминесценцию в красной области видимого спектра. Изучение фотолюминесцентных характеристик позволило определить, что Eu^{3+} не переходит в структуру гидроксиапатита, в результате выдерживания в Tris-HCl буферном и физиологическом растворах.

Полученные результаты дают возможность использовать данные фосфаты в качестве биоматериалов для регенеративной медицины.

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ № 23-73-10007

БИОРЕЗОРБИРУЕМАЯ МАКРОПОРИСТАЯ КЕРАМИКА НА ОСНОВЕ ФОСФАТОВ МАГНИЯ ДЛЯ МЕДИЦИНСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

**Рассолова Ю.Р.^{1*}, Мурашко А.М.¹, Филиппов Я.Ю.^{1,2}, Климашина Е.С.¹,
Путляев В.И.¹**

*¹ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
Москва, Россия*

² МГУ – ППИ, Шэнъчжэнь, Китай

**rassolovayr@my.msu.ru*

В современной регенеративной медицине актуальными являются исследования по разработке биорезорбируемых (рассасывающихся) керамических материалов, обладающих остеокондуктивными и остеоиндуктивными свойствами. Биоматериалы на основе фосфатов магния могут быть рассмотрены в качестве альтернативы традиционно применяемым фосфатам кальция, благодаря способности к растворению *in vitro* и *in vivo* со скоростью, сопоставимой с образованием новой костной ткани организма, а также за счет непосредственного участия магния в костном метаболизме. В литературных источниках недостаточно информации, связанной с изучением физико-химических основ формирования биокерамики с индивидуальной формой и архитектурой порового пространства, в которой магний присутствует в виде единственного катиона.

Целью данной работы стала разработка биорезорбируемой макропористой керамики на основе фосфатов магния для медицинского применения. Для достижения поставленной цели необходимо подобрать оптимальный метод получения порошковых прекурсоров, провести изучение процессов уплотнения прессовок в различных режимах термообработки с дальнейшим исследованием микроструктуры, плотности и механических характеристик материалов, осуществить подбор параметров стереолитографической 3D-печати из фоточувствительных супензий на основе фосфатов магния, а также провести *in vitro* исследования полученной керамики.

Порошковые прекурсоры фосфатов магния были получены методом пиролиза аэрозоля, с формированием субмикронных сферических частиц, с помощью золь-гель синтеза, приводящего к образованию агломератов из частиц размером порядка 10 мкм, а также твердофазным методом, характеризующимся более грубой морфологией. Термообработка составов после пиролиза при 700 °C приводит к разложению остаточных нитратов и удалению влаги в виде газообразных продуктов с сохранением размера частиц.

Установлено, что метод пиролиза аэрозоля позволяет получать керамику с наибольшей плотностью во всем диапазоне составов. Наиболее эффективно процесс спекания протекает для образцов на основе эвтектической смеси ($3\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2/2\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$), что позволяет получать плотные (до 95 %) керамические материалы с наименьшим размером кристаллитов. Спекание ортофосфата магния сопровождается растрескиванием за счет неконтролируемого роста кристаллитов, что возможно предотвратить при увеличении скорости нагрева и уменьшении времени выдержки. Для образцов на основе пирофосфата магния было показано, что использование более высоких температур обжига (от 1200 °C) или введение добавки ортофосфата магния приводит к значительному повышению плотности итоговой керамики. Исследованы фоточувствительные характеристики суспензий для 3D-печати, а также выбран режим термообработки напечатанных структур, позволяющий избежать растрескивания индивидуальных слоев после печати. По результатам *in vitro* тестов было показано отсутствие цитотоксичности керамических материалов, полученных с использованием метода пиролиза аэрозоля. Исследуемая керамика поддерживает адгезию и пролиферацию стволовых клеток на поверхности.

Таким образом, наиболее перспективным методом синтеза порошковых прекурсоров оказался метод пиролиза аэрозоля, который способствует получению плотной и прочной керамики, перспективной для дальнейшего применения в качестве имплантатов для регенерации костной ткани.

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ № 24-29-00396.

ПОРИСТЫЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ ДЛЯ МЕДИЦИНСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Уткин Д.А., Хайрутдинова Д.Р., Оболкина Т.О., Комлев В.С.

Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН,

Москва, Россия

**dimaytikin@bk.ru*

Создание биоинертных керамических материалов с пористой структурой, имитирующей костную ткань, остается актуальной задачей регенеративной медицины. Диоксид циркония, стабилизированный оксидом иттрия, может рассматриваться как перспективный вариант благодаря высокой прочности и биосовместимости [1]. Целью работы

является разработка пористой керамики на основе ZrO_2 -3моль.% Y_2O_3 с пористой структурой для медицинского применения.

Порошки частично стабилизированного диоксида циркония синтезированы методом химического соосаждения. В качестве порообразователей использовали поливиниловый спирт (ПВС) и поливинилпирролидон (ПВП). Композиционные порошки получали механическим смешиванием, образцы прессовали и спекали при 1500°C. В ходе работы были проведены исследования рентгенофазового анализа (РФА), микроструктуры методом растровой электронной микроскопии (РЭМ), микрокомпьютерной томографии и механических испытаний.

Наилучшие результаты показали составы с 15 масс.% ПВС: открытая пористость составила 38%, прочность на изгиб 68 МПа. Увеличение содержания ПВС до 18 масс.% повышало открытую пористость до 44%, но снижало прочность до 22 МПа. Для ПВП максимальное значение открытой пористости составило 23% при прочности 102 МПа. Микрокомпьютерная томография подтвердила градиентное распределение пор (рис. 1). Было установлено, что во всех материалах сохранялась преимущественно тетрагональная фаза ZrO_2 .

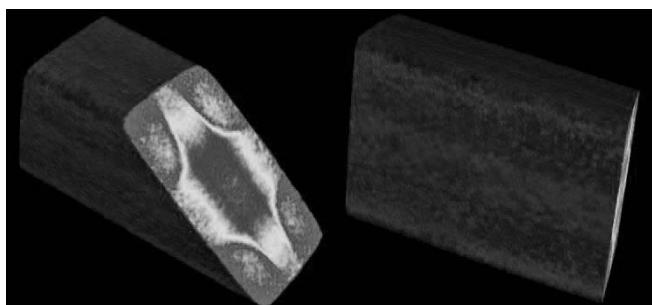


Рисунок 1 – Микрокомпьютерная томография образца, содержащего 15 масс.% ПВС

Таким образом, в ходе работы были получены пористые керамические образцы. Материал с 15 масс.% ПВС, имеющий пористость ~40% и прочность ~70 МПа, по характеристикам близок к губчатой костной ткани и является перспективным для применения в качестве имплантатов для замещения костных дефектов [2].

Исследование проведено в рамках государственного задания № 075-00319-25-00.

Список используемой литературы:

[1] Santa Cruz, Spino, Georg Grathwohl // Journal of the European Ceramic Society, 2008, 28 (9), 1783- 1791.

[2] Баринов С.М. // Успехи химии, 2010, 79 (1), 15-32.

РАЗРАБОТКА НАНОЧАСТИЦ КАРБОНИТРИДА ЦИРКОНИЯ С РАЗЛИЧНЫМ СООТНОШЕНИЕМ С/Н ДЛЯ НЕВОСПАЛИТЕЛЬНОЙ ФОТОТЕРМИЧЕСКОЙ ТЕРАПИИ РАКА

Степанова К.В.*, Суворова В.С., Московских Д.О.

Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия

**kseniys737@gmail.com*

Фототермическая терапия (ФТТ) является новой многообещающей областью терапии рака, основанной на использовании светочувствительных наночастиц, которые локально и неинвазивно уничтожают опухолевые клетки путем преобразования световой энергии в тепло. Однако фотоокислительные последствия, такие как образование большого количества активных форм кислорода (АФК), провоцируют вредную воспалительную реакцию, что способствует рецидиву и метастазированию опухолей. Поэтому создание наноматериалов, обладающих одновременно высокой фототермической эффективностью и противовоспалительным действием является критически важной задачей. Перспективными кандидатами являются керамическиеnanoструктуры на основе карбидов, нитридов и карбонитридов переходных металлов IVB и VB групп. Среди них карбонитриды представляют особый интерес из-за улучшенных фотофизических свойств в результате введения электронов из более электроотрицательного азота. Например, согласно исследованию [1], Ti₃CN продемонстрировал в 5 раз более высокий молярный коэффициент поглощения света по сравнению с Ti₂C. Соединения циркония отличаются высокой биосовместимостью и противовоспалительной активностью. В работе [2] показали, что ZrC проявляет супероксиддисмутазную каталитическую активность, что обеспечивает захват АФК и выраженный противовоспалительный эффект.

В данной работе были получены карбонитриды циркония Zr(C_xN_y) с различным соотношением углерода к азоту методами механического активирования и самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Полученные порошки Zr(C_{0,5}N_y) и Zr(C_{0,9}N_y) представляют собой агломераты субмикронных и наноразмерных частиц от 2 до 40 мкм. Наночастицы Zr(C_{0,5}N_y) и Zr(C_{0,9}N_y) размером 80,3 ± 24,1 нм и 86,2 ± 23,6 нм соответственно были получены путем измельчения порошковых образцов в высокозергетической планетарно-шаровой мельнице и

обработкой ультразвуковым зондом в N-метилпирролидоне. Перевод наночастиц в водную среду был осуществлен путем модификации поверхности молекулами поливинилпирролидона.

Список используемой литературы:

- [1] Y. Zhu, X. Tang, Q. Liu et al // Small. 2022. V. 18. №. #2200646.
- [2] D. Liu, X. Dai, W. Zhang et al. // Biomaterials. 2023. V. 292. #121917.

**ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК TZP -
КЕРАМИКИ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ ПУТЁМ
БАРОТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ**

Гречишников Н.В.* , Ильичёва А.А., Михайлина Н.А., Падалко А.Г.,
Пенькова О.И., Подзорова Л.И., Пыров М.С.

*Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН,
Москва, Россия
nklgrchshnky@yandex.ru*

Важным направлением современного материаловедения является создание материалов, повышающих качество и увеличение продолжительности активной жизни человека. Керамические материалы в большей степени, чем металлы и полимеры, отвечают требованиям биологической совместимости, что определяет их востребованность в медицинской практике. Материалы на основе диоксида циркония (TZP) нашли применение для изготовления имплантатов для хирургического лечения травм, заболеваний позвоночника, суставов. Наибольшее распространение керамики TZP приобрели как стоматологические реставрации в ортопедической стоматологии, благодаря сочетанию высоких механических свойств с цветовыми характеристиками близкими естественному цвету зубов. Различная степень прозрачности керамики определяет использование для маскировки цвета опорных структур или для эстетической реставрации фронтальных зубов. Известно, что путем баротермической обработки (БТО) можно значительно снизить пористость, присутствие которой оказывает влияние на механические и оптические свойства керамики.

Цель работы: установление влияния БТО на механические и оптические характеристики разработанных керамических материалов в модифицированных системах $Zr_{1-n}[Yb]_nO_2$ и $Zr_{1-n}[Sm]_nO_2$, защищенных патентами РФ [1-3] и предназначенных для изготовления изделий конструкционного назначения, преимущественно в ортопедической стоматологии.

Баротермическую обработку образцов, полученных по технологическим схемам, приведенным в указанных патентах, осуществляли на установке горячего изостатического прессования НИРР 25/70-200-2000 (ABRA, Швейцария) при умеренно высоких давлении аргона и температуре. Результаты определения характеристик материалов до и после БТО представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Физико-механические характеристики образцов керамики до и после БТО

Образец, по патенту	Технология	Побш., %	σ , МПа, ± 50	HV, ГПа	$K_{прозр.}$, %
2681788 С1	до БТО	0,6	900	$14,3 \pm 0,7$	0,7
	после БТО	0,4	950	$17,1 \pm 1,0$	7,7
2744546 С1	до БТО	0,5	900	$12,5 \pm 0,6$	1,2
	после БТО	0,3	920	$16,4 \pm 0,8$	12,7
2838117 С1	до БТО	0,8	800	$11,0 \pm 0,5$	1,4
	после БТО	0,4	850	$12,0 \pm 1,0$	11,5

После БТО все образцы уплотнились, повысились значения прочности при статическом изгибе и микротвердости. Образцы до БТО не обладают прозрачностью при толщине $1,05 \pm 0,08$ мм, после БТО все образцы, приобрели полупрозрачность, коэффициент прозрачности составил 7,7 - 12,7%. Разработанные материалы соответствуют ISO 13356: 2015, и могут использоваться для изготовления одиночных зубных коронок, а также мостовидных протезов.

Список используемой литературы:

- [1] Подзорова Л.И., Ильичёва А.А., Михайлина Н.А. и др. Патент RU 2681788 С1.2019
[2] Подзорова Л.И., Ильичёва А.А., Кутузова В.Е. и др. Патент RU 2744546 С1. 2021
[3] Подзорова Л.И., Ильичёва А.А., Михайлина Н.А. и др. Патент RU 2838117 С1.2025

СИНТЕЗ КАРБОНАТ-ГИДРОКСИАПАТИТА МЕХАНОХИМИЧЕСКИМ СПОСОБОМ

Макарова С.В.*, Булина Н.В.

Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск,

Россия

**makarova@solid.nsc.ru*

Биосовместимость и биоактивность имплантатов, применяемых в ортопедии и стоматологии, может быть существенно повышена за счет нанесения на их поверхность биоактивного покрытия. Одним из таких материалов является карбонат-замещенный гидроксиапатит (КГА), являющийся аналогом зубной и костной тканей человека. В литературе описаны три варианта возможной локализации карбонат-иона в структуре ГА: в позиции ОН-группы (А-КГА), в позиции фосфатной группы (В-КГА), смешанный вариант (АВ-КГА). Целью данной работы было исследование продуктов механохимического синтеза при целенаправленном введении в реакционную среду карбонат-иона для получения КГА А- и В-типа (Рисунок 1).

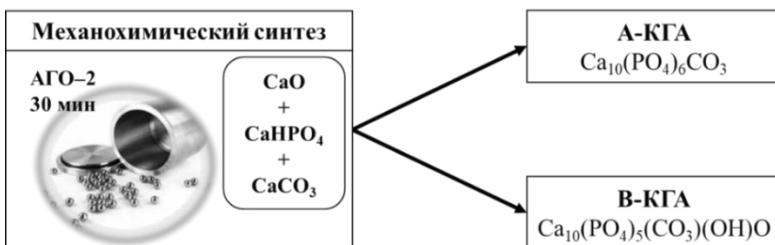


Рисунок 1 – Схема синтеза КГА А- и В-типа

При исследовании продуктов механохимической обработки в планетарной шаровой мельнице АГО-2 установлено, что все синтезированные материалы однофазны (Рисунок 2а) и имеют кристаллическую структуру ГА. На ИК-спектрах наблюдаются колебания карбонатных групп, характерных для локализации в структуре ГА (Рисунок 2б).

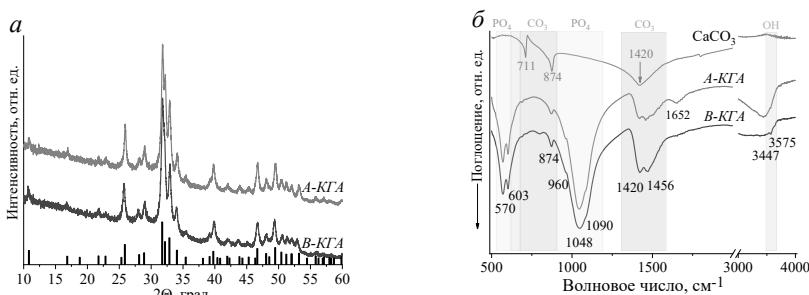


Рисунок 2 – Дифрактограммы (а) и ИК-спектры (б) образцов после 30 мин МХС

Установлено, что в процессе механохимического синтеза формируется КГА смешанного АВ-типа с преимущественной положением карбонатного иона в позиции фосфатной группы в обоих образцах, что вероятно связано с наличием молекул воды в кристаллической решетке и низкой степенью кристалличности образцов. Путем последующего отжига в атмосфере воздуха возможно получение фаз А-КГА и В-КГА, однако необходимо учитывать их низкую термическую стабильность. По данным синхронного термического анализа выделение карбоната из структуры КГА начинается с 600 °C и длится до 1300 °C в обоих вариантах замещения.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИХТМ СО РАН № 121032500064-8.

СЕКЦИЯ 3

Полимерные материалы

УСТНЫЕ ДОКЛАДЫ

Приглашенный доклад

МОДИФИКАЦИИ ПОЛИЭЛЕКТРОЛИТОВ ДЛЯ БИОСЕЛЕКТИВНОЙ РЕГУЛЯЦИИ МИКРОБИЦИДНЫХ И ПРОТИВОВИРУСНЫХ ЭФФЕКТОВ

Сербин А.В.^{1,2*}, Алиханова О.Л.^{1,2}, Больщиков Б.Д.¹, Сивов Н.А.¹

¹ Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчева РАН, Москва,
Россия

² ИЦ биомодуляторов и лекарственных систем НИФ Здоровья, Москва,
Россия

*serbin@ips.ac.ru

Электролиты. Наличие и взаимодействия электрически заряженных структур критически важны в организации биологических форм жизни. Её материальный фундамент выстраивается и эволюционирует от ионов до ионизируемых групп в составе “малых”, олигомерных и полимерных(макро) молекул: вода, соли, метаболиты...→ липиды...→ белки, полисахариды, РНК/ДНК. В этом ряду ключевая роль в самоорганизации молекулярных структур до уровня биологических систем принадлежит именно био-полимерам, ковалентно аккумулирующим энергию макромолекулярной целостности с потенциалом (внутри-) и (меж-) молекулярных связей и взаимодействий, достаточным для структурно-функционального противостояния хаосу теплового ($\sim 300 \pm 50$ К) разрушения. При этом ионно-электростатическая составляющая весьма существенна для взаимного узнавания, регуляции направлений и траекторий сближения или отталкивания, конформационных перестроек, а также переноса-накопления энергии и стабилизации био-релевантных структур и их силовых полей. Это имеет фундаментально существенное значение в прикладных разработках новых материалов/препаратах биомедицинского, в частности, бактерицидного и противовирусного назначения, а также для адекватного выбора в этих целях природных или искусственно-синтетических полиэлектролитов (ПЭ), как заряд-избирательных платформ.

Клетки (и бактерии). Внешняя поверхность клеток несёт избыточный потенциал отрицательного заряда. Поэтому положительно заряженные – катионные ПЭ (КПЭ⁺) активно атакуют клетки и проявляют повышенную цитотоксичность, по сравнению с анионными (АПЭ⁻), что ограничивает допустимый диапазон применения КПЭ⁺ в контакте с клетками организма. Но цитотоксичность в отношении клеток бактерий –

бактерицидность КПЭ⁺ эффективна в дезинфектантах, антисептиках и средствах противомикробной защиты.

Вирусы, эволюционируя как генетические паразиты клеток, репродуцируют вовне инфицированной клетки вирионы, оптимизируя их структуру на поиск и заражение новых клеток: АПЭ⁻ родственный геном вириона (ДНК⁻/РНК⁻) пакуется в сердцевину белкового футляра (капсида), а сенсорные шипы внешних гликопротеинов несут положительный заряд, по сути, супрамолекулярного КПЭ⁺. Это ускоряет движение вирионов к поверхности клеток.

АПЭ⁻, в силу противоположной ионизации, обладают заряд-селективным потенциалом перехвата вирионов и их нейтрализации в конкуренции с одноименным зарядом клеток, препятствуя их инфицированию, а, имея сопоставимую с КПЭ⁺ растворимость в водных средах, АПЭ⁻ существенно превосходят КПЭ⁺ по токсикологической безопасности. Таким образом, если КПЭ⁺ предпочтительны для “жесткой” бактерицидной функциональности, то АПЭ⁻ более целесообразны, как биосовместимые противовирусные платформы.

Модификации ПЭ (МПЭ). Системный анализ текущих результатов исследований в этой области, кроме обозначенных базовых приоритетов применимости КПЭ⁺/АПЭ⁻ платформ, выявил ряд значимых факторов и закономерностей многократного (на порядки) усиления уровней эффективности и селективности микробицидной и конкретизированной вирус-ингибирующей активности (при токсикологической безопасности) МПЭ производных. В докладе представлены и обсуждены направления и результативность соответствующих модификаций ПЭ как по составу, структуре и протяженности полимерного остова, так и по внедрению в боковые позиции цепей специализированных структур-синергистов заданной функциональности и целевой адгезионной стабилизации. Рассмотрены также аспекты механизмов избирательного воздействия МПЭ на уязвимые биополимерные мишени.

*Исследование выполнено при поддержке Гос. задания ИНХС РАН
(124032600004-0)*

Приглашенный доклад

**БИОДЕГРАДИРУЕМЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ
ТЕХНОЛОГИЙ МЕДИЦИНСКОЙ 3D-ПЕЧАТИ**

Седуш Н.Г.^{1,2*}, Крупнин А.Е.², Калинин К.Т.², Королев С.В.³,
Чвалун С.Н.^{1,2}

¹ Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С.

Ениколовова РАН, Москва, Россия

² НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

³ Российский научный центр хирургии им. академика Б.В. Петровского,

Москва, Россия

*nsedush@ispmt.ru

Биодеградируемые биосовместимые полимеры на основе циклических сложных эфиров активно применяются для создания изделий медицинского назначения: матриксов и скаффолдов для тканевой инженерии, хирургических нитей, сосудистых стентов, а также широкого спектра изделий для травматологии, ортопедии и челюстно-лицевой хирургии. В последнее время для изготовления таких имплантируемых изделий все чаще используются аддитивные технологии. 3D-печать обеспечивает возможность оперативного изготовления имплантатов сложной конструкции, в том числе персонализированных, т.е. спроектированных для конкретного пациента с учетом особенностей его анатомии и патологии. Однако крайне ограниченный выбор доступных для 3D-печати биодеградируемых материалов медицинской чистоты значительно тормозит развитие этого направления. Поэтому актуальной задачей является создание материалов в различных формах (прутки, порошки, УФ-отверждаемые композиции) для соответствующих технологий 3D-печати. Для регулирования физико-химических характеристик и сроков деградации конечных изделий важно создать материалы разного химического состава. В докладе будут представлены разработанные подходы для получения биоразлагаемых материалов на основе олигомеров и полимеров лактида и ϵ -капролактона для технологий FDM-, SLS-, фотополимерной печати, а также биопечати. Будут представлены примеры применения созданных материалов для 3D-печати биодеградируемых скаффолдов, спинальных и сосудистых имплантатов.

Приглашенный доклад

**РЫБНЫЙ ЖЕЛАТИН, МОДИФИЦИРОВАННЫЙ АГАРОМ,
КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЙ ГЕЛЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДЛЯ
КАПСУЛИРОВАНИЯ**

Воронько Н.Г.^{1*}, Кузина Т.Д.¹, Кучина Ю.А.¹, Зуев Ю.Ф.², Деркач С.Р.¹

¹*Мурманский арктический университет, Мурманск, Россия*

²*Казанский институт биохимии и биофизики ФИЦ КазНЦ РАН, Казань,
Россия*

* voronkong@mauniver.ru

Полипептид желатин – продукт деструкции коллагена – является хорошо известным и давно используемым биоматериалом для капсулирования терапевтических агентов и лекарств с целью их адресной доставки в организм человека. При этом в технологии капсулирования традиционно используется желатин из млекопитающих (свиней и крупного рогатого скота). Хорошей альтернативой желатину из млекопитающих является рыбный желатин, недооценённым в настоящее время источником которого является вторичное сырьё рыбообрабатывающей промышленности [1]. Однако коллаген рыб (особенно холодноводных) характеризуется низким содержанием пролина и гидроксипролина по сравнению с коллагеном млекопитающих [2, 3]. В результате этого водные системы рыбного желатина обладают низкими температурами золь↔гель перехода, а сформированные гидрогели (как материал стенок капсул) – хрупкой и пористой микроструктурой, а также – невысокой упругостью и прочностью [3, 4].

Известно, что желатин с полисахаридами формирует в объёме водной фазы супрамолекулярные комплексы за счёт нековалентных взаимодействий: электростатических и гидрофобных, водородных связей, стерических факторов [1, 5]. В связи с этим в работе была поставлена цель решить обозначенные выше проблемы комплексного использования водных биоресурсов и повышения качества рыбного желатина путём его модификации сульфатированным полисахаридом из красных морских водорослей агаром.

Желатин получали из кожи атлантической трески путём термической деструкции в кислой среде [2, 4]. Гель полученного желатина обладает более плотной микроструктурой с меньшим количеством пор, чем гель коммерческого образца из кожи холодноводных рыб, по своим характеристикам текстура геля приближается к коммерческому образцу из свиной кожи [3, 4]. Использовали коммерческий образец агара (Sigma–Aldrich Corp.).

Показано, что в результате формирования комплексов желатин–агар в водной смеси биополимеров формируются крупные частицы дисперсной фазы, ζ -потенциал которых зависит от массового соотношения агар/желатин Z , pH и ионной силы I . Построены фазовые диаграммы водных смесей биополимеров в координатах pH(Z) и pH(I). Показано, что при «естественных» значениях pH исследуемые системы являются дисперсиями комплексов без выделения коацерватной фазы. Переход в кислую область приводит к выделению из дисперсии коацерватов. Переход в щелочную область приводит систему к состоянию однофазного раствора отдельных не связанных биополимеров. Наблюдается корреляция коллоидно-химических характеристик золей комплексов желатин–агар с реологическими параметрами гелей, сформированных при охлаждении этих золей. Установлено оптимальное соотношение биополимеров, при котором формируется комплексный гель с плотной текстурой и приемлемыми значениями температур золь \leftrightarrow гель перехода, модуля упругости на плато G'_{pl} и предела текучести σ_{y} .

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ № 23-64-10020.

Список используемой литературы:

- [1] S.R. Derkach, N.G. Voron'ko, Yu.A. Kuchina et al. // Polymers. 2020. V. 12. #3051.
- [2] S.R. Derkach, Yu.A. Kuchina, A.V. Baryshnikov et al. // Polymers. 2019. V. 11. #1724.
- [3] S.R. Derkach, N.G. Voron'ko, Yu.A. Kuchina et al. // Gels. 2024. V. 10. #486.
- [4] Yu.F. Zuev, S.R. Derkach, L.R. Bogdanova et al. // Gels. 2023. V. 9. #990.
- [5] S.R. Derkach, N.G. Voron'ko, Yu.A. Kuchina // Polymers. 2022. V. 14. #2777.

Приглашенный доклад

**ПОСТОБРАБОТКА ПОЛИМЕРНЫХ БИОМАТЕРИАЛОВ
МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ, ПОЛУЧЕННЫХ В
АДДИТИВНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ**

Гупта В.¹, Сингх Дж.¹, Мудгал Д.¹, Хейфец М.Л.², Грецкий Н.Л.²,
Хилько Д.Н.³, Губкин С.В.⁴

¹Тхапарский инженерно-технологический институт, Патнала, Индия

²ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларусь», Минск, Беларусь

³ООО «ШТРАБАГ Инжиниринг Центр», Минск, Беларусь

⁴ГНУ «Институт физиологии НАН Беларусь», Минск, Беларусь

Актуальной проблемой аддитивного производства полимерных биосовместимых изделий медицинского назначения является их постобработка с целью получения требуемого качества поверхностей и кромок. В этой связи рассмотрим тестовую обработку образцов костных пластин размерами 80x10x5мм, изготовленных из полимерных биосовместимых материалов (PLA), методом послойного синтеза (FDM-печать) с использованием термопластичной нити (рис.1). Постобработка полимерных деталей проводилась с использованием виброгалтовочной установки лоткового типа Rösler R210/530 TE-30 с объемом рабочей емкости 20 л с системой очистки и рециркуляции рабочей жидкости Z800 K-HA (рис.2).

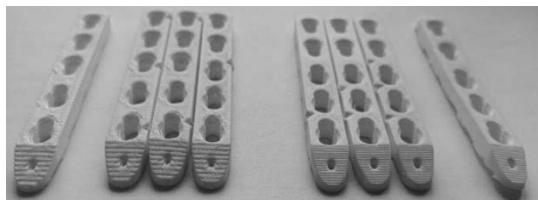


Рисунок 1 – Полимерные пластины, полученные методом послойного синтеза (FDM-печать)



Рисунок 2 – Виброгалтовочная установка лоткового типа

В качестве технологической среды были выбраны абразивные керамические тела RXX 10/15 S (рис.3) и рабочая жидкость (1,5% -ый водный раствор компаунда ZF 113). Выбор указанного абразива обусловлен его высокой агрессивностью, обеспечивающей максимальный съем материала без нарушения объемной структуры полимера. Рабочая жидкость позволяет удалять шлам из зоны обработки. Тип виброустановки лоткового типа небольшого объема выбран исходя из формы, размеров и веса обрабатываемых деталей.

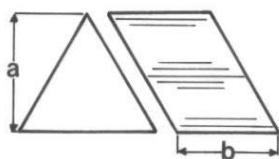
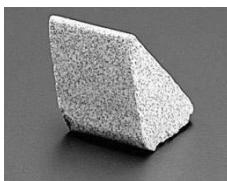


Рисунок 3 – Керамические абразивные тела в форме треугольника с наклонным срезом

В результате тестовой обработки партий полимерных деталей

продолжительностью в 6 часов с использованием приведенных материалов, технологических сред и оборудования установлено [1]: наблюдается минимальный съем материала с поверхности деталей, острые кромки притуплены, геометрия и размер отверстий не изменены, разрушение текстуры поверхности не наблюдается. Увеличение времени обработки и использование других типоразмеров абразива является нецелесообразным.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований «ГКНТ – Индия – 2023» №Т23ИНДГ-001.

[1] Гупта В., Сингх Дж., Мудгал Д., Хейфец М.Л., Грецкий Н.Л., Хилько Д.Н. Послойный синтез изделий с последующей обработкой абразивным инструментом // Перспективы развития аддитивных технологий в Республике Беларусь: сб. докл. Междунар. научн.-практ. симп., Минск 2024 / Беларусская наука, 2024. – С. 30-35.

ИНОВАЦИОННЫЕ ВОЛОКОННЫЕ ПОВЯЗКИ ПКЛ, НЧ СИО И БАНЕОЦИНА ДЛЯ ЛЕЧЕНИЯ РАНЕВЫХ ИНФЕКЦИЙ

Котякова К.Ю.*, Игнатов С.Г., Каршиева С.Ш., Штанский Д.В.
*Национальный исследовательский технологический университет
МИСИС, Москва, Россия*
**kristinkagudz@mail.ru*

Раневые бактериальные инфекции представляют собой значительную проблему здравоохранения, особенно в связи с растущей распространенностью устойчивых к антибиотикам организмов. Антибиотики часто не обеспечивают эффективного лечения из-за ограниченного проникновения в мягкие ткани, возникновения резистентности и недостаточной локальной концентрации в местах воспаления. Это требует поиска новых решений, которые могут преодолеть недостатки традиционной терапии. Раневые бактериальные инфекции требуют инновационных решений в терапии. В данной работе представлены результаты разработки многофункциональных перевязочных материалов на основе волокон поликарболактона (ПКЛ), модифицированных наночастицами (НЧ) оксида меди (CuO) и антибиотиком Банеоцин (Ban) (Рисунок 1).

Для создания нановолокнистых материалов использовался метод электроформования. Раствор ПКЛ готовили в смеси уксусной и

муравьиной кислоты. НЧ CuO синтезировали путем восстановления соли-предшественника $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ с последующим прокаливанием. Морфологию поверхности полученных нановолокон исследовали с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с энергодисперсионным анализом (ЭДС). Химический состав нановолокон ПКЛ был изучен методами инфракрасной спектроскопии Фурье (ИК) и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). Проведена детальная оценка антибактериальной и противогрибковой активности материалов в отношении патогенных бактерий и грибков. Также были выполнены испытания *in vitro* и *in vivo* для оценки биосовместимости и эффективности разработанных материалов.

Разработаны бактерицидные, фунгицидные и гемостатические волоконные повязки ПКЛ с НЧ CuO и иммобилизованным Van через COOH-группы. Показано, что количество иммобилизованного Van обратно пропорционально содержанию НЧ CuO. Полученные материалы демонстрируют широкий спектр антибактериальной активности против различных патогенных бактерий (*S. aureus*, *P. aeruginosa*, *E. faecium*, *E. coli*, *A. Baumannii*) и противогрибковую активность против *C. auris*. Исследования показали, что разработанные материалы обладают низкой цитотоксичностью, особенно при добавлении Van, не вызывают гемолиза и проявляют гемостатические свойства. Важно отметить, что ПКЛ, модифицированный COOH и иммобилизованный Van с 2 и 4 мас.% НЧ CuO, обладает высокой прочностью на разрыв, превышающей показатели многих коммерческих раневых повязок, что делает их перспективным материалом для регенеративной медицины.

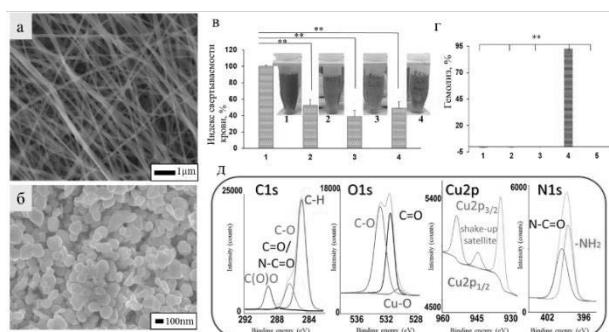


Рисунок 1 – СЭМ изображения волокон ПКЛ (а) и НЧ CuO (б), анализ гемолиза (в-г) и РФЭС спектры модифицированного образца

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ № 24-79-10121.

САМОФОРМИРУЕМЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ ЧАСТИЦЫ НА СТРУКТУРИРОВАННЫХ ТЕМПЛАТАХ С НИЗКОЙ ЭНЕРГИЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Абдурашитов А.С.^{1,2*}, Прошин П.И.², Сухоруков Г.Б.^{1,2}

¹Сколковский Институт Науки и Технологий, Москва, Россия

²ООО “Лифт Центр”, Москва, Россия

****a.abdurashitov@lift.center***

Полимерные частицы сложной (не сферической) формы представляют особый интерес для различных областей наук, включая биотехнологию и медицину.

Помимо свойств поверхности частицы, немаловажную роль при ее взаимодействии с живыми клетками организма играет ее геометрический размер и форма [1]. Частицы, содержащие острые углы могут оказывать повышенное локальное давление на мембрану или является концентратором поверхностного заряда [2]. Данные факты позволяют оптимальные носители биологически активных веществ, которые могут быть применены, например, в местах повышенного гидростатического давления внутри организма (опухолевые ткани), для более эффективного проникновения внутрь клеток или разрушении их мембран.

Однако, методы создания такого рода частиц сложной формы сопряжены с рядом трудностей и, пока, слабо масштабируемые. Авторы предлагают метод создания частиц сложной формы, основанный на взаимодействии тонкой полимерной пленки со структурированным темплатом. В силу комбинации гидродинамических и поверхностных эффектов становится возможным саморазделение тонкой полимерной пленки на независимые участки, повторяющие рельеф темплата.

На рисунке 1 приведена краткая схема метода, а также изображения микрочастиц различной формы, полученное методами сканирующей электронной микроскопии.

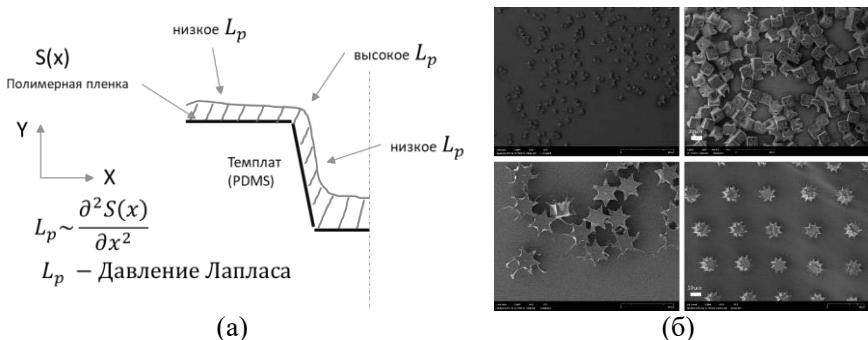


Рисунок 1 – (а) – схематическое описание распределения давления

Лапласа в тонкой полимерной пленке. (б) – электронные
микрофотографии независимых частиц, полученные данным методом.

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ № 25-63-00019.

Список используемой литературы:

- [1] Zheng M., Yu J. The effect of particle shape and size on cellular uptake // Drug Deliv. and Transl. Res. 2016. Т. 6. № 1. С. 67–72.
- [2] Sadat S. M. A., Jahan S. T., Haddadi A. Effects of Size and Surface Charge of Polymeric Nanoparticles on in Vitro and in Vivo Applications // JBNB. 2016. Т. 07. № 02. С. 91–108.

БИОМАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ СИНТЕТИЧЕСКИХ ПЕПТИДОВ ДЛЯ РЕГЕНЕРАЦИИ НЕРВОВ

Дайоб К.*¹, Зухайб М., Абдуллин Т.И.

Институт фундаментальной медицины и биологии, Казанский

(Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

*kdaib@stud.kpfu.ru

Травматические повреждения периферических нервов (ПН) представляют серьезную медицинскую и социальную проблему вследствие негативного влияния на сенсомоторную функцию и качество жизни пациентов. Применяемые методы хирургического лечения травм ПН, основанные на прямом сшивании концов нерва или вставке фрагмента аутологичного нерва, имеют ряд недостатков, связанных с побочными эффектами [1]. Эти недостатки могут быть преодолены с помощью кондукторов – имплантируемых биоматериалов, способных поддерживать и направлять регенерацию нервных тканей.

Значительный прогресс достигнут в конструировании кондуктов на основе синтетических и природных полимеров, формирующих каркас для поддержки клеток ПН и прорастания аксонов. Однако, сами по себе полимерные каркасы, имеют ограниченную способность восстанавливать ПН. По этой причине их необходимо активировать факторами регенерации, среди которых широкое распространение получили клеточные и рекомбинантные продукты, в их числе, стволовые клетки, факторы роста (ФР) и генные препараты [2]. Перспективными, но менее исследованными факторами регенерации ПН являются синтетические пептиды, которые могут быть использованы как для модификации полимерных каркасов, так и их формирования из самособирающихся пептидов. Преимуществами синтетических пептидов перед полноразмерными белками (белки внеклеточного матрикса, ФР и др.) являются повышенная чистота, стабильность и широкие возможности в химической функционализации для комбинирования с кондуктами.

В докладе будут рассмотрены предложенные способы формирования биоматериалов на основе синтетических пептидов для инженерии нервных и других мягких тканей. Более подробно будут рассмотрены подходы, реализуемые в нашей группе, которые включают получение пористых синтетических каркасов, активированных пептидами внеклеточного матрикса с использованием аффинных взаимодействий [3-6].

Работа выполнена за счет средств гранта, выделенного Казанскому федеральному университету на выполнение государственного задания в сфере научной деятельности (проект FZSM-2025-0002).

Список используемой литературы:

- [1] D. P. Kuffler. // Prog. Neurobiol. 2014.V.116. #1-12.
- [2] A. Singh, S. Asikainen, A. K. Teotia et al.// ACS Appl. Mater. Interfaces. 2018. V.10. #43327.
- [3] M. Zoughaib, D. Luong, R. Garifullin et al.// MSEC. 2021. V.120. #111660.
- [4] M. Zoughaib, K. Dayob, S. Avdokushina et al.// Gels. 2023.V.9. #9020105.
- [5] K. Dayob, A. Zengin, R. Garifullin et al.// Micromachines. 2023. V.14. #883.
- [6] A. Yergeshov, M. Zoughaib, K. Dayob et al.// Pharmaceutics. 2024. V. 16. #1569.

**БИОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ
ПОЛИГИДРОКСИАЛКАНОАТОВ, ПРОИЗВЕДЕННЫХ МЕТОДОМ
FDM-ФОРМОВАНИЯ, ДЛЯ БИОИНЖЕНЕРИИ ТВЕРДЫХ
ТКАНЕЙ**

Кистерский К.А.

Московский государственный технический университет им. Н.Э.

Баумана, Москва, Россия

kisterski@yandex.ru

В работе проведен анализ физико-механических, биологических и структурных характеристик полимеров класса полигидроксиалканоатов (далее - ПГА) и нативной костной ткани. Полученные результаты свидетельствуют о значительном потенциале ПГА в качестве альтернативного материала для костной пластики, в том числе в качестве конкурентоспособной замены аутотрансплантатам, считающимся текущим "золотым стандартом" в ортопедии, что улучшит качество жизни пациента, а использование метода FDM-формования позволит персонифицировать изделия.

Полимеры класса ПГА относятся к активным материалам обладающие свойствами полной биосовместимости, контролируемой биодеградации и остеоиндукции, в то же время термопластичность и широкое «окно» температуры плавления [1] позволяет использовать их в качестве катриджного материала (филамента) для 3D-принтера технологии послойного наплавления материала (FDM).

Сочетание перечисленных свойств открывает перспективу создания «синтетических костей» - персонализированных, полностью биодеградируемых имплантатов, точно соответствующих индивидуальным анатомо-морфофункциональным особенностям пациента с помощью FDM-технологии. На текущий момент в мировой практике отсутствуют аналогичные изделия, одновременно обеспечивающие персонализацию, остеоиндукцию, контролируемую полную биодеградацию и абсолютную биосовместимость. Сопоставимая скорость биодеградации объемных ПГА-конструкций и новообразования кости обеспечивает замещение имплантата регенерированной тканью.

Изучены характеристики степени кристалличности используемой полимерной композиции поли-3-гидроксибутират поли-3-гидроксивалерат (15%) (далее – ПГБВ) подвергнутой 4 циклам расплавления-стеклования. Согласно полученным данным оборудования Bruker D8 ADVANCE (Германия) степень кристалличности при этом увеличивается незначительно, с 55% до 60%, а пики на дифрактограмме фазового состава значимо не изменяются. Отмечено изменение

молекулярной массы полимера с 530 до 390 кДа при обработке.

Физико-механические свойства изделий из ПГБВ, изготовленных согласно ГОСТ 12019-66, изучены с использованием испытательной машины Instron 5665 и программного обеспечения BlueHill. Тестирование образцов проходило согласно ГОСТ 11262-2017, ГОСТ 4648-2014, ГОСТ 4651-2014 [3, 4, 5]. Образцы из ПГБВ для исследования получены согласно ГОСТ 12019-66 (Пластмассы. Изготовление образцов для испытания из термопластов.). Модуль Юнга каркаса: 207.52 ± 19.12 параллельно и 241.34 ± 7.62 перпендикулярно слоям. Прочность на сжатие: 19.45 ± 2.10 и 22.43 ± 1.89 МПа соответственно. Проведен сравнительный анализ полученных данных, с использованием литературных данных для кости [1, 6, 7].

Высокая биосовместимость ПГБВ подтверждена успешной колонизацией поверхности каркасов клетками линии NIH 3T3. Эксперименты на свиньях продемонстрировали полное восстановление костного дефекта посредством ремоделирования в течение 150 дней [1].

Список используемой литературы:

- [1] Волова Т.Г. и др. // Высокомолекулярные соединения. Серия А, 2013, 55(7), 775-775
- [2] Shishatskaya E.I. et al. //International Journal of Molecular Sciences, 2023, 24(16) 12969.
- [3] ГОСТ 11262-2017
- [4] ГОСТ 4648-2014
- [5] ГОСТ 4651-2014
- [6] Carter D.R., Spengler D.M. // Clinical Orthopaedics and Related Research (1976-2007), 1978, 135, 192-217.
- [7] Brown T.D., Ferguson A.B. // Acta Orthopaedica Scandinavica, 1980, 51(1-6), 429-437.

УПРУГОВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ОБРАЗЦОВ ИЗ ПОЛИЛАКТИДА: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ СООТНОШЕНИЙ

Келлер И.Э.¹, Виндокуров И.В.¹, Адамов А.А.², Еленская Н.В.^{1*},
Ташкинов М.А.¹

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

²Институт Механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

*n.elenskaya@pstu.ru

Рост потребности в регенерации костной ткани наблюдается ежегодно. Хотя кость обладает естественной способностью к восстановлению, при значительных повреждениях этого становится недостаточно. Тканеинженерные подходы для таких случаев предполагают использование механических метаматериалов – скаффолдов. Эти конструкции должны успешно имитировать структуру и свойства замещаемой костной ткани, обеспечивать структурную поддержку окружающих тканей, обеспечивать среду для пролиферации и дифференцировки клеток [1]. При этом к ключевым критериям при выборе материала костных скаффолдов относятся биосовместимость и биорезорбцию. В этом смысле полимерные материалы выделяются как перспективные, так как удовлетворяют механическим требованиям, обладают контролируемой биодеградацией, биосовместимы и улучшают адгезию клеток благодаря шероховатости поверхности. Несмотря на функционирование в условиях малых деформаций в составе биомеханической системы, локальные напряжения в его решетчатой структуре могут значительно превышатьложенную нагрузку [2]. Это создает риск потери функциональности, пластической деформации и разрушения. Поэтому необходимо учитывать не только упругие, но и неупругие свойства материала [3].

Целью данного исследования было разработать модель упруговязкопластичности для прогнозирования механического отклика скаффолдов из полилактида. Для этого были изучены механические свойства полилактида (PLA) из серии испытаний цилиндрических образцов ($\varnothing=20$ мм, $h=19.5\pm0.2$ мм), изготовленных методом FDM-печати. Образцы испытывались на стесненное и свободное сжатие при монотонном нагружении и на свободное сжатие при циклическом нагружении. Для стесненного сжатия испытания состояли из трех циклов нагружения образца до 60 МПа при полной разгрузке и постоянной скорости перемещения траверсы. Свободное сжатие образцов проводилось также для 60 МПа в рамках двух программ нагружения: испытаний при различных скоростях деформации и испытаний при фиксированной скорости деформации и поэтапным нагружением до амплитудного значения напряжений, выдержке при фиксированной деформации в течение 300 с, полной разгрузке и выдержке при фиксированной деформации в течение 300 с. В рамках циклических испытаний на свободное сжатие было реализовано 100 отнулевых треугольных циклов деформации при различных скоростях перемещения траверсы. Было получено, что в условиях стесненного сжатия образцы не зависят от скорости деформации, что позволило оценить объемные изменения образца как упругие. При циклическом нагружении в условиях свободного

сжатия было выявлено и описано вязкоупругое поведение материала. Полученные данные описываются моделью упруговязкопластичности, в которой неупругое поведение материала описывается совместной работой вязкопластической и нелинейно-вязкой компонент. Полученные зависимости позволят повысить точность прогнозирования механического поведения скаффолов в условиях физиологических нагрузок.

Список используемой литературы:

- [1] M.V. Kiselevskiy, N.Y. Anisimova, A.V. Kapustin et al. // Biomimetics. 2023. V. 8. #546.
- [2] N. Elenskaya, M. Tashkinov, V. V Silberschmidt // Int. J. Solids Struct. 2025. V. 315. #113366
- [3] N. Elenskaya, M. Tashkinov, I. Vindokurov et all // J. Mech. Behav. Biomed. Mater. 2023 V. 147. #106146

МИКРОКАМЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ЛОКАЛЬНОЙ КОРРЕКЦИИ ХИМИЧЕСКОГО МИКРООКРУЖЕНИЯ В ОРГАНИЗМЕ

Ленгерт Е.В.^{1,2}, Степанова Т.В.², Гуслякова О.И.^{3,4}, Савкина А.А.²,
Приходженко Е.С.⁴, Иванов А.Н.², Сухоруков Г.Б.^{3,5}, Ермаков А.В.^{5*}

¹Институт молекулярной терапии, Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова, Москва, Россия

²Центральная научно-исследовательская лаборатория, Саратовский государственный медицинский университет им. В.И. Разумовского Минздрава России, Саратов, Россия

³Центр нейробиологии и нейрореабилитации имени В.И. Зельмана Сколковского института науки и технологий, Москва, Россия

⁴Научно-медицинский центр Саратовского государственного университета, Саратов, Россия

⁵Центр LIFT, Москва, Россия

**a.ermakov@lift.center*

Проблема эффективного управления процессами заживления ран остается одной из ключевых задач современной медицины и сопряжена с постоянно возрастающими затратами. Однако, выходя за рамки данной специфики, задача прецизионной коррекции биохимического микроокружения является фундаментальной для многих областей биомедицины.

В данной работе представлена инновационная микрокамерная технология, которая служит универсальной платформой для инкапсуляции широкого спектра активных соединений непосредственно на поверхности носителя. Уникальность нашего подхода заключается в возможности инкапсулировать даже те вещества, которые сложно или невозможно ввести в состав материалов с использованием традиционных методов. Это позволяет добиться способности к прецизионному и высоколокализованному регулированию биохимического профиля в заданной точке.

Разработанная методология демонстрирует универсальность и уже нашла применение во множестве направлений, включая создание диагностических систем, устройств для контролируемой доставки лекарств и биосенсоров. В рамках данного доклада мы сфокусируемся на применении этой технологии для коррекции химического микроокружения раневых дефектов.

Используя оригинальный метод инкапсуляции твердых порошкообразных веществ, мы обеспечили контролируемое и пролонгированное высвобождение биоактивных соединений, таких как антиоксиданты и пероксид водорода. Показано, что тонкая модуляция окислительного стресса и пролонгированное действие ультразвуковых доз этих соединений способствуют модуляции ангиогенеза, оказывают выраженное антисептическое и противовоспалительное действие, а также стимулируют регенерацию тканей без образования рубцов.

Наблюдаемые биоэффекты повязок на основе микрокамер подчеркивают значительный потенциал передовых материалов и стратегий инкапсуляции для активной и тонкой регуляции биологического микроокружения. Предложенная техника закладывает основу для разработки систем, характеризующихся иерархической мультифункциональностью, и открывает уникальные возможности для развития новых стратегий в биомедицине, включая анизотропные манипуляции, адресную доставку, высвобождение по требованию и интеграцию с клеточной терапией.

ГИДРОГЕЛИ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ РАН НА ОСНОВЕ ПОЛИСАХАРИДОВ, СШИТЫХ ЛИМОННОЙ КИСЛОТОЙ

Чиканова Е.С.*, Короткова А.В., Котякова К.Ю., Макарец Ю.А.,
Штанский Д.В.

Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия

*chikanova.es@misis.ru

В последнее время область науки, занимающаяся синтезом и изучением функциональных гидрогелей, активно развивается. Благодаря уникальному набору свойств гидрогели находят применение в различных областях. В частности, в биоинженерии гидрогели применяются для изготовления раневых повязок, мировой рынок которых составил 476 млн долларов США в 2024 г. Гидрогели эффективно впитывают экссудат из раны и поддерживают рану влажной. Применение полисахаридов обеспечивает нужный уровень биосовместимости, а для улучшения механических характеристик используют методы сшивания. Кроме того, с целью придания готовому материалу определенных свойств в гидрогели добавляют различные наполнители.

В данной работе гидрогели получены из карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ, молекулярная масса – 1000 кДа) и гиалуроновой кислоты (ГК, молекулярная масса – 800 кДа) путем их сшивания лимонной кислотой (ЛК). В качестве наполнителей использовали нановолокна поликапролактона (ПКЛ), полученные в результате электроспиннинга, наночастицы CuO и ZnO и алоэ вера (АВ). Образцы были исследованы с помощью ИК-Фурье спектропсии, СЭМ с ЭДС. Были изучены внешний вид, степень набухания, деградация *in vitro* в tris-буфере и изотоническом растворе, pH, гидрофильтрующие, адгезионные, механические и антибактериальные свойства в отношении госпитальных патогенных штаммов.

Полученные прозрачные материалы в виде пленки толщиной 2 мм обладают высокими адгезионными и гидрофильтрующими характеристиками. Материалы обладают взаимосвязанной системой пор размером от 5 до 100 мкм. По данным FTIR подтверждено протекание реакции сшивания ОН-групп полисахаридов с помощью ЛК за счет выявления характерных мод колебаний C=O, C-O, O-C-O и C-O-C. Относительное удлинение материалов составляет 170 %. Модуль Юнга равен 0,8 кПа. Наибольшая степень набухания отмечена для образца с ZnO, CuO и АВ и равна 919, 749 и 792 % соответственно. Гидрогели стабильны в течение 7 суток в модельных средах, но выявлено, что скорость растворения в изотоническом растворе больше. Материалы показали антибактериальные свойства на штаммы грамположительных и грамотрицательных бактерий.

Таким образом, полученные материалы проявили антипатогенные, высокие механические и абсорбционные свойства, высокую стабильность, что делает гидрогели подходящими для создания раневых покрытий и эффективного восстановления ран.

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ № 25-19-00458

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРИСТОГО СКАФФОЛДА ИЗ PLA ОТ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ КОНСТРУКЦИИ

Ильина Е.Э., Королёв П.В., Маслов Л.Б.*

ФГБОУ ВО «ИГЭУ им. В.И. Ленина», Иваново, Россия

*leonid-maslov@mail.ru

Ранее была построена эффективная конечно-элементная модель системы «скаффолд-кость», которая рассматривается в трёхмерной постановке под действием механического нагружения для анализа процесса регенерации костной ткани в объёме пористого скаффолда. [1] Для наиболее успешного процесса вживления скаффолд должен быть выполнен из особого материала и должен обладать специфической внутренней структурой.

Полимолочная кислота (PLA) – один из наиболее часто используемых материалов в биомедицинском секторе благодаря своей технологичности, биосовместимости и биодеградируемости. [2] Существенным недостатком изделий из PLA являются недостаточные механические характеристики, что существенно ограничивает их область применения. Решением этой проблемы может служить особый подход в проектировании структуры пористости, когда достаточная прочность готового изделия достигается за счёт сочетания механических характеристик материала и конструкции.

Во избежание резорбции костной ткани на границах вживления скаффолд должен обладать схожими физико-механическими свойствами со свойствами каждого типа ткани в сечении кости, поэтому ему требуются легко контролируемые морфометрические характеристики, такие как взаимосвязанность, размер и форма пор, объём пористости и удельная площадь поверхности. В настоящее время актуальным решением этой задачи является проектирование геометрии пористости с помощью трижды периодических минимальных поверхностей (TPMS). Анализируя литературу последних лет, посвящённую данной тематике, можно сделать вывод, что в медицине чаще применяются решётки Schwarz-P, Schwarz-D, Giroid и I-WP. Они обладают высокой миметичностью, а также достаточной прочностью благодаря равномерному распределению напряжений. [3]

При проектировании скаффолов из PLA на основе TPMS следует учитывать, что индивидуальными эффективными упругими свойствами (ЭУС) обладают как материал, так и решётки. Причём свойства решёток напрямую зависят от геометрии, которую они заполняют. Таким образом, мы сталкиваемся с необходимостью определения ЭУС системы «конструкция-материал». Для анализа зависимости упругих характеристик от геометрии исходными данными являются продольные модули упругости, модули сдвига и коэффициенты Пуассона по осям X, Y, Z элементарных ячеек каждого типа выбранных решёток. Проведенные испытания для скаффолда, используемого при лечении диафизарного дефекта большеберцовой кости, показали, что ЭУС системы на 20-30% выше, чем ЭУС отдельно рассматриваемых ячеек. Такой подход позволяет оптимизировать механические свойства скаффолов с различными геометрическими параметрами в зависимости от выбранной геометрии TPMS-решёток, обеспечивающих пористость образцов в диапазоне 50-80%, и подобрать необходимую структуру пористости для повышения характеристик PLA.

