

ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ СИСТЕМ
имени В.А. БЕЛОГО НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»

Объект авторского права
УДК 621.9.048:532.614.2

Лю Имин

**КОМПОЗИЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРСОДЕРЖАЩИЕ ПОКРЫТИЯ С
РЕГУЛИРУЕМЫМИ ПОВЕРХНОСТНЫМИ СВОЙСТВАМИ,
ОСАЖДАЕМЫЕ ИЗ АКТИВНОЙ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ**

**Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния**

Гомель 2022

Работа выполнена в Учреждении образования «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины»

Научный руководитель: **Ярмоленко Максим Анатольевич**,
доктор технических наук, доцент, профессор
кафедры радиофизики и электроники УО
«Гомельский государственный университет
имени Ф. Скорины»

**Официальные
оппоненты:** **Кудина Елена Федоровна**,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Водоснабжение,
химия и экология» УО «Белорусский
государственный университет транспорта»;
Завадский Сергей Михайлович,
кандидат технических наук, доцент,
начальник Центра 9.1. «Электронных
технологий и технической диагностики
технологических сред и твердотельных
структур» Научно-исследовательской части
БГУИР, доцент кафедры электронной
техники и технологии БГУИР;

**Оппонирующая
организация:** УО «Гомельский государственный
технический университет имени
П.О. Сухого», г. Гомель.

Защита состоится «15» декабря 2022 года в 14⁰⁰ час. на заседании совета по защите диссертаций Д 01.14.01 при Государственном научном учреждении «Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси» по адресу: 246050, г. Гомель, ул. Кирова, 32а, эл. почта: mpri@mail.ru; тел.: +375 (0232) 34-17-12, факс: +375 (0232) 34-17-11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного научного учреждения «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси» Д 01.14.01, по адресу: 246050, г. Гомель, ул. Кирова 32а.

Автореферат разослан «10» ноября 2022 года.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций



Н.С. Винидиктова

ВВЕДЕНИЕ

Покрытия с заданными поверхностными, сорбционными свойствами (гидрофобные и гидрофильные, сорбирующие жидкие и газовые среды, имеющие высокие триботехнические, антикоррозионные и другие свойства, обусловленные составом, строением, морфологией поверхностных слоев), имеют широкую перспективу применения в самых различных областях. Так, гидрофобные и особенно супергидрофобные (контактный угол смачивания водой превышает 150°) слои эффективны при их использовании для защиты от запотевания оптических линз, в системах фильтрации и разделения жидких сред, при создании мембран для систем опреснения воды, с целью повышения чувствительности активных элементов сенсоров, коррозионной стойкости ответственных изделий, эксплуатирующихся в агрессивных средах. Лиофильность поверхности оказывает определяющее влияние на процессы граничного или жидкостного трения. В медицине придание поверхности супергидрофобных свойств является важной технической задачей и проводится, в частности, с целью снижения образования на поверхности имплантатов биопленок, вызывающих инфекционные воспалительные процессы.

Значимой задачей для технических приложений является разработка материалов, обладающих селективной сорбцией функциональных жидких сред. При эксплуатации таких материалов могут реализовываться как процессы пролонгированного высвобождения адсорбированных молекул, так и процессы образования материалов заданной структуры и состава. В таких системах слои с заданной сорбционной активностью могут использоваться в качестве контейнеров для доставки функциональных сред.

В настоящее время формирование материалов с заданными поверхностными свойствами достигается различными методами: путем создания иерархических структур (микро- и наноструктур) на субстратах или же модифицированием структурированных поверхностей с использованием главным образом «жидких» технологий. Использование газовых сред и плазменных процессов позволяет наносить микро- и наноконпозиционные слои различного состава из термодинамически несовместимых материалов, реализовывать условия и режимы интенсивного взаимодействия материала покрытия с материалом подложки. Вакуумно-плазменные методы, в частности, формирование слоев из активной газовой фазы, генерированной электронно-лучевым диспергированием исходных веществ, характеризуются универсальностью, возможностью регулирования структуры, поверхностных свойств наносимых покрытий и обрабатываемых материалов в широких пределах (Ткачук Б.В., Ясуда Х., Цзян Сяо Хун). При этом данными методами

возможно формирование покрытий с составом и свойствами, достижение которых другими методами невозможно. Развитие вакуумно-плазменных методов, их применение для нанесения покрытий с заданными поверхностными и сорбционными свойствами представляет практический и научный интерес, является актуальной задачей.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами. Диссертационная работа соответствует приоритетному направлению научных исследований Республики Беларусь на 2021-2025 годы (п. 4: Машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы (композиционные и многофункциональные материалы)) в соответствии с Указом Президента Республики Беларусь от 7 мая 2020 г. № 156. Работа выполнена на основе исследований, проведенных в ходе реализации ряда научно-технических программ по решению важнейших проблем в области естественных и прикладных наук, по заданиям: задание 3.40 «Нанокomпозиционные покрытия с высокими антибактериальными и антифунгальными пролонгированными свойствами, формируемые из активной газовой фазы» (№ г.р. 20190999) подпрограммы «Новые технологии купирования заболеваний» государственной программы научных исследований «Фундаментальные и прикладные науки – медицине», задание 2.4.04 «Разработка физико-химических основ методов активации процессов генерации газовой фазы с использованием экзотермически и эндотермически реагирующих химических веществ» (№ г.р. 20160669) подпрограммы «Микромир, плазма и Вселенная» государственной программы научных исследований «Конвергенция-2020».

Цель, задачи, объект и предмет исследования. Основной целью диссертационной работы являлась разработка функциональных покрытий с регулируемыми гидрофобными свойствами, сорбционной активностью и установление закономерностей их осаждения из газовой фазы, генерируемой электронно-лучевой обработкой исходных веществ в вакууме.

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

1. Экспериментально обосновать использование композиционных покрытий на основе кремнийорганических соединений различной молекулярной массы и фторсодержащих полимеров в качестве слоев с регулируемыми поверхностными свойствами, установить закономерности их осаждения из летучих продуктов электронно-лучевого диспергирования, определить молекулярную структуру и адсорбционные свойства.
2. Определить изменения молекулярной структуры, морфологии,

поверхностных свойств покрытий на основе кремнийорганических соединений и полимеров, протекающие при модифицировании осажденных слоев в плазме тлеющего разряда.

3. Установить закономерности осаждения, структурообразования в многослойных системах на основе соединений фосфора, металлов и гидридов металлов, изменения их структуры, состава, адсорбционных свойств при их выдержке в биологических средах.

4. Изучить структуру и адсорбционные свойства композиционных покрытий на основе микрокристаллической целлюлозы, осажденных из активной газовой фазы, влияния на них условий и режима термообработки.

