Минобрнауки России
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт физической химии и электрохимии
им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук
(ИФХЭ РАН)
ДИССОВЕТ ПО ЗАЩИТЕ ДОКТОРСКИХ И КАНДИДАСКИХ ДИССЕРТАЦИЙ 24.1.141.03
ПРИ ИНСТИТУТЕ ФИЗИЧЕСКОЙ ХИМИИ И ЭЛЕКТРОХИМИИ
ИМЕНИ А.Н. ФРУМКИНА РАН

«УТВЕРЖДАЮ»

директор Института, член-корреспондент РАН
доктор химических наук

А.К. Буряк

Выписка из протокола заседания диссертационного совета 24.1.141.03
№ 12 от 18 сентября 2026 года

Присутствовали:

Председатель диссовета, академик РАН, доктор хим.А.Ю. Цивадзе (1.4.1.),
ученый секретарь, кандидат химических наук Т. Р. Асламазова (1.4.4.),
доктор химических наук Я. З. Волошин (1.4.4.)
доктор химических наук М. С. Григорьев (1.4.1.),
доктор химических наук О. В. Дементьева (1.4.4.),
кандидат химических наук В. В. Душик (2.6.9.),
доктор химических наук, член-корр. РАН Б. Г. Ершов (1.4.4.),
доктор химических наук М. А. Калинина (1.4.4.),
доктор химических наук Г. В. Лисичкин (1.4.4.),
доктор физико-математических наук В.А. Ломовской (1.4.4.),
доктор химических наук А.Г. Мартынов (1.4.1.).
доктор химических наук А.И. Маршаков (2.6.9.),
доктор химических наук А.А. Некрасов (1.4.4.),
доктор химических наук В. А. Сафонов (2.6.9.),
доктор физико-математических наук А.Р. Тамеев (1.4.4.),
доктор физико-математических наук Д.Л. Тытик (1.4.4.),
доктор физико-математических наук Л. И. Трахтенберг (1.4.4.),
доктор химических наук А.Я. Фридман (1.4.1.),
доктор физико-математических наук А.А. Фомкин (1.4.4.),
доктор физико-математических наук А.Н. Ходан (1.4.4.)

ПОВЕСТКА: принятие к защите диссертации ведущего научного сотрудника лаборатории поверхностных сил ИФХЭ РАН ЕМЕЛЬЯНЕНКО КИРИЛЛА АЛЕКСАНДРОВИЧА на тему «Лазерная физико-химическая модификация для получения полифункциональных покрытий», представленной на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук по специальности 1.4.4.-Физическая химия (физико-математические науки).

Научный консультант – академик РАН, доктор химических наук (1.4.4), заведующая лабораторией поверхностных сил ИФХЭ РАН Бойнович Людмила Борисовна, утверждена решением Ученого совета Института, протокол №6 от 10 сентября 2026 года. Обоснование утверждения научного консультанта по диссертационной работе Емельяненко К. А. подписано председателем Ученого совета, Научным руководителем Института, академиком РАН А. Ю. Цивадзе (прилагается).

Председатель заседания Заседание проводится в интерактивном режиме (приказ директора №110 от 11 сентября 2026 года, прилагается). С учетом членов диссертационного совета, участвующих интерактивно, кворум имеется. Можем начинать.

Слушали: ученого секретаря диссовета Т.Р. Асламазову.

Диссертация Емельяненко К. А. прошла предварительную экспертизу на заседании секции Ученого совета «Физикохимия нано- и супрамолекулярных систем» при ФГБУН ИФХЭ РАН, протокол №210 от 16 сентября 2026 г., где получила положительную оценку и была рекомендована к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.4.4.-Физическая химия (физико-математические науки) на диссовете 24.1.141.03, действующем при Институте.