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ № 25-21-20118.

Список используемой литературы:

- [1] Маслов Л.Б. // Прикладная математика и механика. 2019. Т. 83. № 5–6. С. 834–860.
- [2] Donate R., et al. // E-Polymers. V.20. P. 571-599. 2020.
- [3] Al-Ketan O., et al. // Materials & Design. V.191. #108618. 2020.

КОМБИНИРОВАННЫЙ ПОДХОД К ПОВЕРХНОСТНОМУ МОДИФИЦИРОВАНИЮ СКАФФОЛДОВ ПОЛИЛАКТИДА ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ БИОСОВМЕСТИМОСТИ

Брюзгина А.А.^{1*}, Лапуть О.А.¹, Зуза Д.А.², Курзина И.А.¹

¹Томский государственный университет, Томск, Россия

²Институт сильноточечной электроники СО РАН, Томск, Россия

***bryuzgina2016@mail.ru**

В медицинской практике использование тканеинженерных скаффолов из полилактида (ПЛ) затруднено из-за их плохой смачиваемости и низкой способности к взаимодействию с клетками на специфическом уровне [1]. Для преодоления этих недостатков используются технологии плазменной обработки, которые улучшают

смачиваемость и формируют реакционноспособные участки на поверхности, к которым могут прикрепляться биологически активные молекулы, способствующие клеточной адгезии [2]. В данной работе было изучено влияние комбинированного модифицирования поверхности скаффолдов ПЛ с использованием азотной плазмы и иммобилизации гиалуроновой кислоты (ГК) для улучшения их поверхностных характеристик.

Волокнистые скаффолды были получены методом электроспиннинга из 5% раствора ПЛ в дихлорметане. Обработка образцов азотной плазмой тлеющего разряда на стенде ОКТАГОН-ТЭСТ (Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия) проводилась в течение 5 минут. После этого образцы погружали в водные растворы ГК с концентрациями 0,25%, 0,5% и 1% до полного впитывания.

Согласно данным рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС), на обзорных РФЭ-спектрах показано наличие основных элементов в ПЛ – углерода и кислорода, при этом после обработки азотной плазмой образуется новый пик с энергией связи ~399,9 эВ, соответствующий атомарному азоту, что указывает на эффективность применения подобранного режима плазменного облучения для данных материалов.

Результаты исследования смачиваемости поверхности скаффолдов исходного ПЛ подтверждают гидрофобную природу поверхности полимера: значения краевого угла смачивания (КУС) составили $108,5 \pm 3,3^\circ$ и $126,2 \pm 3,8^\circ$ при контакте поверхности с водой и глицерином соответственно. После плазменной обработки поверхности скаффолдов ПЛ значения КУС снизились на 40° , а значение свободной поверхностной энергии увеличилось до 113,9 мН/м относительно необработанного ПЛ. Для образцов с покрытием ГК наименьшее значение ($74,3^\circ \pm 2,2$) составило для образцов с концентрацией ГК 1 масс. %, при этом концентрация ГК на поверхности не влияла на показатели смачивания. Таким образом, улучшение смачиваемости поверхности ПЛ достигается за счёт образования полярных азотсодержащих групп после плазменного воздействия и ковалентного связывания биомолекул ГК через амидные связи между карбоксильными группами ГК и аминогруппами на плазменно-модифицированной поверхности.

Полученные материалы обладают значительным потенциалом для использования в тканевой инженерии и регенеративной медицине, обеспечивая эффективную интеграцию с биологическими тканями.

Работа выполнена в рамках выполнения Государственного задания Минобрнауки России, проект № FSWM-2025-0013. Исследование

выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030).

Список используемой литературы:

- [1] Ajmal M. et al. // Journal of Cleaner Production, 2024, 479, 143985.
- [2] Laput O. A. et al. // Polymers, 2023, 15 (16), 3381.

**РАЗРАБОТКА РАНОЗАЖИВЛЯЮЩИХ КОАКСИАЛЬНЫХ
ПОВЯЗОК С АНТИБАКТЕРИАЛЬНЫМ ЭФФЕКТОМ НА ОСНОВЕ
ПОЛИКАПРОЛАКТОНА И КОЛЛАГЕНА**

Гаспарян К.Г.*, Котякова К.Ю.

Национальный исследовательский технологический университет

МИСИС, Москва, Россия

gasparyan.kr@yandex.ru

Кожные раны остаются актуальной проблемой здравоохранения, поскольку легко инфицируются, что ведёт к воспалению, замедленному заживлению и образованию рубцов. Традиционные повязки, такие как марля и бинты, не создают оптимальных условий для регенерации тканей и не обладают антибактериальными свойствами [1]. Современные перевязочные биоматериалы (гидрогели, плёнки) часто недостаточно прочны, плохо пропускают воздух и требуют частой замены. Перспективной альтернативой являются нетканые волокнистые материалы, обладающие высокой воздухопроницаемостью, прочностью и возможностью модификации. В связи с этим, цель данного исследования является разработка волокнистого коаксиального материала по типу «ядро-оболочка», полученного методом электроформования. Внутренний слой состоит из поликапролактона (ПКЛ), оболочки из коллагена (Кол). Для придания антибактериальных свойств материал модифицирован наночастицами (НЧ) оксида меди (CuO) и экстрактом алоэ вера. Были подобраны условия растворения коллагена и параметры электроформования, получены образцы ПКЛ-Кол. Исследования осуществлялись методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией, ИК-спектроскопии с преобразованием Фурье (ИК), измерения краевого угла смачивания (КУС), а также проведены *in vitro* испытания.

В результате проведенной работы были получены волокнистые коаксиальные материалы ПКЛ-Кол, а также осуществлено внедрение различных концентраций экстракта алоэ вера в формовочный раствор Кол и НЧ С. Методом СЭМ подтверждена однородность структуры, ИК и КУС

выявили характерные функциональные группы и улучшенную гидрофильность материалов (Рисунок 1), а также подтвердили успешное внедрение НЧ CuO и экстракта алоэ вера, что проявилось в выраженной антибактериальной активности материалов по отношению к тестируемым штаммам бактерий и грибков. Дальнейшие исследования будут включать комплексную биологическую оценку материалов, изучение их антибактериальных и ранозаживляющих свойств *in vitro* и *in vivo* для подтверждения клинической эффективности.

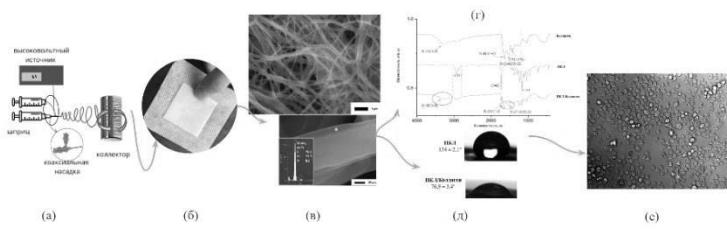


Рисунок 1 – Схема электроформования (а), образец материала (б), СЭМ ПКЛ-Кол (в), ИК ПКЛ-Кол (г), КУС ПКЛ-Кол (д), биологические испытания (е)

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ №24-79-10121.

Список используемой литературы:

[1] Wilkinson HN, Hardman MJ. // Open Biol. Wound healing: cellular mechanisms and pathological outcomes. 2020. 200223.

МГНОВЕННОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОЛЕКУЛ

Юнусов М.Б.

Казанский федеральный университет, Казань, Россия

yunusov_mb99@mail.ru

Актуальными задачами в таких областях как материаловедение, хемоинформатика и фармацевтика является поиск новых соединений с заданными полезными свойствами, а также, описание физико-химических особенностей уже известных соединений. Одной из наиболее важных характеристик молекул является энергия атомизации, которая определяет энергетическую устойчивость, пути протекания реакций и множество других особенностей соединения. В данной работе развивается метод,

основанный на комбинированном использовании квантово-механического моделирования и машинного обучения для прогнозирования энергии атомизации молекул. Квантово-механическое моделирование является высокоточным методом (до 1 ккал/моль) и выступает в роли инструмента для получения обучающих данных. В качестве инструмента для прогнозирования энергии атомизации используется полносвязная нейронная сеть прямого распространения. Одним из наиболее известных наборов данных с результатами квантово-механического моделирования является набор QM7 [1]. Он содержит атомные позиции \mathbf{R} , заряды Z и энергии атомизации E_{at} для 7165 молекул, состоящих из элементов H, C, N, O, S и представляющих большое разнообразие структур: двойные и тройные связи, циклы, спирты, карбоксильные, цианидные, амидные, спиртовые и эпоксидные группы. В работе рассматриваются различные представления молекулярной конфигурации (Рисунок 1), в том числе, основанные на матрице Кулона [2] (Рисунок 1b-e). Элементы матрицы Кулона позволяют извлечь из координат и зарядов дополнительную информацию – энергию кулоновского взаимодействия c_{ij} между атомами i и j молекулы и ядерную энергию c_{ii} отдельного атома i (1):

$$c_{ii} = \frac{Z_i^{2.4}}{2}, c_{ij} = \frac{Z_i Z_j}{|R_i - R_j|} \quad (1)$$

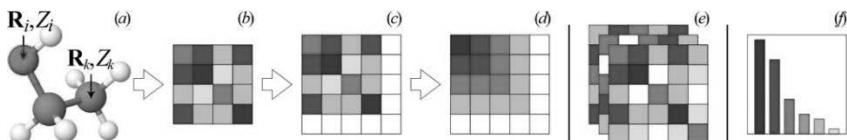


Рисунок 1 – Преобразования молекулярной информации (а) в одно из представлений: матрица Кулона (б, в, г), набор матриц Кулона (д), спектр собственных значений (ф).

Наибольшая эффективность обучения и прогнозирования (MAE = 3.24 ккал/моль, RMSE = 5.52 ккал/моль) достигается при представлении молекул в виде набора случайно-сортированных матриц Кулона. Данный подход позволяет добиться инвариантности представления молекулы, поскольку при использовании единственной матрицы Кулона для молекулы порядок столбцов и строк матрицы зависит от индексации атомов в молекуле.

Работа выполнена на основе гранта, предоставленного Академией наук Республики Татарстан в 2024 году для выполнения фундаментальных и прикладных научно-исследовательских работ в научных и

образовательных организациях, на предприятиях и в организациях реального сектора экономики Республики Татарстан.

Список используемой литературы:

- [1] Rupp M. et al. //Physical review letters, 2012, 108 (5) 058301.
- [2] Montavon G. et al. //Advances in neural information processing systems, 2012, 25.

ТЕРМОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЗВЕЗДООБРАЗНЫЕ ПОЛИ-2-АЛКИЛ-2-ОКСАЗИНЫ: СТРУКТУРА, САМООРГАНИЗАЦИЯ В РАСТВОРАХ И КОМПЛЕКСООБРАЗОВАНИЕ С КУРКУМИНОМ

Кирилл Т.Ю.*, Козина Н.Д., Родченко С.В., Теньковцев А.В.,

Филиппов А.П.

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ-ИВС, Санкт-Петербург,
Россия, *tatyana_pux@mail.ru

Стимул-чувствительные амфифильные полимеры имеют хороший потенциал применения в биомедицинских приложениях благодаря своей водорастворимости и резкому изменению характеристик при варьировании внешних воздействий. При этом, такие объекты должны удовлетворять ряду требований, а именно, биосовместимость, нетоксичность и устойчивость к действию ферментов. Таким требованиям отвечают поли-2-алкил-2-оксазины (ПаОзи), которые являются структурными аналогами полиизопропилакриламида и полипептидов.

Среди полимеров, используемых в качестве носителей гидрофобных низкомолекулярных соединений особое внимание привлекают звездообразные структуры. Наличие гидрофобного центра ветвления обеспечивает комплексообразование, а лучи регулируют растворимость и термоочувствительность. В данной работе изучены новые звездообразные ПаОзи с блок-сополимерными лучами и гексаациклофлановым ядром. Схема синтеза данных полимеров представлена на Рисунке 1.

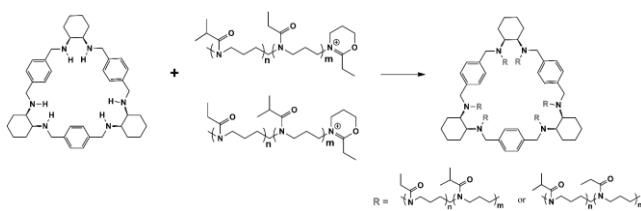


Рисунок 1 – Схема синтеза шестилучевых звездообразных ПаОзи с блок-сополимерными лучами поли-2-этил-2-оксазина и поли-2-изопропил-2-оксазина

Молекулярно-массовые и гидродинамические характеристики исследованных полимерных звезд определены методами светорассеяния, вискозиметрии и рефрактометрии в этиловом спирте. Молекулярные массы линейных ПаОЗи получены методом гель проникающей хроматографии (ГПХ). Число лучей f вычислено при сопоставлении молекулярных масс лучей, ядра и полимерных звезд. Процессы самоорганизации в водных растворах изучались методами статического и динамического светорассеяния и турбидиметрии при вариации концентрации полимеров. Были получены характеристики фазового расслоения, в частности температуры начала и окончания фазового расслоения.

Процессы комплексообразования были изучены методом УФ-спектроскопии. Были определены критические концентрации мицеллообразования. Полученные значения качественно соответствовали данным, полученным методом динамического рассеяния света. Составы комплексов полимерных звезд с куркумином определены методом Остромысленского-Жоба. Для всех образцов образовывались комплексы составом 1 к 1 (полимер/куркумин). Исходя из этого для определения константы связывания K_b был применен метод Бенеши-Гильдебрандта. Полученные значения K_b сильно зависели как от молекулярной массы образцов, так и строения лучей.

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ № 23-13-00205.

БИОЧЕРНИЛА НА ОСНОВЕ ЖЕЛАТИНА И АЛЬГИНАТА: ПОЛУЧЕНИЕ, ПЕЧАТЬ И ФИКСАЦИЯ 3D-КОНСТРУКЦИИ

Дарвиш Д.М.^{1,2*}, Колпина Е.П.¹

¹*Институт цитологии РАН, Санкт-Петербург, Россия*

²*Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, Россия*

**darvishdi@mail.ru*

Применение технологии 3D-биопечати расширяет возможности тканевой инженерии, позволяя создавать конструкции сложной геометрической формы. Ключевую роль в данной технологии играют биочернила, которые должны отвечать ряду требований. Они должны быть нетоксичными, биодеградируемыми, обладать заданной вязкостью и способностью к фиксации в короткие сроки. Если печать осуществляется непосредственно клетками, то на всех этапах процесса создания 3D-

конструкции необходимо элиминировать токсическое/деструктивное воздействие на клетки.

Желатин является одним из наиболее распространенных материалов, применяемых в биопечати, что обусловлено его высокой биосовместимостью, а также простотой регулирования реологических свойств за счет изменения температуры. Однако, высокая чувствительность к изменению температуры имеет и обратную сторону. Так для желатиновых биочернил в концентрации 5% и более изменение температуры на 1°C может существенно повлиять на их вязкость. Для стабилизации конструкции после печати в рецептуру желатиновых биочернил необходимо вводить спивающие добавки.

Целью данного исследования являлась разработка рецептуры биочернил на основе желатина, а также подбор условий печати и фиксации 3D-конструкций.

Было предложено использовать в биочернилах желатин низкой концентрации. Так были проанализированы свойства чернил с концентрацией желатина 2.5%, 3.5% и 5%. В качестве спивающей добавки был выбран альгинат натрия. Фиксацию напечатанной конструкции осуществляли растворами хлорида кальция, концентрацию которого и время обработки варьировали: концентрацию в диапазоне 0.5-10%, а время обработки от 10 минут до 1 суток.

Наилучшие свойства для печати продемонстрировали биочернила с концентрацией желатина 3.5% и альгината натрия 2%. Было выявлено, что после обработки хлоридом кальция клетки перестают адгезировать к поверхности напечатанных конструкций, поэтому они не подходят для протоколов, где заселение клетками предусматривается после печати. Однако, при введении суспензии клеток непосредственно в композицию биочернил, клетки внутри конструкции способны находиться в жизнеспособном состоянии не менее 14 суток. В таких условиях клетки имеют округлую морфологию и не пролиферируют, однако по мере деградации конструкции наблюдается миграция клеток на пластик, адгезия к нему и пролиферация.

Обработка хлоридом кальция влияет на механические свойства биочернил на основе желатина и альгината. С увеличением концентрации и времени обработки жесткость и устойчивость к биодеградации напечатанной конструкции возрастает. Однако, при увеличении времени обработки происходит диффузия кальция вглубь напечатанной конструкции, что является губительным для клеток. Наилучшие результаты, позволяющие сохранить клетки в жизнеспособном состоянии и придать жесткость конструкции, и устойчивость к биодеградации, были

получены после обработки напечатанной конструкции 10% хлоридом кальция в течение 1 часа.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России
в рамках государственного задания FMFU-2024-0008*

**КРИОГЕЛЬ КАРБОКСИЭТИЛХИТОЗАНА, СШИТОГО
ГЛУТАРОВЫМ АЛЬДЕГИДОМ: ОТ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ К КОММЕРЧЕСКОМУ РЕШЕНИЮ**

Дранников А.А.^{1,2*}, Пронченко А.А.¹, Дубовская П.И.¹, Савенко М.Е.¹,
Веретенникова Е.А.³, Пестов А.В.³, Литвинова Е.А.¹

¹*Новосибирский государственный технический университет,
Новосибирск, Россия*

²*Национальный исследовательский Томский политехнический
университет, Томск, Россия*

³*Институт органического синтеза им. И.Я. Постовского УрО РАН,
Екатеринбург, Россия*

*drannikov@corp.nstu.ru

Хитозан широко используется в сельском хозяйстве, медицине и фармацевтике, но его применение ограничено чувствительностью к кислотности среды [1]. Для модификации свойств исходного хитозана проводят дериватизацию, изменяющую растворимость [2], или сшивку биополимера, приводящую к изменению его структуры и пространственного строения, что в итоге обеспечивает целевые свойства конечного продукта [3].

В рамках настоящей работы рассматриваются технологические аспекты производства N-карбоксиэтилхитозана (N-КЭХ) и его дальнейшая сшивка глутаровым альдегидом.

В качестве исходного сырья использовали пищевой хитозан производства ООО «Хитополимер», Россия. Реакцию карбоксиэтилирования проводили в присутствии акриловой кислоты, варьируя температуру реакции с 50°C до 70°C и времени синтеза N-КЭХ с 24 ч до 72 ч, в результате чего степень функционализации контролировалась в диапазоне от 1,00±0,05 до 1,30±0,05.

Структуру полученных биополимеров подтверждали методами ИК-спектроскопии, элементного, дополнительно исследовали морфологию с применением сканирующей электронной микроскопии, набухание и пористость полученных образцов.

Обнаружено, что увеличение степени функционализации N-КЭХ приводило к снижению его реакционной способности в реакции сшивки глутаровым альдегидом, что отчетливее проявлялось при масштабировании процесса от 10 г до 1 кг/серия. В то же время установлено, что с ростом времени криообработки при -19°C от 1 до 5 дней, пористость образцов увеличивалась с $20\pm2\%$ до $50\pm2\%$, а набухание – с $400\pm20\%$ до $600\pm20\%$, что связано с более полным формированием полимерной сетки вследствие сшивки.

В результате разработки получен биополимерный носитель, способный выступить в качестве системы доставки биологически активных компонентов, стимулирующих рост растений. Исследована способность криогеля аккумулировать гуминовые кислоты, аминокислоты и копролиты дождевых червей, разработан состав и технология биологической добавки и подтверждена эффективность данного состава на примере моркови, огурцов и салата.

Работа была выполнена в рамках Соглашения о предоставлении гранта в форме субсидий из областного бюджета Новосибирской области в соответствии с п. 4 статьи 78.1 Бюджетного кодекса РФ от 26.10.2023 № 0000005406995998235121722/№ МЛ-3, заключенным между Министерством науки и инновационной политики Новосибирской области и НГТУ (проект Сиббионой).

Список используемой литературы:

- [1] C. Thambiliyagodage, M. Jayanetti, A. Mendis et al. // Materials. 2023. V. 16. #2073.
- [2] S. Suryani, A.Y. Chaerunisa, I.M. Joni et al. // Nanotechnol. Sci. Appl. 2024. #41-57.
- [3] N.M. Blebea, C. Pușcașu, R.A. Vlad et al. // Gels. 2025. V. 11(4). #275.

РЕДОКС-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ НАНОЧАСТИЦЫ НА ОСНОВЕ ТРИТИОЦИАНУРОВОЙ КИСЛОТЫ ДЛЯ ПРЕОДОЛЕНИЯ ЛЕКАРСТВЕННОЙ РЕЗИСТЕНТНОСТИ ОПУХОЛЕВЫХ КЛЕТОК

Кополева Е.А.*, Пельтек А., Зюзин М.В.

Университет ИТМО, факультет физики и инженерии, Санкт-Петербург, Россия

**elena.kopoleva@metalab.ifmo.ru*

Проблема лекарственной устойчивости остаётся актуальной при лечении злокачественных новообразований и ограничивает эффективность химиотерапии. Одним из подходов к её преодолению является использование умных систем доставки, способных избирательно активироваться в условиях опухолевой микросреды. В данной работе представлены редокс-чувствительные наночастицы на основе тритиоциануровой кислоты и полиэтиленгликоля (TTCA-PEG), полученные одностадийным синтезом. Частицы диаметром около 150 нм проявляют высокую стабильность в биологических средах и обеспечивают контролируемое высвобождение лекарственных веществ в восстановительной среде, типичной для опухолевых тканей.

Наночастицы были загружены доксорубицином, блеомицином и цисплатином. В ходе *in vitro* исследований проведена оценка их эффективности на трёх парах клеточных линий: K562 и K562/4 (хронический миелолейкоз, резистентность связана с экспрессией гена MDR и повышенным выведением препарата), HCT116 и HCT116p53KO (колоректальный рак, резистентность обусловлена отсутствием белка p53 и снижением чувствительности к повреждению ДНК), SKOV-3 и SKOV-3/CDDP (овариальный аденокарциномный процесс, резистентность за счёт повышенной экспрессии антиоксидантных белков и глутатиона). В ходе *in vitro* экспериментов на резистентных клеточных линиях установлено, что использование TTCA-PEG наночастиц приводит к значительному снижению IC₅₀ по сравнению со свободными формами препаратов: с 82,54 до 61,67 мкг/мл для доксорубицина (K562/4), с 2,77 до 0,61 мкг/мл для цисплатина (SKOV-3/CDDP), с 2,45 до 1,32 мкг/мл для блеомицина (HCT116p53KO). Это свидетельствует о способности системы эффективно преодолевать различные механизмы лекарственной устойчивости, включая повышенный отток препаратов, инактивацию глутатионом и нарушения в сигнальных путях апоптоза.

Флуоресцентная микроскопия и проточная цитометрия показали активную интернализацию наночастиц всеми исследуемыми клеточными линиями. Более 50% клеток связывались с частицами спустя 24 ч инкубации при концентрации 150 мкг/мл. Пустые наночастицы TTCA-PEG проявили низкую цитотоксичность, подтверждая их биосовместимость и пригодность для дальнейших доклинических испытаний.

Предложенная платформа отличается универсальностью, простотой синтеза и возможностью применения с различными препаратами, что делает её перспективной для преодоления химиорезистентности при терапии солидных опухолей.

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ № 25-23-01097

ТРЕХКОМПОНЕНТНЫЕ ЛАКТАТНЫЕ БИОСЕНСОРЫ ДЛЯ АНАЛИЗА БИОЛОГИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ

Никитина В.Н.*, Соловьев И.Д., Вохмянина Д.В., Калякин А.А.

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,

Москва, Россия

**niki-vita@yandex.ru*

Электрохимические тест-системы находят широкое применение в различных областях анализа, в особенности в медицине. В последнее время в клинической диагностике возрастает интерес к лактату, как маркеру окислительного стресса в организме или в органе [1]. В связи с этим актуально создание лактатных биосенсоров (тест-полосок) для анализа биологических жидкостей, как инвазивно-отбиаемых (кровь), так и для неинвазивной диагностики (анализ пота) без пробоподготовки. При этом проблема прямого определения лактата в таких образцах состоит в несоответствии рабочего диапазона большинства лактатных биосенсоров содержаниям этого метаболита.

В работе предложен простой способ изготовления тест-полосок на основе одностадийной капельной модификации планарных электродов, позволяющий пролонгировать диапазон линейности отклика биосенсора в области высоких содержаний лактата [2]. Для со-иммобилизации фермента (лактатоксидазы) и медиатора в одной полизелектролитной матрице разработаны составы трехкомпонентных мембранообразующих смесей. Составы мембранообразующих смесей на основе хитозана оптимизировали по содержанию фермента (1–10 мг/мл), медиатора (20–100 мМ) и хитозана (0.001–0.1 об.%). Смеси показали высокую коллоидную устойчивость и стабильность при хранении: после 2-х недель хранения смеси при 4°C аналитические характеристики свежеизготовленных тест-полосок на ее основе воспроизводятся.

Наиболее широкий диапазон линейности отклика и наивысшая чувствительность биосенсоров, 30 – 50 мА/М/см², достигается при использовании медиаторов: гексацианоферрат (III) и гексаамминрутений (III). Показана возможность расширения линейного диапазона отклика биосенсора до 20 мМ путем увеличения содержания хитозана в мембранообразующей смеси. Также расширение диапазона линейности в область высоких концентраций вплоть до 30 мМ возможно при увеличении времени регистрации сигнала тест полоски, до 10–15 секунд.

В буферных растворах при переходе от рН 7.4 к рН 6.0 чувствительность полосок незначительно снижается, а линейный диапазон смещается в область высоких содержаний лактата, что является положительной тенденцией для неинвазивного определения лактата в поте. Показано, что эффект расширения диапазона для рН 6.0 обусловлен зарядами полимерной матрицы и медиатора, и снижением концентрации свободного медиатора в мембране. Разработанные тест-полоски протестировали для детекции лактата в матрице цельной крови: аналитические характеристики остаются практически неизменными и чувствительность в образцах крови сохраняется на 91%.

Таким образом, предложен способ изготовления биосенсора, позволяющий упростить технологический процесс производства сенсоров, с одной стороны, и достичь необходимых аналитических характеристик биосенсоров для анализа биологических жидкостей, с другой.

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ № 24-2300250 (<https://rscf.ru/project/24-23-00250/>)

Список используемой литературы:

- [1] А.И. Сушков, В.С. Рудаков, К.К. Губарев и др. // Вестник трансплантологии и искусственных органов. 2020. V 22. с. 97-106.
[2] V.N. Nikitina, E.V. Daboss, D.V. Vokhmyanina et. al, // J. Electroanal. Chem. 2023. V 938. # 117445.

**ОЦЕНКА ЦИТОСОВМЕСТИМОСТИ ВОЛОКНИСТЫХ
СКАФФОЛДОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА**

Коржова А.Г.*, Лапуть О.А., Курзина И.А.

*Национальный исследовательский Томский государственный
университет, Томск, Россия*

**korzhova17@gmail.com*

В медицине на сегодняшний день применяется широкий спектр полимерных изделий. Особого внимания в качестве материала для создания имплантатов заслуживает политетрафторэтилен (ПТФЭ), который отличается высокими показателями химической стабильности, механическими свойствами и биологической инертностью [1]. Существуют различные методы получения изделий из ПТФЭ, обеспечивающие формирование уникальной структуры материала, определяющей свойства конечного изделия. Перспективным методом получения изделий из ПТФЭ является электроспиннинг, позволяющий

изготавливать волокнистые структуры, имитирующие архитектуру внеклеточного матрикса, что создает оптимальные условия для прикрепления, миграции и дифференцировки клеток [2]. Целью работы является исследование цитосовместимости волокнистых материалов (скаффолдов) из ПТФЭ, полученных методом электроспиннинга, и проведение сравнительного анализа с коммерческим продуктом из растянутого ПТФЭ.

Для получения скаффолдов из ПТФЭ был приготовлен прядильный раствор путем смешивания водной суспензии ПТФЭ марки Ф-4Д (ГалоПолимер, Россия) и 10 масс. % водного раствора поливинилового спирта в соотношении 1:1. Процесс электроспиннинга проводили на лабораторной установке (НИ ТГУ, Томск, Россия). Основные параметры: напряжение 30 кВ, скорость подачи раствора 2 мл/ч, расстояние от иглы до коллектора 13 см, объем раствора 10 мл, внутренний диаметр иглы 1,5 мм. Полученный волокнистый материал снимали с коллектора и высушивали. В качестве материала сравнения в тестах на цитосовместимость использовали сосудистые заплаты из растянутого ПТФЭ (АО «НПК «Экофон», Россия). Цитосовместимость образцов ПТФЭ исследовали с помощью резазуринового теста на модели моноцитарных макрофагов человека после 6 суток культивирования [3].

Жизнеспособность макрофагов, культивируемых на волокнистом ПТФЭ, составила 68,5 % по сравнению с контролем (клетки без образцов), принятым за 100% выживаемости клеток. Для образцов из растянутого ПТФЭ доля живых клеток составила 89,1 %. Согласно ISO 10993-5:2009, материал не считается цитотоксическим, если жизнеспособность клеток по отношению к контрольной группе составляет 70% и выше. Таким образом, несмотря на высокие значения жизнеспособности клеток, волокнистые образцы ПТФЭ не могут быть признаны цитосовместимыми. Гибель клеток может быть вызвана наличием в составе скаффолдов стабилизирующих добавок из суспензии ПТФЭ. Образцы растянутого ПТФЭ продемонстрировали в данном teste высокие показатели цитосовместимости.

В рамках данной работы рассмотрены скаффолды из ПТФЭ и представлены результаты изучения их цитосовместимости в сравнении с коммерческим продуктом. Установлено, что скаффолды из ПТФЭ могут быть применимы в медицинской сфере, однако необходима оптимизация их свойств для улучшения цитосовместимости.

Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030).

Список используемой литературы:

- [1] G.J. Puts, P. Crouse, B.M. Ameduri // Chem. Rev. 2019. V. 119 (3). P. 1763-1805.
- [2] S. Lamichhane, J.A. Anderson, T. Vierhout et al. // J. Biomed. Mater. Res. A. 2017. V. 105(9). P. 2441-2450.
- [3] A. Popova, J. Kzhyshkowska, D. Nurgazieva et al. // Immunobiology. 2011. V. 216(1-2). P. 164-172.

РАЗРАБОТКА ВОЛОКОННЫХ РАНЕВЫХ ПОВЯЗОК НА ОСНОВЕ ПОЛИКАПРОЛАКТОНА С БАКТЕРИЦИДНЫМИ СВОЙСТВАМИ

Макарец Ю.А.*, Котякова К.Ю., Штанский Д.В.

Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия

**makarets.ia@misis.ru*

Бактериальные инфекции ран, особенно вызванные резистентными штаммами и биоплёнкообразующими микроорганизмами, остаются серьёзной проблемой современной медицины. Стандартные перевязочные материалы не обеспечивают необходимой защиты и не способствуют активному заживлению. Это стимулирует разработку многофункциональных раневых покрытий на основе биодеградируемых полимеров с улучшенными свойствами.

В ходе исследования методом электроформования получены композитные волокна на основе поликапролактона (ПКЛ) с 1, 3 и 5 масс.% наночастиц оксида цинка (НЧ ZnO) и иммобилизованным хлоргексидином (ХГ). НЧ ZnO синтезировали из ацетата цинка с использованием гидроксида лития в водно-этиленгликоловой среде, а для связывания ХГ поверхность волокон модифицировали карбоксильными группами с последующей карбодиимидной активацией. Методы сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), энерго-дисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДРС), ИК-Фурье спектроскопии и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) подтвердили успешное введение ZnO и осаждение хлоргексидина на поверхность волокон (Рисунок 1).

СЭМ-анализ выявил однородную хаотично-ориентированную структуру волокон диаметром 100–500 нм, а ЭДРС подтвердила равномерное распределение Zn в структуре ПКЛ и рост содержания цинка при увеличении его концентрации (от 1,1 до 3,9 ат.%). В спектрах ИК-Фурье и РФЭС зафиксированы характерные пики связей, которые свидетельствуют об успешном введении НЧ ZnO и осаждении ХГ на модифицированную поверхность. Материалы с ХГ приобрели гидрофильные свойства и продемонстрировали высокую бактерицидную

активность против множественно резистентных госпитальных штаммов. При этом составы с 1% и 3% НЧ ZnO и ХГ не проявили цитотоксического действия в отношении человеческих дермальных фибробластов, в отличие от образца с 5% НЧ ZnO и ХГ.

В результате работы были подобраны оптимальные концентрации бактерицидных агентов, обеспечивающих биосовместимость и выраженное бактерицидное действие, что демонстрирует перспективность разработанных композитов для создания перевязочных материалов.

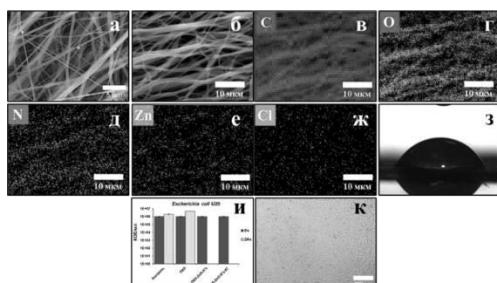


Рисунок 1 – Изображение СЭМ ПКЛ-ZnO-5% волокон (а), изображение СЭМ модифицированных ХГ композитных волокон (б) и соответствующие ЭДРС карты распределения элементов (в-ж), краевой угол смачивания волокон ПКЛ-ZnO-5%-ХГ (з), бактерицидная активность против штамма *E. coli* U20 (и), микроскопическая визуализация клеток (к)

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ № 24-79-10121.

БИОСОВМЕСТИМЫЕ АГАР-АЛЬГИНАТНЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ НЕЙРОРЕАБИЛИТАЦИИ И НЕЙРОИМПЛАНТАЦИИ

Порошин С.Г.^{1,2*}, Соколов А.С.², Сухоруков Г.Б.^{1,2}

¹*Life Improvement by Future Technologies (LIFT) центр, Москва, Россия*

²*Сколковский институт науки и технологий (Сколтех), Москва, Россия*

[*s.poroshin@lift.center](mailto:s.poroshin@lift.center)

Полимерные пленки для покрытия имплантируемых конструкций или раневых, а также послеоперационных поверхностей, являются перспективной областью биомедицинских исследований. На данный момент существует ряд полимерных и иных составов, которые используют для формирования покрытий [1]. Отдельный интерес представляет применение подобных конструкций в области нейрореабилитации или

нейроимплантации. Поражения нервной системы требуют комплексного подхода в терапии, с одной стороны необходимо максимально восстанавливать нативное строение ткани, с другой риск развития инфекционного заболевания на фоне проводимых процедур должен быть снижен насколько представляется возможным. Таким образом идеальный материал для нейрореабилитации должен быть биосовместим, с контролируемой адгезией клеток и способствовать антимикробной защите организма. Исходя из этих критериев был выбран альгинат в качестве материала для печати пленок. Для альгината было показано наличие антибиопленочной активности [2], а также он известен в роли носителя для клеток при формировании трехмерных культур. Однако, он имеет и ряд недостатков. В частности, он образует гидрогель при связывании некоторых металлов, которые в свою очередь могут быть токсичны. В области низкой концентрации связываемых ионов гель существенно менее токсичен, однако может ускоренно деградировать. При печати тонким слоем альгината формируются трещины в следствии сильной усадки гидрогеля. Данные недостатки можно преодолеть, добавляя агар. Комплекс агар-альгинат является биосовместимым, при этом образование геля происходит при застывании агара, что позволяет использовать минимум металлов, также возможна печать тонких покрытий. Для проверки комплекса были проведены микробиологические и культуральные исследования смесей альгината с агаром в сравнении с альгинатом железа (III) и альгинатом кальция. На культуре *K. pneumoniae* была показана синергическая активность альгината и железа, в том числе в составе комплекса железо-альгинат-агар. Количество колоний (~5-9 КОЕ/чашку) оказалось на порядок ниже, чем в контроле с железом в такой же концентрации (~50-70 КОЕ/чашку). Также была проведена проверка способности олигосахаридов альгината препятствовать образованию биопленки *K. pneumoniae* в суспензионной культуре. Добавление 0,5% альгината натрия в питательную среду приводило к образованию агрегатов вместо нативной гомогенной смеси клеток и экзополисахаридов. Адгезионные свойства в отношении клеток млекопитающих были первично проверены на культуре мышиных фибробластов L-929. Было показано, что альгинаты кальция и железа при низких концентрациях соответствующих ионов металлов в незначительной степени подвергаются колонизации клетками линии L-929. В таких условиях преимущественно происходит формирование сфероидов из-за низкой адгезии поверхности. Повышение количества металлов или добавление агара в состав смеси увеличивает степень адгезии клеток, и они активнее распределяются в пространстве, при этом они остаются относительно округлыми, поскольку не вступают в плотный контакт с поверхностью.

Таким образом комплекс агар-альгинат представляет собой перспективный для дальнейшей разработки полимерный материал с определенными преимуществами, в том числе для области нейроимплантации и нейрореабилитации.

Список используемой литературы:

- [1] V. Vishwakarma et al. Multifunctional Coatings on Implant Materials // Coatings 2023, 13, 69
[2] M. Asadpoor et al. Antimicrobial Activities of Alginate // Front. Microbiol, 2021, 12

**БИОФУНКЦИОНАЛИЗАЦИЯ АЛЬГИНАТНОГО ГИДРОГЕЛЯ
НАНОКРИСТАЛЛАМИ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ**

Марков П.А.^{1*}, Еремин П.С.¹, Торлопов М.А.², Мартаков И.С.²,
Михайлов В.И.²

¹*Институт регенеративной и трансляционной медицины ФГБУ «НМИЦ
ПМ» Минздрава России*

²*Институт химии Федерального исследовательского центра «Коми
научный центр Уральского отделения Российской академии наук»,
Сыктывкар, Россия
p.a.markov@mail.ru

Применение гелей из растительных полисахаридов в качестве компонентов биомиметических материалов имеет существенное преимущество, поскольку такие биополимеры обладают высокой биосовместимостью. Вместе с тем масштабному внедрению полисахаридных гидрогелей в тканевую инженерию и практическую медицину препятствует сложность стандартизации структуры и химического состава этого класса биополимеров, а, следовательно, трудности в прогнозировании клеточного ответа на гидрогелевые биоматериалы.

Цель исследования – оценить влияние нанокристаллов целлюлозы на структурно-механические свойства альгинатного гидрогеля, биосовместимость и адгезию фибробластов человека.

Материалы и методы. В работе использованы гидрогелевые альгинатные пленки, в том числе наполненные нанокристаллами целлюлозы (НКЦ, 30 масс. %). При оценке биологических свойств материалов руководствовались положениями стандартов, изложенных в ГОСТ ISO 10993-5-2011 «Изделия медицинские: оценка биологического действия медицинских изделий». С использованием методов световой и

люминесцентной микроскопии оценивали количество и морфологию фибробластов. Оценку метаболической активности клеток проводили с использованием 3-[4,5-диметилтиазол-2-ил]-2,5-дифенилтетразолий бромида (МТТ-тест).

Результаты. Гидрогелевая альгинатная пленка (ГАП) обладает гладкой поверхностью, основным структурным элементом которой являются глобулярные структуры размером около микрометра и менее. Введение в состав ГАП нанокристаллов целлюлозы (НКЦ) до 30 масс. %, увеличивает неоднородность и шероховатость поверхности. Полученный гибридный материал характеризуется повышенной механической прочностью и устойчивостью к биодеградации в условиях *in vitro*. Совместная 48 ч инкубация фибробластов с ГАП снижает метаболическую активность клеток, ингибирует рост и пролиферативную активность фибробластов. Кроме того установлено, что поверхность ГАП обладает слабыми адгезивными свойствами в отношении фибробластов человека, количество адгезированных на поверхности ГАП составляет менее 10 клеток на 0,2 мм². Выявлено, что гибридный гидрогель, содержащий 30 масс. % НКЦ, не ингибирует метаболическую и пролиферативную активность фибробластов. Поверхность ГАП+НКЦ приобретает способность адгезировать фибробласти и поддерживать их в жизнеспособном состоянии.

Таким образом, предложенная модель структурообразования ГАП с использованием НКЦ является перспективным способом регуляции биофункциональных свойств гидрогелевых материалов и может использоваться при создании тканеинженерных конструкций с прогнозируемым клеточным ответом.

Исследование проведено за счет гранта Российского научного фонда № 24-73-10091, <https://rscf.ru/project/24-73-10091/>.

TARGETED DELIVERY OF MATERIALS BASED ON BIOCOMPATIBLE POLYMERS USING ENDOVASCULAR TECHNIQUES

Sindeeva O.A.^{1,*}, Guslyakova O.I.^{1,2}, Terentyeva D.A.¹, Sain A.Yu.¹,
Kazakova L.I.³, Sukhorukov G.B.^{1,3}

¹*Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russia*

²*Saratov State University, Saratov, Russia*

³*Life Improvement by Future Technologies Center, Moscow, Russia*

*o.sindeeva@skoltech.ru

The development of targeted drug delivery systems based on biocompatible and biodegradable polymers is an important task in materials science in the context of biomedical applications. The continuing interest in this problem is associated with the possibility of imparting desired physicochemical properties to containers that will ensure an optimal drug release profile in the target organ after delivery, significantly reducing the side effects of the therapy. However, local delivery remains a serious problem due to the systemic dispersion of containers introduced into the bloodstream and their accumulation, mainly in the liver. The local introduction of containers into the target tissue also has limitations, primarily related to the low level of diffusion and distribution of containers in the tissues of the target organ.

Using endovascular targeting through the renal artery, we showed that polyelectrolyte microcapsules, microgels, polymer ultrasound contrast agents, and nanoparticles can significantly change the biodistribution and accumulation in the body. The proposed method made it possible to significantly increase the efficiency of carrier accumulation in the kidneys. The obtained effect was stable and lasted for at least 24-72 hours. Simultaneously, the encapsulated model substances (fluorescent dye Cyanine 7 or photodynamic dye Photoditiazine) ensured reliable detection of the fluorescent signal in the target organ using fluorescence tomography and confocal microscopy. The selected dosage did not lead to significant morphological changes in the target organ tissues, indicating the safety of arterial administration of polymer carriers for targeted drug delivery.

This study was supported by a grant from the Russian Science Foundation No. 23-75-10070.

КОНТРОЛИРУЕМАЯ ДЕГРАДАЦИЯ ФОСФАТОВ КАЛЬЦИЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ МОЛОЧНОЙ КИСЛОТЫ

Проворкина А.А.*, Голованова О.А.

*Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, Омск,
Россия*

**ProvorkinaAA@omsu.ru*

Контролируемое разрушение кальций-фосфатных биоматериалов — важная задача в стоматологии, ортопедии и реконструктивной хирургии. Такие образования, как зубной камень [1] или послеоперационные кальцификаты [2], требуют селективного удаления с минимальным воздействием на окружающие ткани. В данной работе исследована возможность использования молочной кислоты (МК) — биосовместимого

метаболита — для направленного растворения фосфатов кальция (брушита и гидроксиапатита). Установлены критические параметры процесса, включая зависимость скорости деградации от pH и концентрации ионов Ca^{2+} , а также предложен механизм реакции.

Кинетика растворения изучена потенциометрическим методом с С-селективным электродом при варьировании pH (1–8) и концентрации МК (0.5 мМ – 1 М). Термодинамические расчеты выполнены на основе стандартных энергий Гиббса образования с учетом диссоциации МК ($\text{pKa} = 3.86$) и растворимости продуктов.

Максимальная скорость растворения брушита (2 ммоль/л·мин) наблюдается при $\text{pH} < 4$, что на порядок выше, чем для гидроксиапатита (0.2 ммоль/л·мин). При $\text{pH} > 8.2$ процесс прекращается из-за образования комплексов Ca^{2+} (лактатных/гидроксидных).

В кислой среде протонированная МК разрушает кристаллическую решетку фосфатов кальция, а далее образуются хелатные комплексы Ca^{2+} с лактат-ионами. Методом рентгенофазового анализа подтверждено образование монетита (CaHPO_4), в связи с чем данное химическое взаимодействие можно описать следующей реакцией:



Значение стандартной энергии Гиббса реакции ($\Delta G^\circ = -61.8$ кДж/моль) подтверждает самопроизвольность процесса в кислой среде. Расчетные модели демонстрируют прекращение реакции при росте pH или концентрации ионов Ca^{2+} .

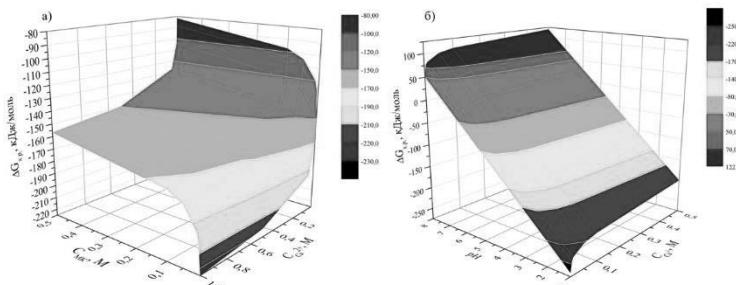


Рисунок 1 – Термодинамическая поверхность $\Delta G = f(C_{\text{МК}}, C_{\text{Ca}^{2+}})$ (а) и $\Delta G = f(\text{pH}, C_{\text{Ca}^{2+}})$ (б)

Молочная кислота эффективна для контролируемого разрушения кальций-фосфатных отложений, что открывает перспективы для

разработки новых хирургических подходов в деградации новообразований.

Исследование проведено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 075-03-2023).

Список используемой литературы:

- [1] Палуганова, А.М. // Центральный научный вестник. 2018. Т. 3 № 10(51).
- [2] Ничипорук К.А. и др. // Сибирский научный медицинский журнал. 2024. Т. 43. №. 6.

МАГНИТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ПЬЕЗОПОЛИМЕРНЫЕ МАТРИЦЫ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ КОСТИ: КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ И ОСТЕОГЕННЫХ СВОЙСТВ

Шлапакова Л.Е., Сурменева М.А., Сурменев Р.А.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

Патологии опорно-двигательной системы, поражающие порядка 1,7 млрд человек во всем мире, приводят к существенному снижению мобильности, профессиональной активности и общего качества жизни пациентов. Ограниченная способность костной ткани к естественной регенерации обуславливает необходимость разработки новых терапевтических подходов [1].

Функциональные полимерные пористые скэффолды, имитирующие внеклеточный матрикс, обеспечивают не только структурную поддержку, но и стимулируют рост регенерирующей ткани. Особый интерес представляют пьезоэлектрические скэффолды, способные генерировать биоэлектрические потенциалы, аналогичные природным, в ответ на механические воздействия. Среди биоматериалов для тканевой инженерии выделяется поли(3-оксибутират) (ПОБ), обладающий уникальной комбинацией свойств: биосовместимостью, контролируемой скоростью деградации, механической стабильностью и пьезоэлектрической активностью.

Магнитоэлектрические материалы функционируют за счет индуцированной поляризации пьезополимера под действием магнитострикционных частиц в переменном магнитном поле (МП) [2]. В данном исследовании в качестве магнитного компонента в пористых

электроформованных скэффрлдах ПОБ использовался композитный наполнитель Fe₃O₄–ОГ, синтезированный путем химического осаждения наночастиц магнетита на поверхность оксида графена.

Рентгенофазовый анализ выявил модификацию кристаллической структуры ПОБ при введении 8 мас. % Fe₃O₄–ОГ, а именно образование нанокристаллитов и уменьшение их среднего размера – это привело к увеличению деформации при растяжении композитных скэффолдов. Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия подтвердила присутствие наполнителя в приповерхностном слое волокон, что объясняется электростатическим взаимодействием оксида графена с полимерной матрицей в процессе ЭФ.

Атомно-силовая микроскопия продемонстрировала увеличение шероховатости поверхности композитных волокон на 27% по сравнению с чистым ПОБ, что связано как с пористостью, так и с наличием частиц наполнителя в поверхностном слое.

Биологические исследования показали трехкратное усиление пролиферации мезенхимальных стволовых клеток на композитных скэффолдах по сравнению с чистым ПОБ. Этот эффект обусловлен модифицированными поверхностными свойствами материала, включая повышенную шероховатость и гидрофильность. *In vivo* эксперименты с имплантацией скэффолдов в дефект бедренной кости крыс в течение 4 недель выявили значительное преимущество композита ПОБ/Fe₃O₄–ОГ в условиях переменного МП: объем регенерированной костной ткани составил 20,5% против 6,6% в случае чистого ПОБ и 8,1% в случае композита без воздействия МП. Полученные данные свидетельствуют о магнитоэлектрической и магнитомеханической стимуляции процессов остеогенеза.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 25-13-20058 (<https://rscf.ru/project/25-13-20058/>) и гранта в форме субсидии, выделяемого Департаментом по научно-технологическому развитию и инновационной деятельности Томской области (Соглашение №02/7/2025), а также Программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Список используемой литературы:

- [1] J. Yuan et al. // Mater. Today Bio. 2022. V. 15. #100318.
- [2] Y. Zhang et al. // Adv. Healthcare Mater. 2021. V. 10. #2100695.

**СИСТЕМА ДЛЯ ФИКСАЦИИ МЕЛКИХ ЛАБОРАТОРНЫХ
ЖИВОТНЫХ С МЕМБРАННЫМ ПОКРЫТИЕМ
И МОНИТОРИНГОМ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
«АНТИКУСЬ»**

Эрлих Т. В.

*Московский физико-технический институт (национальный
исследовательский университет), Россия
tatianaerlikh@yandex.ru*

Современная экспериментальная медицина нуждается в надёжных системах фиксации лабораторных животных для проведения хирургических и физиологических исследований [1–3]. Традиционные устройства ограничивают доступ к зонам манипуляций и повышают риск инфицирования [4, 5]. Разработанная система «Антикусь» обеспечивает иммобилизацию мелких грызунов, свободный доступ к операционному полю и мониторинг основных физиологических параметров, снижая риск заражения за счёт мембранныго покрытия.

Целью работы было создание эргономичного устройства, позволяющего фиксировать животное без чрезмерного стресса, проводить хирургические вмешательства и одновременный сбор данных пульса и температуры, также подключать электроэнцефалографические электроды.

Корпус изготовлен из биосовместимого полилактида; рабочая зона закрыта прозрачной полимерной мембраной. В стенках предусмотрены отверстия для сенсоров частоты сердечных сокращений и температуры, а разъёмы обеспечивают подключение электродов для нейрофизиологического мониторинга. Испытания на 60 мышах (28–35 г) показали надёжную фиксацию в позициях на животе и спине, хороший доступ к областям операций и отсутствие выпадения из устройства. Мембранные покрытие защищало операционную область от контаминации и ускоряло заживление ран; интегрированные сенсоры позволяли непрерывно регистрировать сердечную активность без нарушения процедуры. Сравнение с известными аналогами [1–5] показало улучшенную эргономику и расширенный спектр манипуляций.

Таким образом, система «Антикусь» обеспечивает биобезопасность и удобство при проведении инвазивных и нейрофизиологических исследований на мелких лабораторных животных, сокращает риск инфекции и стресс у животных, расширяет возможности экспериментальной хирургии, фармакологии и нейронаук.

Список используемой литературы:

Секция 3

[1] Патент 2284167. Устройство для фиксации мелких лабораторных животных. 2006.

[2] Патент 216185. Устройство для фиксации лабораторных животных. 2023.

[3] Pritchard W.R., Burgess R.G. Small Animal Restraining Device with Physiologic Sensor Mount: патент 20080168951. 2008.

[4] Хоменко Р.М. и др. Устройство для проведения экспериментов на мелких животных. Патент 219018. 2023.

[5] Бекетов Е.Е. и др. Компактное модульное устройство для фиксации мелких экспериментальных животных без наркоза. Патент 209728. 2022.

СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ

ФОРМОВОЧНЫЕ КОМПОЗИЦИИ НА ОСНОВЕ АЛЬГИНАТА НАТРИЯ И ГИБРИДНОГО НАПОЛНИТЕЛЯ ПРИРОДНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Ахмедов М.М.^{1*}, Чэн А.², Воробьев В.И.³, Сафонова Т.В.²,
Кильдеева Н.Р.¹

¹ *Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина,
Москва, Россия*

² *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
Москва, Россия*

³ *Калининградский государственный технический университет (КГТУ),
Калининград, Россия*

*akhmedov.mm@yandex.ru

Коллаген природного происхождения является незаменимым сырьем для получения новых материалов для медицины и биотехнологии. В последние годы растет интерес к использованию коллагена, выделяемого из чешуи рыб. Сырье для его получения является крупнотоннажным отходом рыбной промышленности. Одним из способов получения коллагена из рыбьей чешуи является способ, разработанный в Калининградском государственном техническом университете, путем измельчения очищенной и высушенной рыбьей чешуи и последующего фракционирования на две фракции: волокнистую — с высоким содержанием коллагена и порошковую — обогащенную гидроксиапатитом [1].

Цель настоящей работы заключалась в исследовании свойств формовочных композиций на основе альгината натрия и гибридного наполнителя природного происхождения. В качестве гибридного наполнителя использовали волокнистую фракцию порошка чешуи рыб. Поскольку этот порошок помимо коллагена содержит гидроксиапатит, он может быть использован в качестве гибридного армирующего наполнителя в биокомпозитах, предназначенных не только для лечения мягких тканей, но и повреждений костной ткани.

С целью изучения содержания водорастворимой формы коллагена в водной дисперсии волокнистой формы коллагена и возможности последующего её использования для получения биокомпозитов были подготовлены водные суспензии волокнистой фракции коллагена рыбьей чешуи, содержащего гидроксиапатит. Для получения дисперсий природного коллагена в воде было использовано высокоскоростное диспергирование (диспергатор FSH-2A) с последующей фильтрацией или

протиранием через сетки для шелкографии различной плотности (16-61 нитей/см).

Было установлено, что при использовании скорости вращения диспергирующей насадки 22000 оборотов/мин и фильтрации через сетку с плотностью 49 нитей/см возможно получение однородной дисперсии, содержащей преимущественно моноволоконца, наилучшим образом подходящих для использования в качестве армирующего наполнителя биокомпозитов. Содержание водорастворимой фракции коллагена в исходном продукте (волокнистой фракции чешуи рыб) составило 11 масс. %.