5. Разработать рекомендации по выбору состава и совершенствованию технологии направленного регулирования структуры и поверхностных свойств кремнийорганических, оксидных и целлюлозосодержащих покрытий.

Объекты исследования: тонкие однокомпонентные, композиционные и многослойные покрытия на основе кремнийорганических соединений и фторсодержащих полимеров, металлов, солей, оксидов и гидридов металлов, целлюлозы, формируемые из активной газовой фазы.

Предмет исследования: закономерности формирования, структура и поверхностные свойства тонких композиционных покрытий на основе полимеров и соединений металлов.

Научная новизна. Впервые электронно-лучевым диспергированием получены гидрофобные покрытия на основе низкомолекулярных кремнийорганических соединений и фторсодержащих полимеров, определен их состав, морфология и структура при различных режимах формирования. Установлены условия и режимы формирования супергидрофобных покрытий при использовании в качестве мишени металлического магния, фторполимеров и кремнийорганической смолы. Определены структурные изменения, протекающие при обработке кремнийорганических полимеров в плазме электрических разрядов и приводящие к повышению гидрофильности.

Обоснована конструкция и состав многослойных покрытий, структура которых в биологических средах трансформируется в структуру гидроксиапатита. Изучен механизм структурных превращений, реализуемый в результате обменных диффузионных процессов с окружающей средой, которые определяются сорбционной активностью тонких слоев.

Впервые методом электронно-лучевого диспергирования получены покрытия на основе целлюлозы, установлены их молекулярная структура и свойства. Показано, что термообработка двухслойного покрытия на основе целлюлозы и P_2O_5 сопровождается образованием слоя с высокой сорбционной активностью к влаге, способного пролонгировано высвободить в жидкую среду лекарственное соединение.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика осаждения композиционных покрытий на основе кремнийорганических соединений и фторсодержащих полимеров из летучих продуктов электронно-лучевого диспергирования, позволяющая управлять структурой кремнийорганической матрицы и регулировать в широких пределах (от 90 до 160°) значение краевого угла смачивания водой. Режимы формирования покрытий на основе кремнийорганической смолы, галогенсодержащих полимеров, магния, имеющих супергидрофобные свойства.

2. Закономерности осаждения покрытий из летучих продуктов диспергирования микрокристаллической целлюлозы, результаты исследования их структуры и свойств, включающие:

– снижение в тонком слое, в сравнении с исходной целлюлозой, концентрации замкнутых циклов, образование углеродных графитоподобных частиц;

– образование в молекулярной структуре тонкого слоя при термообработке (200°C) аморфных углеродных структур с шириной запрещенной зоны $E_g = 3,57$ эВ;

– повышение стойкости покрытия к термической деструкции при осаждении на его поверхность тонкого слоя на основе оксида фосфора (V).

3. Экспериментальное обоснование возможности регулирования гидрофобных свойств покрытий ПТФЭ введением в состав мишени соединений железа и алюминия, приводящих к повышению дефектности молекулярной структуры фторуглеродной матрицы.

4. Условия формирования, состав и структура многослойных покрытий на основе кремнийорганических полимеров, Mg, CaH₂, Zn и фосфорсодержащих соединений, характеризующихся высокой сорбционной активностью в отношении влаги и трансформирующихся в биологических средах в гидроксипатит.

Личный вклад соискателя ученой степени. Соискателем экспериментально определены закономерности осаждения покрытий на основе кремнийорганических низкомолекулярных соединений, металлов, солей, оксидов и гидридов, а также микрокристаллической целлюлозы, проведены измерения их поверхностных свойств. Обсуждение направлений исследований, полученных результатов и основных выводов по работе осуществлялось при участии член-кор. НАН Беларуси, д.х.н., проф. А.В. Рогачева. Разработка методик определения молекулярной структуры, состава полученных покрытий, проведение их измерений, обсуждение ряда полученных результатов проведена совместно с д.т.н., доц. М.А. Ярмоленко, данные КР-, ИК спектроскопии, сканирующей зондовой и электронной микроскопии получены и обсуждены совместно с член-кор. НАН Беларуси, д.т.н., проф. А.А. Рогачевым, проф. Jiang

Xiaohong и проф. Ruiqi Shen (Нанкинский университет науки и технологии, Нанкин, КНР).

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов. Основные результаты исследований представлены и обсуждены на международных, республиканских научно-технических конференциях: конференция, посвященная 110-летию со дня рождения Ф. И. Федорова (Гомель, 2021); международная конференция «Inter-Academia 2021»; Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes (InterPartner – 2021) (Одесса, 2021), международная научно-техническая конференция «Полимерные композиты и трибология» (ПОЛИКОМТРИБ-2022). Результаты были использованы при выполнении проектов «Intergovernmental Cooperation Projects in the National Key Research and Development Plan of the Ministry of Science and Technology of PRC (№ 2016YFE0111800) and Nanjing University of Science & Technology Independent Research Project (№ 30919013301)», используются при проведении лабораторных работ, чтении лекций по курсам «Физика тонких пленок и покрытий», «Наноматериалы и нанотехнологии» в ГГУ им. Ф. Скорины.

Опубликование результатов диссертации. Основное содержание диссертации изложено в 11 статьях, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, из которых 9 статей соответствуют п. 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, а также в 2 статьях материалов научных конференций. Общий объем работ составил 8,1 авторских листов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, шести глав с краткими выводами, заключения, библиографического списка и приложений. Диссертация изложена на 161 страницах, включая 76 страниц текста, 45 рисунков на 41 странице, 17 таблиц на 15 страницах, библиографический список из 212 наименований на 16 страницах, список публикаций соискателя из 13 наименований на 2 страницах и 2 приложений на 5 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

В первой главе рассмотрены основные методы формирования покрытий с заданными поверхностными свойствами. В качестве основных функциональных материалов выбраны кремнийорганические соединения, микрокристаллическая целлюлоза и композиционные материалы на их основе. Существенно расширить эксплуатационные свойства кремнийорганических материалов позволяет их физическое модифицирование. Отмечается высокая эффективность использования в качестве модификаторов кремнийорганических материалов фторуглеродных полимеров, проявляющих термическую

стабильность, высокую гидрофобность и низкий коэффициент трения. Целлюлоза, легированная металлами, соединениями фосфора и кальция, перспективна при создании различных функциональных слоев, обладающих изменяемыми в широких пределах сорбционными свойствами.

Проанализированы закономерности формирования кремнийорганических покрытий. Показано, что в сравнении с «растворными» методами нанесение тонких покрытий в вакууме или при пониженном давлении с использованием электрических разрядов и ионизирующей обработки, имеет ряд преимуществ. В числе особенностей метода отмечены возможность формирования композиционных слоев практически любого состава, отсутствие ограничений по термостойкости подложек, тепловому режиму осаждения и др.