Комиссия диссовета в составе докторов физико-математических наук (1.4.4.), представляющие в совете специальность 1.4.4.-Физическая химия, гл.н.с. А.А. Фомкин и в.н.с. Л. И. Трахтенберг, А. Н. Ходан, ознакомились с диссертацией и авторефератом и рекомендовали ее к защите на нашем совете.

Диссертацию представляет председатель комиссии А. Н. Ходан

Отзыв комиссиии я уже озвучивал на секции «Физикохимия нано- и супрамолекулярных систем», действующей при Ученом совете Института, поэтому думаю, что члены совета помнят мое выступление.

Диссертация Емельяненко Кирилла Александровича «Получение полифункциональных покрытий методами лазерной физико-химической модификации» по содержанию является законченным научным исследованием и в полной мере соответствует научной специальности 1.4.4 «Физическая химия». Основные результаты выполненных исследований в кратком виде представлены в Автореферате диссертации.

Полнота изложения научных данных, полученных автором в процессе подготовки диссертации, отражена в перечне из 60 печатных работ, опубликованных в рецензируемых научных журналах химического и физико- химического профиля, рекомендованных ВАК РФ, а также в тезисах докладов многочисленных научных конференций. Список цитированных статей и научной литературы в диссертации включает 452 названия.

Основной целью диссертационной работы Емельяненко К. А. являлось развитие принципов лазерной физико-химической модификации металлических поверхностей и закономерностей формирования полифункциональных покрытий, обеспечивающих противокоррозионное, противообледенительное действие и повышение потенциала коронного разряда, а также изучение процессов деградации физико-химических и свойств таких покрытий в процессе их реальной эксплуатации или приближенных к ним.

Основными задачами диссертационной работы являлась разработка концепции лазерной физико-химической модификации материалов для создания

полифункциональных покрытий, а также установление физико-химических закономерностей формирования и эксплуатации долговечных покрытий с управляемым смачиванием.

Для достижения поставленной цели был реализован комплексный подход, включающий решение ряда следующих задач:

1. Разработка способа формирования покрытий, обладающих контролируемой величиной смачивания, основанного на использовании методов лазерной структурно-морфологической и физико-химической модификации поверхностного слоя.
2. Изучение совокупности взаимосвязанных механизмов физических процессов, влияющих на противокоррозионные свойства лазерно-текстурированных супергидрофобных покрытий.
3. Поиск условий и оптимизация параметров формирования супергидрофобных поверхностей и покрытий, обладающих высокой коррозионной стойкостью.
4. Изучение основных механизмов деградации супергидрофобных и скользких покрытий при многократных циклах формирования и отрыва льда. Оценка дополнительного вклада эффекта Ребиндера на адсорбционно обусловленное снижение прочности материала и разрушение текстуры скользких покрытий.
5. Изучение влияния параметров лазерной обработки и условий нанесения гидрофобного агента на вклад отдельных механизмов влияния на противообледенительные свойства покрытий.
6. Исследование эффективности супергидрофобных, супергидрофильных и скользких покрытий при длительном воздействии коронного разряда в условиях близких к условиям реальной эксплуатации.

Основные результаты исследований, полученные в процессе выполнения диссертационной работы изложены в 4 главах:

Глава 1. Литературный обзор: поверхности с управляемым смачиванием и принципы формирования долговечных покрытий на металлах

Глава 2. Противокоррозионные покрытия - посвящена разработке супергидрофобных противокоррозионных покрытий на металлических материалах и выявлению физико-химических механизмов их защитного действия;

Глава 3. Противообледенительные покрытия - посвящена исследованию физико-химических процессов, сопровождающих кристаллизацию атмосферной воды на открытых поверхностях и формирование адгезионного контакта льда с твёрдым телом;

Глава 4. Противокоронные покрытия - посвящена исследованию устойчивости покрытий с заданным смачиванием к факторам коронного разряда, количественному сопоставлению их противокоронных свойств в условиях дождевания и разработке покрытий, сочетающих снижение коронных потерь с противокоррозионными и противообледенительными характеристиками.