Полученная суспензия, содержащая преимущественно моноволоконца, была использована для получения биокомпозитных наполненных пленок альгината натрия.

Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ 24-23-00390.

Список используемой литературы:

[1] Воробьев В. И., Нижникова Е. В. Получение фракций коллагена и гидроксиапатита из рыбьей чешуи //Известия КГТУ, 2021, 62, 80-91.

**ПОЛИМЕРНЫЕ АДГЕЗИВЫ НА ОСНОВЕ
ПОЛИЭТИЛЕНГЛИКОЛЬ ДИАКРИЛАТА ДЛЯ
БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ**

Битанова В.А.*, Голубчиков Д.О., Леонтьев Н.В., Мурашко А.М.,
Евдокимов П.В., Путляев В.И.

*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
Москва, Россия*

**viktoriiia.bitanova@chemistry.msu.ru*

В последние годы все больше внимания исследователей уделяется развитию биомедицины. Разрабатываются новые многокомпонентные устройства для регистрации физиологических сигналов организма, а также стимуляции различных процессов в тканях с целью диагностики и лечения заболеваний. Для корректной работы большинства материалов, используемых при решении описанных задач, необходим плотный контакт между устройством и поверхностью биологической ткани. Недостаточная адгезия может привести к потере функциональных свойств материала, снижению его эффективности и надежности получаемых с его помощью данных. Особенное значение этот параметр приобретает для имплантируемых устройств, которые должны поддерживать

долговременную функциональность. Основные требования, предъявляемые к адгезивам для биомедицинских целей, включают в себя биосовместимость и подходящие механические характеристики, от которых зависит как плотность контакта с поверхностью, так и устойчивость связей с подвижными тканями [1]. Помимо этого, адгезивы в составе материалов, помещаемых внутрь организма, должны быть устойчивыми к воздействию биологических жидкостей.

Механизм действия биоадгезивов основан на взаимодействии реакционных групп в их составе с аминокислотными остатками на поверхности тканей. Природа связей может быть как ковалентной, так и нековалентной. В первом случае энергия связывания выше, и контакт с материалом устойчивее. Однако нековалентные связи, обусловленные слабыми межмолекулярными силами, обладают важным преимуществом – способностью к самовосстановлению после разрыва. Это имеет особое значение для адгезивов, подвергающихся серьезным деформациям в процессе использования. Обратный характер их взаимодействий открывает возможность для многократного извлечения и повторного размещения материала без повреждения близлежащих тканей. Стоит отметить, что полимерные адгезивы характеризуются дополнительным механизмом физического связывания с поверхностью – так называемым «переплетением» молекул в результате диффузии полимерных цепочек вглубь тканей [2].

В рамках работы разработаны полимерные биоадгезивы на основе фотоотверждаемого полиэтиленгликоль диакрилата. Исследованы свойства материалов, в том числе адгезия к различным поверхностям. Механические характеристики определены при помощи реологических измерений. Предложены варианты как ковалентного, так и нековалентного связывания адгезивов с поверхностью тканей. Изучена зависимость свойств материалов от молекулярной массы полимера, а также от соотношения компонентов в их составе.

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ № 23-79-10103 и Программы развития Московского университета, проекта № 23-SCH03-06.

Список используемой литературы:

- [1] Y. Lu, X. Xu, J. Li. // J. Mat. Chem. B. 2023. V. 11. #3338.
- [2] S.J. Wu, X. Zhao. // Chem. Rev. 2023. V. 123. #14084.

ИЗУЧЕНИЕ ГЕТЕРОГЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ КОНТРОЛИРУЕМОГО ВЫСВОБОЖДЕНИЯ ТЕРАПЕВТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

Ибрагимов А.Э.^{1*}, Абдурашитов А.С.^{1,2}, Прошин П.И.^{2,1}, Сухоруков Г.Б.^{1,2}

¹Центр нейробиологии и нейрореабилитации имени Владимира Зельмана,
Москва, Россия

²ООО "ЛИФТ Центр", Москва, Россия

*Almaz.Ibragimov@skoltech.ru

Пористые композиционные материалы на основе полимолочной кислоты (PLA) и поливинилпирролидона (PVP) являются перспективными для контролируемой доставки водорастворимых лекарственных препаратов. В данных композитах PLA выступает как биоразлагаемая структурная основа, а PVP как гидрофильный полимер, является порогеном и создает поры в матрице PLA [1]. Пористые биорезорбируемые материалы имеют потенциал применения как системы доставки различных лекарств: для лечения различных заболеваний, включая инфекции различной природы, онкологические заболевания, а также такие композиты могут применяться в регенеративной медицине [2]. График распределения пор по из площасти для различных композитов PLA:PVP (A), 5-дневный релиз метиленового синего (B), СЭМ-снимок поверхности 10-микронной плёнки PLA70:PVP30 (C) и PLA 85:PVP15 (D) указаны ниже, а также свойства этих композитов в табличном виде указаны ниже (Рисунок 1, Таблица 1).

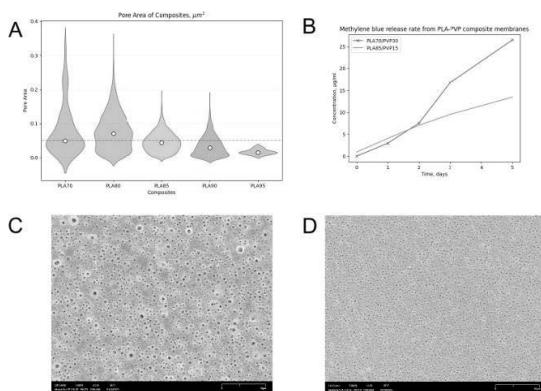


Рисунок 1 – полученные данные пористости и график высвобождения метиленового синего.

Таблица 1 – Механические свойства исследуемых композитов на основе PLA и PVP

Тип композита	F , максимальная нагрузка (Н)	E , модуль Юнга (ГПа)	F_m , предельное напряжение при растяжении, (МПа)
PLA85:PVP15	1.77 ± 0.18	4.16 ± 0.25	55.4 ± 5.5
PLA70:PVP30	1.11 ± 0.21	3.81 ± 0.27	34.8 ± 6.8

Список используемой литературы:

- [1] P. Franco, I. De Marco. The Use of Poly(N-vinyl pyrrolidone) in the Delivery of Drugs: A Review // Polymers, 2020. 12(5). 1114.
- [2] A. Vlachopoulos, G. Karlioti, E. Balla, et al. // Poly(Lactic Acid)-Based Microparticles for Drug Delivery Applications: An Overview of Recent Advances // Pharmaceutics. 2022. 14(2). 359.

СИНТЕЗ ЗВЕЗДООБРАЗНЫХ ПОЛИ-2-АЛКИЛ-5,6-ДИГИДРО-4Н-ОКСАЗИНОВ С АЗАЦИКЛОФАНОВЫМ ЯДРОМ

Козина Н.Д.*, Кирилл Т.Ю., Филиппов А.П.

Филиал НИЦ "Курчатовский институт" - ПИЯФ – ИВС, Санкт-

Петербург, Россия

* ndkozina@gmail.com

Работа посвящена синтезу шестилучевых термочувствительных полигексааза[26]ортопарациклофановых ядер. С целью реализации данной идеи разработан метод синтеза азациклофана [3+3]-циклотримеризацией R,S-транс-1,2-циклогександиамина с тереальдегидом. Вследствие стереокомплементарности, реакция образования циклического основания Шиффа протекает с выходом близким к количественному и, после восстановления боргидридом натрия, приводит к целевому макроциклу (Рисунок 1).

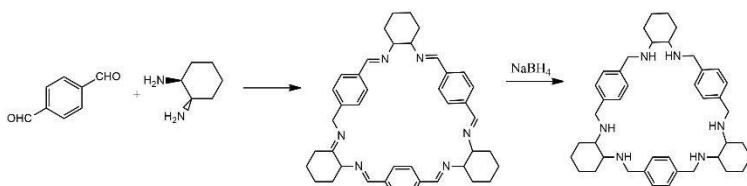


Рисунок 1 – Синтез шестилучевого звездообразного сополимера с гексаазоциклофановым ядром

Азоциклофаны хорошо показали себя в качестве обрывателей растущих цепей в катионной полимеризации 2-алкил-5,6-дигидро-4н-оксазинов за счёт быстрого и количественного присоединения в 6-ой позиции оксазинового гетероцикла [1]. Это дает возможность использовать полученный гексааза[26]ортопарациклофан для синтеза звездообразных шестилучевых полимеров подходом «прививка на». Данный подход к синтезу позволяет достичь наибольшего контроля над структурой синтезируемого звездообразного полимера, так как основные составляющие – ядро и полимерные лучи, синтезируются отдельно друг от друга, непосредственно перед образованием звездообразной структуры.

Структура синтезированных звездообразных полимеров подтверждалась методами УФ-спектроскопии и ^1H ЯМР спектроскопии, молекулярно-массовые характеристики определены комбинацией методом ГПХ и статического светорассеяния.

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ № 23-13-00205.

Список используемой литературы:

[1] M. Kurlykin, N. Kozina, T. Kirila, A. Filippov, A. Tenkovtsev // Mendeleev Communications. 2024. V. 34. P. 743–744.

НОВЫЕ СТОМАТОЛОГИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ БИОПОЛИМЕРНЫХ СМЕСЕЙ АГАР-ЖЕЛАТИН

Кузина Т.Д.*, Глухарев А.Ю., Воронько Н.Г.

Мурманский арктический университет, Мурманск, Россия

**kuzinatd@mauniver.ru*

Стоматологические материалы, основным компонентом которых является агар-агар, представляют собой гидроколлоидные массы, способные к обратимому гелеобразованию. Благодаря низкой стоимости, дополняемой возможностью многократного использования, и точности получаемых с их помощью негативных отображений рельефа тканей или моделей, массы на основе агара применяются для дублирования моделей при создании бюгельных протезов [1], реже – в качестве оттисковых материалов [2]. При этом приходится сталкиваться и с рядом практических затруднений: склонностью к синерезису и высокими температурами плавления гелей [1, 2]. Добиться оптимальной комбинации свойств материала можно, используя синергетический подход к созданию биополимерных композиций и вводя в состав агаровых масс другие

гидроколлоиды. Перспективами в качестве такой модифицирующей добавки обладает желатин. Формируя гели с более низкими температурами плавления и синерезисом, он, тем не менее, ограниченно используется в стоматологии в качестве самостоятельного материала в связи с микробиологическими рисками [3].

Цель настоящей работы заключается в установлении оптимальных соотношений агара и желатина для получения стоматологических материалов в форме гелей с требуемыми характеристиками. Исследованы термические и реологические свойства гидроколлоидных модельных смесей на основе агара с добавками желатина из кожи холодноводных рыб. При этом использование желатина, получаемого из альтернативных традиционным источников, призвано раскрыть функциональный и технологический потенциал вторичного биосыря.

С использованием дифференциальной сканирующей калориметрии для масс на основе агара зафиксировано снижение температуры плавления и повышение температуры гелеобразования под влиянием вводимого желатина. Таким образом, достигается сужение диапазона рабочих температур материала.

Методами объёмной реологии установлено, что гелеобразование в гидроколлоидных массах с концентрацией агара ниже критической в присутствии желатина протекает медленнее, чем в массах с той же концентрацией агара без добавок; при более высоких концентрациях, а также при введении нейтральных солей (NaCl , K_2SO_4) скорости отверждения материалов с добавлением желатина и без него оказываются сопоставимыми. Под воздействием гармонических механических колебаний материалы агар–желатин сохраняют свойственную агаровым массам вязкоупругую природу; при этом показатели прочности и упругости неаддитивно возрастают. Показано, что введение желатина сопровождается увеличением пластичности массы, упрощая извлечение модели либо челюсти из объёма материала, однако обладая потенциальным негативным влиянием на качество оттисков.

Гидроколлоидные массы, в которые вводился желатин, демонстрируют снижение значений синерезиса по сравнению с массами без добавок.

Посредством анализа профиля текстуры, позволяющего сымитировать человеческий укус, определены изменения структурно-механических характеристик (твёрдость, вязкость и липкость и др.) материалов агар–желатин в зависимости от их концентрации в системе.

Список используемой литературы:

[1] A. Sofou, E. Kotsiomiti, N. Farmakis et al. // Eur. J. Prosthodont. Restor. Dent. 1998. V. 6(2). P. 79–84.

[2] M. Taira, Y. Araki // J. Oral Rehabil. 2002. V. 29. P. 697–701.

[3] M. Paczkowska-Walendowska, M. Kulawik, J. Kwiatek et al. // Materials. 2025. V. 18(9). #2124.

РЕГЕНЕРАЦИЯ В МОДЕЛИ ПОЛНОСЛОЙНОЙ РАНЫ МЫШИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ КСЕНОГЕННЫХ РЕГУЛЯТОРНЫХ Т-КЛЕТОК В ФИБРИНОВОМ ГЕЛЕ В КАЧЕСТВЕ НОСИТЕЛЯ

Пермякова А.А.^{1,2}, Кузьменко Е.В.¹, Ржанова Л.А.¹, Рябинин А.А.¹,
Воротеляк Е.А.^{1,2}, Моргун Е.И.¹

¹*Институт биологии развития им. Н.К. Кольцова РАН, Москва, Россия*

²*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Москва, Россия*

Регуляторные Т-клетки (Трег) - важный компонент для поддержания тканевого гомеостаза и регенерации [1]. В настоящий момент появляются работы, в которых исследуется возможность применения данного типа клеток в регенеративной медицине, в т.ч. для регенерации различного типа ран [2]. В то же время важной проблемой является подбор носителя для данных клеток. Гель на основе фибрина и тромбина широко используется в медицине в качестве кровоостанавливающего средства, а также в тканевой инженерии и клеточной терапии в качестве носителя клеток. [2]. Целью данной работы было изучение процесса регенерации раны под воздействием регуляторных Т клеток, а также оценка фибринового геля в качестве носителя для данного типа клеток.

Фенотип CD4+CD25+CD127low Трег был индуцирован в тотальной фракции CD4+ Т клеток, выделенных из периферической крови здоровых доноров путем магнитного сортирования. Трег культивировали в течение 14 суток в среде RPMI с 10% инактивированной эмбриональной телячьей сыворотки с добавлением TGF-β, IL-2, антител против CD3, а также глутамата и пирувата. Для моделирования раны использовали самцов линии C57/bl. Всем мышам наносили полнослойную квадратную рану с площадью 1 см². Далее мыши были разделены на группы – “контроль”, “гель” и “Трег”. Мышам из групп “Трег” и “гель” в раневое ложе вносили конструкцию из фибрин-тромбинового гидрогеля, содержащего Трег и без них. Животных выводили из эксперимента на 5, 10 и 15 сутки эксперимента. Методами морфометрии были оценены такие параметры раневого заживления, как среднее количество клеток на поле зрения в раневом ложе, а также показатель рельефа раны, определяемый как

соотношение толщины грануляционной ткани в раневом ложе к краям раны.

В результате эксперимента было показано, что на 5 сутки показатель рельефа раны достоверно снижался в группах “гель” и “Трег”, что может свидетельствовать об антирубцовом эффекте не только Трег, но и фибринового носителя. Данный результат согласуется с тем, что на 5 сутки среднее количество клеток в раневом ложе в группе “Трег” было достоверно меньше, чем в группе “контроль”. Уменьшение количества клеток может быть обусловлено как снижением числа клеток воспалительной фракции, так мезенхимных клеток, активная пролиферация которых может приводить к образованию рубца. Тот же показатель в группе “гель” не отличался значимо ни от группы “контроль”, ни от группы “Трег”. На 10 сутки отсутствует достоверная разница количестве клеток в раневом ложе, так и в показателе рельефа между группой “контроль”, а также группами “гель” и “Трег”, что говорит о том, что темпы регенерации в целом уравниваются. На 10 сутки количество клеток в группе “Трег” достоверно больше, чем в группе “гель”, что может свидетельствовать о более активных клеточных событиях под влиянием Трег. Таким образом, и Трег, и фибриновый гель могут активно участвовать в ремоделировании ткани во время регенерации раны. Кроме того, фибриновый гель является подходящим носителем для данных клеток. Целью дальнейших исследований является изучения механизмов регенерации раны под влиянием Трег, а также дифференцированная оценка роли Трег и геля в данных событиях.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-74-30015-П, <https://rscf.ru/project/21-74-30015/>

1. Morgan E. I. [и др.]. // Cells. 2024. Т. 13. № 20.
2. Nayer B. [и др.]. // Nature Communications . 2024. № 1 (15).

БИОРАЗЛАГАЕМЫЕ НАНОНОСИТЕЛИ ДЛЯ НЕЙТРОНОЗАХВАТНОЙ ТЕРАПИИ ОНКОЛОГИЧЕСКИХ ЗАБОЛЕВАНИЙ

Поцелеев В.В.^{1*}, Сухоруков Г.Б.¹, Успенский С.А.²

¹Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

²Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С.

Ениколовова, Москва, Россия

*Vladislav.Potseleev@skoltech.ru

Нейтронозахватная терапия (НЗТ) рассматривается как один из наиболее перспективных методов лечения онкологических заболеваний [1]. В настоящее время основными агентами для НЗТ являются борсодержащие соединения, такие как борфенилаланин и боркаптат натрия, содержащие изотоп ^{10}B . Однако их производство экономически затратно, а низкая концентрация бора (<10%) требует применения высоких доз для достижения терапевтического эффекта.

Перспективной альтернативой выступают наночастицы бора, которые не только проще синтезировать, но и обеспечивают почти 100% содержание атомов бора, что значительно снижает необходимую дозировку. Кроме того, недавние исследования показали, что изотоп лития-6 (^{6}Li) обладает более высоким сечением захвата нейtronов по сравнению с ^{10}B , открывая новые возможности для разработки препаратов НЗТ. Однако ключевой проблемой остается создание эффективных систем доставки ^{6}Li в опухолевые ткани.

Для оптимального поглощения опухолевыми клетками размер наночастиц должен составлять менее 100 нм. Помимо этого, важными задачами являются обеспечение контролируемого высвобождения активных соединений и их избирательное накопление в целевых тканях. В связи с этим разработка биоразлагаемых наносовителей на основе бора и лития с регулируемым высвобождением и таргетированной доставкой представляет собой важное направление в развитии НЗТ.

В данной работе в качестве основы для инкаспулации бор- и литийсодержащих соединений были выбраны биосовместимые и биоразлагаемые полимеры – полилактид (PLA) и сополимер молочной и гликолевой кислот (PLGA), широко применяемые в биомедицине [2]. Цель исследования – разработка методики получения биоразлагаемых наночастиц на основе PLA и PLGA, содержащих перспективные агенты для нейтронозахватной терапии рака.

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ № xx-xx-xxxxx.

Список используемой литературы:

[1] Nanocomposite materials based on polylactide and gold complex compounds for absorbed dose diagnostics in bnct / V. Potseleev, S. Uspenskii, E. Trofimchuk et al. // International Journal of Molecular Sciences. — 2023.— Vol. 24, no. 22. — P. 16492.

[2] Potseleev V. V., Trofimchuk E. S., Nikonorova N. I. Kinetics of the release of brilliant green from nanoporous polylactide obtained by a crazing mechanism // Mendeleev Communications. — 2021. — Vol. 31. — P. 515–516.

**СРАВНИТЕЛЬНОЕ IN VIVO ИССЛЕДОВАНИЕ
БИОСОВМЕСТИМОСТИ КСЕНОГЕННЫХ КОЛЛАГЕНОВЫХ
МАТРИЦ ДЛЯ СОЗДАНИЯ БАРЬЕРНЫХ МЕМБРАН В
ТЕХНИКАХ НАПРАВЛЕННОЙ РЕГЕНЕРАЦИИ КОСТНОЙ
ТКАНИ**

Пятина К.В.^{1,2*}, Фадеева И.С.¹, Тетерина А.Ю.², Минайчев В.В.^{1,2},
Смирнов И.В.², Смирнова П.В.², Фадеев Р.С.^{1,2}, Звягина А.И.^{1,2},
Комлев В.С.²

¹*ФГБУН Институт теоретической и экспериментальной биофизики
РАН, Пущино, Россия;*

²*ФГБУН Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова
РАН, Москва, Россия*

**kirapyatina01@gmail.com*

Разработка барьерных мембран (БМ) для направленной регенерации костной ткани является актуальной задачей современной челюстно-лицевой хирургии, при этом фокус внимания смещается на создание натуральных резорбируемых БМ на основе коллагена ввиду его высокой степени биосовместимости, биоактивных свойств и способности к резорбции в организме реципиента. В данной работе исследовали биосовместимость полученных различными методами выделения коллагеновых матриц на модели гетеротопической имплантации крысам *in vivo*.

Для получения коллагеновых матриц использовали фрагменты ксеногенного бычьего перикарда в зоне основной ткани с высокой степенью гомогенности по содержанию коллагеновых волокон. Децеллюляризацию фрагментов перикарда проводили двумя методами: (1) обработкой 0,5% раствором дезоксиходата натрия моногидрата (группа ДХНм); (2) комбинированным воздействием гипотонического шока и нуклеаз: 0,02% РНКазы, 0,2% ДНКазы (группа ГШ). После обработки проводили измерение остаточной донорской ДНК и морфогистохимический анализ изменения структуры образцов перикарда. Исследование биосовместимости полученных матриц проводили в модели гетеротопической (подкожной) имплантации крысам (Wistar ♂, 200±10 гр) в соответствие с ГОСТ ISO 10903-6 на сроки 3, 8 и 13 недель с последующим морфогистохимическим анализом.

В образцах группы ДХНм выявлено наибольшее сохранение структуры коллагенового матрикса при минимальном содержании остаточной донорской ДНК ($61,2 \pm 13,2$ нг/мг) в сравнение с группой ГШ, в

которых, в свою очередь, было обнаружено разрыхление коллагеновых волокон и более высокое содержание остаточной ДНК (120 ± 14 нг/мг). In vivo исследование показало, что к 3-й неделе в образцах группы ДХНм наблюдалась равномерная миграция клеток реципиента, в то время как в группе ГШ миграция клеток в матрикс была менее выражена. К 8-й неделе в группе ДХНм отсутствовали признаки воспаления, отмечалось активное заселение матрикса клетками реципиента без формирования фиброзной капсулы. В то же время в группе ГШ выявлено слабое заселение материала клетками, краевая инфильтрация клетками и начало формирования соединительнотканной капсулы вокруг имплантата. К 13-й неделе в группе ДХНм сохранялась стабильная интеграция имплантата, а именно отсутствовали признаки воспаления и активной резорбции, плотность клеток в матриксе соответствовала окружающим тканям. В группе ГШ наблюдалось формирование выраженной васкуляризированной соединительнотканной капсулы, выраженная краевая клеточная инфильтрация, указывающая на возможную резорбцию матрикса, а также снижение клеточной плотности в толще матрикса.

Таким образом, коллагеновые матрицы, обработанные ДХНм, продемонстрировали наибольшую биосовместимость in vivo. Полученные результаты позволяют создать высокоэффективные матрицы в качестве основы для создания биодеградируемых барьерных мембран, соответствующих требованиям направленной регенерации тканей.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ №24-73-10208 «Разработка инжектируемых кальцийфосфатных гидратированных паст для малоинвазивного введения и полярно реминерализованных композитных барьерных мембран с целью направленной регенерации тканей в травматологии и челюстно-лицевой хирургии» с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Структурно-функциональные исследования биосистем» ИТЭБ РАН.

СТРУКТУРНО-КОНФОРМАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА МОЛЕКУЛЯРНЫХ ЩЕТОК НА ОСНОВЕ ОЛИГООКСИАЛКИЛЕНОВЫХ МОНОМЕРОВ

Симонова М.А.^{1*}, Садков Д.Ю.¹, Каморин Д.М.², Симагин А.С.²

Филиал федерального государственного бюджетного учреждения
«Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» –
Институт высокомолекулярных соединений, Санкт-Петербург, Россия

²*Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород Россия*
**mariasimonova1983@mail.ru*

Разработка рациональных методов получения новых типов биологически чувствительных полимерных щеток с контролируемыми конформационными и фазовыми переходами в водных растворах, а также оценка перспектив их использования в качестве полимерных контейнеров для адресной доставки и контролируемого высвобождения лекарственных препаратов в организме является важной фундаментальной задачей современной полимерной науки.

Цель работы: синтез и исследование влияния состава, температуры и концентрации на молекулярно-массовые, гидродинамические характеристики, структурно-конформационные и термочувствительные свойства, а также способность к агрегации полученных методом контролируемой радикальной ОПЦ-полимеризации.

В качестве мономеров в данной работе использованы четвертично амонивое соединение ЧАСМ, метоксиолигоэтиленгликольметакрилат МОЭГМА со средним числом этиленгликольных звеньев в заместителе равном пяти - C₁E₅M, а также АОЭГМ со средним числом этиленгликольных звеньев в заместителе равном 10 и алкильным фрагментом C₁₂ - C₁₂E₁₀M.

В работе в качестве методов исследования использовались статическое, динамическое рассеяние света, турбидиметрия и рефрактометрия. Молекулярно-массовые характеристики были определены в ДМФА и ацетонитриле. Термочувствительные свойства полимеров изучены в водных и водно-солевых растворах (0.1M NaCl).

Проведенные исследования показали возможность получения полимерных молекулярных щеток C₁E₅M-C₁₂E₁₀M-ЧАСМ на основе гидрофильного, гидрофобного мономеров методом "прививка через" в условиях ОПЦ полимеризации.

Анализ полученных результатов позволяет заключить, что макромолекулы C₁E₅M-C₁₂E₁₀M-ЧАСМ в водных растворах продемонстрировали высокую амфи菲尔ность, выражющуюся в высокой склонности к образованию мицеллярных структур в водных растворах при низких концентрациях, а также в термочувствительных свойствах по типу НКТР. Увеличение доли звеньев алкоксиолигоэтиленгликольметакрилата C₁₂E₁₀ приводит к снижению значений температур фазовых переходов в растворах C₁E₅M-C₁₂E₁₀M-ЧАСМ.

**МЕТОДИКА ПОЛУЧЕНИЯ БИОДЕГРАДИРУЕМОГО
ПОЛИМЕРНОГО ИМПЛАНТАТА ДЛЯ ПОДКОЖНОЙ ДОСТАВКИ
ГЕМОСТИМУЛЯТОРА**

**Шинкарева М.В.^{1,2*}, Анисимова Н.Ю.^{1,2}, Сенатов Ф.С.²,
Киселевский М.В.^{1,2}**

**¹«Национальный медицинский исследовательский центр онкологии имени
Н.Н. Блохина» Минздрава России, Москва, Россия**

**²Национальный исследовательский технологический университет
МИСИС, Москва, Россия**

***m.shinkareva29@mail.ru**

У онкологических больных на фоне применения противоопухолевой терапии одним из наиболее часто встречающихся осложнений является нейтропения (снижение концентрации нейтрофилов в крови менее 2000 клеток/мл). Для профилактики и лечения нейтропении используют препараты на основе гранулоцитарного колониестимулирующего фактора (Г-КСФ), например, Филграстим, который назначают не ранее чем через 24 часа после проведения курса химиотерапии. Однако соблюдение такого предписания зачастую вызывает трудности у пациентов, поскольку существует необходимость повторного посещения пациентом медицинского учреждения и проведения дополнительных пункций на фоне максимального проявления побочных осложнений химиотерапии.

Решением данной проблемы может выступить имплантируемая лекарственная форма гемостимулятора, которую можно будет ввести сразу после окончания курса химиотерапии, тем самым обеспечивая отсроченную и пролонгированную доставку лекарственного препарата.

Целью данной работы является разработка методики получения полимерных биодеградируемых имплантатов для подкожного введения с целью отсроченной и пролонгированной доставки гемостимулятора.

Для получения полимерных каркасов была разработана установка, основными компонентами которой являются шаговый двигатель и стержень, выполняющий роль формы для получения полимерных каркасов цилиндрической формы. В качестве исходного материала для формирования каркасов в данной работе использовали 6 мас.% раствор хитозана (Сонат, Россия) в 2% уксусной кислоте.

Принцип формирования каркасов с использованием разработанной установки заключался в следующем: стержень погружался в полимерный раствор, затем при непрерывном вращении со скоростью 30 об/мин растворитель испарялся, оставляя на стержне полимерную пленку, повторяющую форму стержня. После высыхания первого слоя данный

процесс повторялся до достижения необходимой толщины полимерного каркаса, тем самым формируя многослойную структуру.

Было установлено, что, варьируя диаметр стержня, количество формируемых слоёв и глубину погружения стержня в полимерный раствор можно получать каркасы с различными геометрическими характеристиками. В частности, нами были отработаны способы получения имплантатов в виде капсулы, состоящей из двух трехслойных каркасов с диаметром 3,3 мм и длиной 13 мм.

Разработанная методика позволяет получать имплантаты на основе полимерных каркасов с различными параметрами – длины, внутреннего объема и толщины, варьируя которые можно настраивать скорость их деградации. Поскольку во внутреннюю полость разрабатываемого имплантата планируется вводить препараты на основе Г-КСФ, которые представлены на рынке исключительно в виде раствора, или клеточную супензию, можно использовать биосовместимые и биодеградируемые гели, которые удержат лекарственный препарат или клеточную супензию в своем объеме. Такие имплантаты могут быть использованы в качестве систем для отсроченной и пролонгированной доставки лекарств, в том числе гемостимуляторов.

МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГИДРОГЕЛЕЙ ИЗ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ГИАЛУРОНОВОЙ КИСЛОТЫ

Сучков М.Ю.^{1*}, Кузяева В.И.², Сочилина А.В.², Акасов Р.А.^{1,2},
Егорова Т.В.¹, Генералова А.Н.²

¹*Московский педагогический государственный университет, Москва,
Россия*

²*Институт биоорганической химии им. акад. М.М. Шемякина и Ю.А.
Овчинникова РАН, Москва, Россия*

*max.suchkov3001@yandex.ru

Гиалуроновая кислота (ГК) благодаря высокой растворимости и наличию реакционноспособных функциональных групп, а также биологической активности, является перспективным материалом для регенеративной медицины. Однако её применение ограничено низкой механической прочностью и быстрой деградацией *in vivo*. Целью настоящего исследования было изучение влияния степени модификации ГК (мГК) и содержания кросс-линкера полиэтиленгликоль диакрилат (ПЭГДА) на механические свойства и скорость деградации гидрогелей на её основе.

Гидрогели изготавливали посредством модификации ГК глицидилметакрилатом и последующего фотоотверждения производной *in situ*. В роли фотоинициатора применяли фенил(2,4,6-триметилбензоил)fosфинат лития (LAP), выбранный за его водорастворимость, низкую токсичность и высокую скорость фотосшивки при УФ-облучении на длине волны 365 нм. Механические характеристики, включая прочность на сжатие и сдвиговое напряжение при растяжении, исследовали при помощи системы ElectroPuls E-1000 Dynamic Test System (Instron, США) (Таблица, 1).

Таблица 1 – Модуль упругости при сжатии исследуемых гидрогелей

№	Состав фотокомпозиции (мГК масс.% /ПЭГДА масс.%)	Модуль Юнга (МПа) ± СО
1	5/5	0,898 ± 0,306
2	10/5	0,86 ± 0,26
3	15/5	1,5880 ± 0,023
4	20/5	2,096 ± 0,119
5	20/7,5	2,429 ± 0,213
6	20/10	3,002 ± 0,254

Также была изучена деградация гидрогелей в различных водных средах на модели костного дефекта свиной кости. В течение 30 дней инкубации при 37 °C в атмосфере CO₂ обнаружено, что образцы в культуральной среде DMEM без кросс-линкера полностью растворились, при этом остальные гидрогели набухали примерно в 1,5-2 раза.

Таким образом, оптимальные параметры фотокомпозиций — при концентрации мГК 20 масс.% и ПЭГДА в пределах 5–10 масс.% — обладают сниженной деградацией и обеспечивают формирование гидрогелей с механическими свойствами, сопоставимыми с механическими свойствами плотной соединительной ткани и эластичного хряща (около 0,5–5 МПа) [1], открывая потенциал для формирования скаффолдов, имитирующих плотные ткани, и биопечати *in situ* на месте костных дефектов.

Исследование проведено в рамках темы госзадания Министерства просвещения РФ № 124031100005-5

Список используемой литературы:

- [1] G.E. Kempson, M.A.R. Freeman et al. The determination of a creep modulus for articular cartilage from indentation tests on the human femoral head // Journal of Biomechanics. 1971. V. 4, #4. P. 239–250.

ЦИТОТОКСИЧНОСТЬ ЛИПОСОМАЛЬНЫХ ФОРМ ФОСФОНИЕВЫХ КОНЮГАТОВ БЕТУЛИНОВОЙ КИСЛОТЫ

Салихова Т.И.¹, Даиоб К.¹, Абдуллин Т.И.¹, Салахиева Д.В.¹,
Паширова Т.Н.^{1,2}, Немтарёв А.В.^{1,2}, Миронов В.Ф.^{1,2}

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

²Институт органической и физической химии им. А.Е. Арбузова ФИЦ
КазНЦ РАН, Казань, Россия

*taliya.salikhova@mail.ru

Лупановые тритерпениоиды, содержащиеся в представителях семейств *Betulaceae* и *Platanaceae*, являются перспективной платформой для синтеза биологически активных веществ и разработки лекарственных средств. Благодаря способности инициировать апоптоз опухолевых клеток по митохондриальному пути бетулиновая кислота (БК) и ее производные представляют значительный интерес в противоопухолевой терапии [1]. Ранее были предложены подходы к усилению митохондриотропных и цитотоксических свойств БК посредством модификации трифенилfosфониевой (ТФФ) группой с различными линкерами; модификация ТФФ-фрагментами гликозидов БК приводит к повышенному накоплению конъюгатов в опухолевых клетках [2]. Для дальнейшего повышения специфической активности производных БК актуальной задачей является их комбинация с наноразмерными переносчиками для улучшения фармакологических свойств, в частности, пролонгирования действия *in vitro* и *in vivo*.

В настоящей работе исследовано влияние встраивания трифенилfosфониогексил бетулината (ТФФ-БК) в мембрану липосом на взаимодействие соединения с опухолевыми клетками. Липосомальные формулировки получали гидратацией пленок фосфатидилхолина с конъюгатом или холестерином с последующей экструзией мультиламеллярных липосом через мембрану с размером пор 100 нм. Гомогенность и стабильность липосом, содержащих ТФФ-БК, были подтверждены методом динамического рассеяния света (гидродинамический диаметр 123 нм, индекс дисперсности частиц 0.17). Полученные липосомы имели положительный заряд (ζ -потенциал +33 мВ), что свидетельствует о встраивании конъюгата в липосомальную мембрану и появлении катионных ТФФ групп на границе раздела липосома/раствор.

По данным резазуринового метода ТФФ-БК значительно ингибировало жизнеспособность клеток аденокарциномы простаты человека (линия PC-3); значение IC₅₀ составило 0.21 мкМ. В тех же

условиях липосомальная форма ТФФ-БК проявила меньший цитотоксический эффект ($IC_{50} > 10 \text{ мкМ}$). Сходным образом, в составе липосом конъюгат ТФФ-БК оказывал пониженный деполяризующий эффект на потенциал митохондриальной мембранны клеток PC-3, что в совокупности объясняется пониженной клеточной доступностью ТФФ-БК, включенного в липосомы в сравнении со свободным. При этом по данным проточной цитофлуориметрии липосомальная форма ТФФ-БК с инкапсулированным в ядро родамином характеризуется повышенным внутриклеточным накоплением по сравнению с немодифицированными липосомами, содержащими холестерин.

Исследование выполнено за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности (проект FZSM-2025-0002).

Список используемой литературы:

- [1] O. Tsepaeva, A. Nemtarev, T. Abdullin et al. //Anticancer agents in Med. Chem. 2020. V.20. #286-300
- [2] O. Tsepaeva, T. Salikhova, R. Ishkaeva et al. // J. Nat. Prod. 2023. V.86. #1939-1949.

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА МОЛЕКУЛЯРНЫХ ЩЕТОК НА ОСНОВЕ N-ИЗОПРОПИЛАКРИЛАМИДА С МАКРОМОНОМЕРАМИ ПОЛИ-D,L-ЛАКТИДА НА ПРОЦЕССЫ САМООРГАНИЗАЦИИ В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ

Кирилл Т.Ю., Филиппов А.П.

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ-ИВС, Санкт-Петербург,

Россия

tatyana_pux@mail.ru

В современной науке стимул-чувствительные полимеры занимают важные позиции. Их интенсивные исследования приводят к появлению новых технологий в широком спектре практического применения, в том числе в энергетике, военной технике, автопромышленности, медицине и др. областях. Среди термочувствительных полимеров особое место занимает поли-N-изопропилакриламид (П-Н-ИПААМ). При этом в последнее время особое внимание привлекают амфифильные стимул-чувствительные привитые сополимеры (молекулярные щетки). Обычно такие щетки построены из гидрофобной или реже гидрофильной основной цепи и водорастворимых стимул-чувствительных боковых цепей. Их

свойства могут варьироваться в зависимости от структурных особенностей молекулярной щетки, таких как длина основной и боковых цепей, плотность прививки последних, химическая структура цепей, функциональность и т. д. Особенno востребованы молекулярные щетки с привитыми термочувствительными цепями П-Н-ИПААМ и его сополимеров.

В работе изучены молекулярные щетки на основе Н-ИПААМ с макромономерами поли-D,L-лактида (ПЛА) (П(Н-ИПААМ-со-графтПЛА)) разного состава. Молекулярно-массовые характеристики определены методами молекулярной гидродинамики и оптики в органическом растворителе. Полученные значения гидродинамических характеристик представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Молекулярно-массовые и гидродинамические характеристики П(Н-ИПААМ-со-графтПЛА)

Образец	мн-ИПААМ/мм	$M_n, \text{г}\cdot\text{моль}^{-1}$	$R_h, \text{нм}$	$[\eta], \text{см}^3\cdot\text{г}^{-1}$	$dn/dc, \text{см}^3\cdot\text{г}^{-1}$	$A_2, 10^{-4} \text{ см}^3 \text{моль}^{-2}\cdot\text{г}^{-2}$
1	5	37000	3,4	7,8	0,1163	1,3
2	10	31000	3,9	7,3	0,1117	0,6
3	20	31500	3,2	8,0	0,1106	0,4
4	30	35500	4,0	8,0	0,1059	0,2

Процессы самоорганизации молекулярных щеток П(Н-ИПААМ-со-графтПЛА) изучены в водных растворах при варьировании концентрации и температуры. Для всех образцов получены температурные зависимости интенсивности рассеянного света I , оптического пропускания I^* , гидродинамических радиусов R_h рассеивающих объектов и их относительной доли S_i в растворе. Для каждого образца были получены концентрационные зависимости температур фазового разделения T . Для всех исследованных П(Н-ИПААМ-со-графтПЛА) при увеличении концентрации снижалась температура фазового разделения. Такое поведение является типичным для растворов термочувствительных полимеров. При снижении доли макромономера ПЛА в составе молекулярных щеток (от 1 к 4 образцу) зафиксировано увеличение температур фазового разделения T , что обусловлено изменением гидрофильно-гидрофобного баланса. При этом, во всех водных растворах при комнатной температуре присутствует один тип частиц – мицеллоподобные агрегаты с гидродинамическим радиусом $R_m = 10 \text{ нм}$.

СЕКЦИЯ 4

Композиционные материалы

УСТНЫЕ ДОКЛАДЫ

Приглашенный доклад

МЕМБРАНЫ ИЗ ПОЛИ(3-ГИДРОКСИБУТИРАТА)/ФОСФАТОВ КАЛЬЦИЯ ДЛЯ БИОМЕДИЦИНСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Федотов А.Ю.^{1*}, Тюбаева П.М.^{2,3}, Егоров А.А.¹, Баранов О.В.¹,
Варьян И.А.^{2,3}, Романов Р.Р.³, Лобжанидзе П.В.¹, Мерзликин В.А.²,
Комлев В.С.¹

¹*Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова
Российской академии наук, Москва, Россия*

²*Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН, Москва,
Россия*

³*Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Москва,
Россия*

*Fedotov.ayu@gmail.com

Актуальным научным направлением сегодня является разработка новых биосовместимых материалов для костной и тканевой инженерии на основе комбинаций биополимеров и фосфатов кальция (ФК). Такие материалы представляют особый интерес при восстановлении костной ткани ввиду существенных недостатков существующих материалов, включающих ауто-, алло- и трансплантацию, которые являются дорогостоящими, болезненными и сопровождаются высоким риском отторжения и побочных операций [1]. Суть подхода тканевой инженерии заключается в разработке композитов на основе биополимеров и фосфатов кальция, как биологической альтернативы, которая должна не замещать, а стимулировать восстановление поврежденных тканей [2].

Работа направлена на создание композиционных нетканых волокнистых материалов методом электроспиннинга на основе поли(3-гидроксибутират) (ПГБ) и ФК. Были получены материалы с концентрациями носителя кальция от 0 до 40%. В статье изучено взаимное влияние носителя кальция и полимерной матрицы, а также представлены перспективы применения полученных материалов в медицине.

Электроспиннинг (ЭС) был выбран в качестве наиболее перспективного метода получения композитных материалов ПГБ/ФК с различным фазовым составом и содержанием ФК [3]. В качестве фосфатов кальция были выбраны (α -трикальцийфосфат (α -ТКФ) или октакалциевый фосфат (ОКФ)) поскольку они широко используется в качестве остеоиндуктивных биосовместимых материалов, служащих альтернативой синтетическим пористым костным материалам. Более того, отмечены не только остеоиндуктивные, но и остеогенные свойства ОКФ.

В ходе исследования были успешно получены волокнистые нетканые материалы на основе биополимера ПГБ с концентрацией наполнителя ФК от 0 до 40%. Установлено, что введение высоких концентраций α -ТКФ может существенно влиять на надмолекулярную структуру ПГБ, обеспечивая заметное снижение степени кристалличности материала при сохранении основных параметров кристаллической структуры, что позволит эффективно контролировать скорость биорезорбции имплантированного материала и, как следствие, скорость выхода ФК. Важно, что полученные материалы обладают высокой пористостью и высокой степенью развития поверхности, что, безусловно, является важным аспектом при разработке эффективных материалов для регенерации и реставрации.

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ № 25-13-00400.

Список используемой литературы:

- [1] Oliveira, É.R.; Nie, L.; Podstawczyk, D.; Allahbakhsh, A.; Ratnayake, J.; Brasil, D.L.; Shavandi, A. Advances in Growth Factor Delivery for Bone Tissue Engineering // Int. J. Mol. Sci. 2021, V. 22. P. 903.
- [2] Ginebra, M.; Espanol, M.; Maazouz, Y.; Bergez, V.; Pastorino, D. Bioceramics and bone healing // EFORT Open Rev. 2023. V. 3. P. 173-183.
- [3] Siqueira, L.; Roberto, F.; Anderson, P.; Lobo, O.; Trichêes, S. Morphological, thermal and bioactivity evaluation of electrospun PCL/ β -TCP fibers for tissue regeneration // Polímeros. 2019. V. 29. P. 2118.

ГИБРИДНЫЕ НАНОЧАСТИЦЫ Ta_2O_5/Au : РАДИАЦИОННО-ХИМИЧЕСКИЙ ПОДХОД К СОЗДАНИЮ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Кошевая Е.Д.*, Маслов Д.Д.

¹Федеральное Государственное бюджетное учреждение
«Государственный научный Центр Российской Федерации -
Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна»,
Москва, Россия
**katiaakosh@gmail.com*

Гибридные наночастицы на основе оксидов и благородных металлов демонстрируют значительный потенциал в медицине, биологии, катализе, сенсорах и других областях [1]. Например, наночастицы Ta_2O_5 и Au, будучи биосовместимыми и нетоксичными, обладают высоким потенциалом для разработки новых радиосенсибилизаторов [2] и

контрастных агентов [3]. Комбинация этих материалов, в частности модификация поверхности оксидных ядер наночастицами Au, потенциально позволит получить эффективный функциональный материал для радиационной медицины. При этом локализация золота на поверхности оксида способствует усилению связывания частиц с белками крови и повышению колloidной устойчивости системы в биологических средах.

В настоящей работе синтез гибридных наноструктур осуществлялся методом радиолитического восстановления ионов золота в гидрозолях, содержащих оксидные наночастицы (Рисунок 1). Так, рост частиц Au происходит *in situ* за счет радиолиза воды, без применения дополнительных восстановителей и стабилизаторов. Такой подход позволяет получать частицы высокой чистоты и дисперсности, а контроль размеров и морфологии осуществляется за счёт варьирования дозы и мощности облучения.

Оптимизация условий получения гибридных частиц проходила путем изучения влияния дозы электронного облучения (2–120 кГр), мощности дозы (2–80 кГр/мин), концентрации HAuCl_4 (0.125–0.500 mM), а также pH и химии поверхности оксидных ядер на формирование, свойства и эффективность связывания наночастиц Au. В качестве оксидных ядер применяли два типа частиц: немодифицированные наночастицы Ta_2O_5 и покрытые полидопамином (ПДА) наночастицы $\text{Ta}_2\text{O}_5@\text{ПДА}$. Полученные материалы были охарактеризованы методами просвечивающей электронной микроскопии, УФ-видимой и ИК-спектроскопии, динамического и электрофоретического рассеяния света. Коллоидная устойчивость наночастиц в фосфатно-солевом буфере и культуральной среде (DMEM) оценивалась с помощью динамического рассеяния света и турбидиметрии. Влияние химии поверхности наночастиц на цитотоксичность изучалось методом МТТ.

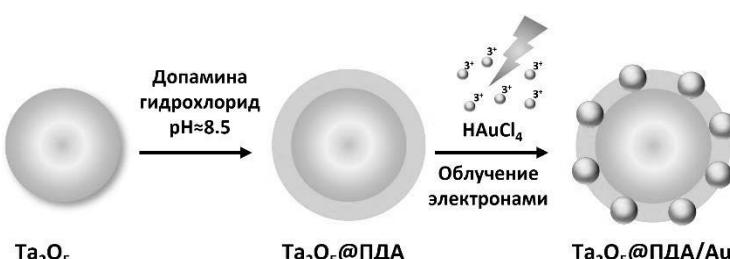


Рисунок 1 – Схема получения гибридных наночастиц.

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ № 24-23-00510.

Список используемой литературы:

- [1] А.В. Поволоцкая, А.В. Поволоцкий, А.А. Маньшина. Гибридные наноструктуры: синтез, морфология, функциональные свойства. // Успехи химии. 2015; 84(6):579-600.
- [2] М.А. Kolyvanova, A.V. Belousov, G.A. Krusanov et al. // Int. J. Mol. Sci. 2021, 22, 6030.
- [3] E.D. Koshevaya, D. Nazarovskaia, M. Simakov et al. // J. Mater. Chem. B, 2020, 8, 8337.

СИНТЕЗ И ХАРАКТЕРИСТИКА СТРОНЦИЙ/СЕРЕБРО-СОЗАМЕЩЕННОГО ГИДРОКСИАПАТИТА ДЛЯ СОЗДАНИЯ ОСТЕОКОНДУКТИВНЫХ И АНТИБАКТЕРИАЛЬНЫХ ГРАНУЛ

Кучеряев К.А.*, Чиканова Е.С., Короткова А.В., Полыгалова В.В.,
Штанский Д.В.

*Национальный университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия
k_kucheryaev@mail.ru

Потребность в трансплантации костей или операции по их замене у 4 миллионов человек в год подчеркивает важность эффективных методов лечения. Биоактивность гидроксиапатита (ГА) способствует регенерации костной ткани, однако его свойства можно дополнительно улучшить. Перспективные стратегии обеспечения антибактериальных свойств ГА без использования антибиотиков включают замещение ГА целевыми ионами. Гексагональная структура ГА отличается высокой стабильностью, а ее гибкость позволяет осуществлять катионные и анионные замещения [1, 2]. При этом важно поддерживать нецитотоксичность материала. В настоящей работе синтезирован со-замещенный ионами Sr^{2+} и Ag^+ нанопорошок ГА для улучшения остеointеграции и антибактериальной активности. На его основе получены биоразлагаемые гранулы, содержащие хитозан (Хит) и карбоксиметилцеллюлозу (КМЦ).

Синтез Sr/Ag -ГА проводился методом осаждения из водных растворов $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$, AgNO_3 и $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ с соотношением $(\text{Ca}+\text{Sr}+\text{Ag})/\text{P} = 1,67$ для получения замещенного ГА с формулой $\text{Ca}_{9,5}\text{Sr}_{0,25}\text{Ag}_{0,25}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$. К раствору нитратов при перемешивании прикалывался гидрофосфат аммония при $\text{pH} 11-12$. Осадок отфильтровывался и высушивался. Полученный порошок характеризовался методами РФА, ИК-Фурье, СЭМ, ЭДРС, БЭТ;

исследовалась кинетика деградации и антибактериальная активность. Для получения композитных гранул (Рисунок 1) порошок Sr/Ag-ГА добавлялся к гидрогелю, полученному смешиванием 2 % масс. растворов КМЦ и Хит в соотношении 1:1, до пастообразного состояния. Пасту формовали и сушили. Свойства гранул изучались методами СЭМ, ЭДРС, ИК-Фурье, пикнометрии; исследовались угол смачивания и кинетика деградации в трикс-буферном растворе при 37 °C на протяжении 21 дня.



Рисунок 1 – Фото композитных гранул на основе Sr/Ag-ГА

Порошок Sr/Ag-ГА является однофазным и наноразмерным. Замещение привело к увеличению параметров кристаллической решетки вследствие больших ионных радиусов Sr^{2+} и Ag^+ по сравнению с Ca^{2+} . Порошок обладает мезопористой структурой с удельной поверхностью 135,7 $\text{m}^2/\text{г}$. Проявляет выраженную антибактериальную активность в отношении штаммов *C. auris*, *S. aureus* и *E. coli*. Полученные монодисперсные гранулы имеют сферическую форму диаметром 5-6 мм, шероховатую поверхность и гидрофильные свойства. Их плотность составляет $2,750 \pm 0,006 \text{ г}/\text{см}^3$. Испытания по деградации подтвердили сохранение формы гранул в течение 3 недель. Таким образом, остеопластические гранулы на основе Sr/Ag-ГА перспективны для применения в регенеративной медицине.

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ № 25-19-00458

Список используемой литературы:

- [1] Goldberg M. A. et al. // Ceramics International. 2024. V. 50. #17404.
- [2] Ressler A. et al. // Ceramics international. 2022. V. 48. #18361.

КОРРОЗИОННАЯ И МЕХАНИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ МАГНИЕВЫХ МОДЕЛЬНЫХ ИМПЛАНТАТОВ С МОДИФИЦИРОВАННЫМИ ПОВЕРХНОСТЬЮ И ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРОЙ

Просолов К.А.^{1*}, Лугинин Н.А.¹, Кашин А.Д.¹, Ерошенко А.Ю.¹,
Седельникова М.Б.¹, Шаркев Ю.П.^{1,2}

¹*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск,
Россия*

²*Томский политехнический университет, Томск, Россия*

*konstprosolov@ispms.ru

В настоящее время одним из ключевых направлений развития регенеративной медицины является создание биодеградируемых имплантатов нового поколения, которые после выполнения своих функций полностью метаболизируются организмом. Особый интерес представляют магниевые сплавы. Для решения проблемы интенсивной коррозии магниевых сплавов в физиологической среде разработан комплексный подход к их модификации и тестированию.

Нами исследован сплав системы Mg-Zn-Zr-Ce (МА20) в крупнокристаллическом (КК), микрокристаллическом (МК) и ультрамелкозернистом (УМЗ) состояниях. Установлено, что переход к МК/УМЗ состоянию обеспечивает значительное повышение механической прочности и коррозионной стойкости [1]. Для повышения долговечности сплавов применён метод микродугового оксидирования (МДО) и сформированы кальцийфосфатные покрытия, модифицированные стронцием, что по литературным данным способствует ускоренному остеогенезу.

С целью дальнейшего повышения барьерных свойств пористая структура МДО покрытий была дополнительно инкапсулирована биосовместимым сополимером полимолочной и полигликолиевой кислот (PLGA). Проведён детальный анализ структуры таких комбинированных покрытий: установлено формирование аморфно-кристаллической фазы с наличием α - и β -трикальцийфосфатов и периклаза (MgO); добавление PLGA приводит к частичному заполнению пор и формированию плотного защитного слоя с характерным для аморфных тел диффузным рассеянием на рентгенограммах.

Дополнительно исследовано нанесение Zr-содержащих оксидных плёнок, полученных методом ВЧ-магнетронного распыления на поверхность МДО-PLGA композитов. Оптимизированы режимы осаждения и температура подложки, что позволило получить покрытия с улучшенными адгезионными и когезионными характеристиками.

Особое внимание уделено исследованию коррозионной усталости и коррозионного растрескивания под напряжением. Для этого разработана испытательная ячейка с протоком физиологической жидкости (0,9% NaCl, 37 °C), что позволяет моделировать реальные условия эксплуатации имплантатов при статических и малоциклических нагрузках. Эксперименты показали, что образцы в УМЗ/МК состоянии с комбинированными покрытиями демонстрируют минимальную степень деформации и наибольшую устойчивость к трещинообразованию как на воздухе, так и в агрессивной среде.

Таким образом, проведённый комплекс исследований доказал эффективность сочетания УМЗ/МК структуры магниевого сплава с многоуровневой системой покрытий (МДО-PLGA-ZrO₂), что обеспечивает оптимальный баланс механической прочности, коррозионной стойкости и биосовместимости.

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ № 23-13-00359.

Список используемой литературы:

[1] A.D. Kashin, K.A. Prosolov, A.Yu. Eroshenko et al. // J. Mater. Sci. 2025. V. 6. #10853-025-11061-8.

**КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ, ПОЛИМЕРНАЯ
ИНФИЛЬРАЦИЯ И СТЕКЛОИОНОМЕРНЫЙ ЦЕМЕНТ:
СРАВНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРИ EX VIVO
СТОМАТОЛОГИЧЕСКОМ ВМЕШАТЕЛЬСТВЕ**

Садырин Е.В.*, Волков С.С., Антипов П.Е., Васильев А.С.

Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону,

Россия

*esadyrin@donstu.ru

Наноиндентирование представляет собой комплекс методик, основанных на точном локальном силовом воздействии на поверхность материала с применением специализированного зонда — индентора — и одновременной регистрацией деформационного отклика с разрешением на нанометровом уровне. Данный метод широко применяется в современной биоинженерии для оценки механических характеристик биосовместимых стоматологических материалов и твердых тканей зуба, включая случаи патологических изменений [1-4]. В большинстве исследований

используется индентор Берковича, имеющий форму правильной трёхгранной пирамиды.