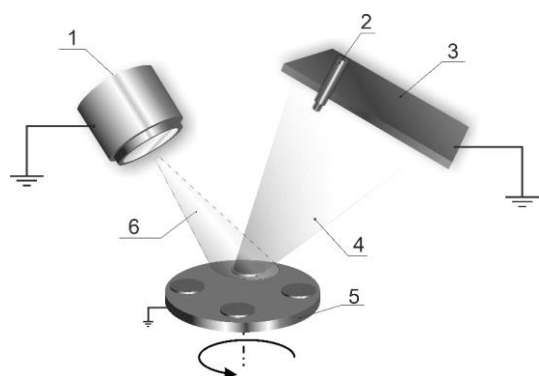
Проведен анализ структуры и свойств целлюлозы, методов получения покрытий на ее основе. Отмечается, что модифицирование целлюлозы фосфор- и кальцийсодержащими соединениями является эффективным приемом придания ей дополнительных свойств. При этом отсутствует информация о возможности реализации процессов самопроизвольного структурообразования за счет контролируемого поглощения тонким слоем атмосферной влаги. Реализация данного подхода возможна при использовании материалов, интенсивно поглощающих влагу из атмосферы, например P_2O_5 .

На основании результатов анализа литературных источников определены цель и основные задачи настоящего исследования.

Вторая глава диссертационной работы содержит информацию об используемых материалах, описание основных методик нанесения и исследования структуры, состава и свойств покрытий. Формирование покрытий осуществляли в вакууме в процессе воздействия потока электронов с энергией 800 – 1600 эВ и плотностью тока 0,01 – 0,03 А/см² на органические и неорганические соединения различной молекулярной массы или их механические смеси. Осаждение покрытий осуществляли при начальном давлении остаточных газов в вакуумной камере $\approx 4 \cdot 10^{-3}$ Па. Слоевые и композиционные системы формировали в одном технологическом цикле без разгерметизации вакуумной камеры. Среднее расстояние от электронной пушки до мишени составляло 150 мм, а от мишени до подложки – 200 мм. Контроль толщины осаждаемых покрытий осуществлялся в процессе нанесения с помощью кварцевого измерителя толщины (КИТ) (рисунок 1).

В качестве исходных органических и неорганических компонентов мишеней были использованы кремнийорганическая смола К-42, полиметилсилсесквиоксан (ПМСО, ХJY Silicones), полидиметилсилоксан (ПМС-400), этилгидридсилоксан (ГКЖ-136-41), политетрафторэтилен (ПТФЭ, ГОСТ 10007-80), полиэтиленгликоль (ПЭГ), фторопласт-30, полиэтилен

высокого давления (ПЭ), полиакриламид (ПАА), микрокристаллическая целлюлоза (Sigma-Aldrich), этидронат (Meryer), гидрид кальция (CaH_2 , Sigma-



1 – электронно-лучевой источник;
2 – кварцевый измеритель толщины;
3 – подложкодержатель; 4 – летучие продукты диспергирования; 5 – держатель мишеней; 6 – электронный луч

Рисунок 1 – Схема формирования покрытия из активной газовой фазы

Aldrich), оксид фосфора (P_2O_5 , Sigma-Aldrich), порошки магния и цинка (Sigma-Aldrich), мирамистин (Tosopharm Co., Ltd, China).

Материал для композиционных мишеней готовили смешением порошков исходных компонентов в различном массовом соотношении с помощью шаровой вибромельницы.

В качестве подложек для нанесения покрытий были выбраны кварцевые пластины (спектроскопические измерения в видимой области), пластины NaCl (ИК-спектроскопические исследования), полированные пластины монокристалла кремния <100>.

ИК-спектроскопические исследования производили на ИК-Фурье спектрофотометре Vertex-70 (Bruker). Сканирование осуществлялось в диапазоне $(4000 - 300) \text{ см}^{-1}$ с разрешением 4 см^{-1} . Рентгеноструктурный анализ покрытий осуществляли на дифрактометре Bruker D8 с использованием $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1,54056 \text{ \AA}$), 40 кВ, 40 мА в качестве источника рентгеновского излучения.

Анализ структуры нанесенных покрытий проводили с помощью РФЭС. Измерения выполняли на спектрометре PHI Quantera II Scanning XPS Microprobe, используя $\text{AlK}\alpha$ ($h\nu = 1486,6 \text{ эВ}$), 160 Вт в качестве источника рентгеновского излучения. Калибровку прибора осуществляли по линии $\text{C}1s$ с энергией связи $284,6 \text{ эВ}$. При проведении послойного анализа использовались низкоэнергетический поток ионов Ar^+ мощностью 45 Вт. Время распыления составляло 15 мин. Для получения воспроизводимого результата осуществлялось 6 циклов повторения.

Электронные спектры получали на UV-Vis спектрофотометре Cary-50 (Varian). Значение ширины запрещенной зоны E_g определяли на основании анализа оптических спектров поглощения согласно модели Тауца.

Исследование морфологии покрытий проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа (РЭМ, Quanta 200 F) и атомно-силового микроскопа (АСМ) Solver P47 PRO (НТ-МДТ, Россия), в котором реализована схема сканирования образцом.

Поверхностную энергию покрытий определяли по двухжидкостной методике (метод ОВРК (метод Оунса, Вендта, Рабеля и Кьельбле)) на основании измерений краевого угла двух жидкостей (вода ($\Theta_{\text{вод}}$) и глицерин ($\Theta_{\text{гл}}$)), проводимых с помощью программно-аппаратного комплекса. Результаты измерений использовались для оценки химического состава и микрогеометрии осаждаемых покрытий.

В третьей главе приведены результаты изучения структуры, морфологии и поверхностных свойств покрытий на основе кремнийорганических соединений, фторполимеров, их зависимости от природы наполнителя, режима термической и плазменной обработки.

Показано, что при воздействии потока низкоэнергетических электронов на кремнийорганическую мишень имеет место частичное отщепление углеводородных заместителей, разрушение Si – O – Si связей в слабо сшитых сетчатых структурах. Согласно данным ИК-спектроскопии, содержание упорядоченных областей в структуре тонкого слоя заметно не отличается от их содержания в исходной кремнийорганической смоле. При этом структура покрытия характеризуется более низкой долей сетчатых областей. Отмеченные изменения обусловлены непрерывной трансформацией структуры и состава мишени в процессе диспергирования, приводящей к образованию в поверхностном слое мишени стойких к потоку электронов структур. Следствие этого осаждаемое покрытие имеет высокодисперсную структуру с равномерно распределенными по объему областями высокой твердости (светлые участки на рисунке 2). Заметно повысить долю сшитых областей в структуре осаждаемого

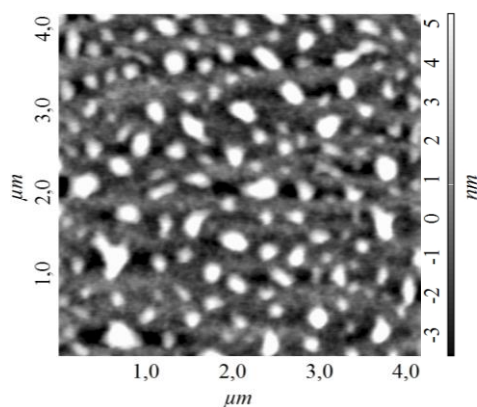


Рисунок 2 – АСМ-изображение покрытия на основе К-42

покрытия и, соответственно, его защитные свойства, позволяет введение металлического магния в состав прессуемой порошковой мишени.