Соискателем развиты теоретические основы адсорбционных процессов на поверхностях прошедших лазерную физико-химическую модификацию материалов, изучены методы стабилизации их функциональных свойств и выполнены комплексные экспериментальные исследования.

Поставленные цели и задачи по разработке методов синтеза покрытий были реализованы на основе комплексного подхода, который предусматривал решение ряда следующих задач:

1. Разработка способа формирования покрытий, обладающих контролируемой величиной смачивания, основанного на использовании методов лазерной структурно-морфологической и

физико-химической модификации поверхностного слоя.

2. Изучение совокупности взаимосвязанных механизмов физических процессов, влияющих на противокоррозионные свойства лазерно-текстурированных супергидрофобных покрытий.

3. Поиск условий и оптимизация параметров формирования супергидрофобных поверхностей и покрытий, обладающих высокой коррозионной стойкостью.

4. Изучение основных механизмов деградации супергидрофобных и скользких покрытий при многократных циклах формирования и отрыва льда. Оценка дополнительного вклада эффекта Ребиндера на адсорбционно обусловленное снижение прочности материала и разрушение текстуры скользких покрытий.

5. Изучение влияния параметров лазерной обработки и условий нанесения гидрофобного агента на вклад отдельных механизмов влияния на противообледенительные свойства покрытий.

6. Исследование эффективности супергидрофобных, супергидрофильных и скользких покрытий при длительном воздействии коронного разряда в условиях близких к условиям реальной эксплуатации.

Все представленные экспериментальные данные были получены на сертифицированных установках и на оригинальном оборудовании, разработанном в Лаборатория поверхностных сил ИФХЭ РАН, степень достоверности полученных результатов подтверждена их экспериментальной воспроизводимостью и широко представлена в независимых рецензируемых научных изданиях по тематике диссертации.

Следует отметить практическую значимость работы:

1. В ходе работы разработаны покрытия на алюминиевых, медных и магниевых сплавах обладающие низкой плотностью токов коррозии порядка 10^{-11} А/см^2 и ниже.

2. Использование методов лазерной обработки, в сочетании с последующей хемосорбцией соединений, снижающих поверхностную энергию, были получены супергидрофобные покрытия на алюминиевых, медных и магниевых сплавах.

3. Впервые количественно оценены изменения противокоронной эффективности супергидрофобных, супергидрофильных и скользких покрытий при длительном воздействии коронного разряда в условиях воспроизводящих напряжённости электрического поля и режимы дождевания, характерные для высоковольтных воздушных линий.

4. Предложено и испытано гидрофильное противокоронное покрытие на основе гибридной кремнийорганической плёнки. Показано, что покрытие сохраняет гидрофильность при длительном контакте с водой и обладает стойкостью к воздействию ультрафиолетового излучения и озона, характерных для условий эксплуатации воздушных линий электропередачи.

Все выводы диссертационной работы обоснованы и корректны, работа хорошо апробирована.

Цели, поставленные в диссертации, достигнуты.

Таким образом, с учетом заключения комиссии диссертационный совет приходит к следующему заключению.

Диссертационная работа Емельяненко К. А. посвящена выявлению влияния свойств поверхностного слоя на характер взаимодействия материала с атмосферными осадками, адгезию жидких и твердых загрязнений, склонность к коррозии и обледенению, а также поведение в электрическом поле. Поэтому целенаправленное формирование заданных физико-химических характеристик приповерхностного слоя представляет собой

самостоятельное направление исследований, находящееся на стыке физической химии поверхностных явлений, коллоидной химии, капиллярных процессов, электрохимии и материаловедения.

Актуальность работы определяется необходимостью установления общих физико-химических закономерностей формирования и эксплуатации покрытий с управляемым смачиванием, выявления механизмов их функционального действия и деградации, а также разработки способов получения долговечных покрытий для металлических материалов, эксплуатируемых в открытой атмосфере.