В настоящей работе проведено *ex vivo* изучение механических свойств композиционных и стеклоиономерных цементных пломб, а также окружающих тканей: эмали, прилегающей к пломбам, и дентина, расположенного в непосредственной близости от дентиноэмалевой границы в зоне влияния реставрации. Дополнительно оценивались механические характеристики интактных участков дентина и эмали на противоположной стороне зуба, выступающих в качестве контрольных образцов. Аналогичная методика была применена для анализа свойств эмали, модифицированной с использованием инфильтранта, и дентина в её непосредственной окрестности, при этом контрольные измерения проводились на интактных участках медиальной поверхности противоположной стороны зуба. Исследование выполнено на четырех образцах зубах, каждый из которых демонстрировал признаки кариозного поражения, что позволило обеспечить репрезентативность данных и провести статистическую обработку результатов.

В работе использовались следующие стоматологические материалы: стеклоиономерный цемент Vitremer (3M ESPE, США), композиционный материал Estelite Flow Quick (Tokuyama Dental, Япония) и инфильтрант Icon (DMG Chemisch-Pharmazeutische, Германия).

Механические свойства исследуемых участков оценивались с использованием наноиндентометра NanoTest 600 Platform 3 (Micro Materials, Великобритания), оснащённого калиброванным алмазным индентором Берковича. Программа нагружения включала трёхстадийный режим: линейное нарастание нагрузки до максимального значения в течение 20 с, выдержка при постоянной максимальной нагрузке 50 мН в течение 30 с с целью минимизации влияния ползучести материала, за которой следовало линейное разгружение в течение 20 с.

Образцы зубов были получены в ходе планового ортодонтического удаления в стоматологическом отделении клиники Ростовского государственного медицинского университета (Ростов-на-Дону, Россия). Проведение исследования одобрено локальным независимым этическим комитетом университета (протокол № 14/21 от 23 сентября 2021 г.), все участники исследования предоставили добровольное информированное согласие. Авторы выражают благодарность профессору Максюкову С.Ю. (Ростовский государственный медицинский университет, г. Ростов-на-Дону) за предоставление образцов.

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ № 25-19-00523.

Список используемой литературы:

- [1] L. Angker, M. Swain // J. Mater. Res. 2006. V. 21. # 8
- [2] L.H. He, M.W. Swain // Dental Mater. 2007. V. 23. #7
- [3] E. Sadyrin, M. Swain, B. Mitrin et al. // Nanomater. 2020. V. 10. # 9
- [4] F. Lippert, D.M. Parker, K.D. Jandt // J. Colloid Interface Sci. V. 280.

2

**СТРУКТУРНО-НЕОДНОРОДНЫЕ ИМПЛАНТАТЫ НА ОСНОВЕ
НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ
РЕГЕНЕРАЦИИ КОСТНОЙ ТКАНИ**

Евдокимов П.В.^{1*}, Филиппов Я.Ю.^{1,2}, Климашина Е.С.¹, Гаршев А.В.^{1,2},
Ефименко А.Ю.¹, Щербаков И.М.¹, Дубров В.Э.¹, Путляев В.И.¹

*¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
Москва, Россия*

²Университет МГУ-ППИ, Шэнъчжэнь, Китай

**pavel.evdkimov@gmail.com*

Современные методы восстановления костных дефектов практически не учитывают сложную структуру костной ткани и множественные взаимодействия с рядом прилегающих к ней тканей. Многообразие природы и функции каждого органа приводит к различным скоростям и механизмам регенерации, что в итоге может вызвать преимущество восстановления одного типа ткани над другими. В связи с этим конструкция скаффолда должна отражать сложность строения кости и её окружения и, следовательно, представлять собой комбинацию различных материалов с индивидуальными макроструктурой, химическим составом и набором механических свойств.

В последнее время значительное внимание сосредоточено на регенеративном подходе, согласно которому имплантат выполняет не только механическую функцию, но и служит источником веществ, необходимых для формирования новой костной ткани. Таким образом, ожидается постепенное полное замещение имплантируемого материала собственнойостью пациента. Регенеративные методики применяют конструкции тканевой инженерии (КТИ) для восстановления биологических функций кости. Создание КТИ особенно важно при лечении костных дефектов, размеры которых превышают критический порог и когда собственных ресурсов организма недостаточно для самовосстановления.

Для изготовления индивидуальных имплантатов сложной формы с заданной пористой архитектурой используют исключительно аддитивные технологии, позволяющие на основе данных компьютерной томографии пациента создать материал необходимой формы для восстановления повреждённых тканей.

В настоящем докладе внимание будет уделено созданию персонализированных структурно-неоднородных скаффолов на основе композитных материалов нового поколения с комплексным химическим составом и архитектурой, направленных на стимуляцию и терапию остеоиндуктивных и других явлений, сопровождающих формирование, рост и ремоделирование кости, не достижимых современными материалами.

Доклад подготовлен авторским коллективом в рамках теоретических и экспериментальных работ при финансовой поддержке гранта РНФ № 23-79-10103 с использованием оборудования, приобретенного за счет Программы развития Московского университета.

ФОРМИРОВАНИЕ СВОЙСТВ ПОРОШКОВ В СИСТЕМЕ CaO-MgO-P₂O₅ ПРИ СООТНОШЕНИИ (Ca+Mg)/P = 1,5, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ПЕЧАТИ МЕТОДОМ СВЕТОВОЙ СВЕТОДИОДНОЙ ПРОЕКЦИИ

Фомин А.С.^{1,*}, Крохичева П.А.¹, Фирсова Е.С.², Антонова О.С.¹,
Каплан М.А.¹, Коновалов А.А.¹, Гольдберг М.А.¹, Баринов С.М.¹,
Комлев В.С.¹

¹*Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН,
Москва, Россия*

²*Московский институт тонких химических технологий имени М. В.
Ломоносова, Москва, Россия*

**afomin@imet.ac.ru*

Рассматривая классическую парадигму состав-структура-свойство при создании современных биомедицинских материалов, предназначенных для восстановления костной ткани, следует отметить равную важность как состава, так и структуры материала на свойства имплантата. Так, состав материала обеспечивает его биосовместимость, скорость биорезорбции, наличие дополнительных свойств, таких как антибактериальные, что важно для сокращения случаев ревизионных операций из-за возможных инфекционных осложнений [1]. Структура

материалов является многоуровневой: так, на макро-уровне она определяет проницаемость материала для жидкостей, клеток, белков, что позволяет контролировать скорость биорезорбции и её полноту. На микро-уровне шероховатость поверхности обуславливает адгезию и пролиферацию клеток [2]. Важно отметить, что развитие современных подходов аддитивного производства, а также современных техник неинвазивной визуализации дефектов тканей позволяет создавать имплантаты персонализированной архитектуры: полученные методами компьютерной томографии 3Д-изображения костных дефектов могут использоваться для создания моделей для 3Д-печати имплантата [3]. Выбор в качестве метода печати световой светодиодной проекции позволяет получать изделия с высоким разрешением, однако, требует систематических исследований физико-химических свойств порошка, его свойств при обжиге, а также свойств получаемых минерал-органических супензий, для получения воспроизводимого и контролируемого результата (по составу, микро- и макроструктуре).

В рамках настоящего исследования были получены порошки в системе CaO-MgO-P₂O₅ при соотношении (Ca+Mg)/P = 1,5, при различных соотношениях Ca/Mg. Материалы получены осаждением из водных растворов солей. Были изучены их физико-химические свойства как после синтеза, так и после термообработки при температуре до 1000 °C. Показана перспектива их применения для получения минерал-органических супензий, стереолитографической печати изделий и получения керамических материалов заданной архитектуры.

Исследование проведено при финансовой поддержке РНФ, грант № 25-29-00849.

Список используемой литературы:

- [1] Касимова А.Р., Божкова С.А., Туфанова О.С. и др. Выбор антибиотиков для лечения ортопедической инфекции, вызванной грамположительными возбудителями, по результатам 12-летнего наблюдения // Травматология и ортопедия России. 2025. Т. 31, №. 2. С. 5-17.
- [2] Тихонов А.А., Евдокимов П.В., Путляев В.И., и др. О выборе архитектуры остеокондуктивных биокерамических имплантатов // Материаловедение. 2018. №. 8 С. 43-48.
- [3] Murr LE. Global trends in the development of complex, personalized, biomedical, surgical implant devices using 3D printing/additive manufacturing: A review // Medical Devices & Sensors. 2020. V. 3, № 6. P. e10126.

**БИОСОВМЕСТИМЫЕ ЦИТРАТ-СТАБИЛИЗИРОВАННЫЕ
НАНОЧАСТИЦЫ ДИОКСИДА ЦЕРИЯ: АНАЛИЗ
ФЕРМЕНТОПОДОБНОЙ АКТИВНОСТИ
КОЛОРИМЕТРИЧЕСКИМ И ХЕМИЛЮМИНЕСЦЕНТНЫМ
МЕТОДАМИ**

Созарукова М.М. *, Попков М.А., Филиппова А.Д., Баранчиков А.Е.,
Иванов В.К.

*Институт общей и неорганической химии имени Н.С. Курнакова РАН,
Москва, Россия*

**s_madinam@bk.ru*

Направленный синтез биологически активных наноматериалов, обладающих ферментоподобной активностью (нанозимов) и способных эффективно модулировать биохимические процессы, — одна из наиболее динамично развивающихся областей современного материаловедения. В связи с этим разработка надежных методов и комплексных подходов к анализу ферментоподобной активности наноматериалов представляет собой важную и актуальную задачу. Ярким представителем нового класса биомиметиков является нанодисперсный диоксид церия, благодаря сочетанию уникальных физико-химических свойств, широкого спектра биокатализической активности и относительно низкой токсичности [1]. Одним из наиболее распространенных типов ферментоподобной активности наночастиц CeO₂ является пероксидазоподобная активность [2]. Ферменты класса пероксидаз и их миметики играют ключевую роль в регуляции метаболизма активных форм кислорода в живых системах, что делает создание новых материалов на основе диоксида церия особенно перспективным для биомедицинских применений.

Целью данной работы был комплексный анализ пероксидазоподобной активности наночастиц CeO₂ двумя независимыми методами — колориметрическим и хемилюминесцентным. Для функционализации поверхности нанодисперсного CeO₂ использовали биосовместимые цитрат-ионы в диапазоне мольных соотношений лиганд:CeO₂ от 0.125:1 до 2:1. Полученные материалы были охарактеризованы комплексом взаимодополняющих методов анализа, включая рентгенофазовый анализ, просвечивающую растровую электронную микроскопию, динамическое рассеяние света, ИК, УФ-спектроскопию. Цитотоксичность наноматериалов была исследована по отношению к мезенхимальным стволовым клеткам человека (МСК).

Наноматериалы с мольным соотношением лиганд:CeO₂, равным 1:1, в диапазоне концентраций от 0,1 до 1 мМ продемонстрировали низкую цитотоксичность по отношению к МСК. Пероксидазоподобная активность

наноматериалов на основе диоксида церия была подтверждена двумя независимыми методами. Колориметрический анализ показал, что кинетика окисления 3,3',5,5'-тетраметилбензидина в присутствии наночастиц диоксида церия соответствует модели Михаэлиса-Ментен. Рассчитанные для наноматериалов на основе CeO₂ каталитические параметры (константа Михаэлиса, каталитическая константа) сопоставимы с характеристиками природного фермента — пероксидазы из корней хрена. С помощью хемилюминесцентного метода были определены константы скоростей элементарных реакций окисления люминола пероксидом водорода в присутствии наночастиц диоксида церия. При увеличении соотношения лиганда от 0.125:1 до 2:1 наблюдается снижение каталитической активности наноматериалов, что, вероятно, обусловлено уменьшением количества активных центров на поверхности частиц.

Таким образом, получены биосовместимые наноматериалы на основе диоксида церия с регулируемой пероксидазоподобной активностью. Впервые проведено сопоставление возможностей количественного анализа пероксидазоподобной активности наноматериалов с использованием принципиально разных аналитических методов — колориметрического и хемилюминесцентного.

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ № 24-13-00370.

Список используемой литературы:

- [1] J. Sheng, Y. Wu, K. Feng. et al. // Adv. Mater. 2024. V. 36. #2211210.
- [2] M.M. Sozarukova, E.V. Proskurnina, V.K. Ivanov // Nanosyst.: Phys. Chem. Math. 2021. V. 12. #283.

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК Al₂O₃, SiO₂ И Fe₂O₃ НА КЕРАМИКУ YSZ

Смирнов С.В.*, Оболкина Т.О., Уткин Д.А., Падалко А.Г., Пыров М.С.

Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН,

Москва, Россия

**films20-10@ya.ru*

В последние годы в производстве керамических изделий активно внедряются аддитивные технологии, что обусловлено их преимуществами: высокой точностью детализации, возможностью создания изделий без использования литьевых форм, быстрым изготовлением индивидуальных деталей на основе CAD-моделей, а также контролем геометрии по всему

объёму, включая внутренние полости и регулируемую пористость. Применение стереолитографии в производстве керамики позволяет снизить процент брака и увеличить размер изделий за счёт использования низкотемпературных составов [1]. В данном исследовании представлены сравнительные характеристики многокомпонентной низкотемпературной конструкционной керамики YSZ. Изучено влияние добавки Al_2O_3 на свойства частично стабилизированной Y_2O_3 керамики ZrO_2 , включая плотность, фазовый состав, прочность и микроструктуру. Образцы подвергались спеканию при температурах 1100 °C, 1250 °C и 1450 °C. Для достижения оптимальных механических характеристик важно получить плотный материал с мелкозернистой структурой при минимальной температуре, чтобы предотвратить рекристаллизацию, ухудшающую свойства керамики [2, 3]. В работе проанализированы результаты спекания семи различных составов керамических материалов. На основе наиболее низкотемпературного состава методом стереолитографии была изготовлена полая ячейка Кнудсена.

Исследование и спекание нанодисперсных порошков ZrO_2 было выполнено при финансовой поддержке государственного задания № 075-00319-25-00. За совместно проведенные исследования автор работы выражает благодарность сотрудникам ИМЕТ РАН: Падалко А.Г., Пырову М.С., Гольдберг М.А., Коновалову А.А., Баринову С.М., Комлеву А.С., Сафонову С.О., Уткину Д.А., Лысенкову А.С.

Список используемой литературы:

- [1] S.V. Smirnov, P.V. Protsenko, M.A. Goldberg, T.O. Obolkina, O.S. Antonova, K.V. Malyutin, G.P. Kochanov, A.A. Konovalov, Yu.M. Nevolin, A.V. Volkov, S.A. Akhmedova, V.A. Kirsanova, I.K. Sviridova, N.S. Sergeeva, S.M. Barinov, V.M. Ievlev, V.S. Komlev Vat photopolymerization 3D printing of yttria-stabilized ZrO_2 ceramics: effects of a sintering additive ($\text{Na}_2\text{O}-2\text{SiO}_2$), biocompatibility, and osteointegration //Additive Manufacturing. – 2024. – V. 84. – P. 104071.
- [2] A. Suresh, M.J. Mayo, W.D. Porter, Thermodynamics of the tetragonal-to-monoclinic phase transformation in fine and nanocrystalline yttria-stabilized zirconia powders, J. Mater. Res. (2003).
- [3] A. Suresh, M.J. Mayo, W.D. Porter, C.J. Rawn, Crystallite and grain-size-dependent phase transformations in yttria-doped zirconia, J. Am. Ceram. Soc. (2003).

СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ

РАЗРАБОТКА НЕТКАНИХ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ В СИСТЕМЕ ПОЛИ-3- ГИДРОКСИБУТИРАТ-ТРИКАЛЬЦИЙФОСФАТ

Баранов О.В.^{1*}, Федотов А.Ю.¹, Тюбаева П.М.^{2,3}, Гаспарян К.Г.^{2,3},
Лобжанидзе П.В.¹, Егоров А.А.¹, Сиротинкин В.П.¹, Ольхов А.А.^{2,3},
Комлев В.С.¹

¹*Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН,
Москва, Россия*

²*Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Москва,
Россия*

³*Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН, Москва,
Россия*

*obaranov@imet.ac.ru

В последние годы стратегия тканеинженерного подхода привлекла большое внимание, однако, несмотря на то, что были предприняты значительные усилия для разработки современных биоматериалов, способных удовлетворить все клинические потребности, на сегодняшний день эта технология все еще не способна учесть и обеспечить эффективное устранение всех осложнений традиционных подходов. В этом контексте использование технологий интеграции биологически активных материалов, ускоряющих процесс заживления, в биосовместимую полимерную матрицу для создания новых тканеинженерных конструкций стало многообещающим подходом для разработки более эффективных биоматериалов.

В связи с этим целью данного исследования было изучение влияния введения трикальцийфосфата (ТКФ) в полимерную матрицу поли-3-гидроксибутират (ПГБ) на морфологию и структуру нетканых волокнистых материалов, полученных электрорадикацией.

Установлено, что чистый ПГБ представляет собой волокнистый материал с дефектами грушевидной формы. При введении до 10% ТКФ наблюдается тенденция к уменьшению среднего размера волокон. Однако увеличение концентрации до 20% приводит к появлению отдельных более толстых волокон, проходящих через структуру материала. В то же время при достижении концентрации 30% такие более толстые волокна изменяют свой внешний вид и по форме напоминают дефекты и локальные утолщения. По результатам ИК-Фурье спектроскопии установлено, что все полосы поглощения, характерные для ПГБ и ТКФ были обнаружены в композитных материалах, а изменение интенсивностей пиков может

говорить о наличии химического взаимодействия между ПГБ и ТКФ. По результатам ДСК установлено, что ТКФ оказывает влияние на формирование надмолекулярной структуру ПГБ, температура плавления ПГБ незначительно изменяется при введении ТКФ, а энталпия плавления уменьшается. Фазовый анализ показывает, что основной фазой является ПГБ (ICDD Card. № 00-049-2212.) При введении ТКФ наблюдается появление рефлексов, соответствующих α -трикальцийфосфату (ICDD Card. № 01-070-0364). С ростом концентрации интенсивность рефлексов соответствующего трикальцийфосфата увеличивается. Добавление ТКФ оказало существенное влияние на прочность материалов, снизив ее почти вдвое. Следует отметить, что при концентрации ТКФ более 20% форма кривой существенно меняется, что может быть связано с крупными включениями ТКФ в волокнах полимера.

В ходе выполнения работы были получены волокнистые нетканые материалы на основе биополимерной матрицы ПГБ с высокой концентрацией наполнителя α -ТКФ (0, 3, 10, 20 и 30%). Композит может быть использован в регенеративной медицине, в частности, в стоматологии и имплантологии благодаря своей высокой биосовместимости, биорезорбируемости и остеоиндуктивным свойствам.

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ № 25-13-00400.

Список используемой литературы:

[1] O'Brien, J.F. Biomaterials & scaffolds for tissue engineering // Mater. Today. 2011. V. 14. P. 88–95.

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ГЕЛЕВОЙ 3D ПЕЧАТИ ДЛЯ
СОЗДАНИЯ ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННЫХ КОСТНЫХ
ИМПЛАНТАТОВ**

Генералов Е.М., Егоров А.А., Лобжанидзе П., Федотов А.Ю., Комлев В.С.

Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова

Российской академии наук, (ИММет РАН), Москва, Россия

**azgorarazan@inbox.ru*

Разработка биосовместимых чернил для 3D печати костных имплантатов является актуальной задачей регенеративной медицины. Октаакальций фосфат (ОКФ) интересен как прекурсор биоминерализации костной ткани с высокими остеокондуктивными свойствами.

Целью работы являлась разработка композиционных биочернил на основе ОКФ и желатина для создания линейки модельных образцов костных имплантатов с различными характеристиками пористости и механических свойств.

Создана линейка из 16 модельных образцов с варьированием ключевых параметров печати. Серия D (диаметр сопла): 0,4; 0,75; 1,1; 1,7 мм демонстрировала влияние геометрии экструзии на морфологию пор. Серия F (поток материала): 8,0; 8,2; 9,0; 9,5% показала зависимость плотности от объемной подачи. Серия S (скорость печати): 10; 12; 14; 16 мм/с выявила оптимальные режимы формирования слоев. Серия Т (температура): 25; 30; 45; 55°C определила термические условия сохранения структуры (Рисунок 1).

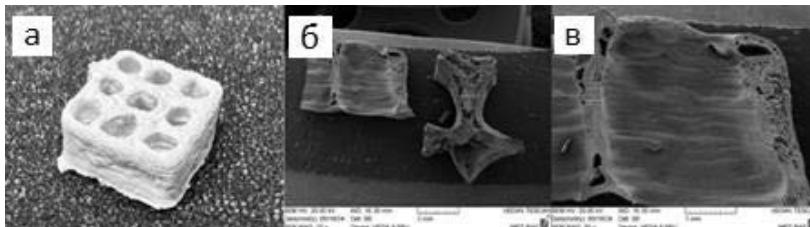


Рисунок 1 – Фото образца T4 (а), микроструктура образца T4 по данным СЭМ (б, в)

РФА анализ подтвердил кристаллическую структуру ОКФ во всех образцах (ICDD 00-026-1056). Образцы демонстрировали различную морфологию пор: от мелкодисперсной (серия D4) до крупнопористой (серия T3). Механические испытания показали диапазон прочности на сжатие 0,45-0,85 МПа в зависимости от пористости. Оптимальные образцы D3, F3, S2, T2 сочетали высокую точность воспроизведения геометрии (отклонения $\leq 0,25$ мм) с развитой пористой структурой (50-70% заполнения) (Таблица 1).

Таблица 1 – Оптимальные параметры печати образцов

Параметр	Значение
Температура хранения эмульсии	45°C
Температура подогревательного блока	40°C
Скорость печати	14 мм/с
Поток	9,5%
Диаметр сопла	0,4 мм

Разработанные биочернила обеспечивают создание имплантатов с программируемой архитектурой пор размером 50-300 мкм, оптимальной

для врастания костной ткани. Вариативность составов позволяет адаптировать свойства под конкретные клинические задачи.

Исследование выполнено при финансовой поддержке ГЗ №075-00319-25-00

Список используемой литературы:

[1] Madeira S., Buciumeanu M. et al. Soft tissue replication in single unit implant impressions—A three dimensional clinical study // Journal of Esthetic and Restorative Dentistry. - 2019. - №4. - С. 359-368.

[2] Billiet T., Gevaert E. The 3D printing of gelatin methacrylamide cell-laden tissue-engineered constructs with high cell viability // Biomaterials. - 2014. - №35. - С. 49-62.

ПОРИСТЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ КОСТНЫХ ТКАНЕЙ НА ОСНОВЕ БИОСТЕКЛА SiO₂-CaO

Лыткина Д.Н.^{*}, Садыков Р.Т., Курзина И.А.

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

**darya-lytkina@yandex.ru*

Современные исследования сосредоточены на создании пористых материалов, моделирующих параметры натуральной кости или создающих условия ее успешной остеоинтеграции с имплантатом [1]. В частности, материалы на основе биостекла (БС) демонстрируют перспективные результаты в восстановлении костных дефектов [2]. Биоактивное стекло, разработанное Ларри Хенчем в 1969 году, активно используется как компонент композитов путем адаптации его фазового состава и моделирования таким образом его свойств [3]. В этом контексте интерес представляют биоматериалы на основе БС модифицированные биологически активными веществами как на этапе синтеза, так и методами импрегнации [4, 5]. Проблема заключается в недостаточной изученности механизмов взаимодействия веществ с поверхностью материалов и отсутствии единого подхода к изучению данных процессов, что ограничивает возможности управляемой модификации биоматериалов этими соединениями. Целью работы являлось получение композитных материалов на основе биостекла системы SiO₂-CaO и исследование их физико-химических и функциональных свойств.

Для золь-гель синтеза БС в прозрачный водный раствор 2 мас.% ЦТАБ добавляли 8 мл этилацетата, перемешивали 30 мин, затем вводили

25 % NH₄OH для регулирования pH. После 15 мин перемешивания последовательно вводили ТЭОС и Ca(NO₃)₂·4H₂O с интервалом 30 мин для получения состава SiO₂-CaO 60/40 мол.%. Были получены четыре серии образцов, для чего коллоидные частицы извлекали из реакционной смеси путём центрифугирования при скорости 7000 об/мин в течение 20 минут, осуществляя через 2 (БС1), 3 (БС2) и 4 (БС3) часа после начала синтеза, а также после дополнительной выдержки в маточном растворе в течение 48 часов (БС4). Биоактивными веществами проводили пропиткой по влагоемкости из водных растворов аминокислот и кукурубитурилов.

Золь-гель методом синтезированы сферические мезопористые частицы биоактивного стекла системы SiO₂-CaO. Увеличение времени синтеза приводит к росту размера частиц и изменению их морфологии. СЭМ-анализ подтвердил сферическую форму частиц, а РГА – их аморфное состояние. Изотермы адсорбции-десорбции соответствуют мезопористой структуре (тип IVa по IUPAC). Наибольшая удельная поверхность наблюдается у образца с преобладанием мезопор. Модификация глицином снижает жизнеспособность макрофагов, но она остается на приемлемом уровне, что указывает на перспективность дальнейших исследований влияния аминокислот на свойства материала.

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ № 24-43-20044.

Список используемой литературы:

- [1] Севастьянов В. И. Биосовместимые материалы / Под ред. В.И. Севастьянова, М.П. Пичникова. М.: МИА, 2011 г.
- [2] Патент № 2617050 Российской Федерации, МПК A61L 27/02, A61L 27/12, A61L 27/24. Биоактивный композиционный материал для замещения костных дефектов и способ его получения : № 2016113715 : заявл. 11.04.2016 : опубл. 19.04.2017 / Гузеев В. В., Гузеева Т. И., Зеличенко Е. А., Гурова О. А., Нестеренко А. А. – 11 с.
- [3] Hench L. L., Jones J. R. // Front. Bioeng. Biotechnol. 2015. V. 3. P. 194.
- [4] Y. Özkabadayı, M. Türk, A. Kumandas et al. // Microsc. Res. Tech.. 2025. V. 88, P. 26–41.
- [5] A. El Rhilassi, M. Mourabet, M. Bennani-Ziatni et al. // J. Saudi Chem. Soc.. 2016. V. 20, is. 1. P. 632–640.

СИНТЕЗ ГИБРИДНЫХ НАНОЧАСТИЦ Ta_2O_5/Au И ИЗУЧЕНИЕ ИХ РЕНТГЕНОКОНТРАСТНЫХ СВОЙСТВ

Маслов Д.Д.*^{*}, Кошевая Е.Д.

Федеральное Государственное бюджетное учреждение

«Государственный научный Центр Российской Федерации - Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна»,

Москва, Россия

**katiaakosh@gmail.com*

Направленный синтез гибридных наночастиц позволяет объединить преимущества различных материалов, создавая платформы с расширенными функциональными возможностями. Перспективной комбинацией для создания гибридных систем является сочетание частиц оксида тантала и золота. Наночастицы оксида тантала (Ta_2O_5) биосовместимы, химически инертны и, благодаря высокому атомному номеру тантала, являются эффективным радиосенсибилизирующим и рентгеноконтрастным агентом, что делает их перспективным материалом-носителем. Золото (Au) — благородный металл с высокой биосовместимостью и широкими возможностями функционализации поверхности. Локализация золотых наночастиц на поверхности Ta_2O_5 позволяет совместить их контрастирующие свойства и расширить потенциал мультифункциональных платформ для терапии и диагностики рака. Для ковалентного связывания золота с носителем использовали покрытие из полидопамина (ПДА). Целью данной работы является подбор условий синтеза и изучение рентгеноконтрастных свойств наноколлоидных систем $Ta_2O_5@ПДА/Au$ и Ta_2O_5/Au .

Золи оксида тантала получали сольвотермальным методом из раствора этоксида тантала в изопропаноле при варировании температуры и времени выдержки, с последующей заменой дисперсионной среды на водную. Для формирования полимерного покрытия водные дисперсии Ta_2O_5 смешивались с раствором допамина при повышенном pH (8.5), что приводило к образованию $Ta_2O_5@ПДА$ за счет автоматической окислительной полимеризации. Синтез наночастиц Au осуществлялся радиолитическим восстановлением ионов золота в водном растворе золотолористоводородной кислоты при варьирований условий, таких как доза, мощность дозы, концентрация прекурсора. Рассматривалось 2 способа получения гибридов: в одном случае происходило смешение золей золота и оксида тантала с последующей агрегацией частиц, в другом же радиационный синтез золота производился *in situ* в присутствии наночастиц Ta_2O_5 или $Ta_2O_5@ПДА$. Условия синтеза были оптимизированы для получения устойчивых дисперсий гибридных

наносистем. С помощью просвечивающей электронной микроскопии было показано, что они состоят из наночастиц сферической формы: оксидного ядра порядка 35 нм и локализованных на поверхности частиц золота размером 5-13 нм. Методом лазерного допплеровского электрофореза были определены ζ -потенциалы полученных систем, они составили порядка -40 мВ. Гидродинамические диаметры, определенные методом динамического рассеяния света, составили порядка 64 нм. Проверка рентгеноконтрастности наночастиц Ta_2O_5/Au и $Ta_2O_5@PDA/Au$ проводилась с использованием фантомного теста на клиническом томографе. Было показано, что при одинаковых массовых концентрациях предложенные препараты превосходят коммерчески доступный препарат "Омнипак". По результатам МТТ-теста выявлено отсутствие цитотоксичности препаратов по отношению к клеткам линии НСТ-116. Полученные результаты указывают на высокий потенциал синтезированных гибридных наночастиц в качестве контрастных агентов для рентгеновской компьютерной томографии.

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ № 24-23-00510.

ОСТЕОКОНДУКТИВНЫЕ КОМПОЗИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИКАПРОЛАКТОНА ДЛЯ ИНЖЕНЕРИИ КОСТНОЙ ТКАНИ

Самофалов П.С.^{1*}, Голубчиков Д.О.², Евдокимов П.В.^{1,2}, Путляев В.И.^{1,2}

¹*Химический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

²*Факультет наук о материалах МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

Samofalovpavel638@gmail.com

В 21 веке композитные материалы на основе биодеградируемой полимерной матрицы приобрели значительный интерес для изготовления костных имплантатов благодаря сочетанию эластичности и контролируемой скорости биодеградации. Особое внимание уделяется разработкам материалов на основе поликапролактона (ПКЛ) за счёт его высокой биосовместимости, низкой цитотоксичности и умеренной скорости биодеградации. Одним из ограничений для материалов данного типа является неэффективная адгезия мезенхимальных стволовых клеток к их поверхности и низкая остеоиндуктивность скаффолда, что может быть решено введением высокодисперсной биорезорбируемой неорганической фазы на основе фосфатов кальция (ФК). В настоящее время возникает

актуальная задача подбора метода создания композитного материала на основе поликапролактона, обладающего необходимыми механическими и биологическими свойствами, а также возможности персонализации архитектуры скафболда для конкретной клинической задачи.

В рамках исследования были изучены химический состав и свойства полимер-неорганического скафболда, состоящего из поликапролактона, наполненного до 10 об. % частиц фосфатов, в частности, аморфным фосфатом кальция, который был направленно синтезирован с применением различных анионных ингибиторов, подобранных на основе констант устойчивости комплексов соответствующих лигандов с ионами кальция Ca^{2+} [1]. Для уточнения состава порошковых наполнителей использовались методы инфракрасной спектроскопии и рентгенофазового анализа. Удельная поверхность материала была измерена с помощью метода БЭТ. Размер частиц определяли с использованием методов динамического светорассеяния и растровой электронной микроскопии. Были изучены способности материала в качестве матрицы для доставки лекарственных белков, а также биосовместимость композитов. Анализ цитосовместимости показал, что полученные композиты нетоксичны и сохраняют плотный слой мезенхимальных стромальных клеток.

Таким образом полученные материалы могут стать перспективной платформой для создания более сложных полимер-неорганических материалов для костно-тканевой инженерии.

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ № 23-79-10103.

Список используемой литературы:

[1] Zuev, D.M., Golubchikov, D.O., Evdokimov, P.V. et al. Synthesis of Amorphous Calcium Phosphate Powders for Production of Bioceramics and Composites by 3D Printing. Russ. J. Inorg. Chem. 67, 940–951 (2022).

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ОКАЗЫВАЮЩИХ ВЛИЯНИЕ НА СКОРОСТЬ ДЕГРАДАЦИИ ПОЛИМЕРНОЙ МАТРИЦЫ, СОЗДАННОЙ НА ОСНОВЕ ПОЛИ-3-ГИДРОКСИБУТИРАТА, С ЦЕЛЬЮ КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССОВ БИОРЕЗОРБЦИИ В ЖИВОМ ОРГАНИЗМЕ

Тюбаева П.М.^{1,2*}, Варьян И.А.^{1,2}, Романов Р.Р.², Федотов А.Ю.¹,
Комлев В.С.¹, Мерзликин В.А.¹

¹*Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН, Москва,
Россия*

²Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Москва,
Россия

³Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова
Российской академии наук, Москва, Россия
**polina-tyubaeva@yandex.ru*

Среди полимеров, которые свободно проходят все три стадии биодеградации образуя олигомеры, которые легко проходят через метаболические пути живых организмов, большое распространение получили полиоксиалканоаты (ПОА). Важно отметить, что процесс деструкции ПОА достаточно хорошо изучен [1]. Поли(3-гидроксибутират) (ПГБ) стал самым распространенным биополимером среди всех ПОА благодаря большому количеству преимуществ: ПГБ легко поддается биологическому разложению, биосовместим, термостабилен в широком диапазоне температур от 30°C до 120°C, обладает удовлетворительными механическими свойствами.

В данной работе для установления роли развития поверхности в процессе деградации сравнивались материалы, полученные на основе ПГБ с двумя типами структуры: нетканый материал, полученный методом электроформования из предварительно подготовленного раствора, и литая пленка, полученная из порошка ПГБ (толщина составляла 0,100-0,120 мм).

Моделирование гидролиза полимерных матриц проводилось экспозицией в фосфатном буфере, и оценка потери массы осуществлялась в соответствии с стандартной методикой. Температура в термошкафу постоянно поддерживалась и составляла 37 ± 3 °C, pH 7,5. Результаты анализа потери массы представлены на Рисунке 1.

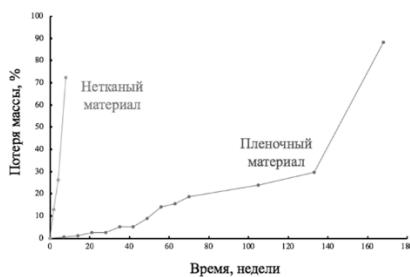


Рисунок 1 – Потеря массы модельных полимерных матриц на основе ПГБ после выдержки в фосфатном буфере

Важно отметить, что по прошествии 42 дней начинается наиболее динамичный процесс потери массы пленок ПГБ, который, обусловлен проникновением жидкости в структуру пленок и формировании каверн,

которые делают полимер в объеме все более доступным для реакции. Таким образом контакт жидких биологических сред с поверхностью полимерной матрицы на основе ПГБ вызывает начало процесса биодеградации. Чем большее число макромолекул полимера доступны для этого процесса, тем интенсивнее протекает разрушение, что хорошо видно из потери массы.

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ № 25-13-00400.

Список используемой литературы:

[1] S.Kim, M.S. Park, O. Jeon, C.Y. Choi, B. Kim, // Biomater. 2006. V. 27. 1399-1409

**СТРУКТУРА И ЭФФЕКТ ПАМЯТИ ФОРМЫ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ
ПОЛИЛАКТИДА, ПЕРСПЕКТИВНЫХ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В
ОРТОПЕДИИ**

Черемных А.И.^{1*}, Ковалева П.А.¹, Качалина П.М.¹, Анисимова Н.Ю.^{1,2}

¹*Национальный исследовательский технологический университет
МИСИС, Москва, Россия*

²"НМИЦ Онкологии им. Н.Н. Блохина" Минздрава России, Москва, Россия

**a.zimina@misis.ru*

Современные тенденции в аддитивных технологиях демонстрируют переход от статичных 3D-структур к динамичным 4D-материалам, способным изменять свои свойства под внешними воздействиями. Особый интерес представляют биосовместимые полимерные композиты с эффектом памяти формы, перспективные для создания «умных» медицинских имплантатов. В данном исследовании проведен комплексный анализ влияния технологических параметров 4D-печати на функциональные и биологические характеристики двух типов композиционных материалов на основе полилактида (PLA) – с гидроксиапатитом (HA) и диоксидом кремния (SiO_2), а также оценены их перспективы для дальнейшего использования в самопозиционирующихся ортопедических конструкциях.

В работе отражены фундаментальные и прикладные аспекты, а именно взаимосвязь между структурой материала и проявляемыми функциональными свойствами в совокупности их применения для артродеза. Установлены закономерности влияния типа и размера частиц

наполнителя на процессы кристаллизации в условиях двухстадийной термической обработки, включающей экструзию и 3D печать. Показана биосовместимость материалов и продуктов их резорбции. Оценены механические свойства печатных материалов.

Ключевые результаты показали принципиально разное поведение материалов: наночастицы НА выступали как эффективные центры кристаллизации, обеспечивая рост степени кристалличности на 15% после печати и хорошее спекание слоев, что в итоге давало более 95% степени восстановления формы. В то же время микрочастицы SiO₂ вызывали кавитационные дефекты и нелинейную зависимость кристалличности от содержания наполнителя, приводя к снижению степени восстановления формы на 40%. Полученные результаты имеют важное практическое значение для разработки 4D-печатных медицинских имплантов, демонстрируя необходимость тщательного контроля термической истории материалов в процессе печати.

Разработанные материалы на основе PLA/НА с контролируемым эффектом памяти формы открывают новые возможности при создании конструкций для артродеза, рисунок 1. Их ключевое преимущество — способность к термоиндуцированному самопозиционированию. Наличие НА в составе композита способствует остеointеграции, а полимерная основа обеспечивает резорбцию.



Рисунок 1 – Самопозиционирующаяся конструкция для артродеза, выполненная на основе полимерного композиционного материала на основе полилактида

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ № 24-23-0044.

МЕЧЕННЫЕ РАДИОНУКЛИДАМИ МАТРИЦЫ НА ОСНОВЕ ГИАЛУРОНОВОЙ КИСЛОТЫ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ ЗАБОЛЕВАНИЙ

Косова А.Д.^{1*}, Снетков П.П.¹, Морозкина С.Н.^{1,2}

¹*Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия*

²*КБГУ имени Х. М. Бербекова, Нальчик, Россия*

**annkosova@bk.ru*

В современной медицине актуальна разработка носителей для таргетной доставки широкого спектра терапевтических или диагностических агентов. Гиалуроновая кислота (ГК) — эндогенный гетерополисахарид внеклеточного матрикса — обладает уникальным набором свойств, определяющих её широкую применимость в клинической практике. Высокая биосовместимость и биоразлагаемость, способность к химической модификации, а также наличие специфичных трансмембранных рецепторов CD44, RHAMM и TLR, позволяют рассматривать ГК как безопасную и эффективную биополимерную матрицу для доставки радионуклидов [1]. Специфичные к ней рецепторы гиперэкспрессируются при онкопатологиях (рак молочной железы) и хронических воспалениях (ревматоидный артрит), поэтому радиофармпрепараты на основе ГК способны эффективно накапливаться в окружении опухоли и в воспалённых синовиальных тканях, что обеспечивает избирательное таргетирование патологических очагов и минимальное воздействие на здоровые ткани.

Эффективность метода напрямую зависит от способов визуализации и используемых радионуклидов, среди которых стоит отметить диагностические γ -излучатели ^{99m}Tc и ^{68}Ga и терапевтические β^- -излучатели ^{177}Lu и ^{90}Y [2]. Стабильность конъюгатов *in vivo* и *in vitro* обеспечивается методами прямого мечения ГК радиоизотопами, а также использованием хелаторов NOTA и DOTA. Распределение радиомеченой гиалуроновой кислоты в исследуемых моделях регистрируется с помощью сцинтиграфии, позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ) или однофотонной эмиссионной компьютерной томографии (ОФЭКТ) для дальнейшей обработки изображений и точной диагностики.

Известно, что наночастицы ГК, меченные ^{99m}Tc и загруженные куркумином с антиangiогенными и противовоспалительным действием, продемонстрировали высокую стабильность, визуализируемость и цитотоксичность при раке молочной железы, что открывает перспективы для терапии опухолей [3]. Также радиофармпрепараты на основе ГК служат инструментами мониторинга метаболизма ГК и воспаления при артрите, остром расpirаторном дистресс-синдроме и травмах,

обеспечивая пространственно-временную визуализацию патологических изменений. Конъюгат ^{177}Lu -DOTA-НА-PLGA(MTX) на основе полимолочной гликоловой кислоты (PLGA) и ГК с метотрексатом (MTX) продемонстрировал потенциал таргетной противоревматической терапии [4].

Таким образом, меченная радионуклидами матрица на основе гиалуроновой кислоты представляет собой эффективный радиофармпрепарат, обеспечивающий минимальную токсичность и таргетное воздействие на патологические очаги для диагностики и визуализации различных заболеваний. Дальнейшая разработка радиофармпрепаратов расширит горизонты персонализированной ядерной медицины при онкологии и хронических воспалениях.

Исследование проведено в рамках внутреннего гранта ФГБОУ ВО КБГУ им. Х.М. Бербекова, 2025 г.

Список используемой литературы:

- [1] M. Gao, H. Deng, W. Zhang et al. // Curr. Top. Med. Chem. 2021. V. 21. #2. P. 126–139.
- [2] M. Goel, Y. Mackeyev, S. Krishnan et al. // Cancer Nanotechnol. 2023. V. 14. #15.
- [3] C. Huang, F. Chen, L. Zhang et al. // Int. J. Nanomedicine. 2020. V. 15. P. 2987–2998.
- [4] R.M. Trujillo-Nolasco, E. Morales-Avila, B.E. Ocampo-García et al. // Mater. Sci. Eng. C. 2019. V. 103. #109766.

**ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ
КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ СИСТЕМЫ $\text{ZrO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ С
ПОНИЖЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ СПЕКАНИЯ**

Левин Д.О.¹, Носикова Л.А.¹, Оболкина Т.О.²

¹*РТУ МИРЭА, Институт тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

²*Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН,
Москва, Россия*

**Dima-levin-2002@mail.ru*

В настоящее время, как и ранее не ослабевает интерес к созданию материалов, свойства которых сохраняются в широком интервале температур. Например, изделия из композиционной керамики на основе диоксида циркония, стабилизированной оксидом иттрия, с добавлением

оксида алюминия даже выше 1000 °C, имеют высокую прочность, твердость, износостойкость, низкую химическую активность и биологическую инертность, что позволяет применять их во многих отраслях. Высокие прочностные характеристики показывают материалы на основе тетрагональной модификации диоксида циркония, стабилизированной в широкой области рабочих температур, за счет введения добавок или использования наноразмерного порошка для предотвращения обратного фазового перехода. Наиболее широкое применение циркониевая керамика нашла в качестве конструкционной, а также в медицине в режущих инструментах и различного рода протезах [1].

Главным недостатком данного материала является сравнительно высокая температура спекания 1710 °C, в результате чего приходится применять дорогостоящее, энергоемкое и менее производительное оборудование, что значительно повышает конечную стоимость продукции. Один из вариантов решения этой проблемы заключается в использовании методов активирования порошка при помощи дополнительного измельчения и введения добавок, которые влияют на диффузионные процессы [2].

Цель данной работы - исследование возможности понижения температуры спекания материала состава 3Y-TZP-20Al₂O₃ за счет добавления оксида никеля (NiO) в концентрациях 2,5; 5,0 и 7,5 масс. %, соответственно. Порошки были синтезированы при помощи метода химического соосаждения из водных растворов солей, с последующим добавлением соли никеля и прокаливанием при 1000 °C в воздушной атмосфере. После чего подготовленную смесь формовали методом одноосного прессования и спекали при температуре 1450 °C.

Исходя из результатов РФА выявлено, что исследуемые образцы характеризовались наличием t-ZrO₂ с незначительным количеством γ -ZrO₂, которая монотонно увеличивается при повышении содержания оксида никеля (II) в системе. Анализ микрофотографий, полученных методом РЭМ, показал, что оптимальное сочетание однородности и плотности удается достичь при добавлении 5,0 масс. % оксида никеля.

Исследования открытой пористости выявили, что образцы с 5,0 масс. % NiO показывают наилучшие результаты пористости (0,3 %) при температуре спекания 1450 °C, тогда как без введения добавки аналогичный результат достигается лишь при 1600 °C.

Анализ механических свойств показал, что добавка 5,0 масс. % NiO позволяет добиться сравнительно высокой прочности при изгибе (702±35 МПа) и микротвердости (10,6±0,7 ГПа), что соответствует или даже

превосходит аналогичные параметры материала без введенной добавки, спеченного при более высокой температуре.

Установлено, что введение 5,0 масс. % оксида никеля (II) позволяет понизить температуру спекания до 1450 °C с сохранением оптимальных эксплуатационных характеристик материала, что значительно удешевляет технологию получения.

Список используемой литературы:

- [1] А.О. Жигачев, Ю.И. Головин, А.В. Умрихин и др. // Керамические материалы на основе диоксида циркония. М.: Техносфера, 2018.
- [2] J. Han, J. Zhang, F. Li et al. // Ceramics International. 2018. Т. 44. № 1. С. 1026-1033.

**НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ СИНТЕЗ БАРИЙ-ЗАМЕЩЕННОГО
ДИКАЛЬЦИЙФОСФАТ ДИГИДРАТА ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В
РЕГЕНЕРАТИВНОЙ МЕДИЦИНЕ**

Смирнова П.В., Смирнов И.В., Тетерина А.Ю., Комлев В.С.

Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова

Российской академии наук, Москва, Россия

*smirnova-imet@mail.ru

Исследования порошков ДКФД, синтезированных в присутствии катионов бария в трёх концентрациях, показали, что барий не препятствует формированию характерной структуры ДКФД. Получены результаты исследований микроструктуры поверхности образцов чистого порошка ДКФД и ДКФД-Ва, в широком диапазоне замещений, с применением сканирующей электронной микроскопии (Рисунок 1).

Разработанный метод низкотемпературного синтеза барий-замещённых форм дикальцийфосфат дигидрата (ДКФД) открывает новые перспективы для создания специализированных кальций-фосфатных материалов с заданными остеопластическими свойствами [1]. Проведенные исследования демонстрируют, что полученные ДКФД-Ва материалы сохраняют биосовместимость при концентрациях до 1 мг/мл, что соответствует максимально приемлемой для имплантации дозе. Наибольший интерес представляет образец с максимальной степенью замещения ионов кальция барием (6.43 ат.% соответствует 10 ат.% теор.), который проявляет выраженную способность модулировать активность макрофагов в условиях воспалительного процесса. Эта уникальная особенность приобретает особую значимость для регуляции иммунного

ответа на имплантат и обеспечения остеоинтеграции материала в организме реципиента [2].

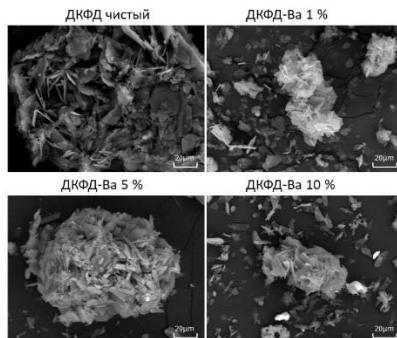


Рисунок 1 – Микроструктура чистого ДКФД и с замещением барием на 1, 5 и 10 ат.-% теор.

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ № 21-73-20251-П.

Список используемой литературы:

- [1] Kovrlija I, Locs J, Loca D. // Materials. № 14(19):5772. 2021.
[2] П.В. Смирнова, А.Ю. Тетерина et al. // Морфология. № 3. 2025.

**ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ПОЛУЧЕНИЯ НА СВОЙСТВА
КОМПОЗИЦИОННОГО КЕРАМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА, НА
ОСНОВЕ ZrO_2 , СТАБИЛИЗИРОВАННОГО ОКСИДАМИ РЭ
Носикова Л.А.^{1*}, Серебрякова К.О.¹, Левин Д.О.¹, Хайрутдинова Д.Р.²
¹РГТУ МИРЭА, Институт тонких химических технологий имени М.В.**

Ломоносова

**²Институт metallurgии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН,
Москва, Россия**

***nosikova-lyubov@mail.ru**

Интерес к керамическим композиционным материалам на основе ZrO_2 обусловлен благоприятным сочетанием в них ряда свойств: высокой механической прочности и трещиностойкости, биоинертности при сохранении устойчивости к коррозии и износу. Так как требуемые характеристики показывают высокотемпературные модификации диоксида циркония— тетрагональная (t ZrO_2) или кубическая (c ZrO_2), неустойчивые при температурах ниже 1170°C, то для практического применения их необходимо стабилизировать. Сама стабилизация может

быть осуществлена одним или сочетанием нескольких способов: легированием (оксидами Al_2O_3 , Y_2O_3 , La_2O_3 , CeO_2), механической обработкой, способствующей созданию более дефектной и дисперсной структуры. Помимо основной задачи закрепления высокотемпературной фазы легирование оксидами РЗЭ приводит к появлению дополнительных интересных свойств у керамики, так к примеру введение CeO_2 в стабилизированный Zr^{4+} будет увеличивать количество дефектов в кристаллической решетке, повышая подвижность кислорода и облегчая его диффузию в решетке твердого раствора $\text{Ce}_{1-x}\text{Zr}_x\text{O}_2$, в результате возрастают каталитическая активность композитов на основе стабилизированного ZrO_2 . В настоящее время циркониевая керамика востребована в качестве конструкционной в авиакосмической отрасли, в твердооксидных топливных элементах (SOFC) и каталитических системах, а также при производстве биомедицинских изделий.

Цель данной работы - исследование влияния условий получения керамических порошков из t- ZrO_2 , стабилизированного Y_2O_3 , La_2O_3 , CeO_2 . Порошки были синтезированы методом химического соосаждения из водных растворов солей, осаждение проводили за счет растворов карбоната аммония или гидрата амиака, далее осадки промывали, сушили и прокаливали при разных температурах.

Анализ результатов показал, что получены целевые порошки сложного состава, со средним содержанием оксидов по массе: $\omega_{\text{ZrO}_2} = 68,27\%$ $\omega_{\text{CeO}_2} = 28,69\%$, $\omega_{\text{Y}_2\text{O}_3} = 2,64\%$, $\omega_{\text{La}_2\text{O}_3} = 0,41\%$. Частицы округлой формы имеют субмикронный и нано-размер, вследствие избыточной поверхностной энергии объединяясь в легкоразрушаемые агломераты.

Исследование партий порошков методом РФА (дифрактометр PowDIX600 Съемку проводили в диапазоне $2\theta: 5-80^\circ$, с шагом $0,01^\circ$) выявило, что образцы характеризовались наличием t- ZrO_2 с незначительным количеством c- ZrO_2 , рефлексы на дифрактограммах несколько уширены вследствие того, что размеры частиц крайне малы и, видимо, сами частицы не до конца закристаллизованы. Качественный анализ показал наличие в синтезированных порошках следующих фаз: $\text{Zr}_{0,5}\text{Ce}_{0,5}\text{O}_2$, $\text{Zr}_3\text{Y}_4\text{O}_{12}$, $(\text{Zr}_{0,88}\text{Ce}_{0,12})\text{O}_2$, $\text{ZrO}_{1,99}$.

Исследование образцов методом лазерной дифракции и последующий расчет выявили, что в зависимости от условий синтеза и последующей обработки, удельная поверхность получаемых порошков увеличивалась от 0,8 до 10,2 $\text{m}^2/\text{г}$. Одним из условий получения более дисперсных порошков стало проведение осаждения в более «мягких условиях» с использованием раствора карбоната аммония в качестве осадителя.

Установлено, что температуры прокаливания образцов могут быть ниже 1000 °C, что снижает энергетические затраты на производство.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП РТУ МИРЭА при поддержке Минобрнауки России в рамках Соглашения № 075-15-2025-548 от 18.06.2025 г.

ГИБРИДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ СЕРЕБРА: ОСОБЕННОСТИ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Громова Я.А.^{1*}, Стадник А.В.¹, Шабатина Т.И.^{1,2}

¹*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Москва, Россия*

²*Московский государственный технический университет имени Н.Э.
Баумана, Москва, Россия*

**chetyyaninka@mail.ru*

Наноразмерные частицы - уникальные объекты исследований, внимание к которым динамично растет ввиду их особых физико-химических свойств и широкого спектра областей применения.

Наночастицы серебра (AgNPs) являются одними из самых изученных наноматериалов на сегодняшний день. Они обладают уникальными физико-химическими и биологическими свойствами такими, как высокая химическая стабильность, устойчивость к изменениям температуры, высокая чувствительность к изменению диэлектрических свойств окружающей среды. Доказано, что AgNPs проявляют антимикробные свойства: они эффективно уничтожают бактерии, вирусы и грибы, включая устойчивые к антибиотикам микроорганизмы. Существующие методы синтеза AgNPs отличаются экспрессностью и простотой, а также позволяют контролировать их форму и размер, в том числе благодаря многообразию существующих лигандов-стабилизаторов.

Однако, как и большинство металлических наночастиц, AgNPs являются агрегативно неустойчивыми и в индивидуальном состоянии не используются. Для предотвращения процесса агрегации в растворе необходима их стабилизация на этапе проведения синтеза. Сочетание наночастиц серебра с стабилизаторами разной природы приводит к формированию новых гибридных наносистем с уникальными физико-химическими свойствами, сочетающими в себе как особенности самого металла, так и лигандной оболочки. Зачастую формирующиеся металлоорганические системы (MOFs) приобретают абсолютно новые свойства или наблюдается синергический эффект, объясняющийся взаимным

влиянием свойств AgNPs на свойства лиганда. Варьируя природу лиганда, можно управлять конечными физико-химическими свойствами систем и интегрировать их в различные области применения, в том числе и биомедицину.

Целью настоящего исследования является получение гибридных систем на основе серебра с различными лигандами: холестерином, тиохолестерином, 7-аминохолестерином, кверцетином. В работе будут представлены основные результаты исследований физико-химических свойств полученных систем, а также приведены примеры их возможных практических приложений, включая биомедицину.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы развития Московского университета – 2024 в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова № AAAA-A21-121011590090-7.

Список используемой литературы:

- [1] Gromova Ya.A., Sarvin B.A., Shabatina T.I. // Russ. J. Phys. Chem. A. 2019. V. 93. № 2. P. 342-347.
- [2] T.I. Shabatina, Y.A. Gromova, O.I. Vernaya et al. // Pharmaceuticals. 2024. 17 (5). 587.
- [3] Ermilov A.Yu., Shabatina T.I., Gromova Y.A. // Mosc. Univ. Chem. Bull. 2022. V. 77. 1. p. 65–71.
- [4] Gromova Y., Shabatina T. Adsorption-Fundamental Mechanisms and Applications. — IntechOpen London UK, 2025. 21 p.
- [5] Gromova Y.A., Gromova S.A., Shabatina T.I. // Mosc. Univ. Chem.Bull. 2025. V. 66. 3. 223-232.