Отжиг при температуре 200°C в атмосфере воздуха не оказывает влияния на структуру кремнийорганического слоя. Высокотемпературная обработка покрытий (нагрев до температуры выше 300°C) сопровождается трансформацией сетчатой структуры в кварцеподобную. Отжиг при 600°C (1 ч) приводит к образованию слоя на основе SiO₂ с кварцеподобной структурой.

Плазменная обработка кремнийорганического покрытия вызывает разрушение Si – С связей, отщепление углеводородных фрагментов и возникновение кислородсодержащих групп. Деструктурирующее влияние плазменной обработки в наибольшей степени проявляется по отношению к

углеводородным заместителям. Следствием разрушения Si – C связей является образование объемных сшитых структур.

Однокомпонентные кремнийорганические покрытия не проявляют выраженных гидрофобных свойств (краевой угол смачивания водой составляет 90...100°) (таблица 1).

Таблица 1 – Результаты измерения краевых углов смачивания покрытий на основе К-42 и ПТФЭ

Покрытие	$\theta_{\text{гл.}} (^{\circ})$	$\theta_{\text{вод.}} (^{\circ})$
К-42 + ПТФЭ (2:1)	102	108
К-42 + ПТФЭ (1:1)	132	123
К-42 + ПТФЭ (1:2)	139	127
К-42	88	91
К-42 + Mg	71	81
Фторопласт-30	93	102
Фторопласт-30 + Mg	125	126
ПТФЭ	121	119
ПТФЭ + Mg	137	136
К-42 + ПТФЭ + фторопласт-30 + Mg	150	161

Существенно более высокие гидрофобные свойства могут быть достигнуты при формировании композиционных слоев на основе кремнийорганических соединений и фторполимеров.

Анализ результатов ИК-спектроскопии показал, что

композиционные покрытия на основе К-42 и фторполимеров могут рассматриваться как высокодисперсные механические смеси модифицированных компонентов. В ИК-спектре присутствуют все полосы поглощения, характерные для исходных составляющих мишени. Поверхностные свойства композиционных покрытий в значительной степени определяются концентрацией и природой вводимых наполнителей.

Установлено, что использование мишеней на основе Mg, К42, ПТФЭ и фторопласт-30 позволяет осаждать покрытия с супергидрофобными свойствами. Увеличение массовой доли ПТФЭ в исходной мишени не сопровождается монотонным повышением гидрофобных свойств осаждаемого покрытия. Данный эффект обусловлен межкомпонентным взаимодействием в зоне воздействия потока электронов и присутствием в составе покрытия карбонизированных фрагментов.

Плазменная обработка композиционных покрытий на основе К-42 и ПТФЭ (К-42 + ПТФЭ) оказывает влияние на их химический состав, структуру и, соответственно, адсорбционные свойства. Под действием разрядной плазмы происходит заметное изменение, прежде всего, состава и структуры фторуглеродного компонента. Регистрируется разрушение C–F связей, появление однокомпонентных углеродных структур. Следствием интенсивного травления и карбонизации фторуглеродного слоя является образование Si–C связей между покрытием и кремниевой подложкой (рисунок 3).

С увеличением продолжительности обработки композиционного покрытия заметным становится снижение доли сшитых структур в структуре кремнийорганического компонента. При этом отмечено отсутствие различия во влиянии плазменной обработки на деструкцию углеводородных заместителей различной природы.

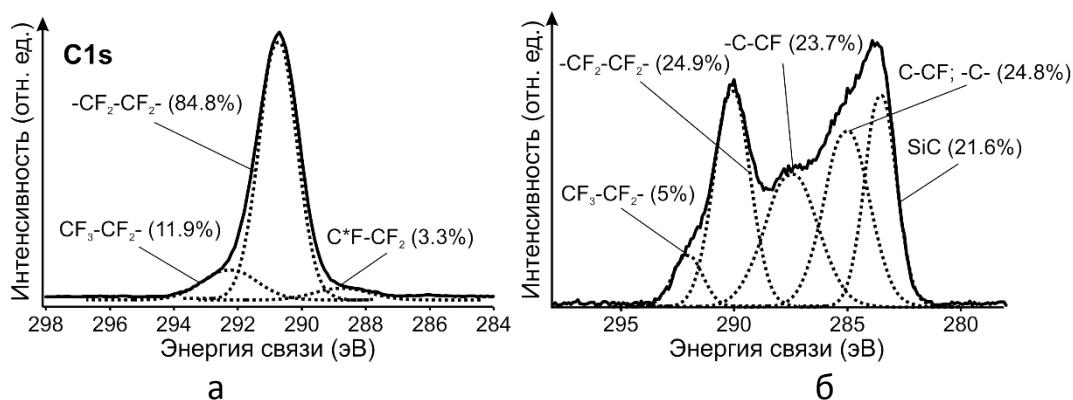


Рисунок 3 – РФЭС спектры покрытий на основе ПТФЭ без обработки (а) и после обработки в плазме тлеющего разряда (20 мин) (б)

Повышение микрошероховатости покрытий (> 2 раз) при их обработке в плазме тлеющего разряда является следствием интенсивного травления композиционного слоя. Установлено, что травлению в значительной мере подвержен фторуглеродный компонент композиционного покрытия. После плазменной обработки поверхность покрытий приобретает выраженные гидрофильные свойства, краевой угол смачивания жидкостями близок к нулю.

Определена эффективность придания заданной поверхностной энергии слоям ПТФЭ путем их модифицирования металлами, в процессе электронно-лучевого диспергирования механической смеси порошков $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O} + \text{Al} + \text{ПТФЭ}$. Установлено, что воздействие потока электронов в вакууме на механическую смесь $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O} + \text{Al}$ инициирует экзотермическую реакцию, результатом которой является взрывное испарение материала мишени. Осаждаемое покрытие представляет собой однородную композиционную систему, состоящую из матрицы ПТФЭ и наполнителя из дисперсных частицы металла. При этом в сравнении с морфологией покрытия ПТФЭ композиционный слой является более «рыхлым» и пористым, присутствует значительное количество мелких каплеподобных образований, формирующих более крупные поверхностные структуры. Рентгеноспектральный микроанализ показал, что покрытие является неоднородным по своему составу: концентрация железа изменялась от 3 до 15%, алюминия от 8 до 14%.