Цель работы - развитие научных принципов лазерной физико-химической модификации металлических поверхностей для получения полифункциональных покрытий, обеспечивающих противокоррозионное, противообледенительное и противокоронное действие и установление физико-химических закономерностей формирования и эксплуатации таких покрытий - достигнута решением следующих задач:

1. Развитие представлений о механизмах смачивания текстурированных поверхностей и факторах, определяющих долговечность покрытий с заданным смачиванием.
2. Разработка принципов и подбор методов лазерной обработки металлических материалов для придания их поверхности требуемых функциональных свойств.
3. Применение лазерной физико-химической модификации для совместного управления морфологией, химическим и фазовым составом, механическими свойствами приповерхностного слоя и его способностью к химическому закреплению низкоэнергетических соединений.
4. Установление механизмов противокоррозионного действия лазерно-текстурированных супергидрофобных покрытий и определение роли режимов смачивания, капиллярных эффектов, адсорбционных процессов, заряжения межфазной границы и барьерных свойств модифицированного слоя.
5. Исследование физико-химических закономерностей кристаллизации переохлажденных капель и формирования адгезионного контакта льда с поверхностями различной природы, включая влияние влажности, температуры, состава водной фазы, длительности контакта и условий механического удаления льда.
6. Установление факторов, определяющих долговечность супергидрофобных и скользких противообледенительных покрытий при многократных циклах кристаллизации воды и удаления льда, а также разработка принципов выбора структуры покрытия и жидкой пропитки с учетом условий эксплуатации.
7. Исследование влияния супергидрофобных, супергидрофильных и скользких покрытий на возникновение и развитие коронного разряда, установление связи между эволюцией смачивания и потерями мощности на корону, а также оценка устойчивости покрытий к длительному воздействию факторов коронного разряда.

Научная новизна работы заключается в следующем.

1. Развита концепция лазерной физико-химической модификации металлических материалов, в рамках которой наносекундная лазерная обработка используется для одновременного управления геометрией микро- и нанорельефа, химическим и фазовым составом, механическими характеристиками и адсорбционной активностью приповерхностного слоя. Установлено, что изменение параметров лазерного воздействия, состава окружающей атмосферы и температуры подложки позволяет сочетать

текстурирование поверхности с протеканием химических реакций и направленно формировать оксидные, гидроксидные и азотсодержащие фазы.

2. Установлено, что противокоррозионное действие лазерно-текстурированных супергидрофобных покрытий обусловлено не только уменьшением площади контакта с электролитом, но и совокупным действием ряда дополнительных механизмов: барьерными свойстами хемосорбированного слоя и модифицированного лазером приповерхностного слоя, блокировкой адсорбционно-активных центров, на которых адсорбируются коррозионно-активные компоненты электролита и заряжением межфазной границы. Разработан метод оценки дзета-потенциала супергидрофобных текстурированных поверхностей по электрофоретической подвижности гидрофобизированных наночастиц, диспергированных с поверхности. Показано, что гидрофобизация смещает дзета-потенциал частиц оксидов алюминия и меди в область более отрицательных значений и расширяет интервал pH, в котором происходит электростатическое отталкивание поверхностью коррозионно-активных анионов.

3. Выявлены закономерности формирования противокоррозионных покрытий на алюминиевых, медных и магниевых сплавах. Показано, что при достижении углов смачивания более 170° долговременная коррозионная стойкость определяется толщиной и фазовым составом лазерно-модифицированного слоя, а также стойкостью хемосорбированного гидрофобного агента. Установлена роль режима лазерной обработки, а также температуры подложки, в формировании плотных и пористых оксидных слоев, оксинитридных включений и каналов проникновения электролита.