СЕКЦИЯ 5

*Доклинические и клинические
исследования медицинских
материалов*

УСТНЫЕ ДОКЛАДЫ

Приглашенный доклад

БИОИНЖЕНЕРНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ДЛЯ ЛОКАЛЬНОЙ ИММУНОТЕРАПИИ ЗЛОКАЧЕСТВЕННЫХ НОВООБРАЗОВАНИЙ

Киселевский М.В.¹, Анисимова Н.Ю.¹, Страумал Б.Б.³, Новрузов К.М.¹,
Мартыненко Н.С.², Рыбальченко О.В.²

¹*ФГБУ «НМИЦ онкологии им. Н.Н. Блохина» Минздрава России*

²*Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН,
Москва, Россия*

³*Институт физики твердого тела РАН, Черноголовка, Россия*

В настоящее время иммунопрепараты и биомедицинские клеточные продукты, широко используются в клинической практике онкологии. Для снижения нежелательных явлений и повышения эффективности препаратов могут быть использованы методы локального внутриопухолевого введения. С этой целью в качестве платформ для локального введения иммунотропных и дозированного высвобождения в область опухолевого процесса препаратов предлагается использовать скаффолды из различных биосовместимых материалов.

Целью исследования была разработка модели имплантируемого устройства для целенаправленного введение иммунопрепаратов в область опухолевого процесса.

С этой целью были созданы два варианта конструкций скаффолдов. Для получения экспериментальных образцов скаффолдов использовали сплав титана ВТ6 с отверстиями диаметром 1-2 мм, которые плотно заполняли препаратом инновационным иммунопрепаратором – ингибитора контрольных точек иммунитета анти PD-1. Активность образцов оценивали после 3 суток инкубации с мононуклеарными лейкоцитами крови онкологических пациентов. Оценивали *in vitro* изменение фенотипа лимфоцитов методом проточной цитометрии и их цитотоксическую активность относительно клеток рака молочной железы человека линии MCF7 в сравнении с интактным контролем. Другой вариант скаффолда на основе сплава системы Fe-30Mn-C. Лимфоциты выделяли из селезенок мышей и активировали *ex vivo* в присутствии коктейля цитокинов – цитокин-индуцированные киллеры (ЦИК). ЦИК в гидрогеле вносили в Fe-30Mn-C скаффолды и изучали их цитотоксичность относительно опухолевых клеток меланомы B16 *in vitro*, а также противоопухолевую активность при интрапатомальной имплантации скаффолдов, насыщенных ЦИК, у мышей с привитой меланомой B16.

Было установлено, что титановые скаффолды с внесенным иммунопрепаратором анти-PD-1 при инкубации с лимфоцитами пациентов, экспрессирующих ингибиторный рецeптор РД-1, приводили к снижению концентрации лимфоцитов, несущих ингибиторный рецeптор: Т-лимфоцитов (CD3+PD-1+ клеток) и натуральных киллеров (CD16+ CD56+ PD-1+ клеток) относительно контроля ($p<0.05$). Цитотоксическая активность против опухолевых клеток возрастила в среднем на 23% в сравнении с контролем ($p<0.05$). Цитотоксический эффект Fe-30Mn-C скаффлодов, насыщенных ЦИК составил $57\pm6\%$, а торможение роста опухоли у мышей с привитой меланомой B16 на 10 сутки наблюдения составило $52\pm9\%$.

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности данного направления, позволяющего создавать непосредственно в области опухолевого процесса эффективную и пролонгированную концентрацию иммунопрепараторов и биомедицинских клеточных продуктов, что может повысить эффективность лечения и снизит выраженность побочных эффектов. Аналогичный подход представляется перспективным для доставки в область опухоли генетически модифицированных лимфоцитов (CAR-T-клеток) – биомедицинских клеточных продуктов, продемонстрировавших высокую эффективность при гемобластозах и незначительную активность при терапии солидных опухолей. Локальные введения CAR-T-клеток в скаффолдах могут позволить создать эффективную концентрацию клеточного продукта в области опухолевого узла и снизить риск развития побочных иммуноопосредованных эффектов.

Приглашенный доклад

ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ РЕКОНСТРУКТИВНЫЕ ИМПЛАНТАТЫ В УСТРАНЕНИИ ДЕФЕКТОВ ЧЕЛЮСТНО-ЛИЦЕВОЙ ОБЛАСТИ У ОНКОЛОГИЧЕСКИХ БОЛЬНЫХ

**Кульбакин Д.Е.¹, Чойнзонов Е.Л.¹, Больбасов Е.Н.², Воробьев А.О.²,
Марченко Е.С.³, Буякова С.П.³, Федорова И.К.¹, Азовская Д.Ю.¹**

¹*Научно-исследовательский институт онкологии, Томский национальный исследовательский медицинский центр Российской академии наук, Томск, Россия*

²*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия*

³*Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия*

Актуальность. В настоящее время проблемы реконструктивно-пластическое замещение послеоперационных дефектов у больных местно-распространенными злокачественными новообразованиями челюстно-лицевой области являются весьма актуальными. Следует отметить, что кости лицевого отдела черепа имеют самую сложную геометрию среди всех костей скелета, что существенно затрудняет реконструктивный этап. С другой стороны, свойственное данной группе больных частое (до 50%) развитие местного рецидива, приводит к выполнению повторных хирургических вмешательств. Одним из решений подобных проблем могут стать остеозамещающие имплантаты, созданные с использованием 3D технологий.

Материал и методы. На базе отделения опухолей головы и шеи НИИ онкологии Томского НИМЦ с 2023 г. начато клиническое испытание реконструктивной технологии по устраниению дефектов челюстно-лицевой области у онкологических больных с использованием новых индивидуальных эндопротезов из отечественного фторполимера – сополимер винилиденфторида с тетрафторэтиленом (ВДФ-ТеФЭ). В рамках данного исследования выполнено 5 реконструктивных операции. Исследование начато с разрешения локального биоэтического комитета, а все пациенты были информированы о проводимом исследовании и подписали добровольное согласие.

У всех больных на момент хирургического лечения имелся злокачественный опухолевый процесс с деструкцией костей носа и/или верхней челюсти (T4).

Имплантат из ВДФ-ТеФЭ изготавливается индивидуально для каждого больного с учетом планируемого объема резекции с использованием CAD/CAM технологий. Полученные имплантаты стерилизовались этиленоксидом. Реконструктивная методика с использованием индивидуальных имплантатов из ВДФ-ТеФЭ всегда комбинировалась с аутотрансплантатами (лоскутами): парамедиальный апоневротический лобный лоскут, лопаточный лоскут, переднебоковой лоскут бедра. Срок наблюдения составил до 5 месяцев.

Результаты. Изготовленные методом 3D принтинга имплантаты из ВДФ-ТеФЭ точно повторяют форму и контуры резецированных участков лицевого отдела черепа, обладают всеми прочностными характеристиками (соответствующими костной ткани) и адекватно возмещают дефекты челюстно-лицевой области. Комбинация реконструктивного имплантата с лоскутами обеспечивала предотвращение воспалительных осложнений в области реконструкции. Воспалительных осложнений и нарушение функционально-прочностных свойств установленных имплантатов за период наблюдения отмечено не было. Имплантаты создаются полностью

из российского сырья в рамках развития стратегии технологического суверенитета.

Выводы. Использование предлагаемых индивидуальных имплантатов из сополимера винилиденфторида с тетрафторэтиленом (ВДФ-ТеФЭ) позволяет выполнять замещение сложных послеоперационных дефектов челюстно-лицевой области с получением максимального функционального и косметического результата, без нанесения дополнительной травмы пациенту и сокращая длительность оперативного пособия связанный с использованием и моделированием костного лоскута.

Приглашенный доклад

ДОКЛИНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ

**ФУНКЦИОНАЛИЗИРОВАННЫХ ПОРИСТЫХ ИМПЛАНТАТОВ,
ПОЛУЧАЕМЫХ МЕТОДАМИ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Каралкин П.А.^{1,2*}, Кудрин К.Г.¹, Святославов Д.С.¹, Усатов Д.А.¹,
Ахмедова С.А.², Кирсанова В.А.², Свиридова И.К.², Сергеева Н.С.²,

Решетов И.В.¹

*¹ФГАОУ ВО Первый Московский государственный медицинский
университет им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский
Университет), Москва, Россия*

*²Московский научно-исследовательский онкологический институт им.
П.А.Герцена – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России,
Москва, Россия*

*pkaralkin@gmail.com

Неизменное повышение частоты онкологических заболеваний и травм костей скелета приводит к увеличению потребности в специализированной помощи при устраниении протяженных костных дефектов [1]. Несмотря на определенные достижения в разработке и применении полимерных и керамических остеопластических материалов, использование имплантатов на основе металлов, в первую очередь титана и его сплавов, на сегодняшний день остается безальтернативным вариантом для замещения дефектов костной ткани в таких нагружаемых областях, как кости лицевой части черепа, нижняя челюсть, позвоночник и крупные суставы [2]. При этом применение аддитивных технологий позволяет получать изделия с необходимыми прочностными характеристиками с учётом анатомических особенностей, способные содержать как пористые, так и сплошные конструктивные элементы для наиболее эффективной реконструкции протяженных дефектов [3].

С точки зрения усиления регенеративных свойств титановых имплантатов перспективным подходом является нанесение на их поверхности биоактивных покрытий, содержащих набор биогенных компонентов, обеспечивающих улучшенную механическую прочность, коррозионную стойкость, биоактивность и бактерицидность [4]. Описанный выше подход был реализован при проведении доклинических испытаний пористых имплантатов из титанового сплава ВТ-6 (TiAl6V4) с биоактивными покрытиями на основе TiCN, модифицированные Ca, P и O (TiCaPCON), нанесенными методом магнетронного напыления. Исследования были выполнены на образцах с многокомпонентными биоактивными покрытиями, в ряде случаев, содержащие ионы серебра (Ag) в целях усиления антибактериальных свойств.

Влияние модификации поверхности титановых имплантатов на клеточную адгезию и остеогенную дифференцировку оценивали в тестах *in vitro* на культурах клеток остеосаркомы MG-63 и мультипотентных стромальных клеток костного мозга человека, соответственно. Были выявлены выраженные адгезионные свойства покрытия на модифицированном титане: площадь клеток и количество фокальных контактов в этой группе оказались существенно выше по сравнению с образцами чистого титана. При этом повышение экспрессии генов *RunX2* и *Alpl* позволяло предположить у изделий с биопокрытиями наличие повышенной способности к остеointеграции.

Усиление регенеративных свойств изучали *in vivo* на модельных костных дефектах, сформированных в нижней челюсти кроликов породы Советская шиншилла, а также в височно-скелетной области приматов вида Павиан анубис. Совокупность рентгенологических и гистологических признаков показала хорошую консолидацию и восстановления функции в области имплантации. Таким образом, наличие биоактивных свойств, высокой износстойкости и возможности осаждения на поверхность с развитым рельефом делает покрытия состава TiCaPCON перспективным материалом для модификации персонализированных имплантатов.

Список используемой литературы:

- [1] Juncar M., Tent P.A., Juncar R.I., et al. // BMC Oral Health. 2021; 21(1): 128.
- [2] Davis R., Singh A., Jackson M.J. et al. // Int J Adv Manuf Tech 2022; 120: 1473–1530.
- [3] Park J., Zobaer T., Sutradhar A.A. // Micromachines. 2021; 12: 101.
- [4] Xue T., Attarilar S., Liu S. et al. // Front. Bioeng. Biotechnol. 2020; 8: 603072.

Приглашенный доклад

БИОМЕДИЦИНСКИЕ ДОКЛИНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ НОВЫХ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ЦЕМЕНТОВ ДЛЯ РЕКОНСТРУКЦИИ КОСТНОЙ ТКАНИ

Сергеева Н.С.^{1*}, Свиридова И.К.¹, Кирсанова В.А.¹, Ахмедова С.А.¹,
Каралкин П.А.^{1,2}, Гольдберг М.А.², Крохичева П.А.², Хайрутдинова Д.Р.²,
Фомин А.С.², Комлев В.С.², Каприн А.Д.¹

¹*Московский научно-исследовательский онкологический институт им.
П.А. Герцена – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России,
Москва*

²*Первый Московский государственный медицинский университет им.
И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет), Москва*

³*Институт Металлургии и Материаловедения им. А.А. Байкова
Российской Академии Наук, Москва, Россия*

**prognoz.06@mail.ru*

Кальцийфосфатные цементы (КФЦ) – класс биоматериалов на основе солей фосфатов кальция и затворяющей жидкости (ЗЖ) с формированием цементного камня, традиционно используется в челюстно-лицевой хирургии, травматологии, онкологии для замещения костных дефектов в зонах, работающих под нагрузкой. В то же время широкое использование этих материалов в клинической практике ограничивают такие их негативные характеристики, как низкое значение pH ЗЖ и самого цемента в процессе биодеградации, экзотермическая реакция в процессе затворения КФЦ, приводящая к некрозу окружающих тканей в месте их имплантации, короткое время схватывания и низкая скорость биодеградации. Определенные надежды клиницисты связывают с новыми магний-замещенными КФЦ (Mg-КФЦ), лишенными вышеперечисленных недостатков.

В настоящей работе проведены биомедицинские испытания линейки образцов Mg-КФЦ в инъектируемой и неинъектируемой формах, с соотношением (Ca+Mg)/P, равным 1,67, содержанием Mg 20 и 60 моль% и двух вариантов ЗЖ. Составы данных образцов костных цементов разработаны в ИМЕТ РАН, там же проведена их полная физико-химическая аттестация. В исследованиях *in vitro* непрямым методом (ГОСТ Р ИСО 10993, части 5 и 12) при инкубации в течение 24 и 72 часов клеток перевивной линии остеосаркомы человека MG-63 в вытяжке данных образцов показано отсутствие токсичности разработанных составов. При посеве клеток непосредственно на образцы Mg-КФЦ и их культивировании на протяжении 10 суток обнаружено наличие матриксных свойств поверхности данных образцов цементных

материалов: клетки формировали фокальные контакты, активно пролиферировали и заселяли всю поверхность материалов, вне зависимости от содержания Mg в цементах. При культивировании МСК КМ донора на образцах Mg-КФЦ с помощью метода ПЦР РВ выявлена экспрессия ключевых генов, ответственных за остеогенную дифференцировку стволовых клеток: ALPL, SP7, RUNX2, и с помощью иммуноцитохимического метода обнаружен синтез щелочной фосфатазы в МСК КМ донора. В экспериментах *in vivo* при подкожной имплантации мышам образцов Mg-КФЦ выявлена их биосовместимость: образцы постепенно биодеградировали и обрастили соединительной тканью без признаков воспаления. Использование свежезатворенных образцов Mg-КФЦ в экспериментах *in vivo* для заполнения модельного костного дефекта у крыс (краевая резекция большеберцовой кости) позволило сделать заключение о наличии у них остеокондуктивных свойств: первые признаки формирования костной ткани *de novo* в месте дефекта определялись уже через 6 недель наблюдения. Полученные результаты свидетельствуют о биоактивности разработанных составов Mg-КФЦ и перспективности их дальнейшего изучения.

Работа проведена в рамках Государственного задания Минздрава России № 056-03-2024-113 на выполнение научных исследований и разработок

ВЛИЯНИЕ ЦИНКОВОГО СПЛАВА Zn-1% Mg-1%Fe НА ОРГАНИЗМ КРОЛИКОВ ПРИ КРАТКОВРЕМЕННОМ И ДЛИТЕЛЬНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Абдрахманова Э.Д.^{1*}, Хафизова Э.Д.^{1,2**}, Билялов А.Р.³,
Галаутдинов М.Ф.³, Щекин В.С.³, Поленок М.В.¹

¹Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

²Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН,
Москва, Россия

³Башкирский государственный медицинский университет Министерства
здравоохранения РФ, Уфа, Россия

*elmira.abdr2019@mail.ru, **ela.90@mail.ru

Внимание исследователей сосредоточено на изучении цинковых сплавов в качестве материала для медицинских применений, а именно сосудистых стентов, винтов и пластин для остеосинтеза. Однако, помимо исследования структуры и механических свойств одной из важнейших задач является исследование поведения материала в живом организме, так

как цинк в избыточном количестве может оказывать токсический эффект [1]. Имплантация Zn-Fe и Ti-6Al-4V показала схожие гистологические и гематологические результаты, что свидетельствует об отсутствии вреда для организма сплава Zn-Fe [2].

Ранее в исследованиях система Zn-Fe-Mg показала более высокую биосовместимость *in vitro* по сравнению с другими цинковыми сплавами [3].

Целью настоящей работы является изучение острой и хронической токсичности биодеградируемого сплава на модели кроликов.

Была проведена серия операций по имплантации пластин и винтов биодеградируемого сплава Zn-1%Fe-1%Mg в бедренные кости и мышцы кроликов. Оценку результатов проводили на основе клинических, рентгенологических исследований на 2 сутки и через 5 недель после операции, а также после выведения животных из эксперимента через 10 недель проводился гистологический анализ.

В данном эксперименте, не было зафиксировано инфекционных осложнений или потери фиксации имплантатов. Рентгенологический и гистологический анализ показал отсутствие значительных изменений в органах экспериментальных животных. Это указывает на минимальное или полное отсутствие негативного влияния данных имплантатов на функциональное состояние внутренних органов кроликов.

Авторы выражают искреннюю благодарность коллективу Уфимской городской ветеринарной станции за профессиональную помощь в проведении рентгенографических исследований и биохимического анализа крови в рамках данного эксперимента

Список используемой литературы:

- [1] L.M. Plum; L. Rink; H. Haase // Int. J. Environ. Res. Public Health. 2010. V. 7, 1342-1365.
- [2] A. Kafri, S. Ovadia, G. Yosafovich-Doitch et al. // J Mater Sci: Mater Med. 2018. V. 29, 94.
- [3] В. Д. Ситдиков, Э.Д. Хафизова, М.В. Поленок, Э.Д. Абдрахманова // Materials. Technologies. Design. 2024. 6(2 (17), 109–128.

ПРИЖИЗНЕННАЯ ОЦЕНКА БИОДЕГРАДАЦИИ МЕМБРАН ДЛЯ НАПРАВЛЕННОЙ КОСТНОЙ РЕГЕНЕРАЦИИ ИЗ МАГНИЕВОГО СПЛАВА Mg-2Zn-2Ga В ЭКСПЕРИМЕНТЕ НА ЛАБОРАТОРНЫХ КРОЛИКАХ

Кунижев К.А.¹, Редько Н.А.¹, Дробышев А.Ю.¹, Невская Е.Е.¹,

Комиссаров А.А.², Баженов В.Е.², Плегунова С.В.²

¹*ФГБОУ ВО «Российский университет медицины» Минздрава России,
Москва, Россия*

²*Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия*

kunizhev@gmail.com

Для направленной костной регенерации (НКР) требуется временные барьерные мембранны, обеспечивающие остеогенез и исключающие повторные вмешательства. Магниевые сплавы, включая Mg–2Zn–2Ga, характеризуются биосовместимостью, остеокондуктивностью и модулем упругости, сопоставимым с костной тканью [1], однако их коррозия в физиологических средах сопровождается газообразованием. Целью работы была прижизненная оценка биорезорбируемой мембранны из Mg–2Zn–2Ga в модели костного дефекта у кроликов с анализом деградации, газообразования и остеointеграции [2,3] и сравнением с нерезорбируемой мембранный из политетрафторэтилена (PTFE) [4,5].

Мембранны из сплава Mg–2Zn–2Ga изготавливали плавкой в защитной атмосфере с последующей двухступенчатой термообработкой и прокаткой [6]; размеры образцов — 30×40×0,2 мм. In vitro-оценку проводили по объёму выделяемого водорода в растворе Хэнкса в течение 8 суток [6]. In vivo: у 20 кроликов формировали парные дефекты теменной кости диаметром 8 мм; один дефект закрывали магниевой мембранный, контралатеральный — PTFE. Выведение из эксперимента выполняли на 1–6-м месяцах. Биодеградацию и регенерацию оценивали с использованием МСКТ, микро-КТ и гистологии.

По данным МСКТ, газообразование вокруг магниевой мембранны было транзиторным (пик к 3-му месяцу, снижение к 6-му) и локализовалось преимущественно по латеральным краям дефекта. Микро-КТ выявила уменьшение объёма мембранны и к 6-му месяцу большую степень заполнения дефекта костью (50%) под магниевой мембранный по сравнению с PTFE (15–20%). Для PTFE мембранны отмечена инкапсуляция без резорбции и выраженного остеогенеза; Конструкция из сплава Mg обеспечила более интенсивную регенерацию при умеренной, самолимитирующейся коррозии и отсутствии остаточного воспаления.

Мембрана из Mg–2Zn–2Ga продемонстрировала биосовместимость, контролируемую деградацию и остеокондуктивность. Газовые полости были маловолюмными, кратковременными и без признаков хронического воспаления. К 6-му месяцу дефект под Mg мембраной уменьшился в большей степени, чем под PTFE. Результаты подтверждают перспективность магниевых мембран и необходимость дальнейших доклинических и клинических исследований.

Список используемой литературы:

- [1] Wang Q, Wang W, Li Y, Li W, Tan L, Yang K. Biofunctional magnesium coating of implant materials by physical vapor deposition. Biomater Transl. 2021; 2: 248–256.
- [2] Noviana D, Paramitha D, Ulum MF, Hermawan H. The effect of hydrogen gas evolution of magnesium implant on post-implantation mortality of rats. J Orthop Transl. 2015; 5: 9–15.
- [3] Zhou T, McCarthy ED, Soutis C, Cartmell SH. Novel lactone-layered double hydroxide ionomer powders for bone tissue repair. J Biomed Mater Res B. 2020; 108: 2835–2846.
- [4] Mei D, et al. Misalignment between degradation rate and mechanical integrity of Mg-Zn-Y-Nd alloy in modified Hanks' solution. J Magnes Alloys. 2024; 12: 3661–3674.
- [5] Mei D, Wang C, Lamaka SV, Zheludkevich ML. Influence of albumin on initial stages of magnesium corrosion in Hank's solution. J Magnes Alloys. 2021; 9: 805–817.
- [6] Rogachev SO, Bazhenov VE, Komissarov AA, et al. Microstructure, mechanical and corrosion properties of Mg-Zn-Ga alloy after hot rolling. J Mater Eng Perform. 2025; 34: 3970–3978.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ТАРГЕТНОЙ ДОСТАВКИ
ПРЕПАРАТОВ В ОРТОТОПИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ
МЕТАСТАЗИРУЮЩЕГО РАКА ПОЧКИ**

Петрова Е.А.^{1*}, Сайн А.Ю.¹, Куликов О.А.², Сухоруков Г.Б.^{1,3},
Синдеева О.А.¹

¹ Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

² Национальный исследовательский Мордовский государственный
университет им. Н.П. Огарёва, Саранск, Россия

³ ООО «ЛИФТ Центр», Москва, Россия

*Elizaveta.petrova@skoltech.ru@mail.ru

Рак почки занимает 12-е место по распространённости среди всех онкологических заболеваний и диагностируется примерно у 2% пациентов с раком [1]. Несмотря на относительно невысокую частоту, данная патология представляет собой серьёзную клиническую проблему из-за сложности ранней диагностики и ограниченности эффективных терапевтических подходов. Стандартным методом лечения остаётся нефрэктомия — частичная или радикальная. Однако её эффективность ограничена стадией заболевания: на поздних этапах операция не всегда предотвращает развитие метастазов. Системная терапия, включая ингибиторы тирозинкиназ и иммунотерапию, широко применяется, но сопровождается значительными побочными эффектами и часто приводит к развитию лекарственной резистентности опухоли [2].

Одним из перспективных направлений для повышения эффективности лечения является таргетная доставка препаратов непосредственно в почку. Мы провели комплексную характеристику ортоптической модели почечной карциномы, включая исследование влияния концентрации имплантированных опухолевых клеток, а также времени выполнения нефрэктомии на рост первичной опухоли и частоту метастазирования (Рисунок 1). Помимо этого, мы оценили биораспределение и накопление полизелектролитных микрокапсул после их инъекции через почечную артерию. Было показано, что артериальная доставка безопасна и значительно увеличивает локальное накопление частиц в почке. Наша работа демонстрирует, что данная модель рака почки является надёжным инструментом для доклинической оценки эффективности и безопасности таргетных терапевтических подходов.

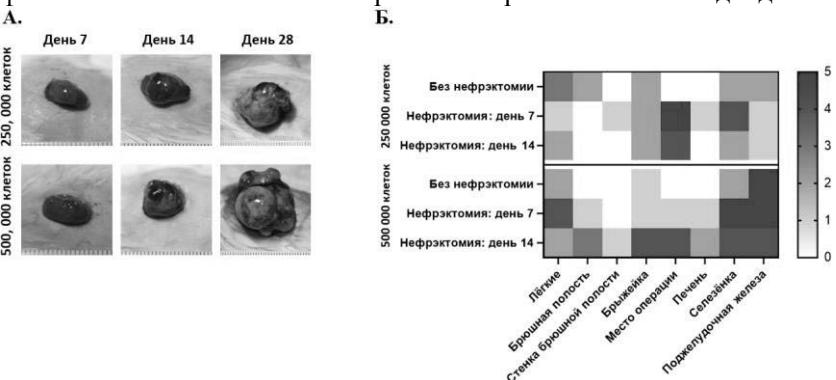


Рисунок 1 – изображения почек с опухолью после ортоптической имплантации разной дозы клеток (А). Распространение метастазов в различных органах в зависимости от дозы клеток и нефрэктомии (Б).

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ № 23-75-10070.

Список используемой литературы:

- [1] L. Cirillo, S. Innocenti, and F. Becherucci, “Global epidemiology of kidney cancer,” *Nephrol. Dial. Transplant.*, vol. 39, no. 6, pp. 920–928, May 2024, doi: 10.1093/ndt/gfae036.
- [2] I. Lyskjær, L. Iisager, C. T. Axelsen, T. K. Nielsen, L. Dyrskjøt, and N. Fristrup, “Management of Renal Cell Carcinoma: Promising Biomarkers and the Challenges to Reach the Clinic,” *Clin. Cancer Res.*, vol. 30, no. 4, pp. 663–672, Feb. 2024, doi: 10.1158/1078-0432.ccr-23-1892.

**РАЗРАБОТКА ИННОВАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ
ПРИМЕНЕНИЯ НИЗКОИНТЕНСИВНОГО ЛАЗЕРНОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ УСИЛЕНИЯ РЕГЕНЕРАТОРНОГО
ПОТЕНЦИАЛА СТРОМАЛЬНО-ВАСКУЛЯРНОЙ ФРАКЦИИ
ЖИРОВОЙ ТКАНИ**

Еремин П.С.*, Марков П.А., Рожкова Е.А.

*ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр
реабилитации и курортологии» Министерства здравоохранения
 Российской Федерации, Москва, Россия*

ereminsps@gmail.com

Одним из перспективных клеточных продуктов является стромально-васкулярная фракция жировой ткани — гетерогенная популяция клеток, включающая мезенхимальные стромальные клетки, эндотелиальные клетки, гладкомышечные элементы, преадипоциты и иммунокомпетентные клетки. Однако эффективность клеточного продукта зависит от характеристик донора: возраста, состояния здоровья, массы тела, наличия хронических заболеваний. У пожилых пациентов и при метаболических нарушениях наблюдается снижение пролиферативного потенциала и ангиогенной активности клеток, что ограничивает клинический результат.

Среди различных методов модуляции биологической активности клеток особое место занимает низкоинтенсивное лазерное излучение, стимуляцию пролиферации и миграции клеток, а также защиту от апоптоза. Лазерная терапия уже доказала эффективность при лечении широкого спектра патологий, включая трофические язвы, повреждения кожи, ортопедические и стоматологические заболевания.

Целью работы является оценка эффективности и безопасности применения низкоинтенсивного лазерного излучения для активации регенераторного потенциала стромально-васкулярной фракции жировой ткани в экспериментах *in vitro*.

Материалы и методы: Для моделирования влияния НИЛИ использовали мезенхимальные стволовые клетки жировой ткани человека. Облучение проводили аппаратом «ЛАЗМИК-ВЛОК» (635 нм, 2 мВт) в диапазоне доз 0,02–4 Дж/см². Эффективность оценивали методом wound healing assay в стандартной среде и при моделировании хронического воспаления (рН 8,0). Оценивали скорость закрытия дефекта, морфологию, пролиферацию, а также распределение фаз клеточного цикла.

Результаты: При облучении клеточных культур красным лазером (635 нм) в диапазоне доз 0,02–4 Дж/см² выявлены выраженные дозозависимые эффекты. В течение первых 24 часов после повреждения монослоя достоверных различий между контрольной группой и группами, облучёнными дозами 0,02–2 Дж/см², площадь дефекта сохранялась на уровне 52–69% от исходного значения. Однако при дозах 1–2 Дж/см² уже к 48 часам отмечалось ускоренное закрытие дефекта по сравнению с контролем: площадь непокрытой зоны снижалась до 13–36% против 24% в контроле ($p < 0,05$). При малых дозах (0,02–0,5 Дж/см²) регенераторная активность была ниже, чем у необлучённых культур, что может указывать на наличие минимального порога эффективности.

В условиях рН 8,0 ростовой среды среды жизнеспособность и адгезия МСК ЖТ снижались по сравнению со стандартной культурой (рН 7,4). Облучение лазером в дозах 1–2 Дж/см² достоверно повышало количество прикреплённых клеток через 72 ч. Размер клеток в опытной группе был в среднем на 27% больше, что указывает на сохранение метаболической активности. При этом, распределение клеток по фазам не изменялось под действием лазера, что говорит об отсутствии сдвига в репликативной активности.

Таким образом, использование низкоинтенсивного лазерного излучения в оптимальных дозах усиливает пролиферативную активность и устойчивость клеток СВФ к повреждающим факторам.

КОСТНАЯ ПЛАСТИКА ГЕН-АКТИВИРОВАННЫМ ОСТЕОПЛАСТИЧЕСКИМ МАТЕРИАЛОМ НА ОСНОВЕ ОКТАКАЛЬЦИЕВОГО ФОСФАТА

Пресняков Е.В.^{1,2*}, Далгатов М.Г.², Бозо И.Я.¹, Деев Р.В.^{1,2}, Комлев В.С.³

¹*АО «Гистографт», Москва, Россия*

²Научно-исследовательский институт морфологии человека имени академика А.П. Авцына Федерального государственного бюджетного научного учреждения "Российский научный центр хирургии имени академика Б.В. Петровского", Москва, Россия

³Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва, Россия

**uvpres@gmail.com*

Применение активированных остеопластических материалов для индукции репаративного остеогенеза является современным подходом к лечению пациентов с дефектами костной ткани. Первым изделием подобного рода стал «Гистографт», состоящий из гранул на основе октакальциевого фосфата с нанесенными на их поверхность молекулами плазмидной ДНК с геном сосудистого эндотелиального фактора роста [1, 2].

Целью работы явились сравнительная оценка костных регенераторов, сформированных при использовании ген-активированного и ординарного остеопластических материалов.

Исследование было проведено на 30 биоптатах костного ткани, полученных в результате двухэтапной дентальной имплантации у пациентов через 6 месяцев после костнопластической операции материалами на основе ксеногенного матрикса («Bio-Oss», Швейцария, n=20) и синтетического ген-активированного материала («Гистографт», Россия, n=20). Результаты оценивали посредством гистологического и имmunогистохимического исследований, а также гистоморфометрии.

Во всех случаях на гистологических препаратах не было выявлено воспалительной инфильтрации, что подтвердило биосовместимость как ксеногенного костного матрикса, так и ген-активированного остеопластического материала «Гистографт».

При имmunогистохимическом исследовании с антителами к СА2 на поверхности микрогранул как Гистографта, так и ксеногенного трансплантата были выявлены резорбирующие материал клетки, напоминающие по своему строению остеокlastы.

В ходе гистоморфометрического анализа было выявлено, что доля вновь образованной ретикулофиброзной костной ткани в группе с использованием ген-активированного остеопластического материала составила 10,86%, что статистически значимо больше ($p = 0,039$), чем в группе с применением ксеногенного матрикса - 4,32%.

Таким образом, как материал «Bio-Oss», так и изделие «Гистографт» обладают свойством остеокондукции. Вместе с тем, ген-активированный

материал «Гистографт», вероятно, за счет свойства остеоиндукции, обеспечил формирование наибольшего объема костной ткани.

Исследование проведено в рамках государственного задания Министерства науки высшего образования Российской Федерации №1024100700005-8 от 25.10.2024.)

Список используемой литературы:

[1] Деев, Р. В. Ординарные и активированные остеопластические материалы / Р.В. Деев, А. Ю. Дробышев, И. Я. Бозо // Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова. – 2015. – № 1. – С. 51-69. – EDN TPHESB.

[2] Classification and the Main Features // BioMed Research International. 2015. Vol. 2015. P. 365050. EDN: VEQAAD doi: 10.1155/2015/365050

СИНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ПРЕПАРАТОВ РАЗЛИЧНОЙ ПРИРОДЫ, ВКЛЮЧЕННЫХ В ГИБРИДНЫЕ ЧАСТИЦЫ НА ОСНОВЕ ФОСФАТА КАЛЬЦИЯ И ХИТОЗАНА, НА СНИЖЕНИЕ ВНУТРИГЛАЗНОГО ДАВЛЕНИЯ

Попова Е.В.

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,

Москва, Россия

popova.ekaterina1995mail.ru

Глазные капли составляют около 90% офтальмологических препаратов, но во внутренние ткани глаза попадает не более 5% от общей дозы из-за наличия барьера роговицы и смыва слезной жидкостью. Для увеличения эффективности проникновения препаратов внутрь глаза перспективны неорганические частицы фосфата кальция (CaP-частицы) благодаря их биосовместимости, биодеградируемости, возможности контроля формы и морфологии. Для усиления взаимодействия между CaP-частицами и отрицательно заряженной поверхностью роговицы можно использовать покрытие положительно заряженным полимером хитозаном (Хит). В этой работе продемонстрирована возможность включения в такие гибридные частицы как низко-, так и высокомолекулярных веществ: ингибитора ангиотензин-превращающего фермента эналаприлата (348 Да) и фермента супероксиддисмутазы 1 (СОД1, 32 кДа). Эти препараты при местном введении способствуют снижению внутриглазного давления (ВГД) и окислительного стресса.

Эналаприлат и СОД1 были включены в гибридные частицы методом соосаждения в кор фосфата кальция с дальнейшим покрытием частиц лактатом Хит со средней молекулярной массой 5 кДа с помощью сшивающего агента триполифосфата натрия. Физико-химические характеристики частиц представлены в табл. 1. Препараты эффективно включались в состав гибридных частиц при совместном включении, при этом процент включения эналаприлата был практически одинаков: при одиночном включении (66%) и совместно с СОД1 (56%). А эффективность включения СОД1 составляла 64% при одиночном включении и 30% при совместном включении. Отметим, что включенные активные вещества не затрудняли высвобождение друг друга, за 3 часа высвобождалось 100% СОД1 и 50% эналаприлата.

Таблица 1 – Характеристики частиц с включёнными препаратами

Частицы	D _h , нм	PDI	ζ, мВ	Включение препарата, %			
				Эналаприлат		СОД1	
				%	мкг/мг	%	мкг/мг
CaP	80±20	0,19	-25±2	-	-	-	-
Гибридные	160±25	0,21	+12±2	-	-	-	-
Гибридные/Эналаприлат	180±30	0,25	+7±3	66±5	340±20	-	-
Гибридные/СОД1	170 ± 20	0,47	+22 ± 1	-	-	64±3	110±5
Гибридные/СОД1+Эналаприлат	140 ± 20	0,43	+20±1	56±6	300±20	30±2	40±3

В экспериментах *in vivo* на нормотензивных кроликах было продемонстрировано, что включение СОД1 и эналаприлата в гибридные частицы привело к значительному увеличению времени «жизни» препаратов в слезной жидкости и значительно большему и длительному снижению ВГД по сравнению как с препаратами в растворе, так и с препаратами, включенными по отдельности. Инстилляция совместно включенных эналаприлата и СОД1 в гибридных частицах приводила к резкому падению ВГД на 3,5 мм рт.ст через час, а при использовании отдельно включенных в гибридные частицы СОД1 и эналаприлата – на 0,8 и 1,4 мм рт.ст, соответственно. Таким образом, очевидно, что суммарный эффект препаратов, совместно внедренных в гибридные частицы, превышает их эффекты при включении по отдельности, то есть, они оказывали некоторый синергический эффект на ВГД, который, по-видимому, обусловлен различными физиологическими механизмами действия СОД1 и эналаприлата.

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова (121041500039-8).

ПОРИСТЫЕ ТИТАНОВЫЕ СКАФФОЛДЫ КАК ПЛАТФОРМА ДЛЯ ЛОКАЛЬНОЙ КЛЕТОЧНОЙ ИММУНОТЕРАПИИ ОПУХОЛЕЙ

**Анисимова Н.Ю.^{1*}, Еникеев Н.А.², Гатина С.А.², Рыжкин А.А.²,
Киселевский М.В.¹**

**¹ФГБУ «НМИЦ онкологии им. Н.Н. Блохина» Минздрава России, Москва,
Россия**

²ФГБОУ ВО Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия
***n_anisimova@list.ru**

Биомедицинские клеточные продукты (БМКП) на основе активированных и генетически модифицированных лимфоцитов играют значимую роль в иммунотерапии рака. Эти препараты показывают высокую активность при локальном введении, обеспечивающем высокую концентрацию иммунокомпетентных клеток. Именно поэтому БМКП эффективны при лечении опухолевых асцитов, плевритов и перикардитов, когда клетки вводят внутрь полостей. Для лечения солидных опухолей было предложено использовать пористые скаффолды в качестве платформ, нагруженных БМКП. Такой подход обеспечивает сохранность клеток в процессе внедрения в организм, поддерживает жизнеспособность культуры концентрированных клеток, а также их пролиферативный потенциал и белок-синтезирующую функцию. Такая платформа, нагруженная большим количеством активированных клеток с противоопухолевой активностью, может быть размещена рядом с опухолевым узлом или внутри него для оказания циторедуктивного воздействия. Это особенно важно для уменьшения объема исходно нерезекtableльных опухолей с последующим иссечением оставшейся опухолевой ткани вместе со скаффолдом.

В настоящем исследовании использовали пористые скаффолды с различной геометрией (Diamond и Gyroid с размером пор 500 мкм и IWP с размерами пор 500 и 700 мкм), изготовленные из титанового сплава ВТ6 методом селективного лазерного сплавления. Напечатанные скаффолды нагружали лимфоцитами человека и лабораторных мышей, активированными интерлейкин-2 в условиях *in vitro* (примерно 700000 клеток в одном образце). Изучали, как влияет структура скаффолдов на выживаемость клеток, их фенотип и цитотоксический потенциал относительно опухолевых клеток. Также исследовали торможение роста опухоли после паратуморальной имплантации скаффолдов с БМКП мышам линии Balb/c с привитой карциномой молочной железы линии EMT6.

Согласно полученным в экспериментах *in vitro* данным после нагрузки в скаффолды лимфоидные клетки характеризовались высоким уровнем выживаемости (более 86% через 48 часов после нагрузки клетками), высокой цитотоксичностью относительно опухолевых клеток линии SKOV3 (до 37% после 48 часов кокнкубации) и достоверным нарастанием уровня мембранны-связанных маркеров активированных лимфоцитов CD25.

Эксперименты *in vivo* показали достоверное торможение роста опухоли через 10 суток после имплантации нагруженных БМКП скаффолдов. В сравнении с исходным объемом опухолевого узла наблюдали либо стабилизацию опухолевого роста (под воздействием клеток в IWP500, Diamond и Gyroid), либо значительную инволюцию под влиянием БМКП, нагруженных в скаффолды со структурой IWP700. При этом в контрольной группе, где мышам имитировали хирургическое вмешательство, но скаффолды не вводили, наблюдали увеличение объема опухоли в среднем в 2,6 раза в сравнении с исходным уровнем. Проведенный сравнительный анализ показал, что имплантация пористых скаффолдов с интерлейкин-активированными лимфоцитами способствовала снижению объема опухоли в среднем в 3,5 раз (Diamond и Gyroid), в 2,6 раз (IWP500) и в 6,4 раза (IWP700) в сравнении с группой контроля. Выявлены признаки постепенной инволюции опухоли под воздействием иммунотерапии, что было особенно заметно в области контакта с пористой конструкцией

Таким образом, проведенные исследования показали перспективность применения пористых титановых скаффолдов для локальной иммунотерапии солидных опухолей с использованием БМКП для повышения эффективности лечения, снижения риска системной токсичности и неблагоприятных побочных эффектов.

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ № 23-69-10003.

ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ РЕАКЦИОННО-СВЯЗАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ФОСФАТОВ КАЛЬЦИЯ И МАГНИЯ В РЕКОНСТРУКТИВНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ ХИРУРГИИ

Крохичева П.А.^{1*}, Свиридова И.К.², Гольдберг М.А.¹, Кирсанова В.А.²,
Хайрутдинова Д.Р.¹, Ахмедова С.А.², Фомин А.С.¹, Сергеева Н.С.²,
Комлев В.С.¹

¹*Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова
Российской Академии Наук, Москва, Российская Федерация*

²«Национальный Медицинский Исследовательский Центр Радиологии»
Министерства Здравоохранения Российской Федерации, Обнинск,
Российская Федерация
^{*}polinariakroh@gmail.com

Восстановление костных дефектов, возникающих в результате травм, воспалительных процессов, после оперативных вмешательств и удалений новообразований, остается актуальной задачей [1]. При реконструктивно-восстановительных операциях для восполнения объема утраченной костной ткани применяю алло- и аутогraftы (фрагменты кости донора или собственной кости пациента, соответственно), считающиеся «золотым стандартом». Однако недостатки такой технологии хорошо известны. Одним из рациональных путей решения могло бы стать использование синтетических биосовместимых и биоактивных материалов. Наиболее перспективны материалы на основе фосфатов кальция и магния, близкие по составу к минеральной составляющей костной ткани, и, в частности, кальциймагний фосфатные цементы (КМФЦ) [2]. Они представляют собой вяжущие системы, состоящие из порошка и жидкости, при смешении которых происходит химическое взаимодействие, сопровождающееся схватыванием и последующим твердением. К несомненным достоинствам этих материалов можно отнести, во-первых, костные цементы на основе системы фосфат кальция - фосфат магния имеют более высокую биосовместимость с костной тканью, что позволяет им лучше интегрироваться с окружающей тканью и обеспечивать более быстрый процесс регенерации. Магний (Mg^{2+}) является одним из четырех наиболее распространенных катионов в организме человека и играет решающую роль в метаболизме костей и их структурном развитии. Во-вторых, такие КМФЦ обладают более высокими механическими характеристиками, что делает их более надежными. В-третьих, применение современных методов малоинвазивной хирургии лечения костных дефектов с использованием КМФЦ позволяет снизить риск осложнений, что в свою очередь сокращает время реабилитации и повышает качество жизни пациента.

В работе представлены результаты исследований влияния ионов Mg^{2+} на функциональные свойства КМФЦ, такие как время и температура твердения, механическая прочность, способность к инъекции, кинетика деградации *in vitro*. Приведены результаты исследований цитосовместимости и остеогенной дифференцировки *in vitro*. Были проведены исследования биосовместимости и биоактивности *in vivo*. Показано, что КМФЦ обладали способностью поддерживать адгезию клеток MG-63, их пролиферацию и распространение, а также остеогенную

дифференцировку hMSCs BM *in vitro*, стимулируя экспрессию генов ALP, SP7 и RUNX2 и выработку ALP. Согласно данным с микроКТ, закрытие костного дефекта происходило к 12 неделе эксперимента. Комплекс изученных физико-химических и биологических свойств разработанных КМФЦ характеризует их как биоактивные, цитосовместимые и перспективные биоматериалы для реконструкции костных дефектов.

Исследование влияния катионов магния было выполнено при поддержке Российского Научного Фонда, грант № 25-29-00849, цементная матрица на основе кальциймагний фосфатов и ее биологические испытания были проведены в рамках Государственного задания № 056-03-2024-113.

Список используемой литературы:

- [1] Wang Y. et al. //Advanced Functional Materials. – 2022. – Т. 32. – №. 51. – Р. 2208639.
[2] Krokhicheva P. A. et al. // J. Magnes. Alloy. – 2024. – Т. 12. – №. 9. – Р. 3698-3716.

**ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ШУМОВАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ДЛЯ
КОНТРОЛЯ БИОРЕЗОРБИЦИИ МАГНИЕВЫХ ИМПЛАНТОВ *IN
VIVO***

Макринский К.И.^{1*}, Клюев А.Л.¹, Мартыненко Н.С.², Анисимова Н.Ю.³
¹*Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН,*

Москва, Россия

²*Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН,
Москва, Россия*

³*НМИЦ онкологии имени Н.Н. Блохина, Москва, Россия*

**kirmak1999@gmail.com*

Биорезорбируемые магниевые сплавы являются перспективными материалами для остеосинтеза, однако их клиническая применимость ограничена необходимостью контроля скорости биокоррозии *in vivo*. Существующие методы мониторинга инвазивны и позволяют проводить лишь дискретную оценку состояния импланта, не отражая реальной кинетики процесса. Альтернативным подходом является электрохимическая шумовая спектроскопия (ЭШС) — неразрушающий метод, основанный на регистрации спонтанных флуктуаций тока или потенциала. ЭШС позволяет осуществлять непрерывный мониторинг коррозионных процессов без приложения внешнего поляризующего

сигнала. Целью настоящей работы являлась оценка принципиальной возможности применения метода ЭШС для мониторинга биокоррозии магниевого импланта с хитозановым покрытием в режиме реального времени в условиях *in vivo*.

В рамках *in vivo* эксперимента лабораторным животным имплантировали парные электроды из биорезорбируемого магниевого сплава, покрытые биосовместимой хитозановой пленкой. Флуктуации тока, возникающие в результате коррозионных процессов, пассивно регистрировали с использованием прецизионного шунт-резистора. Анализ полученных временных рядов токовых шумов проводили с использованием математического аппарата разложения сигнала в ряды Чебышева для идентификации изменений в динамике сигнала.

В ходе эксперимента были успешно зарегистрированы токовые транзиенты, отражающие динамику процессов на поверхности импланта. Анализ коэффициентов разложения временных рядов позволил выделить две последовательные, статистически различные стадии. Первая стадия была ассоциирована с начальной кинетикой смачивания и гидратации поверхности импланта, в то время как вторая стадия характеризовала процесс деструкции и отслоения хитозанового покрытия, обнажающий поверхность магниевого сплава. Таким образом, полученные результаты демонстрируют, что электрохимическая шумовая спектроскопия является чувствительным инструментом, позволяющим в неразрушающем режиме фиксировать и различать ключевые стадии биодеградации импланта *in vivo*, что открывает перспективы для ее использования в качестве метода непрерывного мониторинга.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации

ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИТНЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ НАПРАВЛЕННОЙ ДОСТАВКИ КЛЕТОК В ДОКЛИНИЧЕСКИХ ЖИВОТНЫХ МОДЕЛЯХ

Турчин В.В.^{1*}, Солопов М.В.¹, Лёгенький Ю.А.², Кавелина А.С.¹,
Акопян Г.В.¹, Беспалова С.В.², Попандопуло А.Г.¹

¹*Институт неотложной и восстановительной хирургии имени В.К. Гусака, Донецк, Россия*

²*Донецкий государственный университет, Донецк, Россия*

*turchin.dn@mail.ru

Введение. Магнитный таргетинг клеток основан на использовании магнитных нано- или микрочастиц для маркировки клеток с последующим управлением их локализацией с помощью внешних магнитных полей. В регенеративной медицине данный подход позволяет преодолевать анатомо-физиологические барьеры (ГЭБ, сложная архитектура органов), повышать концентрацию терапевтических клеток в зоне повреждения и усиливать их репаративные эффекты.

Методы. Систематический обзор проводился в соответствии с рекомендациями PRISMA-2020. Поиск в базах PubMed, Cochrane Library и eLibrary (2019–2024 гг.) выявил 39 экспериментальных работ, в которых использовались магнитные частицы (SPIONs/MPIO) для маркировки клеток млекопитающих, и осуществлялось их нацеливание *in vivo* с помощью магнитных полей.

Результаты. Среди экспериментальных исследований на животных моделях заболеваний за последних 5 лет существенную долю составляют заболевания нервной системы, сердца, глаз, мочевыделительной системы, опорно-двигательного аппарата, онкологических и других заболеваний. Наиболее частым объектом маркировки выступали мезенхимные мультипотентные стромальные клетки, эндотелиальные клетки и их прогениторы, Т-клетки и другие клетки иммунной системы. Было показано, что магнитный таргетинг позволяет повысить локальную концентрацию клеток в 1,16-20 раз. В работе Nie W. [1] на модели привитой лимфомы с помощью магнитного поля удалось в 3 раза повысить опухолевую концентрацию цитотоксических Т-лимфоцитов, что привело к полной супрессии опухоли и 100% выживаемости в течении (35 дней). Магнитное нацеливание ММСК при внутрижелудочковом введении в мышиной модели болезни Альцгеймера позволило удержать в 2,4 раза больше клеток в зоне модельного повреждения мозга, что привело к снижению количества β -амилоида на 7 день после трансплантации на 44% и улучшению когнитивных функций через 2 недели [2]. Применение магнитного нацеливания эндотелиальных прогениторных клеток на крысиной модели почечной ишемии-реперфузии позволило в 2,15 раз увеличить концентрацию клеток в зоне интереса, что через 3 дня привело к снижению уровня сывороточного азота мочевины и креатинина в 2,46 и 2,06 раз соответственно, а также снижению уровня апоптоза почечной паренхимы в 2,65 раз [3].

Выходы. Систематический анализ современных исследований на животных моделях демонстрирует высокий потенциал магнитного таргетинга клеток для лечения нейродегенеративных, сердечно-сосудистых, офтальмологических заболеваний и онкопатологий.

Исследование проведено при финансовой поддержке госзадания № ZUNQ-2025-0002.

Список используемой литературы:

- [1] W. Nie, W. Wei, L. Zuo et al. // ACS Nano. 2019. V. 13. №2. P. 1469-1478.
- [2] M. Jung, H. Kim, J.W. Hwang et al. // Nano Lett. 2023. V. 23. №2. P. 476-490.
- [3] D. Wu, J. Liu, C. Zhou et al. // Bioengineering. 2023. V. 10. №5. P. 509.

СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ

БИОДЕГРАДИРУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ КАК ПЛАТФОРМА ДЛЯ ВНУТРИКОСТНОЙ ДОСТАВКИ МУЛЬТИПОТЕНТНЫХ МЕЗЕНХИМАЛЬНЫХ СТРОМАЛЬНЫХ КЛЕТОК

Власенко Р.Я., Ситдикова С.М., Шинкарева М.В., Анисимова Н.Ю.,
Киселевский М.В.

*ФГБУ «НМИЦ онкологии им. Н.Н. Блохина» Минздрава России, Москва,
Россия*

vlasenko2002@bk.ru

Процедуру аллогенной трансплантации гемопоэтических (стволовых) клеток (алло-ТГСК) используют как этап терапии при различных заболеваниях, в том числе при лечении пациентов с гемобластозами. Перед трансплантацией реципиента повреждают высокодозной химио- или химиолучевой терапии, чтобы удалить клетки собственной кроветворной системы, поэтому у него развивается тяжелая нейтропения, анемия и тромбоцитопения, что сопряжено с высоким риском инфекций и геморрагических осложнений. Также у части пациентов регистрируют нарастание симптомов реакции «трансплантат против хозяина» (РТПХ). Поэтому после ТГСК для профилактики и лечения нарушений гемопоэза на фоне РТПХ необходимо применение препаратов, способствующих восстановлению всех клонов гемопоэтических клеток. В качестве перспективных подходов терапии этой категории пациентов могут рассматриваться биомедицинские клеточные продукты на основе мультипотентных мезенхимальных клеток (ММСК). Внутрикостное введение этих клеток, восполняющие стромальный компонент костного мозга, призвано повысить эффективность и скорость приживления гемопоэтических клеток доноров. Для обеспечения сохранности ММСК и межклеточных связей при инъекции, отказа от деадгезии, а также поддержания высокой концентрации и оптимальной жизнеспособности после введения предложено вводить их в иммобилизованными на биодеградируемом скаффолде и/или в гидрогеле (не разрушая адгезию клеток с поверхности роста и между собой).

В настоящем исследовании оценивали перспективы использования для внутрикостного введения ММСК скаффолов на основе гранул трикальцийфосфата (ТКФ) в полилактидгликолидной матрице (Клипдент –ПЛ, АО «ОЭЗ «ВладМиВа», Россия), а также гель, полученный из плазмы крови человека, обогащенной тромбоцитами (PRP плазму). Концентрированную суспензию CFSE-меченых ММСК человека (коллекция ФГБУ «НМИЦ онкологии им. Н.Н. Блохина» Минздрава

России) наносили на поверхность сухих гранул ТКФ, выдерживали в течение 15 минут, а затем медленно заливали ростовой средой и инкубировали в течение 21 суток при температуре 37 °C в атмосфере 5% углекислого газа. В процессе инкубации оценивали сохранение жизнеспособности клеток, а также их пролиферативный потенциал путем оценки концентрации CFSE (+) и Ki-67(+) клеток. В другой серии экспериментов суспензию ММСК вносили в PLP плазму, а после полимеризации геля глюконатом кальция оценивали жизнеспособность клеток путем оценки активности лактатдегидрогеназы (ЛДГ) после 48 часов инкубации в вышеописанных условиях. В контрольных сериях суспензию ММСК наносили на дно лунок планшетов в том же количестве, которое использовали для нагрузки скаффолдов, и инкубировали в ростовой среде в условиях, аналогичных экспериментальным образцам.

Было показано, что гранулы на основе ТКФ стимулировали адгезию ММСК, поддерживая их жизнеспособность и пролиферативный потенциал: за время инкубации концентрация Ki-67 (+) клеток увеличилась более, чем в 2 раза, а CFSE(+) клеток – в 4,5 раз. Гель на основе PRP плазмы способствовал сохранению жизнеспособности клеток и их пролиферации поскольку не наблюдали снижения ЛДГ активности в сравнении с контролем.

Таким образом, проведенные исследования показали перспективность применения биодеградируемых материалов (гранул на основе ТКФ и геля на основе PRP плазмы) в качестве платформ для локализированной доставки ММСК, сохраняющих их жизнеспособность и поддерживающих клеточную активность. Поскольку использование таких платформ не предполагает предварительную деадгезию клеток, можно ожидать, что за счет сохранения межклеточных связей и белкового слоя мембранны повышается выживаемость клеток после трансплантации, а также ускориться формирование ретикулярной ткани для формирования новых гемопоэтических ниш, способствуя восстановлению гемопоэза пациентов.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ РАЗРАБОТКИ И ИССЛЕДОВАНИЙ ГОТОВЫХ ЛЕКАРСТВЕННЫХ ФОРМ

Краснопевцева О.В., Фирсов А.В.*

ЦК НТИ ФИЦ Биотехнологии РАН, Москва, Россия

ООО «Кологик», Москва, Россия

**Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина, Москва,
Россия*

Ключевые слова: жизненный цикл продукции, сокращение времени разработки, сопровождение исследований, лекарственные средства, автоматизированные процедуры, информационная система.