Показано, что легирование покрытий ПТФЭ металлами является эффективным методом изменения гидрофобных свойств (таблица 2).

Таблица 2 – Величины краевых углов смачивания покрытий ($\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 + \text{Al}$) + ПТФЭ

Углы смачивания	$(\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 + \text{Al}) + \text{ПТФЭ}$			
	(2:1)	(1:1)	(1:2)	(1:4)
$\theta_{\text{гл.}} (^{\circ})$	117	148	137	118
$\theta_{\text{вод.}} (^{\circ})$	92	136	139	132

В четвертой главе представлены результаты изучения структуры и свойств покрытий на основе микрокристаллической целлюлозы, сформированных в вакууме из летучих продуктов диспергирования потоком

низкоэнергетических электронов.

Установлено, что в составе покрытия регистрируется более высокое содержание $\text{C}=\text{C}$ связей и более низкое содержанием $\text{C}-\text{C}$ и $\text{C}-\text{H}$ связей, в сравнении с исходным порошком целлюлозы (рисунок 4).

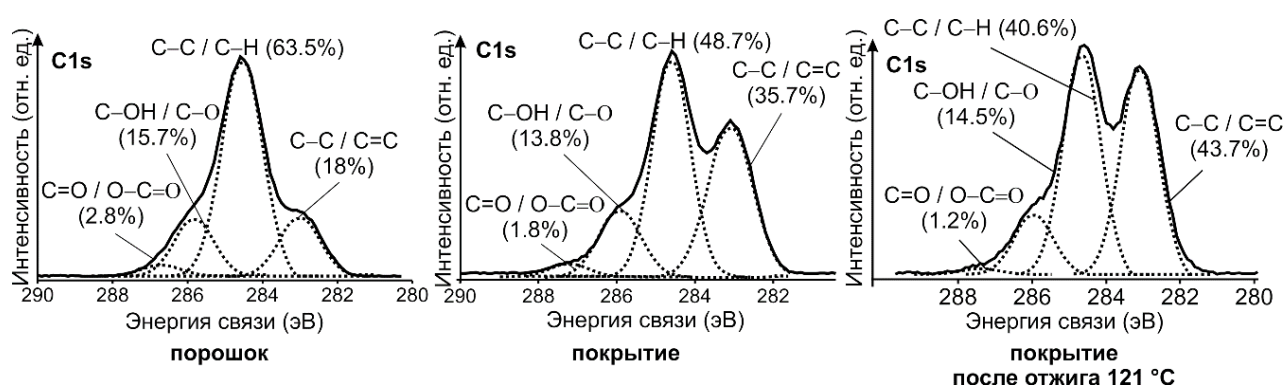


Рисунок 4 – РФЭ спектры микрокристаллической целлюлозы

Особенности структуры покрытий обусловлены частичной деструкцией микрокристаллической целлюлозы под действием потока электронов. Одним из следствий деструкции является образование углеродных частиц. На это указывает значение ширины запрещенной зоны ($E_g = 3,95$ эВ). Покрытие может рассматриваться, как состоящее из целлюлозной матрицы, с расположенными в ее объеме частицами углерода.

Установлено, что термообработка способствует образованию аморфных углеродных структур с шириной запрещенной зоны $E_g = 3,57$ эВ. При этом покрытие после термообработки не теряет высокой сорбционной активности в отношении влаги.

Независимо от термообработки покрытие на основе микрокристаллической целлюлозы легко растворяется в водных средах. Для получения нерастворимого гидрофильного тонкого слоя предложено нанесение дополнительного слоя оксида фосфора (V) и проведение последующей термообработки. Интенсивное поглощение атмосферной влаги слоем оксида фосфора сопровождается образованием фосфорсодержащих кислот и их взаимодействием с молекулами целлюлозы.

Фосфорсодержащие соединения повышают стойкость слоя на основе микрокристаллической целлюлозы к термической деструкции. При нагреве двухслойное покрытие интенсивно теряет влагу (регистрируется заметное снижение оптической плотности полосы поглощения валентных колебаний ОН-групп).

Пятая глава посвящена рассмотрению закономерностей формирования, структурообразования и свойств покрытий на основе неорганических соединений и кремнийсодержащих соединений, определению их поверхностных свойств в зависимости от условий формирования и состава.

Установлены особенности состава и структуры многослойных покрытий на основе кремнийорганических полимеров, Mg, CaH₂, P₂O₅, Zn, полученных последовательным осаждением отдельных компонентов из активной газовой фазы, образованной их электронно-лучевым испарением. Отмечена высокая сорбционная активность многослойных покрытий по отношению к влаге, что является основной причиной самопроизвольного образования фосфатов, гидроксидов и карбонатов металлов. Установлено образование бисфосфоната в межслоевом пространстве кремнийорганика – оксид фосфора (V). Известно, что бисфосфонаты препятствуют разрушению костной ткани. Образованию бисфосфонатов в объеме многослойной системы Mg + CaH₂ + P₂O₅ + К-42 способствует высокотемпературная (500°С) термическая обработка. В дальнейшем было предложено использовать в качестве одного из компонентов многослойной системы бисфосфонат (этидронат).

После 2 недель выдержки покрытия в буферном SBF растворе структура многослойной системы Mg + CaH₂ + P₂O₅ + К-42 трансформируется в гидроксиапатит (ГА). Термообработка многослойной системы Mg + CaH₂ + P₂O₅ + SiO_x(OH)_{2-x} инициирует образование кристаллических форм гидроксиапатита. Экспериментально обоснована высокая эффективность использования в качестве верхнего слоя многослойного покрытия фосфата цинка, который защищает нижерасположенные слои от интенсивного взаимодействия с биологической средой и инициирует процессы образования гидроксиапатита. Многослойное покрытие Mg + CaH₂ + этидронат + P₂O₅ + Zn + P₂O₅ после отжига (200°С) выдерживает нагрузку 30 Н без разрушения. Зарождение ГА в отмеченной многослойной системе происходит в объеме тонкослойной системы – на межфазной границе CaH₂ + этидронат.