4. Установлены закономерности кристаллизации ансамблей переохлажденных капель на супергидрофобных поверхностях при варьировании температуры, влажности воздуха и состава водной фазы. Показано, что влажность влияет на кристаллизацию через изменение интенсивности испарительного охлаждения, а также через процессы конденсации и десублимации. Установлено, что поверхностно-активные вещества, галогениды щелочных металлов и дисперсные частицы могут как ускорять, так и замедлять кристаллизацию. Увеличение времени задержки кристаллизации слабых растворов солей не сводится к понижению равновесной температуры замерзания и связано также с гидратацией ионов и изменением структуры воды вблизи межфазных границ.

5. Разработаны экспериментальные методы исследования статистики кристаллизации больших ансамблей капель и сдвиговой адгезионной прочности льда. Предложенная центрифужная методика с дисковым держателем позволяет в одном эксперименте регистрировать до 24 значений адгезионной прочности для разных образцов при одинаковых условиях формирования и выдержки льда. Установлено влияние температуры, длительности контакта, скорости нарастания нагрузки и способа ее приложения на измеряемую прочность адгезионного контакта. Показано, что при интерпретации адгезии необходимо учитывать формирование и изменение толщины квазижидкого межфазного слоя, вязкое течение в нем и релаксацию метастабильных менисков внутри текстуры.

6. Установлены механизмы деградации супергидрофобных и скользких покрытий при многократных циклах намораживания и удаления льда. Для супергидрофобных поверхностей деградация связана с проникновением воды в текстуру, увеличением истинной площади контакта и механическим разрушением элементов рельефа, в том числе на рекалесцентной стадии кристаллизации. Для скользких покрытий определены роли истощения и перераспределения жидкой пропитки, обнажения твердой текстуры и

адсорбционного понижения прочности материала под действием пропитывающей жидкости. Сформулированы критерии выбора системы «подложка – пропитывающая жидкость – окружающая среда» с учетом толщины и термодинамической устойчивости жидкой пленки.

7. Впервые количественно сопоставлено изменение противокоронной эффективности супергидрофобных, супергидрофильных и скользких покрытий при длительном совместном воздействии дождевания и коронного разряда в конфигурациях, воспроизводящих напряженности поля, характерные для высоковольтных воздушных линий. Установлено, что существенное увеличение коронных потерь может происходить без видимого разрушения рельефа и определяется появлением локальных дефектов смачивания, на которых удерживаются капли. Предложено и испытано гидрофильное противокоронное покрытие на основе гибридной кремнийорганической пленки, сочетающее устойчивую к внешним факторам гидрофильность, низкие токи коррозии и, несмотря на хорошее смачивание, отсутствие увеличения сдвиговой адгезионной прочности льда относительно необработанного провода.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в развитии физико-химических представлений о связи между строением приповерхностного слоя, режимом смачивания, функциональными характеристиками покрытия и их изменением при длительном воздействии окружающей среды.

Показано, что описание полифункциональных поверхностей только значениями статического угла смачивания и угла скатывания недостаточно. Для прогноза их поведения необходимо учитывать химический и фазовый состав модифицированного слоя, распределение плотных и пористых областей, механическую прочность текстуры, состояние наружного адсорбционного слоя и заряд межфазной границы.

Полученные результаты расширяют представления о механизмах противокоррозионной защиты металлов супергидрофобными покрытиями.

Впервые выполнен анализ влияния теплового баланса испаряющейся капли, нестационарного гетерогенного зародышеобразования, гидратации ионов и заряда дисперсных частиц, на противообледенительные свойства создаваемых покрытий.

Для скользких покрытий предложено теоретическое описание устойчивости пропитывающей пленки с учетом поверхностных сил, расклинивающего давления, диэлектрических характеристик компонентов системы и толщины жидкого слоя.

Выявленная связь между характеристиками смачивания, геометрией удерживаемых капель и интенсивностью коронного разряда дополняет представления о влиянии состояния водной фазы на электрические процессы вблизи поверхности высоковольтного проводника.