Авторами предложен информационный подход формирования полного плана разработок, позволяющий выделить и контролировать дополнительные параметры, связанные с обеспечением требуемого уровня качества готовой продукции. Был разработан прототип автоматизированной информационной системы, обеспечивающей:

- хранение и защиту данных по разработкам;
- анализ, обобщение, поиск и представление информации для сокращения времени и стоимости разработок;
- моделирование композиций готовых лекарственных форм с использованием автоматизированных форм на разработку;
- сопровождение процессов исследований и доказательства эффективности за счет автоматизации форм технологической документации.

Спроектированная база данных, включающая реестры основных видов сырья, нормативных требований и методов исследования, обеспечивает функциональную полноту программного обеспечения на заданном интервале времени. Реализована возможность многоаспектного поиска информации через поисковые формы ТЗ на разработку композиций готовых форм.

Надежность представленных данных компонентов и готовых композиций подкреплена результатами испытаний лабораторных прототипов. Разработанное информационное обеспечение представляет собой совокупность единой системы классификации и кодирования информации, унифицированных систем документации, схем информационных потоков. Система предназначена для своевременного формирования и выдачи необходимой информации для планирования и управления разработками и исследованиями.

МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ КЛЕТОЧНОЙ РЕАКТИВНОСТИ НА ИМПЛАНТАЦИЮ ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ ПОЛИЛАКТИДА И ГИДРОКСИАПАТИТА

Лебединская О.В.^{1*}, Качалина П.М.², Ковалева П.А.², Черемных А.И.²,
Львов В.А.², Бабаева Г.³, Пашинцева Н.В.⁴, Киселевский М.В.^{2,5},
Анисимова Н.Ю.^{2,3,5}

*¹Пермский государственный медицинский университет им. академика
Е.А. Вагнера Минздрава России, Пермь, Россия*

²НИТУ МИСИС, Москва, Россия

³РУДН имени Патрика Лумумбы, Москва, Россия

⁴Ветеринарная клиника «Биоконтроль», Москва, Россия

⁵ФГБУ «НМИЦ онкологии им. Н.Н. Блохина» Минздрава России, Москва, Россия

Полилактид (ПЛА) рассматривается как перспективный материал для применения в медицине. Для его упрочнения было предложено введение добавок в виде гидроксиапатита (ГАП), диоксида кремния и других. Ранее в экспериментах *ex vivo* нами была показана перспективность применения ПЛА, содержащего 15% ГАП (ПЛА/ГАП), в качестве основы имплантатов с эффектом памяти формы для ортопедии или артродеза [1,2].

Целью данной работы являлся анализ результатов подкожной имплантации лабораторным мышам экспериментальных образцов хирургических скоб для фиксации краев раны при ушивании тканей на основе ПЛА/ГАП.

Материалы и методы. Были изготовлены экспериментальные образцы хирургических скоб на основе ГАП, содержащего 15% ГАП, полученных методом экструзии с последующим формированием на 3D принтере. Образцы взвешивали, обрабатывали погружением в 60% этанол, а затем имплантировали подкожно мышам линии Balb/c. Через 7 недель животных подвергали эвтаназии, извлекали образцы скоб для оценки потери массы и готовили гистологические образцы тканей в области контакта с имплантатами. Для подготовки гистологических препаратов ткани фиксировали формалином и окрашивали гематоксилином-эозином по стандартной методике. Изучение морфологии образцов производили с использованием световой микроскопии.

Результаты. Согласно полученным результатам за время нахождения в теле животного не произошло достоверного изменения массы образцов хирургических скоб. Следовательно скорость биодеградации образцов *in vivo* достаточно низкая и для ее изучения требуется проведение более длительных экспериментов. Визуальный осмотр не выявил признаков отека тканей или признаков развития абсцесса в области имплантации. Наблюдали слабую васкуляризацию площади имплантата, но его соединительная ткань плотно прилегала к его поверхности, прочно фиксируя его в тканях области имплантации. Проведенный морфологический анализ показал, что после имплантации каркасов в ткани тела мышей не было выявлено признаков некроза, разрушения материала имплантата или признаков отстрой воспалительной реакции.

Заключение. Проведённые в условиях *in vivo* исследования доказали, что имплантация экспериментальных образцов медицинских

изделий на основе ПЛА/ГАП не индуцировала развитие острого воспаления или реакции отторжения, что служит признаком биосовместимости материала. Этот факт в сочетании с медленной скоростью биодеградации, а также эффектом памяти формы материала позволяет рассматривать полученные экспериментальные образцы как перспективные для применения в ортопедии с целью фиксации сухожилий или капсулы сустава, что, зачастую характеризуется трудным оперативным доступом, и требует длительного восстановительного периода.

Исследование было выполнено при поддержке гранта РНФ № 24–23–00442.

Список используемой литературы:

[1] Качалина П.М., Ковалева П.А., Черемных А.И., Львов В.А., Анисимова Н.Ю. // Российский биотерапевтический журнал. 2025. Т. 24. № 1. С. 78–86.

[2] Анисимова Н.Ю., Корнющенков Е.А., Гаранин Д.В., Голуб Л.В., Попандопуло А.Г., Турчин В.В., Качалина П.М., Ковалева П.А., Черемных А.И., Львов В.А., Киселевский М.В. // Российский ветеринарный журнал. 2025. № 1. С. 6–13.

**ГАНТЕЛЕВИДНЫЕ НАНОЧАСТИЦЫ Fe_3O_4 -Au ДЛЯ
КОМБИНИРОВАННОЙ ПРОТИВООПУХОЛЕВОЙ
ХИМИОТЕРАПИИ**

Чмелюк Н.С.^{1,2*}, Абакумов М.А.^{1,2}

¹*ФГАОУ ВО РНИМУ им. Н.И. Пирогова Минздрава России (Пироговский Университет), Москва, Россия*

²*Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия*

**nellichmelyuk@yandex.ru*

Терапия онкологических заболеваний на сегодняшний день остается важной проблемой, только по данным Росстата за 2022 год, число умерших от злокачественных новообразований составило 14,8 % от общего числа всех умерших за этот год, что на 3,2 % больше по сравнению с 2021 годом. Число выявленных впервые случаев злокачественных новообразований также выросло: в 2021 году число случаев составило 580,4 тыс., в 2022 году – 624,8 тыс. Одним из важнейших методов терапии онкологических заболеваний был и остается. Метод химиотерапии, однако, для многих типов онкологических заболеваний использование лишь одного

химиотерапевтического препарата является недостаточным, как правило, из-за низкого уровня ответа на лечение и высокого риска рецидива опухоли. Использование комбинаций противоопухолевых препаратов является более предпочтительным из-за воздействия сразу на несколько «мишеней» в опухолевых клетках, благодаря чему эффективность данного типа терапии выше. Также два препарата в определённых соотношениях могут проявлять синергический эффект, то есть, их совместное действие будет более эффективным по сравнению с действием от препаратов по-отдельности. Однако, каждый препарат обладает собственной фармакокинетикой, что затрудняет одновременную доставку свободных лекарственных веществ в опухоли.

Для решения данной проблемы в работе предлагается использовать гантелевидные наночастицы Fe_3O_4 -Аи, которые благодаря наличию двух принципиально химически различных поверхностей могут быть селективно модифицированы с дальнейшей возможностью контролируемо загружать комбинации препаратов. Кроме того, возможно снижение общего токсического эффекта вследствие использования наночастиц как платформы доставки, а также от синергического эффекта от комбинации противоопухолевых веществ. Одновременно с этим, наличие магнитных свойств Fe_3O_4 позволит отслеживать биораспределение частиц при помощи МРТ. Цель исследования заключалась в разработке системы доставки комбинаций двух противоопухолевых препаратов, проявляющих синергический эффект, на основе димерных наночастиц Fe_3O_4 -Аи для противоопухолевой терапии. В результате работы были подобраны наиболее оптимальные комбинации противоопухолевых соединений, синтезированы гантелевидные частицы различного размера, исследованы их фазовый состав и магнитные свойства; разработаны подходы к функционализации поверхностей НЧ Fe_3O_4 -Аи; загружены комбинации противоопухолевых веществ; исследована их биологическая активность как в *in vitro*, так и в *in vivo* условиях.

**РАЗРАБОТКА И ХАРАКТЕРИСТИКА МАЛЕИМИД-
МОДИФИЦИРОВАННЫХ ХЛОРИНОВЫХ ПРОИЗВОДНЫХ ДЛЯ
СОЗДАНИЯ СТАБИЛЬНЫХ БИОКОНЬЮГАТОВ С
АЛЬБУМИНОМ**

Пухова А.С.^{1*}, Говоров Н.Д.¹, Бугаева Е.С.¹, Кирин Н.С.¹,
Островерхов П.В.¹, Безбородова О.А.^{1,2}, Погорилый В.А.¹, Грин М.А.¹

¹*ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет»,
Москва, Россия*

²Московский Научно-Исследовательский онкологический институт им.
П.А. Герцена – филиал ФГБУ НМИЦ радиологии Минздрава России,
Москва, Россия
** pukhova-1996@bk.ru*

Существуют различные способы мечения белков, среди которых особый интерес представляют стратегии, в которых используются малеимид-функционализированные линкеры. Благодаря их высокой селективности в реакции с цистеиновыми сульфгидрильными группами достигается высокая стабильность конъюгатов в системном кровотоке, которая необходима для их использования в качестве препаратов. Возможность варьирования условий реакции (рН, ионная сила) позволяет управлять степенью конъюгации, что способствует направленному дизайну биоконъюгатов для эффективной доставки лекарственных средств в опухолевое микроокружение [1].

Нашей научной группой был осуществлён дизайн и синтез ряда производных природных хлоринов, функционализированных малеимидным фрагментом, с целью получения конъюгатов с белками-переносчиками, в частности с человеческим сывороточным альбумином (ЧСА). ЧСА, как известно, часто используется в качестве системы доставки, которая способно увеличить время циркулирования препарата в системном кровотоке. В результате синтезированы два различных производных природных хлоринов, отличающихся структурой спейсерного фрагмента, соединяющего хлориновый макроцикл и малеимидную группу, что позволяет исследовать влияние структурных особенностей на реакционную активность и стабильность конъюгатов (Схема 1). В процессе синтеза также был разработан протокол их получения и очистки, обеспечивающий высокую чистоту и воспроизводимость. Первичная оценка биологической активности полученных конъюгатов включала исследования *in vitro*, направленные на определение их цитотоксических свойств под действием светового излучения и способности к селективному накоплению в опухолевых клетках. Эти модельные соединения послужат основой для дальнейших исследований реакций конъюгации гидрофобных молекул с белковыми структурами и позволят оптимизировать параметры синтеза для разработки эффективных систем доставки и терапии.

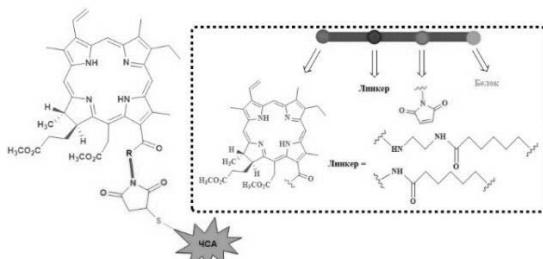


Схема 1 – Модифицированные конъюгаты природных хлоринов

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания номер FSFZ-2025-0020.

Список используемой литературы:

[1] Renault K. et al. Covalent modification of biomolecules through maleimide-based labeling strategies //Bioconjugate Chemistry. – 2018. – Т. 29. – №. 8. – С. 2497-2513.

**ИССЛЕДОВНИЕ БИОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СПЛАВА
СИСТЕМЫ Ti-Al-Nb С ДОБАВЛЕНИЕМ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ (Ce, Y, La)**

Анохин А.С.^{*}, Кирсанкин А.А., Чувикина М.С., Лукьянов А.С.,

Ермакова Е.А.

*Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН,
Москва, Россия*

**aleksandr.lukyanov.ru*

В последнее время в медицине наблюдается быстрое распространение использования сплавов и интерметаллидов на основе Ti. Данные материалы считаются перспективными так как обладают хорошими механическими свойствами: низкий удельный вес, высокий уровень биосовместимости, коррозионная стойкость [1-5]. В настоящее время металлические биоматериалы используются для создания искусственных тазобедренных суставов, зубных имплантатов, костных пластин и винтов в качестве конструкционных материалов. За последнее время было создано большое количество титановых сплавов, содержащих биосовместимые элементы, такие как Ti, Zr, Nb, Mo и Ta. Эти сплавы демонстрируют выдающиеся механические характеристики, включая низкий модуль Юнга [6].

Для проведения исследований были выбраны слитки титанового сплава Ti-Al-Nb с добавлением редкоземельных элементов (Ce, Y, La), полученные методом электродугового плавления.

Для оценки безопасности тестируемых материалов были выполнены экспериментальные исследования с подкожной имплантацией тестируемых образцов.

Прижизненными методами исследования, у животных регистрировали: массу тела (гр), общую температуру тела (°C) и локальную температуру тела (°C) в области имплантации в периоды: непосредственно перед началом эксперимента, через 3, 7, 14, 21 и 28 суток после операции. В качестве нормы принимали значения, полученные перед выполнением оперативного вмешательства.

В эти же сроки у животных отмечали внешний вид, поведенческие реакции, интенсивность и характер двигательной активности, состояние волосяного и кожного покрова, цвет слизистых оболочек. Выполняли визуальную оценку мягких тканей в области имплантации.

В экспериментах *in vivo*, при оценке безопасность новых тестируемых материалов прижизненными методами исследования во всех группах не было выявлено нарушений процессов терморегуляции и энергетического обмена в организме экспериментальных животных. Об этом свидетельствовало отсутствие резких значимых колебаний общей и локальной температуры тела, а также веса животных на разных сроках эксперимента. Также не изменялась интенсивность приема корма и воды. Сохранились двигательные и поведенческие реакции. Не было зарегистрировано случаев гибели животных.

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ № 24-03-02066.

Список используемой литературы:

- [1] Niinomi, M.; Nakai, M.; Hieda, J. Development of New Metallic Alloys for Biomedical Applications. *Acta Biomater* 2012, 8, 3888–3903.
- [2] Lapin, J.; Gabalcová, Z.; Bajana, O.; Daloz, D. Effect of Heat Treatments on the Microstructure and Mechanical Properties of a Cast Intermetallic Ti-44Al-4Nb-4Zr-0.2Si-0.3B Alloy; 2006; Vol. 44.
- [3] Lapin J. Comparative study of creep of cast Ti-46Al-2W-0.5Si and Ti-45Al-2W-0.6Si-0.7B alloys. 2006. Vol. 44. 57–64 p.;
- [4] Lapin, J. Comparative Study of Creep of Cast Ti-46Al-2W-0.5Si and Ti-45Al-2W-0.6Si-0.7B Alloys; 2006; Vol. 44.
- [5] Titanium and Titanium Alloys.

[6] Kudrman J., Fousek J., Březina V., Míková R., Veselý J. Titanium Alloys for Implants in Medicine, 2007, v. 45, 199-208 p.

СЕКЦИЯ 6

Умные материалы

УСТНЫЕ ДОКЛАДЫ

Приглашенный доклад

ПОЛИМЕРНЫЕ СТРУКТУРЫ ГИЛАУРОНОВЫЙ КИСЛОТЫ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ КОНТРОЛЬ ВРЕМЕНИ ВЫХОДА БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ

**Суховей Ю.Г.^{1*}, Коптюг А.В.², Костоломова Е.Г.¹, Уклейкин В.Е.¹,
Суховей Н.Ю.¹**

¹Тюменский НЦ СО РАН, Тюмень, Россия

²Университет Центральной Швеции, Эстерсунд, Швеция

**i-yura@mail.ru*

Природные биохимические процессы неразрывно связаны с биополимерными структурами. Одним из таких биополимеров является гиалуроновая кислота и её соли. Они непосредственно вовлечены в управление кондициями межклеточного матрикса и сопряжённые с этим межклеточные взаимодействия. Процесс синтеза и биодеградации гиалуроновой кислоты непосредственно встроен как регулятор процессов гидратации (водонасыщения) и, как следствие, в вольюмизацию межклеточного матрикса. Баланс синтеза - деградации гиалуроновой кислоты характерен практически для всех типов клеток человеческого организма. Это подтверждается наличием у клеток рецептора клеточной адгезии CD44, являющегося в первую очередь рецептором наличия и концентрации гиалуроновой кислоты в межклеточном матриксе.

Свойство предвнесенной гиалуроновой кислоты легко встраиваться в природные механизмы активно используется, например в косметологии и офтальмологии. Гиалуроновые кислоты будучи биополимерами с различной длиной цепи сохраняют возможность образовывать водонасыщенные гели разной вязкости. Они являются хорошим носителем для многих активных веществ, в том числе медицинского назначения. Вязкие варианты являются отличными стабилизаторами для многих веществ, которые быстро теряют активность в водных растворах. Полимерные структуры гиалуроновой кислоты с различными биологически активными веществами обеспечивают распределённую по времени биодоступность за счёт постепенной биодеградации. Этот функционал очень полезен, например, для наиболее эффективной регенерации тканей, и оптимизации приживления имплантатов.

В течение многих лет мы проводим поиск природных соединений с заживляющей и омолаживающей активностью. Нами разработан способ экспресс-тестирования веществ и определения соответствующей их

активности с использованием клеточных культур [1]. Это дало возможность выявить класс веществ, являющихся природными «балансировщиками» процессов пролиферации и апоптоза [1-3], которые лежат в основе как процессов регенерации, так и дающие возможность омоложения ткани за счёт увеличения доли молодых клеток при стабильном их общем количестве (клеточный гомеостаз). Соответствующие вещества, в том числе в сочетании с гилауроновой кислотой (носитель и стабилизатор) отлично зарекомендовали себя, например, в заживляющих гелях, препаратах для косметологии, стоматологии и в покрытиях для имплантатов.

Таким образом, в настоящее время появилась уникальная возможность дозировать управляемый по времени выход стабилизированных биологически активных веществ через ресорбцию «нагруженных» полимеров гилауроновой кислоты.

Список используемой литературы:

- [1] A. Koptyug, Y. Sukhovei et al. //Int. J. Mol Sci. 2023. V.24 (9), #8020.
- [2] A. Koptyug, Y. Sukhovei et al. // Biomed J Sci Tech Res. 2023. V. 51, 42768-42772.
- [3] A. Koptyug, Y. Sukhovei et al. // OBM Geriatrics. 2023. V. 7(4), #263.

Приглашенный доклад

БИОРАЗЛАГАЕМЫЕ НАНОКОНТЕЙНЕРЫ ДЛЯ ДОСТАВКИ ЛЕКАРСТВ К ОПУХОЛЯМ

Жарков М.Н.¹, Пирчхадзе С.З.², Зелепукин И.В.³, Шилягина Н.Ю.⁴,
Пятаев Н.А.¹, Колпаков Ф.А.², Zvyagin A.V.^{2,3*}

¹*Федеральный центр развития биотехнологий и медицины, Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск, РФ*

²*Научно-технологический университет «Сириус», ФТ Сириус,
Краснодарский край, РФ*

³*Институт биоорганической химии им. М.М. Шемякина и А.В. Овчинникова РАН, Москва, РФ*

⁴*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород, РФ*

Одной из главных причин клинических неудач при разработке противоопухолевых препаратов является их выраженная системная токсичность; отсев новых лекарств на стадии клинических испытаний по этой причине достигает 92% [1]. Инкапсуляция противоопухолевых

лекарственных соединений в наноконтейнеры позволяет снизить побочные эффекты при системном введении, однако микроокружение опухоли затрудняет проникновение наночастиц вглубь опухолевой ткани, что снижает эффективность терапии солидных опухолей и метастатических узлов. В этой работе представлена новая концепция доставки лекарств, основанная на пассивном накоплении коллоидных носителей в сосудистой системе опухоли с последующим быстрым высвобождением низкомолекулярного лекарственного карго, что, как выяснилось, обеспечивает глубокое проникновение в интерстиций опухоли и, собственно, раковые клетки (Рис. 1). Этот подход к доставке лекарств был обоснован теоретически и продемонстрирован экспериментально на моделях первичных солидных опухолей [2] и метастазов [3]. Реализация предложенной концепции потребовала разработки линейки коллоидных частиц с варьируемой скоростью биодеградации в биологических жидкостях.

Были изучены металл-органические каркасы на основе трёхвалентного железа (MIL-101 [Fe]) со скоростью биодеградации 15 мин, субмикронные частицы ватерита (ВЧ) со средним диаметром ~500 нм и скорость биодеградации 3 ч, а также более устойчивые наночастицы кремния со скоростью деградации 24 ч в сыворотке [4]. Предварительное введение наночастиц кремния в кровоток позволило получить 13-кратное увеличение доставки магнитных частиц к ксенотрансплантированным мышьям опухолям B16-F1 *in vivo*.

Для ВЧ, нагруженных фотосенсибилизатором порфиразином, была характерна более медленная деградация, однако введение препарата в этих частицах обеспечивало почти вдвое большее его накопление в первичных солидных опухолях *in vivo*, что позволило заметно повысить эффективность фотодинамической терапии [2]. Быстро распадающиеся наночастицы MIL-101 (Fe) с доксорубицином (Dox), внутривенно введённые мышам с трансплантированной меланомой B16-F1, захватывались сосудистой сетью лёгких с метастазами и быстро высвобождали лекарственное соединение в процессе распада. Это привело к значимому увеличению концентрации препарата в целевом органе и улучшению результатов лечения, выраженному в 11-кратном уменьшении количества метастатических узлов и уменьшении их медианного размера в 2,4 раза.

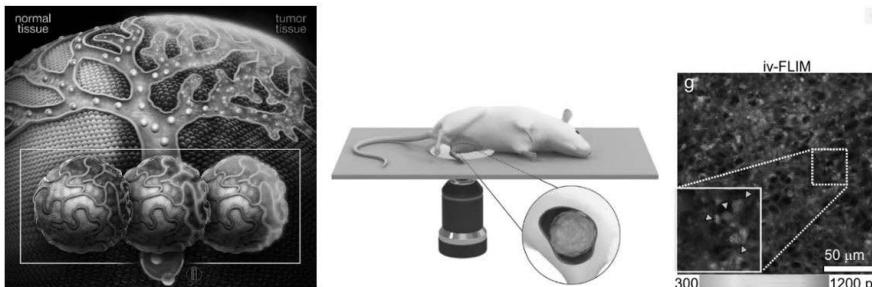


Рисунок. Левая панель: Графическая иллюстрация концепции доставки лекарств: контейнеры с лекарством (синие сферы) секвестрируются в сосудистой системе опухоли (фиолетовый фон), быстро деградируют и высвобождают лекарства (синие) в паренхиму опухоли. Центральная панель: графическая иллюстрация данных прижизненной многофотонной микроскопии (iv MPM) и микроскопии с визуализацией времени жизни флуоресценции (iv-FLIM). Правая панель: изображения опухолевой ткани, полученные с помощью iv-FLIM через 3 часа после внутривенной инъекции фотосенсибилизатора, инкапсулированного в биоразлагаемый субмикронный контейнер. Фотосенсибилизатор, накопленный в опухоли, первоначально оставался в контейнерах (синие) и постепенно высвобождался, проникая глубоко в опухолевую ткань (оранжево-жёлто-зелёный). Цветная полоса: время жизни флуоресценции

Экспериментально доказанное преимущество создания высокой концентрации химиотерапевтического препарата в течение короткого промежутка времени было подтверждено с использованием численной модели гибели раковых клеток *in vitro*. Оказалось, что инкубация клеток B16-1F в растворе Dox с концентрацией 5 мкг/мл в течение короткого промежутка времени 20 мин вызывает гибель 70% популяции клеток. Эти результаты коррелировали с данными фармакокинетических исследований *in vivo*, которые показали, что в целевом органе тестовых животных (лёгких), в случае внутривенного введения Dox, инкапсулированного в металлоганические каркасы MIL-88 (Fe) создаются сравнимые значения концентрации-времени. Экспозиция цитостатика в лёгких значимо превышала значения, получаемые введением свободного Dox. Примечательно, что в сердечной ткани наблюдалось обратная картина: концентрация Dox при введении в MIL-88 (Fe) была значительно ниже, чем при его введении в виде раствора. Иными словами, инкапсуляция Dox существенно снижает побочные кардиотоксичные эффекты, и кратно увеличивает терапевтическую

эффективность за счёт создания высокой концентрации в целевом органе в течение короткого промежутка времени.

Полученные результаты свидетельствуют о фармакокинетических преимуществах химиотерапевтических препаратов, инкапсулированных в быстroredеградируемые частицы, и открывают перспективы для разработки более эффективных средств химиотерапии рака

Acknowledgement: Работа поддержана грантом № 22-03 от 27.09.2024 Научно-технологического университета «Сириус».

Список литературы

- [1] R.C. Mohs, N.H. Greig, Drug discovery and development: Role of basic biological research, *Alzheimers Dement (N Y)* 3(4) (2017) 651–657.
- [2] B.V. Parakhonskiy, N.Y. Shilyagina, O.I. Gusliakova, A.B. Volovetskiy, A.B. Kostyuk, I.V. Balalaeva, L.G. Klapshina, S.A. Lermontova, V. Tolmachev, A. Orlova, D.A. Gorin, G.B. Sukhorukov, A.V. Zvyagin, A method of drug delivery to tumors based on rapidly biodegradable drug-loaded containers, *Applied Materials Today* 25 (2021) 101199.
- [3] I.V. Zelepukin, O.Y. Griaznova, K.G. Shevchenko, A.V. Ivanov, E.V. Baidyuk, N.B. Serejnikova, A.B. Volovetskiy, S.M. Deyev, A.V. Zvyagin, Flash drug release from nanoparticles accumulated in the targeted blood vessels facilitates the tumour treatment, *Nature Communications* 13(1) (2022) 6910.
- [4] I.V. Zelepukin, E.A. Mashkovich, N.A. Lipey, A.A. Popov, V.O. Shipunova, O. Yu. Griaznova, M.S. Deryabin, V.V. Kurin, P.I. Nikitin, A.V. Kabashin, M.I. Bakunov, S.M. Deyev, A.V. Zvyagin, Direct photoacoustic measurement of silicon nanoparticle degradation promoted by a polymer coating, *Chemical Engineering Journal* 430 (2022) 132860.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛИАРИЛЕНОВ В СЕНСОРИКЕ, МИКРОФЛЮИДИКЕ И НЕЙРОТЕХНОЛОГИЯХ

Галиев А.Ф.^{1,2*}, Буланкин Н.С.^{1,2}, Ишмухаметов М.С.², Карамов Д.Д.^{1,2}

¹*Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы, Уфа, Россия*

²*Институт физики молекул и кристаллов, Уфа, Россия*

*azat-red@ya.ru

Полиарилены являются материалами, обладающими термопластичностью, механической и химической стойкостью, оптической прозрачностью, электроактивностью, хорошими пленкообразующими свойствами [1]. Совокупность этих свойств

позволяет создавать на основе растворов и расплавов полиариленов тонкопленочные структуры для электроники [2], с толщиной слоев от 3 нм и выше, используя печатные и аддитивные технологии, в том числе в составе полимер-углеродных композитов. Такие структуры могут найти применение в биомедицинских устройствах, а определение перспектив и возможных областей применения было предметом данного исследования.

В работе проведено сравнительное исследование биосовместимости со-полиариленэфиркетонов с традиционными биомедицинскими материалами: полидиметилсилоксаном и поликарбонатом. Обнаружена устойчивость объектов исследования к различным методам стерилизации, хорошая приживаемость и адгезия клеток крысины роговицы без использования дополнительных растворов и покрытий. Получено, что оптическая прозрачность и возможность изготовления пленок контролируемой толщины, делает возможным применение тонких пленок для разработки устройств микрофлюидики.

Обсуждается возможность применения структур на основе полиариленов для разработки гибких сенсоров деформации металла, где в качестве металла использовался медицинский титано-никелевый сплав (нитинол), а также тактильных датчиков (прикосновения) и летучих органических соединений (газов). На рис. 1. показаны варианты изготовления мультисенсорной структуры металл/полимер/металл, чувствительной к деформации титано-никелевого сплава.

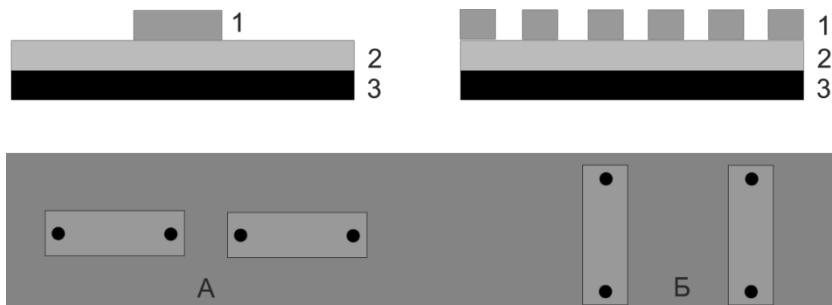


Рисунок 1 – Структура моно- и мультисенсора деформации вверху и способы крепления на тестируемом объекте, внизу, где 1 – измерительные электроды, 2 – полимерная пленка, 3 – титано-никелевый сплав; А – вертикальное, Б – горизонтальное размещение сенсоров

Также в работе показана возможность изготовления композитных, электропроводящих пленок субмикронной толщины, перспективных для применения в качестве электродов, гибких проводов, нагревательных элементов и экранирующих покрытий для нейроинтерфейсов.

Список используемой литературы:

- [1] D.D. Karamov, A.F. Galiev, A.A. Lachinov, et al. // Polymers, 2023. V. 15(16). #3366.
- [2] A.F. Galiev, D.D. Karamov, et al. // J. Mat. Sci.: Mater. Electron. 2024. V. 35. #976.

**ПЬЕЗОАКТИВНЫЕ И МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ
МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ТКАНЕВОЙ ИНЖЕНЕРИИ И ТЕРАНОСТИКИ**

Сурменев Р.А.*, Сурменева М.А., Чернозем Р.В., Шлапакова Л.Е.,
Фетисова А.А., Мухортова Ю.Р.

*Национальный исследовательский Томский политехнический
университет, Томск, Россия*

*rsurmenev@mail.ru; surmenev@tpu.ru

В настоящее время разрабатываются различные типы перспективных биоматериалов для изготовления на их основе имплантатов следующего поколения. Такие имплантаты должны быть биосовместимыми и обеспечивать экзогенные электрические потенциалы, стимулирующие регенерацию определенного типа ткани (кость, нервы, мышцы и т.д.), и при этом соответствующие их биологическим эндогенным аналогам.

Во всем мире проводятся масштабные междисциплинарные исследования возможностей использования различных типов электро- и магнитоактивных наноматериалов для лечения различных злободневных заболеваний, таких как онкология, нейродегенеративные заболевания, которые в ряде случаев не поддаются лечению традиционными методами.

Также довольно интенсивно исследуется влияние различных внешних физических стимулов (магнитные поля, ультразвук) на механизмы регенерации тканей и адресную доставку, и высвобождение лекарств, биомолекул и т.д. К настоящему времени достигнут определенный прогресс в понимании способов получения и управлении свойствами пьезоактивных и магнитоэлектрических материалов, однако большинство таких материалов все еще не доступны для клинического использования.

Доклад будет посвящен обзору различных типов биосовместимых пьезоэлектрических и магнитоэлектрических материалов в форме наночастиц и скэфволдов для адресной доставки лекарств, стимуляции клеточной активности (пролиферации, дифференцировки и т.д.), а также для регенерации тканей [1-4]. Такие материалы активно применяются для

тканевой инженерии при восстановлении костной ткани, периферических нервов, мышц и т.д. Их ключевыми преимуществами является возможность неинвазивной электростимуляции и/или адресная доставка/высвобождение лекарств при воздействии внешнего физического стимула (например, ультразвука, магнитных полей в режимах, безопасных для тканей) [5, 6].

Исследование проведено при финансовой поддержке грантов РНФ № 25-13-20055 (<https://rscf.ru/project/25-13-20055/>), № 25-13-20058 (<https://rscf.ru/project/25-13-20058/>) и гранта в форме субсидии, выделяемого Департаментом по научно-технологическому развитию и инновационной деятельности Томской области (Соглашение №02/7/2025), а также Томского политехнического университета (программа стратегического академического лидерства “Приоритет-2030”).

Список используемой литературы:

- [1] Bin Firoz, A., V. Rybakov, A.A. Fetisova, L.E. Shlapakova, I.O. Pariy, A.S. Lozhkomoev, Y.R. Mukhortova, A.L. Kholkin, M.A. Surmeneva, R.A. Surmenev // Adv. Comp. Hybr. Mater. 2025. V.8. # 95.
- [2] Chernozem, R.V., A.O. Urakova, P.V. Chernozem, D.A. Koptsev, Y.R. Mukhortova, I.Yu. Grubova, D.V. Wagner, E.Yu. Gerasimov, M.A. Surmeneva, A.L. Kholkin, R.A. Surmenev // Small 2023. # 2302808.
- [3] Kopyl, S., R. Surmenev, M. Surmeneva, Y. Fetisov, A. Kholkin //Mater. Today Bio 2021. V.12. # 100149.
- [4] Shlapakova, L.E., M.A. Surmeneva, A.L. Kholkin, R.A. Surmenev //Mater. Today Bio 2024. V.25. # 100950.
- [5] Chernozem, P.V., A.V. Romashchenko, O.I. Solovieva, A.Zh. Ibraeva, G. Nosov, D.A. Koptsev, S.A. Lisitsyn, M.A. Surmeneva, D.V. Wagner, E.Yu. Gerasimov, S.O. Kazantsev, A.S. Lozhkomoev, G.B. Sukhorukov, R.A. Surmenev, R.V. Chernozem // ACS Appl. Mater. Interfaces 2025. V. 17. # 21614–21629.
- [6] Sharapova, M.B., D.S. Zuev, E.K. Silvanovich, A.Zh. Ibraeva, K.N. Morozova, E.V. Kiseleva, P.V. Chernozem, A.O. Urakova, D.V. Wagner, E.Yu. Gerasimov, O.B. Shevelev, B.G. Sukhov, M.A. Surmeneva, R.A. Surmenev, E.L. Zavjalov, R.V. Chernozem, A.V. Romashchenko. ACS Appl. Nano Mater. 2025. V. 8. I. 14. # 6930–6942.

ИНТЕЛЕКТУАЛЬНЫЕ МЕДИЦИНСКИЕ УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ НИТИНОЛА: ОТ ТОПОЛОГИЧЕСКОГО ДИЗАЙНА ДО УПРАВЛЯЕМОЙ ДОСТАВКИ ЛЕКАРСТВ

Чернышихин С.В., Шишковский И.В.*

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Самара, Россия;

shiv@fian.smr.ru

Разработка «умных» биосовместимых систем доставки лекарств требует интеграции аддитивных технологий, материаловедения и компьютерного моделирования. В работе рассмотрено применение никелида титана (NiTi), обладающего эффектом памяти формы (ЭПФ), для создания пористой системы дозированной доставки лекарств (СДЛ). Предложена гироидная структура, изготовленная методом селективного лазерного плавления (LPBF), которая обеспечивает оптимальное сочетание прочности, биосовместимости и массообменных характеристик.

На основе данных о фазовых переходах и ЭПФ нитинола выполнено конечно-элементное моделирование термомеханического поведения гироидной структуры в программном комплексе ABAQUS. Моделирование позволило оценить усилия, возникающие при активации ЭПФ материала за счёт изменения температуры, а также изменение размеров пор под действием деформации структуры. Ожидается, что такие деформации могут быть использованы для управляемого выдавливания лекарственного раствора из внутренних полостей имплантата.

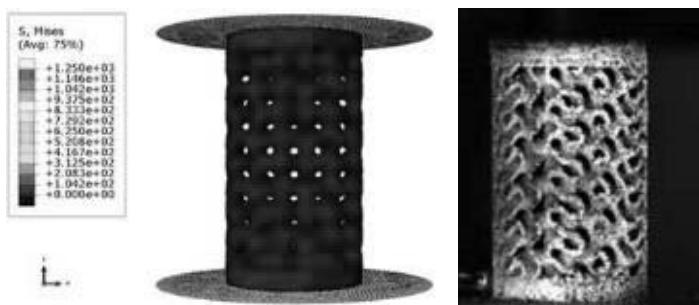


Рисунок 1 – Моделирование и экспериментальные испытания на сжатие гироидных конструкций

Представленный подход основан на ранее разработанных методах проектирования пористых структур [1] и моделировании гистерезиса фазовых переходов [2], а также экспериментальных исследованиях проницаемости и биосовместимости NiTi [3]. Результаты открывают возможность создания персонализированных медицинских устройств

нового поколения, способных к саморегуляции в зависимости от состояния организма.

Список литературы:

- [1] Shishkovsky I.V. // MRS Proceedings, 2012, V. 1415 mrsf11-1415-ii03-10. 10.1557/opr.2012.3
- [2] Shishkovsky I.V. // Physics Procedia, V.39, 2012, 893 - 902. 10.1016/j.phpro.2012.10.114
- [3] Chernyshikhin S.V. et al. // International Journal of Bioprinting, 2023, V.10 (1), 0119. Doi:10.36922/ijb.0119.

**ИЗГОТОВЛЕНИЕ МИКРОГЕЛЕЙ АЛЬГИНАТА ЖЕЛЕЗА
СЛОЖНОЙ ФОРМЫ ДЛЯ ИНКАПСУЛЯЦИИ КЛЕТОК И
ХИМИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ**

Соколов А.С.^{1*}, Порошин С.Г.^{1,2}, Абдурашитов А.С.^{1,2}, Прошин П.И.^{1,2},
Сухоруков Г.Б.^{1,2}

¹*Сколковский Институт Науки и Технологий, Россия*

²*Общество с ограниченной ответственностью «ЛИФТ Центр»*

Alexey.Sokolov@skoltech.ru

Альгинаты — это природные линейные анионные полисахариды, которые легко образуют спицкие гидрогели при взаимодействии их карбоксильных групп с катионами поливалентных металлов. Благодаря своей доступности и биосовместимости эти гидрогели нашли широкое применение в качестве пищевых продуктов, промышленных сорбентов, систем высвобождения лекарственных средств, материалов тканевой инженерии и т.д.

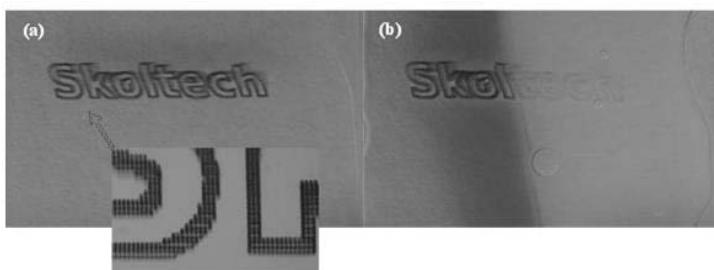


Рисунок 1 — Фото-индущированное образование (а) и растворение (б)
сложного паттерна из микрогелей альгината железа

Ион Ca^{2+} обычно используется физической для кросс-сшивки молекул альгината, однако для некоторых задач ионы железа эффективнее по некоторым причинам. Во-первых, ионы железа Fe^{3+} и Fe^{2+} по-разному сшивают молекулы альгината: при одинаковой концентрации ионы Fe^{3+} образуют альгинатный гель, а ионы Fe^{2+} - нет [1]. Таким образом, изменяя заряд иона железа, можно изменять агрегатное состояние гидрогеля. Под действием света синей части спектра ($\lambda = 450$ нм) в присутствии фотоактивного комплекса железа происходит выделение ионов Fe^{3+} и образование гидрогеля [2]. Под действием света фиолетовой части спектра ($\lambda = 405$ нм) железо Fe^{3+} восстанавливается в Fe^{2+} , вызывая растворение гидрогеля [3]. С использованием источника лазерного излучения ($\lambda = 450$ нм) могут быть получены фотоотверженные частицы микрогелей, из которых может быть сформирован паттерн сложной формы. Затем, обработкой светом около-ультрафиолетового диапазона ($\lambda = 405$ нм) микрогели могут быть растворены. (Рисунок 1). Эта фотохимическая система потенциально может применяться для инкапсуляции лекарственных препаратов и живых клеток с возможностью их высвобождения после кратковременной световой обработки.

Список используемой литературы:

- [1] Materials Advances 2022, 3(4), 1849-1873.
- [2] Chemical Communications, 2023, 59(70), 10532-10535.
- [3] Processes, 2013, 1, 153–166.

**ИССЛЕДОВАНИЕ рН-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ МИКРОСФЕР
ХИТОЗАНА ДЛЯ АДРЕСНОЙ ДОСТАВКИ
НИЗКОМОЛЕКУЛЯРНЫХ ВЕЩЕСТВ**

Черникова Э.Е.*[,] Чжицинь Ванг

Томский государственный университет, Томск, Россия

*9evg.elina9@gmail.com

Хитозан – биосовместимый и биоразлагаемый полимер, используемый в фармацевтике для создания систем доставки лекарств с контролируемым высвобождением и повышенной биодоступностью. Хитозан легко подвергается химической модификации, что способствует улучшению растворимости и стабильности лекарств, а рН-чувствительность обеспечивает доставку препарата локально. Благодаря этим свойствам хитозан используется для создания наночастиц, микрокапсул и гидрогелей для различных способов введения препаратов [1].

Целью данной работы является получение микросфер хитозана, модифицированным терефталевым альдегидом, с хемосорбированным и инкапсулированным флуоресцеином, изучение физико-химические свойства материалов.

Микросферы хитозана были получены методом ионотропного гелеобразования [2]. Вкратце, раствор Na_2HPO_4 вводили по каплям в слабокислый раствор хитозана при постоянном перемешивании, далее раствором NaOH доводили pH до 10. Для образования микросфер хитозана вносили раствор терефталевого альдегида и перемешивали 1 час при 50°C . Полученный колloid промывали водой 4 раза и фильтровали. При инкапсуляции 15 мл раствора флуоресцеина вносились в раствор хитозана в начале синтеза, при хемосорбции же высушенные микросферы хитозана выдерживались в 15 мл флуоресцеина в течение 24 часов.

В ходе работы были получены ИК-спектры как исходных реагентов, так и полученных микросфер (Рисунок 1). Отсутствие полосы в районе 1720 cm^{-1} , характерной для свободной альдегидной группы, указывает на завершенность альдольной конденсации и формирование микросфер.

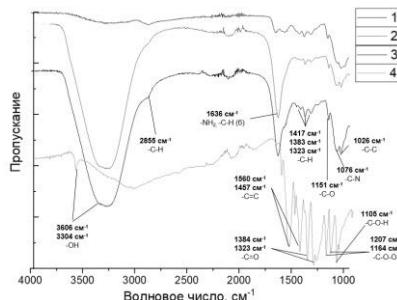


Рисунок 1 – ИК-спектры хитозана (1), микросфер хитозана с инкапсулированным флуоресцеином (2), микросфер хитозана с хемосорбированным флуоресцеином (3), флуоресцеина (4)

Средний размер частиц хитозана, а также систем с инкапсулированным и хемосорбированным флуоресцеином составил $395 \pm 0,7$, $408 \pm 1,1$ и $471 \pm 1,5$ нм соответственно. Высвобождение флуоресцеина при pH 5,0, 6,5 и 7,4 в первые сутки превышало 40%.

Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030).

Список используемой литературы:

- [1] X. Yongmei, D. Yumin // Int. J. Pharm. 2003. V.250. P. 215 – 226.

[2] Э.Е. Черникова, М.Д. Загвоздин, А. Брусович [и др] // Вестн. Том. гос. ун-та. Хим. 2024. № 36. С. 126–138.

МУЛЬТИМОДАЛЬНЫЙ ИМПЛАНТ С СИСТЕМОЙ ДОСТАВКИ ПРЕПАРАТОВ ДЛЯ КОМБИНИРОВАННОЙ ТЕРАПИИ НЕЙРОНАЛЬНОЙ ТРАВМЫ

Сайн А.Ю.^{1*}, Абдурашитов А.С.^{1,3}, Прошин П.И.^{1,3}, Статник Е.С.², Корсунский А.М.², Салимон А.И.², Синдеева О.А.¹, Сухоруков Г.Б.^{1,3}

¹ Центр нейробиологии и нейрореабилитации им. Владимира Зельмана, Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

² Центр системного проектирования, Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

³ Life Improvement by Future Technologies (LIFT) центр, Москва, Россия
*Alexandra.Sain@skoltech.ru

Нейрональные импланты активно исследуются в сфере лечения травм ЦНС благодаря их способности интегрироваться с мягкими тканями мозга [1,2]. Одной из актуальных задач является обеспечение контролируемого высвобождения нескольких терапевтических агентов с кинетикой, согласованной с течением патофизиологических процессов нейротравмы [3,4,5].

В результате данной работы был разработан и охарактеризован мягкий ($E = 4.56$ МПа) мультиmodalный имплант на основе биосовместимых полимеров: PVA, PDMS, PLGA. Достигнуто высвобождение трёх модельных веществ в динамике, согласованной с течением патофизиологических процессов (Рисунок 1). Результаты *in vitro* и *in vivo* испытаний подтверждают совместимость, безопасность и функциональность импланта.

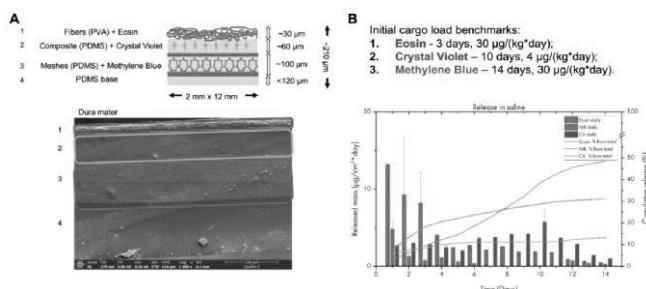


Рисунок 1 – (А) структура импланта и (В) кинетика высвобождения модельных веществ из него.

Список используемой литературы:

- [1] F Lotti, F Ranieri, G Vadalà, L Zollo, et al. // Front Neurosci. 2017. V.11 #497
[2] M Gulino, D Kim, S Pané, SD Santos, et al. // Front Neurosci. 2019. V. 13 #689
[3] M Rahamanian, A Ghahremani, P Kesharwani, F Oroojalian, et al. // Environ Res. 2023. V. 235 #116563
[4] AM Ziemba, RJ Gilbert. Front Pharmacol. 2017. V 8 #245
[5] J Collazos-Castro, Jorge. // Handbook of Innovations in Central Nervous System Regenerative Medicine. 2020. p. 259-289

**УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СИНТЕЗ ПОЛИСАХАРИДНЫХ КАПСУЛ:
МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ И ПРАКТИЧЕСКОЕ
ПРИМЕНЕНИЕ**

Паллаева Т.Н.^{1,2*}, Марченко И.В.¹, Букреева Т.В.¹
¹КККиФ НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия
²ЛИФТ Центр, Москва, Россия
***ii.ivanov@mail.ru**

В рамках данного исследования был изучен механизм формирования стабильных эмульсионных капсул на основе биосовместимых полисахаридов — ксантановой камеди и хитозана — с применением низкочастотного ультразвука. Методология включала сравнительный анализ физико-химических свойств капсул, полученных методом ультразвукового синтеза и классическим механическим диспергированием. Было установлено, что ультразвуковая обработка позволяет получать капсулы с улучшенными коллоидными и механическими характеристиками: контролируемым средним размером порядка 1 мкм, стабильным ζ -потенциалом около -19 мВ и повышенной устойчивостью к агрегации.

Ключевым эффектом ультразвукового воздействия является деполимеризация полисахаридов и их последующая межфазная реорганизация в оболочках типа ксантановая камедь/хитозан, что приводит к значительному увеличению стабильности. Данные рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии подтвердили образование ковалентных связей между полимерами, о чём свидетельствует сдвиг пика N1s в область 400–402 эВ и изменение соотношения N/C (1,17 против 1,0 при механическом способе), что указывает на обогащение оболочки ксантановой камедью и наличие ковалентных взаимодействий. Результаты

ЯМР-спектроскопии дополнительно подтвердили структурную перестройку, показав сужение сигналов и изменения химических сдвигов в периферийных группах (CH_2OH , CH_2OAc), что свидетельствует о равномерном распределении полимеров.

Указанные структурные изменения привели к существенному повышению механической прочности композитных капсул: модуль Юнга для системы ксантановая камедь/хитозан составил 48 кПа, что превышает значения для капсул на основе индивидуальных полисахаридов (20 кПа для ксантановой камеди и 36 кПа для хитозана). Таким образом, ультразвуковая обработка обеспечивает не только эффективное эмульгирование липофильных соединений в водорастворимых полимерах, но и формирование стабильной структуры «ядро—оболочка» благодаря кавитационно-индуцированной перегруппировке функциональных групп полимеров на границе раздела фаз.

Синтезированные капсулы были использованы для инкапсулирования как гидрофобных препаратов биомедицинского назначения (тимохинон, витамин Е, паклитаксел), так и биоцида широкого спектра действия (DCOIT). Была показана высокая степень инкапсулирования компонентов (более 90%), а также исследована кинетика их высвобождения.

Проведённое исследование вносит значительный вклад в понимание поведения полисахаридов под действием акустической энергии и открывает новые возможности для разработки высокоэффективных систем доставки лекарственных средств с заданными свойствами.

СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ

КОМПОЗИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИФОСФАТОВ ДЛЯ РЕГЕНЕРАЦИИ КОСТНОЙ ТКАНИ

Голубчиков Д.О.^{1,2*}, Шуленков А.А.¹, Забежайлова Е.А.²,
Самофалов П.С.¹, Евдокимов П.В.^{1,2}, Путляев В.И.^{1,2}

¹*Химический факультет, Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

²*Факультет наук о материалах, Московский государственный
университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

* *golubchikovdo@my.msu.ru*

Глобальные демографические тенденции указывают на неуклонный рост среднего возраста населения, что приводит к значительному росту числа травм костей, требующих хирургического вмешательства. Разработка материалов нового поколения для восстановления костной ткани ориентирована на регенеративный подход, предполагающий вовлечение материалов в естественный процесс ремоделирования кости, что обеспечивает полное восстановление ткани. При оценке функциональных характеристик биодеградируемых композитных материалов следует учитывать скорость резорбции и механическую прочность. Помимо своей основной механической роли в поддержании структурной стабильности и обеспечении биосовместимости, современные материалы имплантатов также должны способствовать обладать остеокондуктивностью, стимулировать ангиогенез и поддерживать рост новой костной ткани.

Биокерамика на основе фосфатов кальция сохраняет лидирующие позиции среди материалов для инженерии костной ткани. Однако используемые, в основном, гидроксиапатит и трикальцийфосфат, как правило, не обладают достаточной скоростью биорезорбции. В данной работе представлен подход к увеличению скорости биорезорбции биокерамики на основе фосфатов путем использования фосфатов кальция и магния и снижения соотношения $\text{Ca}(\text{Mg})/\text{P}$ в керамических композитах, поскольку растворимость напрямую коррелирует с ним. В данной работе впервые исследованы керамические композиты с соотношением $0,5 \leq \text{Ca}(\text{Mg})/\text{P} \leq 1,5$.

В ходе данного исследования мы сначала уточнили оптимальные способы твердофазного синтеза чистых прекурсоров и обеспечили получение двухфазных образцов с целевым соотношением $\text{Ca}(\text{Mg})/\text{P}$. Температуры синтеза были выбраны в соответствии с данными термogravimетрии/дифференциальной сканирующей калориметрии.

Кроме того, режимы спекания, приводящие к получению плотной керамики, были изучены методом дилатометрии. Следует отметить, что полифосфаты кальция и магния могут также выступать в качестве спекающей добавки, обеспечивая жидкофазное спекание. Также было рассмотрено влияние pH на скорость растворения разработанной двухфазной керамики. Кроме того, было изучено влияние состава керамики (соотношение Ca(Mg)/P) на механические свойства.

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ № 22-19-00219.

**БИОСОВМЕСТИМЫЕ НАНОЧАСТИЦЫ $(\text{Fe}, \text{Mn}, \text{Co}, \text{Zn})\text{Fe}_2\text{O}_4$ ДЛЯ УЛЬТРАСТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА КЛЕТОК МЕТОДОМ ПЭМ
EDX**

Иванова А.В.^{1,2*}, Абакумов М.А.^{1,2}

*¹Национальный исследовательский технологический университет
МИСИС, Москва, Россия*

*²Российский национальный исследовательский медицинский университет
имени Н.И. Пирогова, Москва, Россия*

**super.fosforit@yandex.ru*

Традиционными методами визуализации биомолекул являются методы флуоресцентной микроскопии, разрешающая способность которых ограничена дифракционным пределом и не превышает 200 нм. Развитие методов флуоресцентной микроскопии сверхвысокого разрешения привело к возможности получать изображения объекта с улучшенным разрешением до 5 нм, однако даже такое разрешение не позволяет визуализировать большинство биомолекул, размер которых составляет единицы нанометров. Получать изображения с разрешением меньше дифракционного предела световой микроскопии стало возможным с появлением электронной микроскопии. Особую известность для визуализации биомолекул приобрела система «Immunogold». Данный препарат представляет собой наночастицы золота, которые чаще всего конъюгированы с вторичными антителами, сконструированными для специфического связывания с определенным антигеном или клеточным компонентом. Благодаря высокой электронной плотности золота удается зарегистрировать гипоинтенсивные области, соответствующие местам связывания системы при проведении электронной микроскопии образца. Также есть возможность использования наночастиц золота разного размера, однако такой подход весьма трудоемок и ограничивается двумя

исследуемыми мишенями. Поиск новых подходов и методов решения этой задачи остается актуальным и интересным.

В ходе проведенного исследования был разработан способ получения и синтезированы наночастицы (МНЧ) сложных оксидов железа Fe_3O_4 и MFe_2O_4 с контролируемым элементным составом и магнитными свойствами. Полученные результаты позволили использовать МНЧ синтезированные в бензиловом спирте, как перспективный материал для создания нанозонда. В результате модифицирования поверхности МНЧ молекулами 3,4-дигидроксифенилуксусной кислоты и поли(этилен гликоль) 2-аминоэтилового эфира уксусной кислоты удалось получить стабильные в водных растворах при физиологических условиях МНЧ Fe_3O_4 и МНЧ MFe_2O_4 . Отработанные подходы были применены в задачах по изучению загрузки антител (АТ) на МНЧ.

Все выбранные четыре типа МНЧ были успешно конъюгированы с вторичными АТ, которые оказались стабильными и не потеряли своей иммунореактивности, по отношению к белковым антигенам, расположенным в клетках рака предстательной железы человека РСЗ: к белку микротрубочек α -тубулину, к многофункциональному белку межклеточных контактов β -катенину, к основным клеточным компартментам: к ядру и митохондриям.