Шестая глава содержит обобщенную информацию о поверхностных свойствах сформированных методом электронно-лучевого диспергирования покрытий на основе кремнийорганических и фторсодержащих полимеров, целлюлозы, фосфатно-кальциевых слоев и наиболее эффективных областях их применения. Показано, что в зависимости от состава покрытия, метода его обработки краевые углы смачивания изменяются в широких пределах: от

Таблица 3 – Поверхностные свойства покрытий

Состав покрытия	$\Theta_{\text{вода}} / \Theta_{\text{глицерин}}$
ПМС	95/88
ПМС + ПТФЭ (1:1)	106/92
ПМС + ПТФЭ (1:2)	123/121
ПМС + ПТФЭ (1:4)	127/125
ГКЖ	101/94
ГКЖ + ПТФЭ (1:1)	112/97
ГКЖ + ПТФЭ (1:2)	109/93
ГКЖ + ПТФЭ (1:4)	120/140
К-42*	<5/<7
Mg + К-42 + ПТФЭ	147/154
Mg + К-42 + фторопласт-30	145/134
Mg + К-42 + ПТФЭ + фторопласт-30	161/150
(Fe(NO ₃) ₃ + Al) + ПТФЭ (2:1)	92/117
(Fe(NO ₃) ₃ + Al) + ПТФЭ (1:1)	136/148
(Fe(NO ₃) ₃ + Al) + ПТФЭ (1:2)	139/137
(Fe(NO ₃) ₃ + Al) + ПТФЭ (1:4)	132/118

* после плазменной обработки

противогрибковых свойств.

Основным назначением фосфатно-кальциевых многослойных покрытий является активации роста костной ткани. Внутри организма человека подобные покрытия трансформируются в гидроксиапатит. Многослойная система способна поддерживать вблизи имплантата заданную концентрацию лекарственного соединения. Нанесение подобных покрытий на имплантаты может способствовать быстрому срастанию с костной тканью изделий медицинского назначения. При этом нанесение многослойных покрытий позволяет заметно повысить коррозионную стойкость металлических изделий. При нанесении покрытий Mg + CaH₂ + P₂O₅ + К-42 на подложки из Ti₆Al₄V значение плотности тока коррозии снизилось в 8,276 до 0,380 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, а сопротивление поляризации возросло с 13,86 до 108,0 $\text{k}\Omega/\text{cm}^2$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Установлены закономерности осаждения композиционных покрытий из летучих продуктов электронно-лучевого диспергирования кремнийорганических соединений, фторсодержащих полимеров и магния, определены их молекулярная структура и краевые углы смачивания водой и глицерином. Использование магния позволяет формировать структурно упорядоченные кремнийорганические покрытия без дополнительной термической обработки. Высокотемпературная обработка

супергидрофобных (при модифицировании галогенсодержащими полимерами, магнием) до гидрофильных (при плазменной обработке, модифицировании оксидами металлов) (таблицы 1 и 3).

На примере покрытий на основе микрокристаллической целлюлозы, CaH₂, P₂O₅ и мирамистина показана высокая эффективность их использования для придания текстильным материалам биоактивных, антибактериальных и

кремнийорганических покрытий ($> 400^{\circ}\text{C}$), независимо от молекулярной массы исходного кремнийорганического соединения мишени приводит к отщеплению углеводородных заместителей и трансформации сетчатой структуры в кварцеподобную [1, 2, 5, 8, 10, 11, 12].

2. Предложен технологический способ формирования супергидрофобных покрытий с использованием в качестве мишеней фторсодержащих полимеров, кремнийорганической смолы и магния, экзотермически взаимодействующих друг с другом под действием потока электронов. Показано, что покрытия на основе К-42, ПТФЭ, фторопласт-30, Mg проявляют супергидрофобные свойства [8].

Плазменная обработка композиционных покрытий на основе кремнийорганической смолы и ПТФЭ вызывает в кремнийорганическом компоненте отщепление углеводородных фрагментов, а также аморфизацию фторсодержащего компонента, образование в его объеме углеродных структур, что приводит к росту гидрофильных свойств композиционного слоя [8, 10, 12].

3. Установлены особенности структуры покрытий на основе микрокристаллической целлюлозы, формируемых в процессе воздействия низкоэнергетического потока электронов на исходное высокомолекулярное соединение, изменение структуры при термообработке. В покрытии регистрируется образование в тонком слое аморфных углеродных структур [9, 13].

Термообработка покрытий (200°C) сопровождается повышением содержания аморфных углеродных структур с шириной запрещенной зоны $E_g = 3,57$ эВ. С целью получения покрытий с высокими сорбционными свойствами, способностью к пролонгированному высвобождению лекарственного соединения, предлагается формирование двухслойных систем на основе микрокристаллической целлюлозы и оксида фосфора (V) с последующей термической обработкой [9, 13].

4. Определены закономерности формирования, состав и структура многослойных покрытий на основе кремнийорганических соединений, Mg, CaH_2 , P_2O_5 и Zn, полученных последовательным электронно-лучевым осаждением отдельных компонентов из газовой фазы. Установлен порядок размещения слоев покрытия, характеризующегося высокой сорбционной активностью влаги, механизм трансформации многослойных систем в кристаллические формы гидроксиапатита при выдержке в SBF растворе [1 – 4].

5. Определены особенности регулирования в широких пределах гидрофобных свойств покрытий ПТФЭ путем их модифицирования соединениями железа и алюминия на стадии электронно-лучевого диспергирования механических смесей в условиях протекания в мишени экзотермических процессов, приводящих к интенсивному дефторированию и

образованию дефектов в молекулярной структуре фторуглеродной матрицы. Показано, что состав и структура покрытия являются неоднородными, что обусловлено «взрывным» характером генерации летучих продуктов [6, 7].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Разработанные технологические приемы нанесения и составы кремнийорганических композиционных гидрофобных / супергидрофобных покрытий рекомендуются к использованию для модифицирования трековых мембран, применяемых в технологии дистилляции воды (фторсодержащие покрытия) (ОИЯИ, Россия), защиты элементов оптических лазерных систем от влаги (кремнийорганические покрытия) (СОЛАР ЛС, Беларусь), гидрофильные покрытия могут быть рекомендованы для нанесения на поверхность полимерных медицинских катетеров и сеток для снижения коэффициента трения (НП ООО «Медбиотех», Беларусь). Покрытия на основе целлюлозы позволяют придать тканевым материалам антибактериальные и противогрибковые свойства, снизить скорость десорбции влаги с его объема в результате образования на поверхности волокон гидрогеля (Беллепром).

Для модифицирования изделий медицинского назначения (имплантатов, фиксирующих элементов и др.) рекомендуются предложенные покрытия основе Mg, CaH₂, P₂O₅, этидроната и Zn, полученных последовательным осаждением отдельных компонентов из газовой фазы, образованной их электронно-лучевым испарением в вакууме. При их выдержке в физиологических средах такие многослойные системы трансформируется в кристаллические формы гидроксиапатита, имеющий состав костной ткани. Нанесение подобных многослойных систем способствует быстрому срастанию металлического имплантата с костной тканью. Данные результаты были использованы при выполнении проектов «Intergovernmental Cooperation Projects in the National Key Research and Development Plan of the Ministry of Science and Technology of PRC (№ 2016YFE0111800) and Nanjing University of Science & Technology Independent Research Project (№ 30919013301)», и разработанные в рамках данного проекта технологические решения прошли клинические испытания в медицинских учреждениях на территории КНР.