Таким образом, диссертационная работа Емельяненко К. А. является завершенной научно-квалификационной работой, в которой развиты научные принципы лазерной физико-химической модификации металлических поверхностей для получения полифункциональных покрытий, обеспечивающих противокоррозионное, противообледенительное и противокоронное действие и установление физико-химических закономерностей формирования и эксплуатации таких покрытий. Она соответствует паспорту специальности 1.4.4. – Физическая химия (физико-математические науки).

В качестве официальных оппонентов предлагаются:

1)Макаров Алексей Викторович, академик РАН, доктор технических наук 05.16.01 «Металловедение и термическая обработка металлов» (по современной номенклатуре — 2.6.1 «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»), ФГБУН Институт физики металлов им. М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, заведующий отделом материаловедения; лаборатория механических свойств, адрес 620108, г. Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, д. 18; +7(343) 378-36-40; avm@imp.uran.ru,

2)Колобов Юрий Романович, доктор физико-математических наук 01.04.07 «Физика твердого тела» (по современной номенклатуре — 1.3.8 «Физика конденсированного состояния»), профессор, Заслуженный деятель науки Российской Федерации, главный научный сотрудник ФГБУН Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук, химико-технологический отдел; лаборатория физико-химической инженерии композиционных материалов, главный научный сотрудник, и.о. заведующего лабораторией; адрес 142432, Московская обл., г. Черноголовка, просп. академика Семенова, д. 1; +7 (496) 5221320; kolobov@icp.ac.ru

3)Старинский Сергей Викторович, доктор физико-математических наук (1.3.14. - Теплофизика и теоретическая теплотехника), заведующий лабораторией физико-химических процессов в энергетике ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук; адрес Россия, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 1; тел.+7(383) 330-90-40; starikhbz@mail.ru

В качестве ведущей организации предлагается: Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина. Проректор по научной работе, доктор биологических наук, профессор Гусев Александр Анатольевич; адрес 392036, г. Тамбов, ул. Интернациональная, д. 33; +7 (4752) 72-34-34, доб. 6077; sciencenew@tsutmb.ru.

Отзыв готовит Цыганкова Людмила Евгеньевна, доктор химических наук (02.00.05 «Электрохимия» (по современной номенклатуре — 1.4.6 «Электрохимия»), заведующая кафедрой химии, Инженерно-технический институт; ТГУ им. Г.Р. Державина; лаборатория электрохимии и коррозии металлов; адрес 392036, г. Тамбов, ул. Интернациональная, д. 33, +79027-27-62-58, vits21@mail.ru

Постановили:

1) Принять к защите диссертацию ведущего научного сотрудника лаборатории поверхностных сил ИФХЭ РАН Емельяненко Кирилла Александровича «Получение полифункциональных покрытий методами лазерной физико-химической модификации», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.4.4.-Физическая химия (физико-математические науки).

2)Утвердить официальными оппонентами:

(1)Макаров Алексей Викторович, академик РАН, доктор технических наук, ФГБУН Институт физики металлов им. М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, заведующий отделом материаловедения;

(2)Колобов Юрий Романович, доктор физико-математических наук, профессор, Заслуженный деятель науки Российской Федерации, главный научный сотрудник ФГБУН Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук

(3)Старинский Сергей Викторович, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией физико-химических процессов в энергетике ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук

3)Утвердить ведущую организацию Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина.

4)Разрешить публикацию автореферата диссертации Емельяненко К. А.

5)Утвердить список специалистов и организаций, которым необходимо разослать автореферат диссертации Емельяненко К. А.

6)Установить дату защиты диссертации Емельяненко К. А. 24 декабря 2026 г.

Председатель заседания диссертационного совета, председателя диссовета, академик РАН, доктор химических наук, профессор — А. Ю. Цивадзе

Ученый секретарь диссовета, кандидат химических наук — Т.Р. Асламазова