Полученные результаты также позволили рассматривать синтезированные конъюгаты МНЧ с АТ, как перспективный и эффективный препарат для решения задач ПЭМ-визуализации биомолекул, который позволит производить детекцию нескольких белковых антигенов, что было подтверждено в ходе экспериментов *in vitro* на ультратонких срезах клеток рака предстательной железы человека РСЗ.

АДСОРБЦИЯ КРАСИТЕЛЕЙ И ОБРАЗОВАНИЕ J-АГРЕГАТОВ НА МЕЗОПОРИСТЫХ НАНОЧАСТИЦАХ ФЕРРИТА КОБАЛЬТА С НАСТРАИВАЕМОЙ АРХИТЕКТУРОЙ ПОР

Никитин А.А.*[,], Бондаренко Л.С., Абакумов М.А.

*Национальный исследовательский технологический университет
МИСИС, Москва, Россия*
**nikitin.aa@misis.ru*

Мезопористые магнитные наноадсорбенты представляют собой уникальный класс функциональных материалов, позволяющих осуществлять адсорбцию различных органических молекул с последующим их отделением действием внешнего магнитного поля. В данной работе представлена универсальная платформа на основе

стержнеобразных (100×30 нм) наночастиц (НЧ) феррита кобальта с настраиваемой бимодальной мезопористостью (3 – 10 нм и 10 – 50 нм) для исследования того как пористость адсорбента и молекулярные свойства адсорбтивов определяют их пути адсорбции [1]. Пористость НЧ контролировалась путем варьирования скоростей отжига матрицы на основе акагенита, в результате чего получались НЧ с различными микроструктурами. Эффективность НЧ как адсорбентов была систематически изучена с использованием трех органических красителей: хромовый темно-синий (ХТС), метиловый оранжевый (МО) и метиленовый синий (МС), которые различаются по молекулярной структуре и заряду (Рисунок 1).



Рисунок 1 – Схематическое изображение механизмов адсорбции различных красителей наночастицами феррита кобальта

Так, поры малого диаметра (3 – 10 нм) имеют решающее значение для эффективной адсорбции МО и МС. Несмотря на то, что МО и поверхность НЧ имеют отрицательный заряд, в отношении него показана высокая адсорбционная емкость (до $62 \text{ мг} \cdot \text{г}^{-1}$) НЧ, что в 2,5 раза больше, чем для тех же НЧ и МС. Адсорбция МО происходила посредством кооперативной многослойной хемосорбции, подчиняющейся кинетике псевдовторого порядка, в то время как для МС наблюдалась монослойная физадсорбция. ХТС в низких концентрациях оставался в растворе в молекулярной форме и эффективно адсорбировался (до $130 \text{ мг} \cdot \text{г}^{-1}$) наночастицами. Однако при более высоких концентрациях образовывались J-агрегаты, которые десорбировались в раствор. Полученные результаты демонстрируют разнообразные и ранее не изученные пути адсорбции, указывающие на то, что НЧ способны индуцировать изменение молекулярного состояния красителей, приводя к формированию наносборок и последующей многослойной адсорбции.

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ № 25-73-20132.

Список используемой литературы:

[1] A.A. Nikitin, V. A. Arkhipov, N.S. Chmelyuk et al. //ACS Appl. Nano Mater. 2023. V. 6. N. 15. P. 14540–14551.

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ СИНТЕЗА МАГНИТНЫХ
НАНОЧАСТИЦ ТИПА ЯДРО-ОБОЛОЧКА ДЛЯ
МАГНИТОМЕХАНИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СТРУКТУРОЙ
БЕЛКОВ НА СУБМОЛЕКУЛЯРНОМ УРОВНЕ**

Прищепа А.В.^{1*}, Абакумов М.А.^{1,2}, Никитин А.А.^{1,2}

¹*Национальный исследовательский технологический университет
МИСИС, Москва, Россия*

²*ФГАОУ ВО РНИМУ им. Н.И. Пирогова Минздрава России, Москва,
Россия*

**aprishcepa2000@yandex.ru*

Протекание большинства биохимических процессов в живом организме контролируется конформацией белков. Более того, нарушение процессов фолдинга белка является причиной многих заболеваний, поэтому разработка способа дистанционного управления субмолекулярной структурой белков является перспективным направлением исследований. Одним из таких подходов может выступить магнито-механика, которая основана на преобразовании энергии низкочастотных переменных магнитных полей в механическую энергию при помощи магнитных наночастиц (МНЧ).

В данной работе исследована возможность магнитомеханического подхода для изменения конформации сывороточного альбумина человека (ЧСА), а также для управления межмолекулярными белковыми взаимодействиями на модельной паре стрептавидин-биотин. Для изменения субмолекулярной структуры выбранных белков используются МНЧ феррита кобальта CoFe_2O_4 , на примере которых уже доказана возможность магнитомеханического изменения олигонуклеотидных дуплексов [1,2]. Синтез CoFe_2O_4 МНЧ проводился методом термического разложения ацетилацетонатов железа и кобальта в присутствии олеиновой кислоты и олеиламина в качестве поверхностно-активных веществ. Целевые белки ковалентно закреплялись на поверхность CoFe_2O_4 МНЧ, после чего полученный комплекс «МНЧ+белок» обрабатывался низкочастотным магнитным полем. Для прочного ковалентного

связывания выбранных белков с поверхностью CoFe_2O_4 МНЧ проведена их модификация при помощи покрытия из 3,4-дигидроксифенилуксусной кислоты или оксида кремния. Механическое движение МНЧ в низкочастотном магнитном поле приводит к возникновению сил растяжения/сжатия в исследуемых белка и изменению их конформации. Для исследования межбелковых взаимодействий в паре стрептавидин-биотин применялась разработанная нами методика подложек, при которой биотин ковалентно закрепляется на поверхности подложки, а связанный с ним стрептавидин находится на поверхности CoFe_2O_4 МНЧ.

Проведенное исследование подтвердило применимость магнитомеханического подхода для дистанционного управления конформацией белков и межбелковых взаимодействий на примере сывороточного альбумина и пары стрептавидин-биотин. В исследовании разработана методика связывания белков с CoFe_2O_4 МНЧ с различным функциональным покрытием. Применение различного покрытия доказало влияние диполь-дипольных взаимодействий в процесс преобразования МНЧ энергии магнитного поля в механические силы. Полученные результаты могут послужить стимулом к разработке новых методик терапии особо тяжких патологий при помощи нанотехнологий.

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РНФ № 25-73-00100.

Список используемой литературы:

- [1] A.A. Nikitin, A.V. Prishchepa, R.A. Rylov et. al. // J. Phys. Chem. Lett. 2023. V. 14 (40). P. 9112-9117.
- [2] A. V Prishchepa, A. G. Savchenko, N. S. Chmelyuk et al. // J. Magn. Magn.Mater. 2025. V. 614. P. 172757.

ЗАВИСИМОСТЬ ПОГЛОЩЕНИЯ ПОЛИЭЛЕКТРОЛИТНЫХ НАНОКАПСУЛ КЛЕТКАМИ ЦНС ОТ ЗАРЯДА НАНОКАПСУЛ И ФЕНОТИПА КЛЕТОК

Амелина К.А.^{1*}, Казакова Л.И.², Носов Г.А.^{2,3}, Сухоруков Г.Б.^{1,2}

¹*Сколковский Институт Науки и Технологий, Москва, Россия*

²*ООО “ЛИФТ ЦЕНТР”, Москва, Россия*

³*Федеральный Центр Мозга и Нейротехнологий ФМБА России, Москва, Россия*

*K.Amelina@skoltech.ru

Гематоэнцефалический барьер (ГЭБ) строго ограничивает проникновение веществ в центральную нервную систему (ЦНС) [1]. Полиэлектролитные нанокапсулы рассматриваются как перспективные носители лекарств для преодоления этого барьера [2]. Их ключевые характеристики (размер, заряд и эффективность инкапсуляции) определяют биологические эффекты и безопасность наносистем.

В данной работе проведено сравнение взаимодействия полиэлектролитных нанокапсул диаметром 608 ± 91.8 нм на основе полистиролсульфоната (PSS) и полиглутамилгидрохлорида (PAH) с клетками нервной ткани. В качестве модельных систем использованы первичные нейроны, астроциты, а также клеточные линии микроглии НМС3 и глиобластомы U87, что представляет интерес для разработки подходов к таргетной терапии нейродегенеративных заболеваний и глиобластомы.

Результаты исследования продемонстрировали, что характер клеточного поглощения полиэлектролитных нанокапсул определяется как фенотипом клеток нервной ткани, так и зарядом их поверхности. Максимальное накопление нанокапсул наблюдалось в астроцитах, тогда как клетки микроглии НМС3 и глиобластомы U87 характеризовались существенно меньшей степенью internalизации, а нейроны практически не вовлекались в процесс. Установлено, что отрицательно заряженные нанокапсулы (-20.2 ± 4.77 мВ) с PSS во внешнем слое поглощались астроцитами и клетками глиобластомы эффективнее по сравнению с положительно заряженными ($+14.1 \pm 6.12$ мВ) с PAH во внешнем слое, тогда как микроглия не проявляла зависимости от заряда (*Рис.1A*). Дополнительно, применение pH-чувствительного красителя SNARF-1 позволило выявить лизосомальное накопление нанокапсул через 24 часа, что свидетельствует о ключевой роли эндоцитоза в механизмах их internalизации (*Рис.1B*).

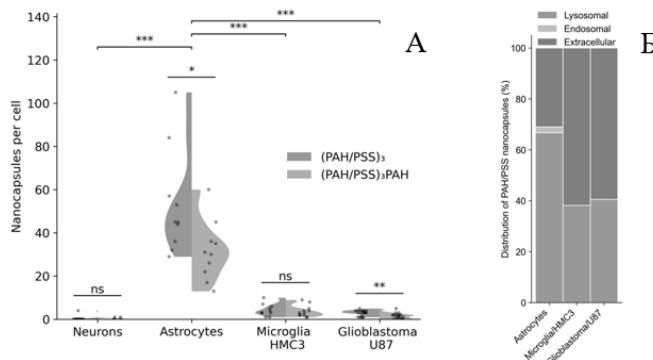


Рисунок 2 – (А) Виолин-плоты интернализации нанокапсул различными типами клеток мозга при разном ζ -потенциале нанокапсул. Статистическая значимость — тест Манна–Уитни ($*p < 0,05$; $**p < 0,01$; $***p < 0,001$). (Б) Сравнительный анализ локализации PAH/PSS нанокапсул в клетках мозга на основе ратиометрического сигнала SNARF-1.

Список используемой литературы:

- [1] Daneman R. et al. The Blood–Brain Barrier // Cold Spring Harb. Perspect. Biol. 2015. V. 7. # a020412.
- [2] Kopach O. et al. Brain neurons internalise polymeric micron-sized capsules: Insights from in vitro and in vivo studies // Mater. Today Bio. 2025. V. 31. #101493.

СИНТЕЗ МИКРОКРИСТАЛЛОВ 4-МЕТИЛУМБЕЛЛИФЕРОНА С ПОЛИЭЛЕКТРОЛИТНЫМ ПОКРЫТИЕМ ДЛЯ АДРЕСНОЙ ДОСТАВКИ В ПЕЧЕНЬ

Крикунова П.В.^{1*}, Сапач А.Ю.², Синдеева О.А.², Котелевцев Ю.В.², Сухоруков Г.Б.^{2,3}, Паллаева Т.Н.^{1,3}

¹Отделение «Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова» Курчатовского комплекса кристаллографии и фотоники НИЦ «Курчатовский институт, Москва, Россия

²Сколковский институт науки и технологий, Инновационный центр "Сколково", Москва, Россия

³ЛИФТ Центр, Москва, Россия
*krikunova.pv@gmail.com

4-метилумбеллиферон (4-MU) является перспективным соединением для ингибирования выработки гиалуроновой кислоты [1] в

поврежденных тканях или при развитии рака. Доставка данного соединения в организм лимитируется крайне низкой гидрофильностью, поэтому для его введения используются органические растворители, такие как диметилсульфоксид (ДМСО). Внутривенное введение 4-MU в твёрдой форме позволит снизить токсичность, и, в сочетании с концепцией «тряянского коня», использовать возможности пассивной доставки. Одним из наиболее эффективных подходов для синтеза кристаллов, линейные размеры которых не превышают нескольких микрон, является перекристаллизация в присутствии антирастворителя под воздействием ультразвука (УЗ) [2, 3].

В процессе УЗ гомогенизации нестабильная эмульсия насыщенного раствора 4-MU (ДМСО) в масле вводилась в водный раствор бычьего сывороточного альбумина (БСА). При ультразвуковой обработке эмульсия раствора 4-MU в масле диспергируется в водной среде. Это вызывает переход ДМСО в водную фазу, что, в свою очередь, инициирует зарождение кристаллов за счет удаления растворителя. Под действием УЗ происходит спивка белка [4], находящегося в дисперской среде, на поверхности кристаллов дисперской фазы. В результате были получены кристаллы 4-MU со средним размером 3,5 мкм изометричного облика с оболочкой из БСА, функционализированного флуоресцентной меткой Cy7. Дополнительно полученная система ядро-оболочка была модифицирована двумя бислоями полионного комплекса РАН-RITC/PSS методом послойной адсорбции полизелектролитов. Формирование оболочки было подтверждено изменением заряда поверхности.

Для доставки кристаллов 4-MU в печень использовались аутологичные макрофаги мыши, выделенные из костного мозга, что позволило задействовать естественные пути доставки в печень и минимизировать нагрузку на нецелевые ткани и органы. Исследования *in vitro* показали быстрый захват и интернализацию микрокристаллов 4-MU макрофагами в терапевтической концентрации 44 мкг/мл, при этом цитотоксическая нагрузка данной системы на клетки была существенно ниже по сравнению с раствором 4-MU в ДМСО.

Исследование *in vivo* показало, что макрофаги, несущие 4-MU, успешно локализуются в фиброзной ткани печени. При этом через час после введения флуоресцентное свечение увеличивается, достигая пика после 24 часов. Измерение флуоресценции внутренних органов *ex vivo* позволило оценить, что около 71% сигнала локализовано в печени, таким образом можно предположить, что макрофаги, достигшие печени, способствуют накоплению и удержанию лекарства в фиброзной ткани.

Эксперименты с макрофагами были выполнены при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-75-10070).

Список используемой литературы:

- [1] N. Nagy, H.F. Kuipers, A.R. Frymoyer et al. // Front Immunol. 2015. V. 6. 123.
- [2] N. Belkacem, M.A. Sheikh Salem, H.S. AlKhatib // Powder Technol. 2015. V. 285. 16-24.
- [3] Z. Guo, M. Zhang, H. Li et al. // J. Cryst. Growth. 2005. V. 273. 555-563.
- [4] K. S. Suslick, M. W. Gristaff // J. Am. Chem. Soc. 1990, 112, 7807.

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Abakumov M.A.	28	Serhat Keser.....	31
Akhmedova S.A.	23	Sindeeva O.A.	202
Andreev V.	33	Sukhorukov G.B.	15, 202
Anisimova N.Y.	29, 30	Sukhovey Yu.G.	25
Antonova O.S.	23	Sviridova I.K.	23
Barzinjy Azeez Abdullah.	24	Tankut Ates	31
Cherkasov V.	33	Temralieva D.R.	29
Deyneko D.V.	34	Terentyeva D.A.	202
Dobatkin S.V.	29	Ukleykin V.E.	25
Ebrahimi R.	110	Yusupov V.	33
Enikeev N.A.	30	Zvyagin A.V.	298
Fomin A.S.	23	Абакумов М.А.	290, 313, 314, 316
Gatina S.A.	30	Абдрахманова Э.Д.	58, 59, 77, 269
Goldberg M.A.	23	Абдуллин Т.И.	175, 225
Guslyakova O.I.	202	Абдурашитов А.С.	174, 212, 306, 309
Kannan S.	32	Авакян Л.А.	128
Kapustin A.V.	30	Адамов А.А.	178
Karelin R.	33	Азовская Д.Ю.	264
Kazakova L.I.	202	Акасов Р.А.	223
Khayrutdinova D.R.	23	Акопян Г.В.	283
Khmelevskaya I.	33	Аксенов Д.А.	63
Kirsanova V.A.	23	Александровский Э.К.	62
Kiselevsky M.V.	29, 30	Алиханова О.Л.	166
Komarov V.	33	Амелина К.А.	317
Komlev V.S.	23	Андреев В.А.	50, 53, 98, 111, 113
Koptyug A.V.	25	Андианова Р.Р.	90
Kostolomova E.G.	25	Анисимова Н.Ю.	40, 48, 76, 93, 102, 105, 107, 222, 252, 263, 279, 282, 286, 288
Krokhicheva P.A.	23	Анохин А.С.	293
Lukyanova E.A.	29	Антипина М.А.	47
Martynenko N.S.	29	Антипов П.Е.	235
Morozova S.M.	27	Антонова О.С.	141, 145, 146, 238
Namvarian R.	110	Антонова С.О.	143
Niyazi Bulut.	31	Астанин В.В.	108
Omer Kaygili	31	Астапов Д.	116
Prokoshkin S.	33	Астафуров С.В.	116
Rybalchenko O.V.	29	Астафурова Е.Г.	116
Ryzhkin A.A.	30		
Sain A.Yu.	202		
Sergeeva N.S.	23		

Асфандияров Р.Н.	63	Волков С.С.	235
Аубакирова В.Р.	44, 63	Волкова Е.П.	65, 66
Афоникова Н.С.	93	Волчихина М.А.	117, 122
Ахмедов М.М.	209	Воробьев А.О.	264
Ахмедова С.А.	143, 266, 268, 280	Воробьев В.И.	209
Бабаева Г.	288	Воронько Н.Г.	169, 214
Багрец Д.А.	120	Воропаева Е.С.	46
Баженов В.Е.	38, 56, 82, 88, 271	Воротеляк Е.А.	216
Байгонакова Г.А.	54	Востриков Н.Ф.	104
Баранов О.В.	229, 243	Вохмянина Д.В.	195
Баранчиков А.Е.	240	Галаутдинов М.Ф.	77, 269
Баринов С.М.	238	Галиев А.Ф.	301
Безбородова О.А.	291	Галимзянов Б.Н.	78
Беляков А.Н.	76, 107	Галкин С.П.	74, 119
Беседин В.Д.	11	Гамин Ю.В.	74, 119
Беспалова С.В.	283	Гаршев А.В.	19, 237
Билялов А.Р.	77, 269	Гаспарян К.Г.	186, 243
Битанова В.А.	210	Гатина С.А.	48, 279
Биттер С.М.	43	Гафуров М.Р.	20, 134
Бозо И.Я.	10, 275	Генералов Е.М.	244
Больбасов Е.Н.	264	Генералова А.Н.	223
Больщиков Б.Д.	166	Гирсова С.Л.	43, 50, 98
Бондаренко Л.С.	314	Глухарев А.Ю.	214
Боткин А.В.	56, 65, 66	Говоров Н.Д.	291
Браиловский В.	62	Голованова О.А.	203
Брижань Л.К.	11	Голубчиков Д.О.	210, 249, 312
Брилевский А.И.	14	Гольдберг М.А.	20, 141, 143, 145,
Брюзгина А.А.	17, 184		146, 238, 268, 280
Бугаева Е.С.	291	Горбенко А.Д.	91, 100
Букреева Т.В.	310	Горнакова А.С.	40, 93
Буланкин Н.С.	301	Грецкий Н.Л.	114, 170
Булина Н.В.	128, 162	Гречишников Н.В.	161
Буякова С.П.	264	Грин М.А.	291
Быстров В.С.	128	Громова Я.А.	260
Валиев Р.З.	9, 56, 65, 66, 110	Губкин С.В.	114, 170
Варьян И.А.	229, 250	Гундерова С.Д.	94
Васильев А.С.	235	Гупта В.	170
Веретенникова Е.А.	192	Гуслякова О.И.	180
Веснин В.Р.	51	Давдян Г.С.	40, 93
Виндокуров И.В.	178	Даиоб К.	175, 225
Власенко Р.Я.	286	Далгатов М.Г.	275

- Данюк А.В. 14
Дарвиш Д.М. 190
Деев Р.В. 10, 275
Дейнеко Д.В. 141, 155
Деркач М.А. 62, 94
Деркач С.Р. 169
Добаткин С.В. 76, 102, 105, 107,
 111, 113
Добаткина Т.В. 102, 113
Докука В.Н. 90
Донская Н.О. 20, 146
Дранников А.А. 192
Дробышев А.Ю. 271
Дубовская П.И. 192
Дубров В.Э. 19, 237
Дудорова А.А. 131
Дьячкова У.Д. 154
Дюрягин В.С. 44
Евдокимов П.В. ... 19, 138, 148, 154,
 210, 237, 249, 312
Егоров А.А. 134, 149, 229, 243, 244
Егорова В.А. 138
Егорова Т.В. 223
Еленская Н.В. 178
Еникеев Н.А. 48, 81, 99, 279
Еремин П.С. 201, 274
Ермаков А.В. 180
Ермакова Е.А. 293
Ерошенко А.Ю. 234
Ершов Н.А. 38, 82, 88
Ефименко А.Ю. 19, 154, 237
Жарков М.Н. 298
Жеребцов С.В. 46
Жидков В.К. 91
Жуков И.А. 84
Жукова Ю.С. 47
Жуковская Е.С. 155
Забежайлова Е.А. 312
Загибалова Е.А. 116
Заманова Р.А. 77
Звягина А.И. 219

Зелепукин И.В. 298
Зобкова Ю.О. 134
Зуев Ю.Ф. 169
Зуза Д.А. 184
Зухайб М. 175
Зюзин М.В. 193
Ибрагимов А.Э. 212
Иванов А.Н. 180
Иванов В.К. 240
Иванова А.В. 313
Игнатов С.Г. 172
Ильина Е.Э. 183
Ильичёва А.А. 127, 161
Исламгалиев Р.К. 58, 59, 110
Ишмухаметов М.С. 301
Кавелина А.С. 283
Кадиров П.О. 47
Казакова Л.И. 317
Казанцева Н.В. 42
Каймонов М.Р. 137
Калинин К.Т. 168
Каморин Д.М. 220
Каплан М.А. ... 86, 91, 100, 114, 238
Каприн А.Д. 268
Каралкин П.А. 266, 268
Карамов Д.Д. 301
Караشاев М.М. 74
Карелин Р.Д. 53
Каршиева С.Ш. 172
Карякин А.А. 195
Качалина П.М. 252, 288
Кашин А.Д. 234
Келлер И.Э. 178
Кильдеева Н.Р. 209
Кин Т.Ю. 74, 119
Кирилэ Т.Ю. 189, 213, 226
Кирин Н.С. 291
Кирсанкин А.А. 293
Кирсанова В.А. ... 143, 266, 268, 280
Киселевский М.В. ... 40, 48, 102, 105,
 107, 222, 263, 279, 286, 288

Кистерский К.А.	177	Кудрин К.Г.	266
Климашина Е.С. ..	19, 138, 157, 237	Кудряшов А.Н.	43
Клюев А.Л.	282	Кузина Т.Д.	169, 214
Ковалев А.Д.	140	Кузнецова П.А.	134
Ковалёва М.А.	54	Кузьменко Е.В.	216
Ковалева П.А.	252, 288	Кузяева В.И.	223
Козина Н.Д.	189, 213	Кукушко Е.А.	11
Колмаков А.Г....	37, 60, 71, 91, 100,	Куликов О.А.	272
	114, 117	Кульбакин Д.Е.	264
Колпаков Ф.А.	298	Кулясова А.Г.	95
Колпина Е.П.	190	Кулясова О.Б.	56, 68, 70, 95, 108,
Комаров В.С.	50, 53, 98		110
Комиссаров А.А.	38, 56, 82, 88, 271	Кунижев К.А.	271
Комлев В.С.	20, 133, 134, 135, 141,	Курзина И.А.	17, 184, 196, 246
	143, 145, 146, 149, 151, 158, 219,	Кучеряев К.А.	232
	229, 238, 243, 244, 250, 257, 268,	Кучина Ю.А.	169
	275, 280	Лапуть О.А.	17, 184, 196
Коновалов А.А.	145, 146, 238	Лебединская О.В.	288
Конопацкий А.С.	50, 98	Левин Д.О.	255, 258
Конушкин С.В.	60, 71, 86, 100, 114,	Лёгенький Ю.А.	283
	117, 122	Лезин В.Д.	62, 104
Кополева Е.А.	193	Ленгерт Е.В.	180
Коптюг А.В.	297	Леонов А.В.	146
Коржова А.Г.	17, 196	Леонтьев Н.В.	148, 210
Корнева А.В.	93	Литвинова Е.А.	192
Королёв П.В.	183	Лобжанидзе П.В.	149, 229, 243, 244
Королев С.В.	168	Лотков А.И.	43
Корольков О.Е.	67	Лугинин Н.А.	234
Коротицкий А.В.	47	Лукашевич К.Е.	62
Короткова А.В.	181, 232	Лукьянов А.С.	293
Корсунский А.М.	309	Лукьянובה Е.А.	76, 102, 105, 107,
Косова А.Д.	254		111, 113
Костоломова Е.Г.	297	Лучин А.В.	116
Котелевцев Ю.В.	319	Лыткина Д.Н.	152, 246
Котякова К.Ю....	172, 181, 186, 198	Львов В.А.	288
Кошевая Е.Д.	230, 248	Макарец Ю.А.	181, 198
Краснопевцева О.В.	287	Макарова С.В.	128, 162
Крикунова П.В.	319	Макринский К.И.	282
Крохичева П.А....	20, 141, 238, 268,	Мальцев С.А.	20, 134, 151
	280	Мамин Г.В.	20
Крупнин А.Е.	168	Марков А.Б.	80

- Марков П.А. 201, 274
Мартаков И.С. 201
Мартыненко Н.С. 76, 102, 105, 107,
 111, 113, 263, 282
Марченко Е.С. 54, 84, 264
Марченко И.В. 310
Маслов Д.Д. 230, 248
Маслов Л.Б. 183
Махмуд Алхаж Али А. 74
Мельников Д.С. 99
Мерзликин В.А. 229, 250
Мерсон Д.Л. 14, 73
Мерсон Е.Д. 14, 73
Минайчев В.В. 135, 219
Миронов В.Ф. 225
Михайлина Н.А. 127, 161
Михайличенко А.А. 152
Михайлов В.И. 201
Михлик С.А. 71
Мокшин А.В. 78
Моргун Е.И. 216
Морозкина С.Н. 254
Морозова Я.А. 86, 100, 122
Московских Д.О. 160
Мудгал Д. 170
Мурадян А.А. 62
Мурашко А.М. 138, 154, 157, 210
Мурыгин С.Р. 50, 98
Мухортова Ю.Р. 303
Мягких П.Н. 73
Насакина Е.О. 86
Невская Е.Е. 271
Немтарёв А.В. 225
Низамов Т.Р. 140
Низамутдинов А.С. 134
Никитин А.А. 314, 316
Никитина В.Н. 195
Никитина М.А. 56
Никифоров Г.А. 78
Никифоров И.В. 155
Никишина Е.Е. 133
Николаев А.А. 96
Новиков М.М. 131
Новрузов К.М. 40, 93, 263
Носикова Л.А. 255, 258
Носов Г.А. 317
Нугаманов Ф.В. 58
Оболкина Т.О. 143, 145, 158, 241,
 255
Озеров М.С. 46
Ольхов А.А. 243
Осипова Е.Ю. 131
Островерхов П.В. 291
Падалко А.Г. 127, 161, 241
Паллаева Т.Н. 310, 319
Парамонова Е.В. 128
Парфенов Е.В. 44, 70
Парфенова Л.В. 44
Пашиццева Н.В. 288
Паширова Т.Н. 225
Пельтек А. 193
Пенькова О.И. 127, 161
Пермякова А.А. 216
Пестов А.В. 192
Петракова Н.В. 20, 134, 151
Петрова Е.А. 272
Пирчхадзе С.З. 298
Пискунова П.А. 50, 98
Плегунова С.В. 38, 82, 88, 271
Погольская Д.Д. 148
Погорильй В.А. 291
Подзорова Л.И. 127, 161
Поленок М.В. 59, 77, 269
Полетика Т.М. 43, 50, 98
Полуянов В.А. 73
Полыгалова В.В. 232
Полякова К.А. 50, 98
Попандопуло А.Г. 283
Попков М.А. 240
Попова Е.В. 277
Порошин С.Г. 199, 306
Поцелеев В.В. 217

Пресняков Е.В.	275	Саин А.Ю.	272, 309
Приходенко Е.С.	180	Салахиева Д.В.	225
Прищепа А.В.	316	Салимон А.И.	309
Проворкина А.А.	203	Салихова Т.И.	225
Прокошкин С.Д.	47, 62	Самофалов П.С.	249, 312
Пронченко А.А.	192	Сапач А.Ю.	319
Просвирнин Д.В.	107	Сафонов С.О.	143
Просолов К.А.	234	Сафронова Т.В.	130, 209
Прошин П.И.	174, 212, 306, 309	Свиридова И.К.	143, 266, 268, 280
Пудовкин М.С.	134	Святославов Д.С.	266
Пупанова А.К.	138	Севостьянов М.А.	37, 60, 86, 91, 100, 114, 117, 122
Пустов Ю.С.	47	Севостьянова Т.М.	91, 100
Путляев В.И.	19, 138, 148, 154, 157, 210, 237, 249, 312	Седельникова М.Б.	234
Пухова А.С.	291	Седуш Н.Г.	168
Пыров М.С.	127, 161, 241	Селезнева И.И.	86
Пятаев Н.А.	298	Сементеева Ю.Р.	63
Пятина К.В.	219	Сенатов Ф.С.	222
Рааб А.Г.	63, 76	Сербин А.В.	166
Рамазанов К.Н.	96	Сергеева Н.С.	143, 266, 268, 280
Рассолова Ю.Р.	157	Сергиенко К.В.	60, 86, 100
Редько Н.А.	271	Серебрякова К.О.	258
Решетов И.В.	266	Сивов Н.А.	166
Ржанова Л.А.	216	Симагин А.С.	220
Родченко С.В.	189	Симонова М.А.	220
Рожкова Е.А.	274	Сингх Дж.	170
Романов Р.Р.	229, 250	Синдеева О.А.	272, 309, 319
Рубаник В.В.	120	Сиразеева А.Р.	70, 95
Рубаник В.В. мл.	120	Сиротинкин В.П.	127, 243
Рыбальченко Г.В.	76, 105	Ситдикова С.М.	286
Рыбальченко О.В.	76, 102, 105, 107, 111, 113, 263	Скопинцев Д.А.	90
Рыжкин А.А.	81, 99, 279	Скрябин А.С.	51
Рыклина Е.П.	50, 98	Скугорев А.В.	74
Рябинин А.А.	216	Слижевская Я.Ю.	113
Савенко М.Е.	192	Слободян М.С.	80
Савкина А.А.	180	Смирнов И.В.	135, 219, 257
Садков Д.Ю.	220	Смирнов С.В.	143, 241
Садовникова М.А.	20	Смирнова П.В.	135, 219, 257
Садыков Р.Т.	246	Снетков П.П.	254
Садырин Е.В.	235	Созарукова М.М.	240
		Соколов А.С.	199, 306

- Соловьев И.Д. 195
Солопов М.В. 283
Сочилина А.В. 223
Стадник А.В. 260
Статник Е.С. 309
Степанова К.В. 160
Степанова Т.В. 180
Столяров В.В. 67
Страумал Б.Б. 40, 93, 263
Суворова В.С. 160
Сударчикова М.А. 86, 100
Сурменев Р.А. 205, 303
Сурменева М.А. 205, 303
Суховей Н.Ю. 297
Суховей Ю.Г. 297
Сухоруков Г.Б.... 174, 180, 199, 212,
 217, 272, 306, 309, 317, 319
Сучков М.Ю. 223
Табачкова Н.Ю. 76, 105
Тагиров Д.В. 46, 85
Тарытина И.Е. 102, 113
Ташкинов М.А. 178
Творогов А.И. 62, 104
Темралиева Д.Р. 102, 105, 111, 113
Теньковцев А.В. 189
Теплякова Т.О. 50, 98
Тетерина А.Ю. 135, 219, 257
Титков В.А. 155
Тихолюк В.О. 133
Токарь А.А. 107
Торлопов М.А. 201
Турчин В.В. 283
Тюбаева П.М. 229, 243, 250
Тюрин В.А. 93
Тютькова Ю.Б. 131
Уклейкин В.Е. 297
Урбан В.И. 120
Усатов Д.А. 266
Успенский С.А. 217
Уткин Д.А. 143, 158, 241
Фадеев Р.С. 135, 219
Фадеева И.В. 131
Фадеева И.С. 135, 219
Фаррахов Р.Г. 44, 48
Федорова И.К. 264
Федотов А.Ю.... 149, 229, 243, 244,
 250
Федотов М.А. 124
Фетисова А.А. 303
Филиппов А.П. 189, 213, 226
Филиппов Я.Ю. 19, 138, 154, 157,
 237
Филиппова А.Д. 240
Фирсов А.В. 287
Фирсова Е.С. 238
Фомин А.С. 141, 145, 146, 238, 268,
 280
Хайткулов А.Р. 96
Хайрутдинов Р.Р. 90
Хайрутдинова Д.Р. 133, 141, 143,
 158, 258, 268, 280
Хасанова А.Р. 108
Хафизова Э.Д. 58, 59, 77, 269
Хейфец М.Л. 114, 170
Хилько Д.Н. 170
Хоминец И.В. 11
Хомутова У.В. 17
Храпова Н.Н. 40
Хрусталёв А.П. 84
Худододова Г.Д. 110
Чвалун С.Н. 8, 168
Чеверикин В.В. 47
Черебыло С.А. 131
Черемных А.И. 252, 288
Черкасов В.В. 53
Черникова Э.Е. 307
Чернозем Р.В. 303
Чернышихин С.В. 305
Чжицинь Ванг 307
Чиканова Е.С. 181, 232
Чистохина Э.И. 111
Чмелюк Н.С. 290

Чойнзонов Е.Л.	264	Шишкиунова М.А.	63
Чувикина М.С.	293	Шлапакова Л.Е.	205, 303
Чэнь А.	209	Штанский Д.В. ...	16, 172, 181, 198, 232
Шабатина Т.И.	260	Шуленков А.А.	312
Шайсултанов Д.Г.	93	Щекин В.С.	77, 269
Шаркеев Ю.П.	12, 234	Щербаков И.М.	19, 237
Шарко А.А.	86	Щетинин И.В.	76, 105, 140
Шереметьев В.А.	47, 62, 94, 104	Эрлих Т. В.	207
Шилягина Н.Ю.	298	Юнусов М.Б.	187
Шинкарева М.В.	222, 286	Юсупов В.С.	53
Шишковский И.В.	305		

СОДЕРЖАНИЕ

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ.....	7
СИНТЕТИЧЕСКИЕ ИЛИ ПРИРОДНЫЕ ПОЛИМЕРЫ? ЗА И ПРОТИВ Чвалун С.Н.....	8
НАНОСТРУКТУРНЫЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ БИОМАТЕРИАЛЫ ДЛЯ МЕДИЦИНСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ Валиев Р.З.....	9
ГЕНАКТИВИРОВАННЫЕ КОСТНОПЛАСТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ОКТАКАЛЬЦИЕВОГО ФОСФАТА В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ И КЛИНИЧЕСКОЙ ПРАКТИКЕ Деев Р.В., Бозо И.Я.....	10
СОВРЕМЕННАЯ БОЕВАЯ ПАТОЛОГИЯ КОНЕЧНОСТЕЙ. ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ, ЗАДАЧИ, ПЕРСПЕКТИВЫ Брижсань Л.К., Хоминец И.В., Беседин В.Д., Кукушко Е.А.....	11
КОМПОЗИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ БИОИНЕРТНЫХ ТИТАНОВЫХ И РЕЗОРБИРУЕМЫХ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ И МОНОСЛОЙНЫХ И МУЛЬТИСЛОЙНЫХ БИОПОКРЫТИЙ И ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ДЛЯ ЗАМЕЩЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ КОСТНОЙ ТКАНИ2 Шаркеев Ю.П.....	12
ПРИМЕНЕНИЕ СПЛАВА ZX10 ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ БИОРЕЗОРБИРУЕМЫХ ИМПЛАНТАТОВ. ВЛИЯНИЕ ТМО НА МЕХАНИЧЕСКИЕ И КОРРОЗИОННЫЕ СВОЙСТВА Мерсон Д.Л., Данюк А.В., Мерсон Е.Д., Брилевский А.И.....	14
TRENDS IN BIOMEDICAL MATERIALS. WHERE PHYSICS CAN HELP Sukhorukov G.B.....	15
АНТИБАКТЕРИАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ: ИСТОРИЯ, ПРОБЛЕМЫ И ИХ РЕШЕНИЯ, БАКТЕРИЦИДНЫЕ МЕХАНИЗМЫ, ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ Штанский Д.В.....	16
ВЛИЯНИЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ НА ПОВЕРХНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ И РЕГЕНЕРАТИВНОЙ МЕДИЦИНЫ Курзина И.А., Лапуть О.А., Брюзгина А.А., Коржова А.Г., Хомутова У.В.....	17
РЕЗОРБИРУЕМЫЕ КЕРАМИКА И КОМПОЗИТЫ ДЛЯ РЕГЕНЕРАЦИИ КОСТНОЙ ТКАНИ СО СЛОЖНОЙ ВНУТРЕННЕЙ АРХИТЕКТУРОЙ Путляев В.И., Евдокимов П.В., Гаршев А.В., Климашина Е.С., Филиппов Я.Ю., Ефименко А.Ю., Щербаков И.М., Дубров В.Э.....	19
МУЛЬТИЧАСТОТНЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ ПАРАМАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС В ИЗУЧЕНИИ БИОГЕННЫХ И СИНТЕТИЧЕСКИХ ЗАМЕЩЕННЫХ ФОСФАТОВ КАЛЬЦИЯ Гафуров М.Р., Садовникова М.А., Мамин Г.В., Гольдберг М.А., Петракова Н.В., Мальцев С.А., Донская Н.О., Крохичева П.А., Комлев В.С.....	20
INTERNATIONAL ONLINE MEETING.....	22
CALCIUM-MAGNESIUM PHOSPHATE CEMENTS FOR BONE TISSUE REGENERATIO	
Goldberg M.A., Krokhicheva P.A., Khayrutdinova D.R., Fomin A.S., Antonova O.S., Sviridova I.K., Kirsanova V.A., Akhmedova S.A., Sergeeva N.S., Komlev V.S.....	23

GREEN NANOTECH FOR A GREENER PLANET

Barzinjy Azeez Abdullah..... 24

3D PRINTING OF IMPLANTS: NEW ALLOYS, METAMATERIALS, COATINGS AND SURFACE PROPERTY STRUCTURING

Koptyug A.V., Sukhovey Yu.G., Ukleynkin V.E., Kostolomova E.G. 25

NANOCOLLOIDAL GELS BASED ON CELLULOSE NANOCRYSTALS: THE ROLE OF THE NATURE OF NANOPARTICLES AND APPLICATION

Morozova S.M. 27

MAGNETIC NANOPARTICLES IN BIOMEDICINE

Abakumov M.A. 28

BIORESORBABLE MAGNESIUM ALLOYS IS PROMISING MATERIALS FOR MEDICAL PURPOSES

Martynenko N.S., Rybalchenko O.V., Lukyanova E.A., Anisimova N.Yu., Temralieva D.R., Kiselevsky M.V., Dobatkin S.V. 29

POROUS STRUCTURES FOR ADVANCED BIOACTIVE TITANIUM IMPLANTS

Enikeev N.A., Ryzhkin A.A., Kapustin A.V., Gatina S.A., Anisimova N.Y., Kiselevsky M.V. 30

DEFECT ENGINEERING AND RARE-EARTH DOPING IN ZnO AND NiO: A DFT STUDY OF ELECTRONIC STRUCTURE AND BAND GAP MODULATION

Niyazi Bulut, Omer Kaygili, Tankut Ates, Serhat Keser 31

IN SITU FORMED COMPOSITES BASED ON CALCIUM PHOSPHATE AND ZIRCONIA FOR APPLICATIONS IN ORTHOPEDICS

Kannan S. 32

STUDY AND PRODUCTION OF NANOSTRUCTURED NiTi SHAPE MEMORY ALLOYS WITH HIGH LEVEL OF PROPERTIES FOR MEDICAL APPLICATIONS

Komarov V., Karelina R., Cherkasov V., Khmelevskaya I., Andreev V., Yusupov V., Prokoshkin S. 33

LUMINESCENT MATERIALS IN BONE TISSUE SUBSTITUTES

Deyneko D.V. 34

СЕКЦИЯ 1 36

МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ 36

УСТНЫЕ ДОКЛАДЫ 37

ТИТАНОВЫЕ СПЛАВЫ ДЛЯ МЕДИЦИНЫ

Колмаков А.Г., Севостьянов М.А. 37

ПОДХОДЫ К ОПТИМИЗАЦИИ СВОЙСТВ БИОРЕЗОРБИРУЕМЫХ МАГНИЕВЫХ ИМПЛАНТАТОВ

Комиссаров А.А., Баженов В.Е., Плегунова С.В., Ершов Н.А. 38

КЛЕТОЧНАЯ АДГЕЗИЯ И КОЛОНИЗАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ СПЛАВА ВТ6 С НАНЕСЕННЫМИ ЛАЗЕРОМ НАСЕЧКАМИ

Страумал Б.Б., Киселевский М.В., Анисимова Н.Ю., Новрузов К.М., Храпова Н.Н., Горнакова А.С., Давдян Г.С. 40

ОСОБЕННОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ, ПОЛУЧЕННЫХ ЛАЗЕРНОЙ 3D ПЕЧАТЬЮ

Казанцева Н.В. 42

ИССЛЕДОВАНИЯ, РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ВЫВОД НА РЫНОК СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТЫХ ИМПЛАНТАТОВ ИЗ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ДВОЙНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ TiNi

Полетика Т.М., Гирсова С.Л., Кудряшов А.Н., Биттер С.М., Лотков А.И. 43

Содержание

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ И ВНЕДРЕНИЯ В ПРОИЗВОДСТВО БИОСОВМЕСТИМЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ГЛАЗМЕННО-ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ОКСИДИРОВАНИЯ ДЛЯ ДЕНТАЛЬНЫХ ИМПЛАНТАТОВ	
Парфенов Е.В., Фаррахов Р.Г., Аубакирова В.Р., Дюрягин В.С., Парфенова Л.В.....	44
СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ СРЕДНЕЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА TiNbZr С БОРИДНЫМ УПРОЧНЕНИЕМ	
Жеребцов С.В., Озеров М.С., Воропаева Е.С., Тагиров Д.В.	46
КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ИССЛЕДОВАНИЮ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ БИОДЕГРАДИРУЕМОГО СПЛАВА Fe-30Mn-5Si: ОТ РЕОЛОГИИ К РАДИАЛЬНО-СДВИГОВОЙ ПРОКАТКЕ	
Антипина М.А., Кадиров П.О., Жукова Ю.С., Шереметьев В.А., Пустов Ю.С., Коротицкий А.В., Чеверикин В.В., Прокошкин С.Д.	47
БИОМИМЕТИЧЕСКОЕ ПОКРЫТИЕ СПЛАВА Ti-15Mo	
Гатина С.А., Фаррахов Р.Г., Анисимова Н.Ю., Киселевский М.В., Еникеев Н.А.	48
О РОЛИ СТРУКТУРНОЙ НАСЛЕДСТВЕННОСТИ В УПРАВЛЕНИИ ФАЗОВЫМИ ПРЕВРАЩЕНИЯМИ И ФУНКЦИОНАЛЬНО-МЕХАНИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ СТАРЕЮЩЕГО НИКЕЛИДА ТИТАНА	
Рыклина Е.П., Полякова К.А., Мурыгин С.Р., Комаров В.С., Конопацкий А.С., Теплякова Т.О., Андреев В.А., Полетика Т.М., Гирсова С.Л., Пискунова П.А.	50
АНОДИРОВАНИЕ ТИТАНА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ С АНТИБИОТИКОМ	
Веснин В.Р., Скрябин А.С.	51
РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ТРУБ ИЗ СПЛАВОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ НИКЕЛИДА ТИТАНА ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В МЕДИЦИНЕ И ТЕХНИКЕ	
Карелин Р.Д., Комаров В.С., Черкасов В.В., Юсупов В.С., Андреев В.А.	53
БИОМАТЕРИАЛЫ ИЗ НИКЕЛИДА ТИТАНА: ОТ ИССЛЕДОВАНИЙ К ПРАКТИКЕ	
Марченко Е.С., Ковалёва М.А., Байгонакова Г.А.	54
ВЛИЯНИЕ КОМБИНИРОВАННОЙ ИПД ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА МАГНИЕВОГО СПЛАВА Mg-2Zn-2Ga	
Никитина М.А., Кулясова О.Б., Боткин А.В., Баженов В.Е., Комиссаров А.А., Валиев Р.З.	56
КОРРОЗИОННАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ БИОДЕГРАДИРУЕМОГО СПЛАВА Zn-0,5%Ag-0,8%Al ПОСЛЕ РКУП	
Нугаманов Ф.В., Хафизова Э.Д., Абдрахманова Э.Д., Исламгалиев Р.К.	58
ВЛИЯНИЕ РАВНОКАНАЛЬНОГО УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ НА СТРУКТУРНЫЕ, МЕХАНИЧЕСКИЕ И КОРРОЗИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦИНКОВОГО СПЛАВА Zn-4Ag-1Cu	
Поленок М.В., Хафизова Э.Д., Абдрахманова Э.Д., Исламгалиев Р.К.	59
СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СПЛАВА Ti-38Zr-11Nb (ат. %)	
Колмаков А.Г., Сергиенко К.В., Конушкин С.В., Севостьянов М.А.	60
СВЕРХУПРУГИЕ СПЛАВЫ Ti-Zr-Nb ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СЕРИЙНЫХ И ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ОРТОПЕДИЧЕСКИХ ИМПЛАНТАТОВ	
Шереметьев В.А., Лезин В.Д., Мурадян А.А., Творогов А.И., Александровский Э.К., Лукашевич К.Е., Деркач М.А., Прокошкин С.Д., Браиловский В.	62
ПОВЫШЕННАЯ КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ СПЛАВА Mg-1,2Zn-0,6Zr ПОДВЕРГНУТОГО РКУП С УЛЬТРАЗВУКОМ	
Аксенов Д.А., Асфандияров Р.Н., Шишикунова М.А., Рааб А.Г., Сементеева Ю.Р., Аубакирова В.Р.	63

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТЫХ ПРУТКОВ ИЗ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ МЕТОДАМИ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ ДЛЯ МЕДИЦИНСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Боткин А.В., Волкова Е.П., Валиев Р.З.	65
ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ УМЗ ПРУТКОВ ИЗ МАГНИЕВОГО СПЛАВА Mg-1%Zn-0,18%Ca КОМБИНИРОВАННЫМ МЕТОДОМ ЭКСТРУЗИИ И РКУП	
Волкова Е.П., Боткин А.В., Валиев Р.З.	66
ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИИ С ТОКОМ НА МИКРОСТРУКТУРУ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТого БИОМЕДИЦИНСКОГО ТИТАНА GRADE 4	
Корольков О.Е., Столяров В.В.	67
УМЗ СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БИОРЕЗОРБИРУЕМЫХ МАГНИЕВЫХ И ЦИНКОВЫХ СПЛАВОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДАМИ ИПД	
Кулясова О.Б.	68
СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БИОРЕЗОРБИРУЕМЫХ СПЛАВОВ Zn-0.8%Li И Zn-0.8%Li-0.1%Ca	
Сиразеева А.Р., Кулясова О.Б., Парфенов Е.В.	70
МИКРОДУГОВОЕ ОКСИДИРОВАНИЕ ТИТАНА МАРКИ ВТ1-0, СПЛАВОВ ВТ6 И Ti-38Zr-9Nb (ат. %) ДЛЯ МЕДИЦИНСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ	
Михлик С.А., Конушкин С.В., Колмаков А.Г.	71
ВСЕСТОРОННЯЯ ИЗОТЕРМИЧЕСКАЯ КОВКА КАК СПОСОБ ДОСТИЖЕНИЯ ПОВЫШЕННОЙ СТОЙКОСТИ БИОРЕЗОРБИРУЕМОГО СПЛАВА ZX10 К КОРРОЗИОННОМУ РАСТРЕСКИВАНИЮ ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ В ФИЗИОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЕ	
Мерсон Е.Д., Полуянов В.А., Мягких П.Н., Мерсон Д.Л.	73
ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ, ФАЗОВОГО СОСТАВА И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СПЛАВА СИСТЕМЫ Co-Cr-Mo ДЛЯ МЕДИЦИНСКИХ ИМЛАНТАТОВ ПРИ КОМБИНИРОВАННОЙ ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННОЙ ОБРАБОТКЕ	
Скугорев А.В., Гамин Ю.В., Кин Т.Ю., Махмуд Алхаж Али А., Карапаев М.М., Галкин С.П.	74
ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТых БИОДЕГРАДИРУЕМЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ	
Рыбальченко О.В., Анисимова Н.Ю., Рыбальченко Г.В., Мартыненко Н.С., Лукьянова Е.А., Табачкова Н.Ю., Щетинин И.В., Рааб А.Г., Беляков А.Н., Добаткин С.В.	76
ДОКЛИНИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ БИОДЕГРАДИРУЕМЫХ ЦИНКОВЫХ СПЛАВОВ: ОЦЕНКА ТОКСИЧНОСТИ И ОСТЕОИНТЕГРАЦИИ	
Хафизова Э.Д., Биялов А.Р., Галаутдинов М.Ф., Щекин В.С., Заманова Р.А., Поленок М.В., Абдрахманова Э.Д.	77
КОМПЛЕКСНОЕ ОПИСАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА ЧЕРЕЗ СРЕДНИЕ ЛИНЕЙНЫЕ РАЗМЕРЫ ПОР И МЕЖПОРОВЫХ ПЕРЕГОРОДОК	
Никифоров Г.А., Галимзянов Б.Н., Мокшин А.В.	78
ЛАЗЕРНАЯ И ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТЕЙ СПЛАВОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ НА ОСНОВЕ НИКЕЛИДА ТИТАНА	
Слободян М.С., Марков А.Б.	80

Содержание

ОЧИСТКА АДДИТИВНО ПОЛУЧАЕМЫХ ПОРИСТЫХ СТРУКТУР ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ДЛЯ МЕДИЦИНСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ОТ ДЕФЕКТОВ ПЕЧАТИ	
<i>Рыжкин А.А., Еникеев Н.А.</i>	81
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЕФОРМАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ПРЕССОВАНИЕМ НА КОМПЛЕКС ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ БИОРЕЗОРБИРУЕМЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Mg-Zn-Y-Mn	
<i>Ершов Н.А., Баженов В.Е., Плегунова С.В., Комиссаров А.А.</i>	82
ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ОБРАБОТКИ НА ФОРМИРОВАНИЕ СОСТАВА, СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ БИОМЕДИЦИНСКОГО СПЛАВА Mg-Ca-Zn	
<i>Хрусталёв А.П., Марченко Е.С., Жуков И.А.</i>	84
БИОСОВМЕСТИМОТЬ И КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ МЕТАЛЛОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИТОВ TiNbZr, АРМИРОВАННЫХ БОРИДАМИ	
<i>Тагиров Д.В.</i>	85
ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ И БИОСОВМЕСТИМОСТИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА Ti-38Zr-9Nb МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ	
<i>Сударчикова М.А., Шарко А.А., Конушкин С.В., Селезнева И.И., Сергиенко К.В., Морозова Я.А., Насакина Е.О., Каплан М.А., Севостьянов М.А.</i>	86
ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ, МЕХАНИЧЕСКИХ И КОРРОЗИОННЫХ СВОЙСТВ БИОРЕЗОРБИРУЕМЫХ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Mg-Ga-X (x=Zn, Mn)	
<i>Плегунова С.В., Баженов В.Е., Ершов Н.А., Комиссаров А.А.</i>	88
СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ	90
МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫХ ИОНОВ С МЕТАЛЛАМИ	
<i>Андианова Р.Р., Докука В.Н., Скопинцев Д.А., Хайрутдинов Р.Р.</i>	90
МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА Ti-38ZR-11NB ЛЕГИРОВАННОГО СЕРЕБРОМ	
<i>Горбенко А.Д., Жидков В.К., Каплан М.А., Колмаков А.Г., Севостьянова Т.М., Севостьянов М.А.</i>	91
БИОСОВМЕСТИМОСТЬ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВОВ Ti-Mo	
<i>Горнакова А.С., Корнева А.В., Новрузов К.М., Шайсултанов Д.Г., Афоникова Н.С., Анисимова Н.Ю., Странумал Б.Б., Тюрин В.А., Давдян Г.С.</i>	93
НОВЫЕ СВЕРХУПРУГИЕ СПЛАВЫ СИСТЕМЫ Ti-Zr-Nb-Sn	
<i>Гундерова С.Д., Деркач М.А., Шереметьев В.А.</i>	94
СВОЙСТВА БИОРЕЗОРБИРУЕМОГО ЦИНКОВОГО СПЛАВА Zn-0.8%Li-0.1%Mn, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ РКУП-CONFORM	
<i>Кулясова А.Г., Сиразеева А.Р., Кулясова О.Б.</i>	95
ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫЕ ПОКРЫТИЯ НА ТИТАНОВОМ СПЛАВЕ ВТ6: СТРУКТУРА И СВОЙСТВА	
<i>Николаев А.А., Хайтулов А.Р., Рамазанов К.Н.</i>	96
ЭВОЛЮЦИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ, МАРТЕНСИТНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРЯЧЕДЕФОРМИРОВАННОГО НИКЕЛИДА ТИТАНА	
<i>Пискунова П.А., Рыклина Е.П., Полякова К.А., Мурыгин С.Р., Комаров В.С., Конопацкий А.С., Теплякова Т.О., Андреев В.А., Полетика Т.М., Гирсова С.Л.</i>	98