В числе перспективных технологических направлений формирования гидрофобных слоев следует отметить осаждение полимер-оксидных покрытий из активной газовой фазы, образованной в результате протекания в мишени экзотермических процессов.

Результаты, полученные в ходе выполнения работы, используются при проведении лабораторных работ, чтении лекций по курсам «Физика тонких пленок и покрытий», «Наноматериалы и нанотехнологии» на физическом факультете ГГУ им. Ф. Скорины.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК

1. The structure and properties of bioactive multilayer coatings applied by a low-energy electron beam on the implant surface / Yiming Liu, A. V. Rogachev, V. A. Yarmolenko, A. A. Rogachev, Xiaohong Jiang, Dongping Sun, Jintao Xiao, M.A. Yarmolenko // *Surface & Coatings Technology*. – 2019. – Vol. 378. – P. 124969.

2. Formation features, structure and properties of bioactive coatings based on phosphate-calcium layers, deposited by a low energy electron beam / Jintao Xiao, A. V. Rogachev, V. A. Yarmolenko, A. A. Rogachev, Yiming Liu, Xiaohong Jiang, Dongping Sun, M. A. Yarmolenko // *Surface & Coatings Technology*. – 2019. – 359. – P. 6 – 15.

3. Молекулярная структура однослойных и бислойных покрытий, перспективных при их использовании в процессах остеосинтеза / Лю Имин, А. В. Рогачев, М. А. Ярмоленко, А. А. Рогачев, Цзян Сяохун, А. С. Руденков // *Проблемы физики, математики и техники*. – 2019. – Т.39, № 2. – С. 21 – 27.

4. Биоактивные многослойные покрытия, инициирующие рост костной ткани: структура и свойства / Лю Имин, А. В. Рогачев, М. А. Ярмоленко, А. А. Рогачев, Цзян Сяохун, А. С. Руденков // *Проблемы физики, математики и техники*. – 2019. – Т.39, № 2. – С. 28 – 35.

5. Features of electron beam deposition of polymer coatings with the prolonged release of the drug component / Beibei Li, Yiming Liu, A. V. Rogachev, V. A. Yarmolenko, A. A. Rogachev, A. E. Pyzh, Xiaohong Jiang, M. A. Yarmolenko // *Materials Science & Engineering C*. – 2020. – Vol. 110. – P. 110730.

6. Формирование композиционных покрытий электронно-лучевым диспергированием смеси нитрата железа, алюминия и ПТФЭ в условиях протекания экзотермического взаимодействия / Лю Имин, Цзичэн Ван, А. В. Рогачёв, О. А. Саркисов, М. А. Ярмоленко, А. С. Руденков // *Проблемы физики, математики и техники*. – 2020. – Т.44, № 3. – С. 30 – 34.

7. Особенности формирования покрытий оксидов металла из активной газовой фазы в условиях протекания инициируемых электронами эндотермических процессов / А. В. Рогачёв, В. А. Емельянов, Лю Имин, М. А. Ярмоленко, А. С. Руденков // *Проблемы физики, математики и техники*. – 2020. – Т. 44, № 3. – С. 50 – 54.

8. Влияние плазменной обработки покрытий на основе кремнийорганических полимеров, осажденных методом электроннолучевого диспергирования, на их структуру и морфологию / М. А. Ярмоленко, О. А. Саркисов, Лю Имин, А. В. Рогачёв // *Проблемы физики, математики и техники*. – 2021. – Т.46, № 1. – С. 38 – 43.

9. Structure and properties of microcellulose-based coatings deposited via a low-energy electron beam and their effect on the properties of wound dressings / Yiming Liu, Xu Qin, A. V. Rogachev, A. A. Rogachev, I. I. Kontsevaya, A. E. Pyzh, Xiaohong Jiang, V.A. Yarmolenko, A.S. Rudenkov, M. A. Yarmolenko // Carbohydrate Polymer Technologies and Applications. – 2021. – Vol. 2. – 100146.

10. Радиационная стойкость легированных металлами кремнийорганических покрытий, осаждаемых из газовой фазы / А. А. Рогачев, Лю Имин, М. А. Ярмоленко, Гао Лихун, Ма Джуа // Проблемы физики, математики и техники. – 2021. – Т.47, № 2. – С. 45 – 50.

11. Особенности деградации полимерных материалов при воздействии коротковолнового лазерного излучения / М. А. Ярмоленко, А. А. Рогачёв, Лю Имин, А. В. Рогачёв, Гао Лихун, Ма Чжу // Проблемы физики, математики и техники. – 2022. – Т. 50, № 1. – С. 49 – 54.

Материалы научных конференций

12. Лю, Имин Молекулярная структура и поверхностные свойства кремнийорганических покрытий, сформированных диспергированием в условиях горения электрического разряда / Лю Имин, А. А. Рогачев, М. А. Ярмоленко, А. С. Руденков // Научная конференция, посвященная 110-летию со дня рождения Ф. И. Федорова (Гомель, 25 июня 2021 года) : сборник материалов / Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины, отделение физики, математики и информатики Национальной академии наук Беларуси, государственное научное учреждение «Институт физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси» ; редкол. : С. А. Хахомов (гл. ред.) [и др.]. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2021. – С. 329 – 333.

13. Vacuum Coatings Based on Miramistin and Their Biological Properties / Yiming Liu, I. I. Kontsevaya, A. A. Rogachev, Xiaohong Jiang, and M. A. Yarmolenko // Research and Education: Traditions and Innovations Proceedings of the 19th International Conference on Global Research and Education (Inter-Academia 2021), Lecture Notes in Networks and Systems 422 ; Ed. : S. Khakhomov [et al.]. – P. 189 – 194.



РЭЗІЮМЭ

Лю Імін

Кампазіцыйныя полімерзмяшчальныя пакрыцці с рэгуляванымі павярхоўнымі ўласцівасцямі, якія абложваюцца з актыўнай газавай фазы

Ключавыя словы: электронна-прамянёвае дыспергаванне, кампазіцыйнае пакрыццё, крэмнійарганічныя злучэнні, мікракрысталічная цэлюлоза, гідраксіапатыт, супергідрафобныя пакрыцці, павярхоўная энергія

Мэты работы: распрацоўка функцыянальных пакрыццяў з рэгуляванымі гідрафобнымі ўласцівасцямі, сарбцыйнай актыўнасцю і ўсталяванне заканамернасцяў іх аблогі з газавай фазы, якая генеруецца электронна-прамянёвай апрацоўкай зыходных рэчываў у вакууме.

Метады даследавання: атамна-сілавая і сканіруючая электронная мікраскапія; рэнтгенаўская фотаэлектронная, ІК-Фур'е спектраскапія; рэнтгенаструктурны аналіз; дыферэнцыяльна-сканіруючая каларыметрыя; стандартныя метадыкі даследавання ахоўных уласцівасцяў і павярхоўнай энергіі пакрыццяў.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: упершыню электронна-прамянёвым дыспергаваннем атрыманы гідрафобныя пакрыцці на аснове нізкамалекулярных крэмнійарганічных злучэнняў і фторзмяшчальных палімераў, вызначаны іх склад, марфалогія і структура пры розных рэжымах фарміравання. Выяўлены ўмовы і рэжымы фарміравання супергідрафобных пакрыццяў пры выкарыстанні ў якасці мішэні металічнага магнію, фторпалімераў і крэмнійарганічнай смалы. Прапанаваны рэжымы і ўмовы фарміравання гідрафільных слаёў на аснове крэмнійарганічных палімераў. Абгрунтавана канструкцыя і склад шматслойных пакрыццяў, структура якіх у біялагічных асяроддзях трансфармуецца ў структуру гідраксіапатыта. Вывучаны механізм адзначаных структурных ператварэнняў, які рэалізуецца ў выніку абменных дыфузійных працэсаў з навакольным асяроддзем, якія вызначаюцца сарбцыйнай актыўнасцю тонкіх слаёў. Упершыню атрыманы пашытыя пакрыцці на аснове цэлюлозы, вывучаны іх малекулярная структура і ўласцівасці.

Рэкамендацыі па выкарыстанню і галіна ўжывання: распрацаваныя тэхналагічныя прыёмы нанясення і складывы крэмнійарганічных кампазіцыйных гідрафобных / супергідрафобных пакрыццяў рэкамендаваны для нанясення на паверхню раздзяляльных трэкавых мембран, якія ўжываюцца ў тэхналогіі дыстыляцыі вады, абароны элементаў аптычных лазерных сістэм ад вільгаці, абароны ад агрэсіўных асяроддзяў, на паверхню тэкстыльных матэрыялаў для рэгулявання іх сарбцыйнай актыўнасці, на паверхню імплантатаў для стымулявання працэсу остеоінтэграцыі.

РЕЗЮМЕ

Лю Имин

Композиционные полимерсодержащие покрытия с регулируемыми поверхностными свойствами, осаждаемые из активной газовой фазы

Ключевые слова: электронно-лучевое диспергирование, композиционное покрытие, кремнийорганические соединения, микрокристаллическая целлюлоза, гидроксиапатит, супергидрофобные покрытия, поверхностная энергия

Цели работы: разработка функциональных покрытий с регулируемыми гидрофобными свойствами, сорбционной активностью и установление закономерностей их осаждения из газовой фазы, генерируемой электронно-лучевой обработкой исходных веществ в вакууме.

Методы исследования и использованная аппаратура: атомно-силовая и сканирующая электронная микроскопия; рентгеновская фотоэлектронная, ИК-Фурье спектроскопия; рентгеноструктурный анализ; дифференциально-сканирующая калориметрия; стандартные методики исследования защитных свойств и поверхностной энергии покрытий.

Полученные результаты и их новизна: впервые электронно-лучевым диспергированием получены гидрофобные покрытия на основе низкомолекулярных кремнийорганических соединений и фторсодержащих полимеров, определен их состав, морфология и структура при различных режимах формирования. Установлены условия и режимы формирования супергидрофобных покрытий при использовании в качестве мишени металлического магния, фторполимеров и кремнийорганической смолы. Предложены режимы и условия формирования гидрофильных слоев на основе кремнийорганических полимеров. Обоснована конструкция и состав многослойных покрытий, структура которых в биологических средах трансформируется в структуру гидроксиапатита. Изучен механизм отмеченных структурных превращений, реализуемый в результате обменных диффузионных процессов с окружающей средой, которые определяются сорбционной активностью тонких слоев. Впервые получены покрытия на основе целлюлозы, изучены их структура и свойства.

Рекомендации по использованию и область применения: разработанные технологические приемы нанесения и составы кремнийорганических композиционных гидрофобных / супергидрофобных покрытий рекомендуются для нанесения на поверхность разделительных трековых мембран, применяемых в технологии дистилляции воды, защиты элементов оптических лазерных систем от влаги, защиты от агрессивных сред, на поверхность текстильных материалов для регулирования их сорбционной активности, на поверхность имплантатов для стимулирования процесса остеointеграции.

SUMMARY

Yiming Liu

Composite polymer-containing coatings with adjustable surface properties deposited from the active gas phase

Key words: electron beam dispersion, composite coating, organosilicon compounds, microcrystalline cellulose, hydroxyapatite, superhydrophobic coatings, surface energy

Aim of the work: the development of functional coatings with controlled hydrophobic properties, sorption activity and establishment of patterns of their deposition from the gas phase generated by electron beam dispersion of the materials in vacuum.

Research methods and equipment: atomic force and scanning electron microscopy; X-ray photoelectron, IR Fourier spectroscopy; X-ray analysis; differential scanning calorimetry; standard research methods of protective properties and surface energy (Fowkes method) of coatings.

Results and scientific novelty for the first time, the hydrophobic coatings based on low molecular weight organosilicon compounds and fluorine-containing polymers have been obtained by electron beam dispersion; their composition, morphology and structure have been determined under various modes of formation. The conditions and modes for the formation of superhydrophobic coatings using magnesium metal, fluoropolymers, and organosilicon resin as a target has been established. Modes and conditions for the formation of hydrophilic layers based on organosilicon polymers have been proposed. The design and composition of the multilayer coatings, the structure of which in biological media is transformed into the hydroxyapatite structure, have been substantiated. The mechanism of the above-mentioned structural transformations, implemented as a result of exchange diffusion processes with the environment, which are determined by the sorption activity of thin layers, has been studied. The cellulose-based crosslinked coatings have been obtained for the first time; their molecular structure and properties have been studied.

Recommendation on the use and application area: the developed technological methods of deposition and compositions of organosilicon composite hydrophobic / superhydrophobic coatings are recommended for depositing to the surface of separating track membranes used in water distillation technology; on the surface of optical systems to prevent fogging and protect against aggressive media; on the surface of textile materials to regulate their sorption activity; on the surface of the implants to stimulate the osseointegration process.

Научное издание

Лю Имин

**Композиционные полимерсодержащие покрытия с регулируемыми
поверхностными свойствами, осаждаемые из активной газовой фазы**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Подписано в печать 08.11.2022 г. Формат бумаги 60×84 1/16. Бу-
мага офсетная №1. Гарнитура Таймс. Напечатано на ризографе.
Усл. Печ. Л. 1,4. Тираж 60 экз. Зак. № 13-22

ИММС НАН Беларуси, 246050, г. Гомель, ул. Кирова, 32А,
Свидетельство о государственной регистрации издателя
№ 1/244 от 25.03. 2014