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АДДИТИВНО ПОЛУЧАЕМОГО ПОРИСТОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА ДЛЯ ОРТОПЕДИЧЕСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ Рыжкин А.А., Еникеев Н.А., Мельников Д.С.....	99
ИССЛЕДОВАНИЕ СПЛАВОВ ГРУППЫ Ti-Zr-Nb МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ Сергиенко К.В., Морозова Я.А., Севостьянова Т.М., Конушкин С.В., Каплан М.А., Горбенко А.Д., Сударчикова М.А., Севостьянов М.А., Колмаков А.Г	100
МАГНИЕВЫЕ СПЛАВЫ С РЗМ ДЛЯ МЕДИЦИНСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ Лукьянова Е.А., Мартыненко Н.С., Рыбальченко О.В., Анисимова Н.Ю., Киселевский М.В., Тарытина И.Е., Темралиева Д.Р., Добаткина Т.В., Добаткин С.В	102
РАЗРАБОТКА ПОРИСТЫХ БИОМАТЕРИАЛОВ ИЗ СПЛАВА Ti-6Al-4V С ПОВЫШЕННОЙ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТЬЮ Тверогов А.И., Лезин В.Д., Востриков Н.Ф., Шереметьев В.А.....	104
УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТЫЕ БИОРАЗЛАГАЕМЫЕ СПЛАВЫ Fe-Mn-C-Cu С ТЕРАПЕВТИЧЕСКИМ ЭФФЕКТОМ Темралиева Д.Р., Рыбальченко О.В., Анисимова Н.Ю., Мартыненко Н.С., Рыбальченко Г.В., Лукьянова Е.А., Табачкова Н.Ю., Щетинин И.В., Киселевский М.В., Добаткин С.В	105
ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ СТРУКТУРЫ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И БИОСОВМЕСТИМОСТЬ АУСТЕНИТНЫХ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ Токарь А.А., Рыбальченко О.В., Анисимова Н.Ю., Киселевский М.В., Мартыненко Н.С., Лукьянова Е.А., Просвирнин Д.В., Беляков А.Н., Добаткин С.В	107
ВЛИЯНИЕ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ СТРУКТУРЫ МЕТОДОМ ВСЕСТОРОННЕЙ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ КОВКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЦИНКОВОГО СПЛАВА Zn-0,8%Li Хасанова А.Р., Кулясова О.Б., Астанин В.В.....	108
МИКРОСТРУКТУРА, МЕХАНИЧЕСКАЯ И КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ БИОРАЗЛАГАЕМОГО МАГНИЕВОГО СПЛАВА Mg-Zn-Ca ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ МЕТОДОМ РКУП Худододова Г.Д., Namvarian R., Кулясова О.Б., Исламгалиев Р.К., Валиев Р.З., Ebrahimi R.....	110
ВЛИЯНИЕ РОТАЦИОННОЙ КОВКИ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БИОРЕЗОРБИРУЕМЫХ СПЛАВОВ Zn-1Mg И Zn-1Mg-0,1Mn Мартыненко Н.С., Чистюхина Э.И., Темралиева Д.Р., Рыбальченко О.В., Лукьянова Е.А., Андреев В.А., Добаткин С.В	111
МИКРОСТРУКТУРА И СВОЙСТВА СПЛАВА Mg-Y-Zn-Zr ПОСЛЕ РОТАЦИОННОЙ КОВКИ Лукьянова Е.А., Тарытина И.Е., Слижевская Я.Ю., Мартыненко Н.С., Рыбальченко О.В., Темралиева Д.Р., Добаткина Т.В., Андреев В.А., Добаткин С.В.	113
БЕЗНИКЕЛЕВЫЙ НИЗКОМОДУЛЬНЫЙ ТИТАНОВЫЙ СПЛАВ ДЛЯ ОРТОПЕДИЧЕСКИХ ИМПЛАНТАТОВ, ПОЛУЧАЕМЫХ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ Колмаков А.Г., Севостьянов М.А., Каплан М.А., Конушкин С.В., Хейфец М.Л., Грецкий Н.Л., Губкин С.В	114

Содержание

НОВЫЕ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫЕ СПЛАВЫ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ Co ₃₅ Ni ₅ Cr ₂₀ Fe ₂₀ Mn ₂₀	
Астафурова Е.Г., Астапов Д., Астафуров С.В., Загибалаева Е.А., Лучин А.В.....	116
МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВОВ Ti-40Zr-(10-12)Ta (ат.%)	
Конушкин С.В., Волчихина М.А., Севостьянов М.А., Колмаков А.Г.....	117
ВЛИЯНИЕ СТАРЕНИЯ НА МИКРОСТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БИОМЕДИЦИНСКОГО СПЛАВА Co-28Cr-6Mo ПОСЛЕ РАДИАЛЬНО- СДВИГОВОЙ ПРОКАТКИ	
Кин Т.Ю., Гамин Ю.В., Галкин С.П.....	119
ДЕФОРМАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ СПЛАВА С ЭПФ НА ОСНОВЕ TiNi С ПОКРЫТИЕМ НИТРИДА ТИТАНА ДЛЯ МЕДИЦИНСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ	
Багрец Д.А., Рубаник В.В., Рубаник В.В. мл., Урбан В.И.....	120
БИОСОВМЕСТИМОСТЬ IN VITRO СПЛАВОВ Ti-40Zr-(10-12)Ta ат%	
Морозова Я.А., Волчихина М.А., Конушкин С.В., Севостьянов М.А.	122
УСТОЙЧИВОСТЬ КОЛЛОИДНЫХ РАСТВОРОВ СЕРЕБРА, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ	
Федотов М.А.....	124
СЕКЦИЯ 2	126
КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ.....	126
УСТНЫЕ ДОКЛАДЫ.....	127
БАРОТЕРМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ КАК ФАКТОР СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ZRO ₂ ДЛЯ ЭСТЕТИЧЕСКОЙ ОРТОПЕДИЧЕСКОЙ СТОМАТОЛОГИИ	
Подзорова Л.И., Падалко А.Г., Ильичёва А.А., Пенькова О.И., Михайлина Н.А., Пыров М.С., Сиротинкин В.П.....	127
СВОЙСТВА ГИДРОКСИАПАТИТА С КАТИОННЫМИ ЗАМЕЩЕНИЯМИ	
Быстров В.С., Парамонова Е.В., Авакян Л.А., Макарова С.В., Булина Н.В.....	128
НЕОРГАНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ МЕДИЦИНСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ	
Сафонова Т.В.....	130
МАТРИКСЫ ИЗ ТРИКАЛЬЦИЙФОСФАТА, ПОЛУЧЕННЫЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ	
Фадеева И.В., Новиков М.М., Черебыло С.А., Тютюкова Ю.Б., Дудорова А.А., Осипова Е.Ю.....	131
ЦЕМЕНТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ ФОСФАТ МАГНИЯ - ФОСФАТ КАЛЬЦИЯ, ДОПИРОВАННЫЕ ИОНАМИ ЕВРОПИЯ	
Никишина Е.Е., Тихолок В.О., Хайрутдинова Д.Р., Комлев В.С.....	133
МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ БИОМАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ФОСФАТОВ КАЛЬЦИЯ ДЛЯ РЕГЕНЕРАЦИИ И НЕИНВАЗИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ ЗАБОЛЕВАНИЙ КОСТНОЙ ТКАНИ	
Петракова Н.В., Зобкова Ю.О., Мальцев С.А., Кузнецова П.А., Егоров А.А., Низамутдинов А.С., Пудовкин М.С., Гафуров М.Р., Комлев В.С.....	134
ВЛИЯНИЕ ФАЗОВЫХ И СТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НА БИОИНТЕГРАЦИЮ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ФОСФАТОВ КАЛЬЦИЯ ДЛЯ РЕГЕНЕРАЦИИ КОСТНОЙ ТКАНИ	
Тетерина А.Ю., Смирнов И.В., Минайчев В.В., Смирнова П.В., Фадеев Р.С., Фадеева И.С., Комлев В.С.....	135

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БИОКЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ ДВОЙНЫХ СИЛИКАТОВ И ФОСФАТОВ НАТРИЯ-КАЛЬЦИЯ	
Каймонов М.Р.....	137
ОРТОФОСФАТ МАГНИЯ ДЛЯ БИОМЕДИЦИНСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ: ОСОБЕННОСТИ РАСТВОРНОГО И ТВЕРДОФАЗНОГО СИНТЕЗОВ, МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И 3D ПЕЧАТЬ	
Климашина Е.С., Пупанова А.К., Егорова В.А., Мурашко А.М., Филиппов Я.Ю., Евдокимов П.В., Путляев В.И.	138
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЦИНКА И ХРОМА НА СТРУКТУРУ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ЛЕГИРОВАННЫХ ФЕРРИТОВ ДЛЯ БИОМЕДИЦИНСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ	
Ковалев А.Д., Низамов Т.Р., Щетинин И.В.	140
МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ФАЗЫ ВИТЛОКИТ, СОДЕРЖАЩИЕ ИОНЫ НЕОДИМА, ДЛЯ БИОВИЗУАЛИЗАЦИИ	
Хайрутдинова Д.Р., Гольдберг М.А., Дейнеко Д.В., Крохичева П.А., Фомин А.С., Антонова О.С., Комлев В.С.....	141
ОСОБЕННОСТИ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ И ОКСИДА АЛЮМИНИЯ	
Оболкина Т.О., Смирнов С.В., Гольдберг М.А., Уткин Д.А., Хайрутдинова Д.Р., Антонова С.О., Сафонов С.О., Ахмедова С.А., Кирсанова В.А., Свиридова И.К., Сергеева Н.С., Комлев В.С.	143
СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ	145
ПОЛУЧЕНИЕ 3D КЕРАМИЧЕСКИХ ТРИКАЛЬЦИЙФОСФАТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ МЕТОДОМ DLP ДЛЯ МЕДИЦИНСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ	
Антонова О.С., Оболкина Т.О., Гольдберг М.А., Коновалов А.А., Фомин А.С., Комлев В.С.....	145
СИНТЕЗ И СВОЙСТВА ЖЕЛЕЗОЗАМЕЩЕННОГО ГИДРОКСИАПАТИТА	
Донская Н.О., Гольдберг М.А., Фомин А.С., Антонова О.С., Леонов А.В., Коновалов А.А., Комлев В.С.....	146
РЕЗОРБИРУЕМАЯ КЕРАМИКА НА ОСНОВЕ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ ФОСФАТОВ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ КОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ	
Леонтьев Н.В., Погольская Д.Д., Евдокимов П.В., Путляев В.И.	148
ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ГРАНУЛИРОВАНИЯ ФОСФАТОВ КАЛЬЦИЯ	
Лобжанидзе П.В., Федотов А.Ю., Егоров А.А., Комлев В.С.....	149
ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ПОРОШКОВ $\text{Ca}_{3-2x}(\text{PO}_4)_2\text{-Na}_x\text{Ln}_x$ ($\text{Ln}=\text{Yb}, \text{Er}$)	
Мальцев С.А., Петракова Н.В., Комлев В.С.....	151
ПОЛУЧЕНИЕ БИОАКТИВНОГО МЕЗОПОРИСТОГО СТЕКЛА СОСТАВА CaO-SiO_2 и $\text{CaO-SiO}_2\text{-ZnO}$ МЕТОДОМ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ СИНТЕЗА	
Михайличенко А.А., Лыткина Д.Н.....	152
РЕЗОРБИРУЕМЫЕ ОСТЕОКОНДУКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ БИФАЗНОЙ КЕРАМИКИ В СИСТЕМЕ $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2\text{-Ca}_{2.5}\text{Na}(\text{PO}_4)_2$	
Мурашко А.М., Филиппов Я.Ю., Дьячкова У.Д., Ефименко А.Ю., Евдокимов П.В., Путляев В.И.	154
СИНТЕЗ И СВОЙСТВА СМЕШАННЫХ КАЛЬЦИЙ-СТРОНЦИЙ ФОСФАТОВ, ДОПИРОВАННЫХ Zn^{2+} И Eu^{3+}	
Никифоров И.В., Жуковская Е.С., Титков В.А., Дейнеко Д.В.	155

Содержание

БИОРЕЗОРБИРУЕМАЯ МАКРОПОРИСТАЯ КЕРАМИКА НА ОСНОВЕ ФОСФАТОВ МАГНИЯ ДЛЯ МЕДИЦИНСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ <i>Рассолова Ю.Р., Мурашко А.М., Филиппов Я.Ю., Климашина Е.С., Путляев В.И.</i> ...	157
ПОРИСТЫЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ ДЛЯ МЕДИЦИНСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ <i>Уткин Д.А., Хайрутдинова Д.Р., Оболкина Т.О., Комлев В.С.</i>	158
РАЗРАБОТКА НАНОЧАСТИЦ КАРБОНИТРИДА ЦИРКОНИЯ С РАЗЛИЧНЫМ СООТНОШЕНИЕМ С/Н ДЛЯ НЕВОСПАЛИТЕЛЬНОЙ ФОТОТЕРМИЧЕСКОЙ ТЕРАПИИ РАКА <i>Степанова К.В., Суворова В.С., Московских Д.О.</i>	160
ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК TZP - КЕРАМИКИ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ ПУТЬМ БАРОТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ <i>Гречишников Н.В., Ильчёва А.А., Михайлова Н.А., Падалко А.Г., Пенькова О.И., Подзорова Л.И., Пыров М.С.</i>	161
СИНТЕЗ КАРБОНАТ-ГИДРОКСИАПАТИТА МЕХАНОХИМИЧЕСКИМ СПОСОБОМ <i>Макарова С.В., Булина Н.В.</i>	162
СЕКЦИЯ 3	165
ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ	165
УСТНЫЕ ДОКЛАДЫ.....	166
МОДИФИКАЦИИ ПОЛИЭЛЕКТРОЛИТОВ ДЛЯ БИОСЕЛЕКТИВНОЙ РЕГУЛЯЦИИ МИКРОБИЦИДНЫХ И ПРОТИВОВИРУСНЫХ ЭФФЕКТОВ <i>Сербин А.В., Алиханова О.Л., Больщиков Б.Д., Сивов Н.А.</i>	166
БИОДЕГРАДИРУЕМЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЙ МЕДИЦИНСКОЙ 3D-ПЕЧАТИ <i>Седуш Н.Г., Крупин А.Е., Калинин К.Т., Королев С.В., Чвалун С.Н.</i>	168
РЫБНЫЙ ЖЕЛАТИН, МОДИФИЦИРОВАННЫЙ АГАРОМ, КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЙ ГЕЛЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДЛЯ КАПСУЛИРОВАНИЯ <i>Воронько Н.Г., Кузина Т.Д., Кучина Ю.А., Зуев Ю.Ф., Деркач С.Р.</i>	169
ПОСТОБРАБОТКА ПОЛИМЕРНЫХ БИОМАТЕРИАЛОВ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ, ПОЛУЧЕННЫХ В АДДИТИВНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ <i>Гупта В., Сингх Дж., Мудгал Д., Хейфец М.Л., Гречкий Н.Л., Хилько Д.Н., Губкин С.В.</i>	170
ИННОВАЦИОННЫЕ ВОЛОКОННЫЕ ПОВЯЗКИ ПКЛ, НЧ СИО И БАНЕОЦИНА ДЛЯ ЛЕЧЕНИЯ РАНЕВЫХ ИНФЕКЦИЙ <i>Котякова К.Ю., Игнатов С.Г., Каршиева С.Ш., Штанский Д.В.</i>	172
САМОФОРМИРУЕМЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ ЧАСТИЦЫ НА СТУРКТУРИРОВАННЫХ ТЕМПЛАТАХ С НИЗКОЙ ЭНЕРГИЕЙ ПОВЕРХНОСТИ <i>Абдурашитов А.С., Прошин П.И., Сухоруков Г.Б.</i>	174
БИОМАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ СИНТЕТИЧЕСКИХ ПЕПТИДОВ ДЛЯ РЕГЕНЕРАЦИИ НЕРВОВ <i>Даиоб К., Зухайб М., Абдуллин Т.И.</i>	175
БИОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИГИДРОКСИАЛКАНОАТОВ, ПРОИЗВЕДЕННЫХ МЕТОДОМ FDM-ФОРМОВАНИЯ, ДЛЯ БИОИНЖЕНЕРИИ ТВЕРДЫХ ТКАНЕЙ <i>Кистерский К.А.</i>	177

УПРУГОВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ОБРАЗЦОВ ИЗ ПОЛИЛАКТИДА: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ СООТНОШЕНИЙ	
Келлер И.Э., Виндокуров И.В., Адамов А.А., Еленская Н.В., Ташкинов М.А.	178
МИКРОКАМЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ЛОКАЛЬНОЙ КОРРЕКЦИИ ХИМИЧЕСКОГО МИКРООКРУЖЕНИЯ В ОРГАНИЗМЕ	
Ленгерт Е.В., Степанова Т.В., Гуслякова О.И., Савкина А.А., Приходженко Е.С., Иванов А.Н., Сухоруков Г.Б., Ермаков А.В.	180
ГИДРОГЕЛИ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ РАН НА ОСНОВЕ ПОЛИСАХАРИДОВ, СЩИТЫХ ЛИМОННОЙ КИСЛОТОЙ	
Чиканова Е.С., Короткова А.В., Котякова К.Ю., Макарец Ю.А., Штанский Д.В.	181
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРИСТОГО СКАФФОЛДА ИЗ PLA ОТ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ КОНСТРУКЦИИ	
Ильина Е.Э., Королёв П.В., Маслов Л.Б.	183
КОМБИНИРОВАННЫЙ ПОДХОД К ПОВЕРХНОСТНОМУ МОДИФИЦИРОВАНИЮ СКАФФОЛДОВ ПОЛИЛАКТИДА ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ БИОСОВМЕСТИМОСТИ	
Брюзгина А.А., Лапутъ О.А., Зуза Д.А., Курзина И.А.	184
РАЗРАБОТКА РАНОЗАЖИВЛЯЮЩИХ КОАКСИАЛЬНЫХ ПОВЯЗОК С АНТИБАКТЕРИАЛЬНЫМ ЭФФЕКТОМ НА ОСНОВЕ ПОЛИКАПРОЛАКТОНА И КОЛЛАГЕНА	
Гаспарян К.Г., Котякова К.Ю.	186
МГНОВЕННОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОЛЕКУЛ	
Юнусов М.Б.	187
ТЕРМОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЗВЕЗДООБРАЗНЫЕ ПОЛИ-2-АЛКИЛ-2-ОКСАЗИНЫ: СТРУКТУРА, САМООРГАНИЗАЦИЯ В РАСТВОРАХ И КОМПЛЕКСООБРАЗОВАНИЕ С КУРКУМИНОМ	
Кирилл Т.Ю., Козина Н.Д., Родченко С.В., Теньковцев А.В., Филиппов А.П.	189
БИОЧЕРНИЛА НА ОСНОВЕ ЖЕЛАТИНА И АЛЬГИНАТА: ПОЛУЧЕНИЕ, ПЕЧАТЬ И ФИКСАЦИЯ 3D-КОНСТРУКЦИИ	
Дарвииш Д.М., Колтина Е.П.	190
КРИОГЕЛЬ КАРБОКСИЭТИЛХИТОЗАНА, СЩИТОГО ГЛУТАРОВЫМ АЛЬДЕГИДОМ: ОТ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ К КОММЕРЧЕСКОМУ РЕШЕНИЮ	
Дранников А.А., Пронченко А.А., Дубовская П.И., Савенко М.Е., Веретенникова Е.А., Пестов А.В., Литвинова Е.А.	192
РЕДОКС-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ НАНОЧАСТИЦЫ НА ОСНОВЕ ТРИТИОЦИАНУРОВОЙ КИСЛОТЫ ДЛЯ ПРЕОДОЛЕНИЯ ЛЕКАРСТВЕННОЙ РЕЗИСТЕНТНОСТИ ОПУХОЛЕВЫХ КЛЕТОК	
Кополева Е.А., Пельтек А., Зюзин М.В.	193
ТРЕХКОМПОНЕНТНЫЕ ЛАКТАТНЫЕ БИОСЕНСОРЫ ДЛЯ АНАЛИЗА БИОЛОГИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ	
Никитина В.Н., Соловьев И.Д., Вохмянина Д.В., Карякин А.А.	195
ОЦЕНКА ЦИТОСОВМЕСТИМОСТИ ВОЛОКНИСТЫХ СКАФФОЛДОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА	
Коржова А.Г., Лапутъ О.А., Курзина И.А.	196

Содержание

РАЗРАБОТКА ВОЛОКОННЫХ РАНЕВЫХ ПОВЯЗОК НА ОСНОВЕ ПОЛИКАПРОЛАКТОНА С БАКТЕРИЦИДНЫМИ СВОЙСТВАМИ	
<i>Макарец Ю.А., Котякова К.Ю., Штанский Д.В.</i>	198
БИОСОВМЕСТИМЫЕ АГАР-АЛЬГИНАТНЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ НЕЙРОРЕАБИЛИТАЦИИ И НЕЙРОИМПЛАНТАЦИИ	
<i>Порошин С.Г., Соколов А.С., Сухоруков Г.Б.</i>	199
БИОФУНКЦИОНАЛИЗАЦИЯ АЛЬГИНАТНОГО ГИДРОГЕЛЯ НАНОКРИСТАЛЛАМИ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ	
<i>Марков П.А., Еремин П.С., Торлопов М.А., Мартаков И.С., Михайлов В.И.</i>	201
TARGETED DELIVERY OF MATERIALS BASED ON BIOCOMPATIBLE POLYMERS USING ENDOVASCULAR TECHNIQUES	
<i>Sindeeva O.A., Guslyakova O.I., Terentyeva D.A., Sain A.Yu., Kazakova L.I., Sukhorukov G.B.</i>	202
КОНТРОЛИРУЕМАЯ ДЕГРАДАЦИЯ ФОСФАТОВ КАЛЬЦИЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ МОЛОЧНОЙ КИСЛОТЫ	
<i>Проваркина А.А., Голованова О.А.</i>	203
МАГНИТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ПЬЕЗОПОЛИМЕРНЫЕ МАТРИЦЫ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ КОСТИ: КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ И ОСТЕОГЕННЫХ СВОЙСТВ	
<i>Шлапакова Л.Е., Сурменева М.А., Сурменев Р.А.</i>	205
СИСТЕМА ДЛЯ ФИКСАЦИИ МЕЛКИХ ЛАБОРАТОРНЫХ ЖИВОТНЫХ С МЕМБРАННЫМ ПОКРЫТИЕМ И МОНИТОРИНГОМ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ «АНТИКУСЬ»	
<i>Эрлих Т. В.</i>	207
СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ	209
ФОРМОВОЧНЫЕ КОМПОЗИЦИИ НА ОСНОВЕ АЛЬГИНАТА НАТРИЯ И ГИБРИДНОГО НАПОЛНИТЕЛЯ ПРИРОДНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ	
<i>Ахмедов М.М., Чэнь А., Воробьев В.И., Сафонова Т.В., Кильдеева Н.Р.</i>	209
ПОЛИМЕРНЫЕ АДГЕЗИВЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИЭТИЛЕНГЛИКОЛЬ ДИАКРИЛАТА ДЛЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ	
<i>Битанова В.А., Голубчиков Д.О., Леонтьев Н.В., Мурашко А.М., Евдокимов П.В., Путляев В.И.</i>	210
ИЗУЧЕНИЕ ГЕТЕРОГЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ КОНТРОЛИРУЕМОГО ВЫСВОБОЖДЕНИЯ ТЕРАПЕВТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ	
<i>Ибрагимов А.Э., Абдурашитов А.С., Прошин П.И., Сухоруков Г.Б.</i>	212
СИНТЕЗ ЗВЕЗДООБРАЗНЫХ ПОЛИ-2-АЛКИЛ-5,6-ДИГИДРО-4Н-ОКСАЗИНОВ С АЗАЦИКЛОФАНОВЫМ ЯДРОМ	
<i>Козина Н.Д., Кирилэ Т.Ю., Филиппов А.П.</i>	213
НОВЫЕ СТОМАТОЛОГИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ БИОПОЛИМЕРНЫХ СМЕСЕЙ АГАР-ЖЕЛАТИН	
<i>Кузина Т.Д., Глухарев А.Ю., Воронько Н.Г.</i>	214
РЕГЕНЕРАЦИЯ В МОДЕЛИ ПОЛНОСЛОЙНОЙ РАНЫ МЫШИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ КСЕНОГЕННЫХ РЕГУЛЯТОРНЫХ Т-КЛЕТОК В ФИБРИНОВОМ ГЕЛЕ В КАЧЕСТВЕ НОСИТЕЛЯ	
<i>Пермякова А.А., Кузьменко Е.В., Ржанова Л.А., Рябинин А.А., Воротеляк Е.А., Моргун Е.И.</i>	216
БИОРАЗЛАГАЕМЫЕ НАНОНОСИТЕЛИ ДЛЯ НЕЙТРОНОЗАХВАТНОЙ ТЕРАПИИ ОНКОЛОГИЧЕСКИХ ЗАБОЛЕВАНИЙ	
<i>Поцелеев В.В., Сухоруков Г.Б., Успенский С.А.</i>	217

СРАВНИТЕЛЬНОЕ IN VIVO ИССЛЕДОВАНИЕ БИОСОВМЕСТИМОСТИ КСЕНОГЕННЫХ КОЛЛАГЕНОВЫХ МАТРИЦ ДЛЯ СОЗДАНИЯ БАРЬЕРНЫХ МЕМБРАН В ТЕХНИКАХ НАПРАВЛЕННОЙ РЕГЕНЕРАЦИИ КОСТНОЙ ТКАНИ Пятина К.В., Фадеева И.С., Тетерина А.Ю., Минайчев В.В., Смирнов И.В., Смирнова П.В., Фадеев Р.С., Звягина А.И., Комлев В.С.....	219
СТРУКТУРНО-КОНФОРМАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА МОЛЕКУЛЯРНЫХ ЩЕТОК НА ОСНОВЕ ОЛИГООКСИАЛКИЛЕНОВЫХ МОНОМЕРОВ Симонова М.А., Садков Д.Ю., Каморин Д.М., Симагин А.С.....	220
МЕТОДИКА ПОЛУЧЕНИЯ БИОДЕГРАДИРУЕМОГО ПОЛИМЕРНОГО ИМПЛАНТА ДЛЯ ПОДКОЖНОЙ ДОСТАВКИ ГЕМОСТИМУЛЯТОРА Шинкарева М.В., Анисимова Н.Ю., Сенатов Ф.С., Киселевский М.В.	222
МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГИДРОГЕЛЕЙ ИЗ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ГИАЛУРОНОВОЙ КИСЛОТЫ Сучков М.Ю., Кузяева В.И., Сочилина А.В., Акасов Р.А., Егорова Т.В., Генералова А.Н.	223
ЦИТОТОКСИЧНОСТЬ ЛИПОСОМАЛЬНЫХ ФОРМ ФОСФОНИЕВЫХ КОНЮГАТОВ БЕТУЛИНОВОЙ КИСЛОТЫ Салихова Т.И., Даиоб К., Абдуллин Т.И., Салахиеva Д.В., Паширова Т.Н., Немтарёв А.В., Миронов В.Ф.....	225
ВЛИЯНИЕ СОСТАВА МОЛЕКУЛЯРНЫХ ЩЕТОК НА ОСНОВЕ Н-ИЗОПРОПИЛАКРИЛАМИДА С МАКРОМОНОМЕРАМИ ПОЛИ-D,L-ЛАКТИДА НА ПРОЦЕССЫ САМООРГАНИЗАЦИИ В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ Кирилэ Т.Ю., Филиппов А.П.	226
СЕКЦИЯ 4	228
КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ	228
УСТНЫЕ ДОКЛАДЫ.....	229
МЕМБРАНЫ ИЗ ПОЛИ(3-ГИДРОКСИБУТИРАТА)/ФОСФАТОВ КАЛЬЦИЯ ДЛЯ БИОМЕДИЦИНСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ Федотов А.Ю., Тюбаева П.М., Егоров А.А., Баранов О.В., Варьян И.А., Романов Р.Р., Лобжанидзе П.В., Мерзликин В.А., Комлев В.С.	229
ГИБРИДНЫЕ НАНОЧАСТИЦЫ Ta_2O_5/Au : РАДИАЦИОННО-ХИМИЧЕСКИЙ ПОДХОД К СОЗДАНИЮ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ Кошевая Е.Д., Маслов Д.Д.	230
СИНТЕЗ И ХАРАКТЕРИСТИКА СТРОНЦИЙ/СЕРЕБРО-СОЗАМЕЩЕННОГО ГИДРОКСИАПАТИТА ДЛЯ СОЗДАНИЯ ОСТЕОКОНДУКТИВНЫХ И АНТИБАКТЕРИАЛЬНЫХ ГРАНУЛ Кучеряев К.А., Чиканова Е.С., Короткова А.В., Поляголова В.В., Штанский Д.В. ..	232
КОРРОЗИОННАЯ И МЕХАНИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ МАГНИЕВЫХ МОДЕЛЬНЫХ ИМПЛАНТАТОВ С МОДИФИЦИРОВАННЫМИ ПОВЕРХНОСТЬЮ И ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРОЙ Просолов К.А., Лугинин Н.А., Кашин А.Д., Ерошенко А.Ю., Седельникова М.Б., Шаркеев Ю.П.	234
КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ, ПОЛИМЕРНАЯ ИНФИЛЬРАЦИЯ И СТЕКЛОИОНОМЕРНЫЙ ЦЕМЕНТ: СРАВНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРИ EX VIVO СТОМАТОЛОГИЧЕСКОМ ВМЕШАТЕЛЬСТВЕ Садырин Е.В., Волков С.С., Антипов П.Е., Васильев А.С.	235

Содержание

СТРУКТУРНО-НЕОДНОРОДНЫЕ ИМПЛАНТАТЫ НА ОСНОВЕ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ РЕГЕНЕРАЦИИ КОСТНОЙ ТКАНИ	
Евдокимов П.В., Филиппов Я.Ю., Климашина Е.С., Гаршев А.В., Ефименко А.Ю., Щербаков И.М., Дубров В.Э., Путляев В.И.....	237
ФОРМИРОВАНИЕ СВОЙСТВ ПОРОШКОВ В СИСТЕМЕ CaO-MgO-P ₂ O ₅ ПРИ СООТНОШЕНИИ (Ca+Mg)/P = 1,5, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ПЕЧАТИ МЕТОДОМ СВЕТОВОЙ СВЕТОДИОДНОЙ ПРОЕКЦИИ	
Фомин А.С., Крохичева П.А., Фирсова Е.С., Антонова О.С., Каплан М.А., Коновалов А.А., Гольдберг М.А., Баринов С.М., Комлев В.С	238
БИОСОВМЕСТИМЫЕ ЦИТРАТ-СТАБИЛИЗИРОВАННЫЕ НАНОЧАСТИЦЫ ДИОКСИДА ЦЕРИЯ: АНАЛИЗ ФЕРМЕНТОПОДОБНОЙ АКТИВНОСТИ КОЛОРИМЕТРИЧЕСКИМ И ХЕМИЛЮМИНЕСЦЕНТНЫМ МЕТОДАМИ	
Созарукова М.М., Попков М.А., Филиппова А.Д., Баранчиков А.Е., Иванов В.К.....	240
ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК Al ₂ O ₃ , SiO ₂ И Fe ₂ O ₃ НА КЕРАМИКУ YSZ	
Смирнов С.В., Оболкина Т.О., Уткин Д.А., Падалко А.Г., Пыров М.С.....	241
СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ	243
РАЗРАБОТКА НЕТКАННЫХ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ В СИСТЕМЕ ПОЛИ-3-ГИДРОКСИБУТИРАТ-ТРИАЛЦИЙФОСФАТ	
Баранов О.В., Федотов А.Ю., Тюбаева П.М., Гаспарян К.Г., Лобжанидзе П.В., Егоров А.А., Сиротинкин В.П., Ольхов А.А., Комлев В.С	243
РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ГЕЛЕВОЙ 3D ПЕЧАТИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННЫХ КОСТНЫХ ИМПЛАНТАТОВ	
Генералов Е.М., Егоров А.А., Лобжанидзе П., Федотов А.Ю., Комлев В.С.....	244
ПОРИСТЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ КОСТНЫХ ТКАНЕЙ НА ОСНОВЕ БИОСТЕКЛА SiO ₂ -CaO	
Лыткина Д.Н., Садыков Р.Т., Курзина И.А.....	246
СИНТЕЗ ГИБРИДНЫХ НАНОЧАСТИЦ Ta ₂ O ₅ /Au И ИЗУЧЕНИЕ ИХ РЕНТГЕНОКОНТРАСТНЫХ СВОЙСТВ	
Маслов Д.Д., Кошевая Е.Д	248
ОСТЕОКОНДУКТИВНЫЕ КОМПОЗИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИКАПРОЛАКТОНА ДЛЯ ИНЖЕНЕРИИ КОСТНОЙ ТКАНИ	
Самофалов П.С., Голубчиков Д.О., Евдокимов П.В., Путляев В.И	249
ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ОКАЗЫВАЮЩИХ ВЛИЯНИЕ НА СКОРОСТЬ ДЕГРАДАЦИИ ПОЛИМЕРНОЙ МАТРИЦЫ, СОЗДАННОЙ НА ОСНОВЕ ПОЛИ-3-ГИДРОКСИБУТИРАТА, С ЦЕЛЬЮ КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССОВ БИОРЕЗОРБИЦИИ В ЖИВОМ ОРГАНИЗМЕ	
Тюбаева П.М., Варьян И.А., Романов Р.Р., Федотов А.Ю., Комлев В.С., Мерзликин В.А	250
СТРУКТУРА И ЭФФЕКТ ПАМЯТИ ФОРМЫ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИЛАКТИДА, ПЕРСПЕКТИВНЫХ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ОРТОПЕДИИ	
Черемных А.И., Ковалева П.А., Качалина П.М., Анисимова Н.Ю	252
МЕЧЕННЫЕ РАДИОНУКЛИДАМИ МАТРИЦЫ НА ОСНОВЕ ГИАЛУРОНОВОЙ КИСЛОТЫ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ ЗАБОЛЕВАНИЙ	
Косова А.Д., Снетков П.П., Морозкина С.Н	254

ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ СИСТЕМЫ ZrO ₂ -Al ₂ O ₃ С ПОНИЖЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ СПЕКАНИЯ	
Левин Д.О., Носикова Л.А., Оболкина Т.О.....	255
НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ СИНТЕЗ БАРИЙ-ЗАМЕЩЕННОГО ДИКАЛЬЦИЙФОСФАТ ДИГИДРата ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В РЕГЕНЕРАТИВНОЙ МЕДИЦИНЕ	
Смирнова П.В., Смирнов И.В., Тетерина А.Ю., Комлев В.С.....	257
ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ПОЛУЧЕНИЯ НА СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННОГО КЕРАМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА, НА ОСНОВЕ ZrO ₂ , СТАБИЛИЗИРОВАННОГО ОКСИДАМИ РЗЭ	
Носикова Л.А., Серебрякова К.О., Левин Д.О., Хайрутдинова Д.Р.....	258
ГИБРИДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ СЕРЕБРА: ОСОБЕННОСТИ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ	
Громова Я.А., Стадник А.В., Шабатина Т.И.....	260
СЕКЦИЯ 5	262
ДОКЛИНИЧЕСКИЕ И КЛИНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ	
МЕДИЦИНСКИХ МАТЕРИАЛОВ.....	262
УСТНЫЕ ДОКЛАДЫ.....	263
БИОИНЖЕНЕРНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ДЛЯ ЛОКАЛЬНОЙ ИММУНОТЕРАПИИ ЗЛОКАЧЕСТВЕННЫХ НОВООБРАЗОВАНИЙ	
Киселевский М.В., Анисимова Н.Ю., Страумал Б.Б., Новрузов К.М., Мартыненко Н.С., Рыбальченко О.В.	263
ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ РЕКОНСТРУКТИВНЫЕ ИМПЛАНТАТЫ В УСТРАНЕНИИ ДЕФЕКТОВ ЧЕЛЮСТНО-ЛИЦЕВОЙ ОБЛАСТИ У ОНКОЛОГИЧЕСКИХ БОЛЬНЫХ	
Кульбакин Д.Е., Чойнзонов Е.Л., Больбасов Е.Н., Воробьев А.О., Марченко Е.С., Буякова С.П., Федорова И.К., Азовская Д.Ю.	264
ДОКЛИНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ФУНКЦИОНАЛИЗИРОВАННЫХ ПОРИСТЫХ ИМПЛАНТАТОВ, ПОЛУЧАЕМЫХ МЕТОДАМИ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА	
Каралкин П.А., Кудрин К.Г., Святославов Д.С., Усатов Д.А., Ахмедова С.А., Кирсанова В.А., Свирилова И.К., Сергеева Н.С., Решетов И.В.	266
БИОМЕДИЦИНСКИЕ ДОКЛИНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ НОВЫХ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ЦЕМЕНТОВ ДЛЯ РЕКОНСТРУКЦИИ КОСТНОЙ ТКАНИ	
Сергеева Н.С., Свирилова И.К., Кирсанова В.А., Ахмедова С.А., Карапкин П.А., Гольдберг М.А., Крохичева П.А., Хайрутдинова Д.Р., Фомин А.С., Комлев В.С., Каприн А.Д.	268
ВЛИЯНИЕ ЦИНКОВОГО СПЛАВА Zn-1% Mg-1%Fe НА ОРГАНИЗМ КРОЛИКОВ ПРИ КРАТКОВРЕМЕННОМ И ДЛИТЕЛЬНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ	
Абдрахманова Э.Д., Хафизова Э.Д., Билялов А.Р., Галаутдинов М.Ф., Щекин В.С., Поленок М.В.	269
ПРИЖИЗНЕННАЯ ОЦЕНКА БИОДЕГРАДАЦИИ МЕМБРАН ДЛЯ НАПРАВЛЕННОЙ КОСТНОЙ РЕГЕНЕРАЦИИ ИЗ МАГНИЕВОГО СПЛАВА Mg-2Zn-2Ga В ЭКСПЕРИМЕНТЕ НА ЛАБОРАТОРНЫХ КРОЛИКАХ	
Кунижев К.А., Редько Н.А., Дробышев А.Ю., Невская Е.Е., Комиссаров А.А., Баженов В.Е., Плегунова С.В.	271

Содержание

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ТАРГЕТНОЙ ДОСТАВКИ ПРЕПАРАТОВ В ОРТОТОПИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МЕТАСТАЗИРУЮЩЕГО РАКА ПОЧКИ <i>Петрова Е.А., Саин А.Ю., Куликов О.А., Сухоруков Г.Б., Синдеева О.А.</i>	272
РАЗРАБОТКА ИННОВАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРИМЕНЕНИЯ НИЗКОИНТЕНСИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ УСИЛЕНИЯ РЕГЕНЕРАТОРНОГО ПОТЕНЦИАЛА СТРОМАЛЬНО-ВАСКУЛЯРНОЙ ФРАКЦИИ ЖИРОВОЙ ТКАНИ <i>Еремин П.С., Марков П.А., Рожкова Е.А.</i>	274
КОСТНАЯ ПЛАСТИКА ГЕН-АКТИВИРОВАННЫМ ОСТЕОПЛАСТИЧЕСКИМ МАТЕРИАЛОМ НА ОСНОВЕ ОКТАКАЛЬЦИЕВОГО ФОСФАТА <i>Пресняков Е.В., Далгатов М.Г., Бозо И.Я., Деев Р.В., Комлев В.С.</i>	275
СИНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ПРЕПАРАТОВ РАЗЛИЧНОЙ ПРИРОДЫ, ВКЛЮЧЕННЫХ В ГИБРИДНЫЕ ЧАСТИЦЫ НА ОСНОВЕ ФОСФАТА КАЛЬЦИЯ И ХИТОЗАНА, НА СНИЖЕНИЕ ВНУТРИГЛАЗНОГО ДАВЛЕНИЯ <i>Попова Е.В.</i>	277
ПОРИСТЫЕ ТИТАНОВЫЕ СКАФФОЛДЫ КАК ПЛАТФОРМА ДЛЯ ЛОКАЛЬНОЙ КЛЕТОЧНОЙ ИММУНОТЕРАПИИ ОПУХОЛЕЙ <i>Анисимова Н.Ю., Еникеев Н.А., Гатина С.А., Рыжкин А.А., Киселевский М.В.</i>	279
ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ РЕАКЦИОННО-СВЯЗАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ФОСФАТОВ КАЛЬЦИЯ И МАГНИЯ В РЕКОНСТРУКТИВНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ ХИРУРГИИ <i>Крохичева П.А., Свиридова И.К., Гольдберг М.А., Кирсанова В.А., Хайрутдинова Д.Р., Ахмедова С.А., Фомин А.С., Сергеева Н.С., Комлев В.С.</i>	280
ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ШУМОВАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ БИОРЕЗОРБИЦИИ МАГНИЕВЫХ ИМПЛАНТОВ IN VIVO <i>Макринский К.И., Клюев А.Л., Мартыненко Н.С., Анисимова Н.Ю.</i>	282
ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИТНЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ НАПРАВЛЕННОЙ ДОСТАВКИ КЛЕТОК В ДОКЛИНИЧЕСКИХ ЖИВОТНЫХ МОДЕЛЯХ <i>Турчин В.В., Соловьев М.В., Лёгенький Ю.А., Кавелина А.С., Акопян Г.В., Беспалова С.В., Попандопуло А.Г.</i>	283
СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ	286
БИОДЕГРАДИРУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ КАК ПЛАТФОРМА ДЛЯ ВНУТРИКОСТНОЙ ДОСТАВКИ МУЛЬТИПОТЕНТНЫХ МЕЗЕНХИМАЛЬНЫХ СТРОМАЛЬНЫХ КЛЕТОК <i>Власенко Р.Я., Ситникова С.М., Шинкарева М.В., Анисимова Н.Ю., Киселевский М.В.</i>	286
МОДЕЛИРОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ РАЗРАБОТКИ И ИССЛЕДОВАНИЙ ГОТОВЫХ ЛЕКАРСТВЕННЫХ ФОРМ <i>Краснопевцева О.В., Фирсов А.В.</i>	287
МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ КЛЕТОЧНОЙ РЕАКТИВНОСТИ НА ИМПЛАНТАЦИЮ ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ ПОЛИЛАКТИДА И ГИДРОКСИАПАТИТА <i>Лебединская О.В., Качалина П.М., Ковалева П.А., Черемных А.И., Львов В.А., Бабаева Г., Пашиццева Н.В., Киселевский М.В., Анисимова Н.Ю.</i>	288
ГАНТЕЛЕВИДНЫЕ НАНОЧАСТИЦЫ Fe ₃ O ₄ -Au ДЛЯ КОМБИНИРОВАННОЙ ПРОТИВООПУХОЛЕВОЙ ХИМИОТЕРАПИИ <i>Чмелюк Н.С., Абакумов М.А.</i>	290

РАЗРАБОТКА И ХАРАКТЕРИСТИКА МАЛЕИМИД-МОДИФИЦИРОВАННЫХ ХЛОРИНОВЫХ ПРОИЗВОДНЫХ ДЛЯ СОЗДАНИЯ СТАБИЛЬНЫХ БИОКОНЬЮГАТОВ С АЛЬБУМИНОМ	
Пухова А.С., Говоров Н.Д., Бугаева Е.С., Кирин Н.С., Островерхов П.В., Безбородова О.А., Погорильй В.А., Грин М.А.	291
ИССЛЕДОВНИЕ БИОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СПЛАВА СИСТЕМЫ Ti-Al-Nb C ДОБАВЛЕНИЕМ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ (Ce, Y, La)	
Анохин А.С., Кирсанкин А.А., Чувикина М.С., Лукьянов А.С., Ермакова Е.А.	293
СЕКЦИЯ 6	296
УМНЫЕ МАТЕРИАЛЫ	296
УСТНЫЕ ДОКЛАДЫ.....	297
ПОЛИМЕРНЫЕ СТРУКТУРЫ ГИЛАУРОНОВЫЙ КИСЛОТЫ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ КОНТРОЛЬ ВРЕМЕНИ ВЫХОДА БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ	
Суховей Ю.Г., Коптиюк А.В., Костоломова Е.Г., Уклейкин В.Е., Суховей Н.Ю.	297
БИОРАЗЛАГАЕМЫЕ НАНОКОНТЕЙНЕРЫ ДЛЯ ДОСТАВКИ ЛЕКАРСТВ К ОПУХОЛЯМ	
Жарков М.Н., Пирчадзе С.З., Зелепукин И.В., Шилягина Н.Ю., Пятаев Н.А., Колпаков Ф.А., Zyuygin A.V.	298
ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛИАРИЛЕНОВ В СЕНСОРИКЕ, МИКРОФЛЮИДИКЕ И НЕЙРОТЕХНОЛОГИЯХ	
Галиев А.Ф., Буланкин Н.С., Ишмухаметов М.С., Карамов Д.Д.	301
ПЬЕЗОАКТИВНЫЕ И МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ТКАНЕВОЙ ИНЖЕНЕРИИ И ТЕРАНОСТИКИ	
Сурменев Р.А., Сурменева М.А., Чернозем Р.В., Шлапакова Л.Е., Фетисова А.А., Мухортова Ю.Р.	303
ИНТЕЛЕКТУАЛЬНЫЕ МЕДИЦИНСКИЕ УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ НИТИНОЛА: ОТ ТОПОЛОГИЧЕСКОГО ДИЗАЙНА ДО УПРАВЛЯЕМОЙ ДОСТАВКИ ЛЕКАРСТВ	
Чернышхин С.В., Шишковский И.В.	305
ИЗГОТОВЛЕНИЕ МИКРОГЕЛЕЙ АЛЬГИНАТА ЖЕЛЕЗА СЛОЖНОЙ ФОРМЫ ДЛЯ ИНКАПСУЛЯЦИИ КЛЕТОК И ХИМИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ	
Соколов А.С., Порошин С.Г., Абдурашитов А.С., Прошин П.И., Сухоруков Г.Б.	306
ИССЛЕДОВАНИЕ рН-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ МИКРОСФЕР ХИТОЗАНА ДЛЯ АДРЕСНОЙ ДОСТАВКИ НИЗКОМОЛЕКУЛЯРНЫХ ВЕЩЕСТВ	
Черникова Э.Е., Чжисинь Ванг....	307
МУЛЬТИМОДАЛЬНЫЙ ИМПЛАНТ С СИСТЕМОЙ ДОСТАВКИ ПРЕПАРАТОВ ДЛЯ КОМБИНИРОВАННОЙ ТЕРАПИИ НЕЙРОНАЛЬНОЙ ТРАВМЫ	
Саин А.Ю., Абдурашитов А.С., Прошин П.И., Статник Е.С., Корсунский А.М., Салимон А.И., Синдеева О.А., Сухоруков Г.Б.	309
УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СИНТЕЗ ПОЛИСАХАРИДНЫХ КАПСУЛ: МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ	
Паллаева Т.Н., Марченко И.В., Букреева Т.В.	310
СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ	312
КОМПОЗИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИФОСФАТОВ ДЛЯ РЕГЕНЕРАЦИИ КОСТНОЙ ТКАНИ	
Голубчиков Д.О., Шуленков А.А., Забежайлова Е.А., Самофалов П.С., Евдокимов П.В., Путляев В.И.	312

Содержание

БИОСОВМЕСТИМЫЕ НАНОЧАСТИЦЫ (Fe,Mn,Co,Zn)Fe ₂ O ₄ ДЛЯ УЛЬТРАСТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА КЛЕТОК МЕТОДОМ ПЭМ EDX	
<i>Иванова А.В., Абакумов М.А.</i>	313
АДСОРБЦИЯ КРАСИТЕЛЕЙ И ОБРАЗОВАНИЕ J-АГРЕГАТОВ НА МЕЗОПОРИСТЫХ НАНОЧАСТИЦАХ ФЕРРИТА КОБАЛЬТА С НАСТРАИВАЕМОЙ АРХИТЕКТУРОЙ ПОР	
<i>Никитин А.А., Бондаренко Л.С., Абакумов М.А.</i>	314
РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ СИНТЕЗА МАГНИТНЫХ НАНОЧАСТИЦ ТИПА ЯДРО-ОБОЛОЧКА ДЛЯ МАГНИТОМЕХАНИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СТРУКТУРОЙ БЕЛКОВ НА СУБМОЛЕКУЛЯРНОМ УРОВНЕ	
<i>Прищепа А.В., Абакумов М.А., Никитин А.А.</i>	316
ЗАВИСИМОСТЬ ПОГЛОЩЕНИЯ ПОЛИЭЛЕКТРОЛИТНЫХ НАНОКАПСУЛ КЛЕТКАМИ ЦНС ОТ ЗАРЯДА НАНОКАПСУЛ И ФЕНОТИПА КЛЕТОК	
<i>Амелина К.А., Казакова Л.И., Носов Г.А., Сухоруков Г.Б.</i>	317
СИНТЕЗ МИКРОКРИСТАЛЛОВ 4-МЕТИЛУМБЕЛЛИФЕРОНА С ПОЛИЭЛЕКТРОЛИТНЫМ ПОКРЫТИЕМ ДЛЯ АДРЕСНОЙ ДОСТАВКИ В ПЕЧЕНЬ	
<i>Крикунова П.В., Сапач А.Ю., Синдеева О.А., Котелевцев Ю.В., Сухоруков Г.Б., Паллаева Т.Н.</i>	319
АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ.....	322
СОДЕРЖАНИЕ	330

Биорезорбируемые магниевые имплантаты для травматологии и ЧЛХ - заживление без повторной операции.

Уникальный инновационный сплав из магния, галлия и цинка, а также собственная технология производства имплантатов позволяет нам делать резорбируемые имплантаты в 4 раза доступнее, чем иностранные аналоги.

Наша продукция:

- Винты
- Пины

Области применения



Челюстно-лицевая хирургия



Травматология



Ортопедия



Доступны для заказа с I квартала 2026 года

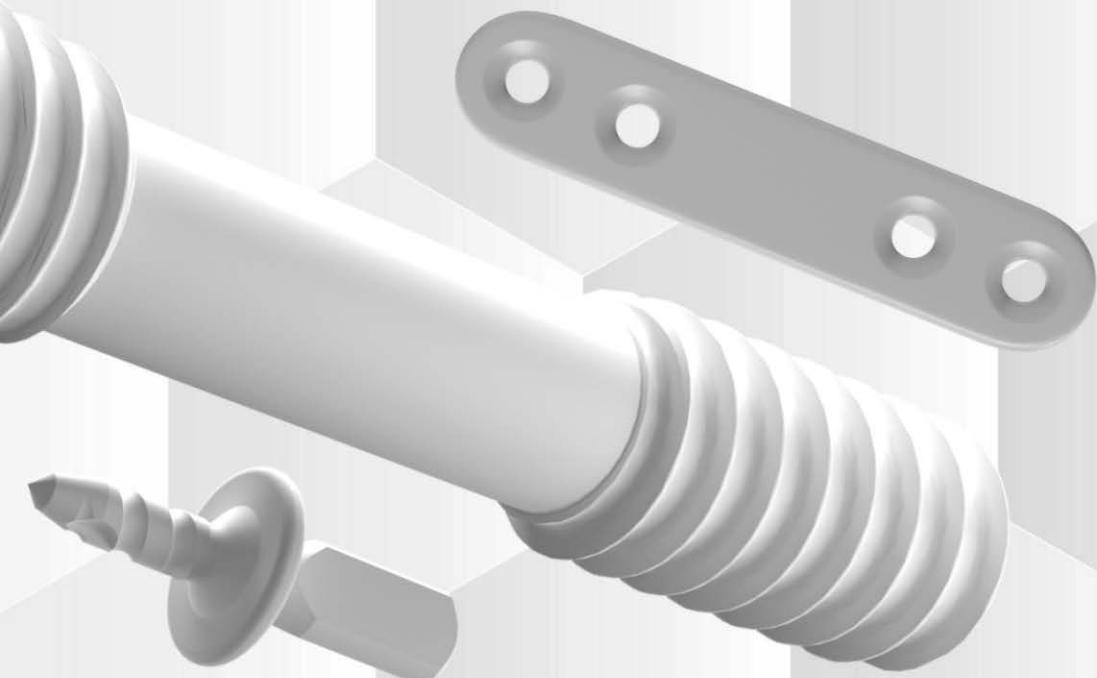
+7 966 148-77-37

info@osteо-sibear.ru

www.osteо-sibear.ru

Инновация Osteo-Sibear позволит заменить титановые имплантаты на резорбируемые магниевые и избавить пациентов во всем мире от нежелательной повторной операции по извлечению имплантата.

Sk
Участник



Разработано
в сотрудничестве с



Российский
университет
медицинской
недели



+7 966 148-77-37

info@osteo-sibear.ru

www.osteo-sibear.ru

+7 (495) 989-56-80

Москва, Варшавское шоссе, 1/6, оф. А 203

zakaz@lucon.pro

www.lucon.pro





ЛЮКОН

+7 (495) 989-56-80

zakaz@lucon.pro

lucon.pro

Компания «ЛЮКОН ПРО» с 2014 года является одним из ведущих предприятий России по комплексному оснащению центральных заводских лабораторий, отделов качества, научно-исследовательских центров, метрологических служб производственных предприятий, НИИ и ВУЗов качественным оборудованием производителей мирового уровня.

Ключевые направления деятельности компании – поставка оборудования для элементного анализа, систем электронной микроскопии, оптических микроскопов, видеоизмерительных систем, оборудования для проведения механических испытаний.

Накопленный опыт и долгосрочные отношения с заводами-изготовителями позволяют нам быть уверенными в качестве поставляемой продукции и соблюдать сроки поставок. Часть оборудования имеется в наличии на наших центральных и региональных складах.



Москва, Варшавское шоссе, 1/6, оф. А 203

Мы предоставляем:

Пробоподготовка

Пробоподготовка — оборудование для материаловедения охватывает полный цикл подготовки образцов для последующего анализа микроструктуры различных материалов: металлов, композитов, горных пород, электронных компонентов и биологических образцов.

- Отрезные станки ручные и автоматические
- Станки для горячей запрессовки и холодной заливки
- Оборудование для шлифовки и полировки
- Расходные материалы



посмотреть все оборудование

Микроскопия

Микроскопы для детального изучения микроструктуры и дефектов материалов.

- Оптические микроскопы
- Сканирующие электронные микроскопы
- Видеоизмерительные системы
- Автономно-силовые микроскопы



посмотреть все оборудование

+7 (495) 989-56-80

Москва, Варшавское шоссе, 1/6, оф. А 203

zakaz@lucon.pro

www.lucon.pro

Измерение твердости

Широкий диапазон твердомеров для тестирования материалов различной твердости и структуры.

- Твердомеры по шкалам Виккерса, Роквелла и Бринелля
- Универсальные твердомеры



посмотреть все оборудование

Анализ химических составов

Возможность быстрого и точного определения элементного состава с помощью портативных и стационарных анализаторов.

- Рентгено-флуоресцентные анализаторы
- Лазерные анализаторы
- Оптико-эмиссионные спектрометры



посмотреть все оборудование

СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ

Международная конференция
«Биоматериалы: от исследований к практике»

Материалы публикуются в авторской редакции.

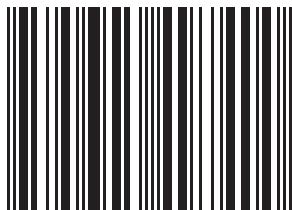
Отпечатано в цифровой типографии «Спринтер»

117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 23

Подписано в печать 12.09.2025

Тираж 50 экз.

ISBN 978-5-6054974-0-0



9 785605 497400 >